

MOHAMED SABAR

**UNE APPROCHE À BASE D'AGENTS
POUR LA PLANIFICATION ET
L'ORDONNANCEMENT EN TEMPS RÉEL
DE PERSONNEL DANS UN CONTEXTE DE
CHAÎNE D'ASSEMBLAGE FLEXIBLE**

Thèse présentée
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de doctorat en Sciences de l'Administration
pour l'obtention du grade de Philosophiæ Doctor (Ph.D.)

DÉPARTEMENT DES OPÉRATIONS ET SYSTÈMES DE DÉCISION
FACULTÉ DES SCIENCES DE L'ADMINISTRATION
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2008

© Mohamed Sabar, 2008



Université Laval
Faculté des sciences de l'administration
QUÉBEC, CANADA

Cette thèse intitulée :

**UNE APPROCHE À BASE D'AGENTS POUR LA PLANIFICATION
ET L'ORDONNANCEMENT EN TEMPS RÉEL DE PERSONNEL
DANS UN CONTEXTE DE CHAÎNE D'ASSEMBLAGE FLEXIBLE**

présentée par : Mohamed SABAR

pour l'obtention du grade de : Philosophiæ Doctor (Ph.D.)

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de :

M. Benoit Montreuil, Ph.D., directeur de recherche, Université Laval, Faculté des sciences de l'administration

M. Jean-Marc Frayret, Ph.D., codirecteur de recherche, École Polytechnique de Montréal

M. Louis-Martin Rousseau, Ph.D., (examinateur externe), École Polytechnique de Montréal

M. Pierre Baptiste, Ph.D., École Polytechnique de Montréal

Mme. Lise Chrétien, Ph.D., Université Laval, Faculté des sciences de l'administration

Mme. Monia Rekik, Ph.D., Université Laval, Faculté des sciences de l'administration

sous la présidence de :

M. Jacques Renaud, Ph.D., Université Laval, Faculté des sciences de l'administration

*A mes parents,
A mes sœurs,
A mon frère,
A mon épouse,
pour leur amour et leur soutien.*

Résumé

La recherche abordée dans le cadre de cette thèse s'intéresse à la gestion des ressources humaines opérationnelles, et plus spécifiquement aux problèmes de planification de ces ressources dans un contexte dynamique. Un intérêt particulier est porté au problème d'ordonnancement en temps réel du personnel travaillant sur une chaîne d'assemblage. Nous abordons cette problématique dans une perspective de gestion par compétences et ce, en nous basant sur le profil de compétences dans la modélisation de l'offre et de la demande en main-d'œuvre.

Quatre principaux axes de recherche sont exploités. Le premier axe vise l'aspect théorique de la modélisation du problème d'ordonnancement du personnel. A cet effet, nous proposons un modèle mathématique du problème d'affectation dynamique des employés sur une chaîne d'assemblage avec la prise en considération des préférences, des compétences et des déplacements inter-postes des employés. En nous basant sur ce modèle, et grâce à l'utilisation du solveur commercial de type Cplex, nous avons pu résoudre des instances de problèmes de petite taille. Les résultats obtenus démontrent que la production d'une solution optimale requiert un temps de calcul important, ce qui risque de générer une rigidité et une moindre réactivité de la fonction d'ordonnancement face à des perturbations d'un environnement dynamique.

Le deuxième axe de recherche porte sur l'élaboration d'une approche distribuée à base d'agents pour la résolution du problème d'ordonnancement du personnel. L'approche proposée se base sur l'utilisation de plusieurs catégories d'agents intelligents qui coopèrent entre eux à travers la formation de coalitions. Chaque coalition est formée de deux agents-employés qui auront décidé de coopérer entre eux en s'échangeant une partie de leurs activités d'assemblage afin d'améliorer leur profit et en conséquence, la qualité de la solution globale d'ordonnancement. Les résultats d'ordonnancement du personnel obtenus à partir des premiers tests sont encourageants. Ils démontrent que notre approche à base d'agents permet d'obtenir des solutions de bonne qualité en des temps raisonnables.

Le troisième axe de recherche porte sur le réordonnancement du personnel en temps réel face aux aléas liés à l'absence d'employés. À cet effet, nous proposons une extension de l'approche à base d'agents ainsi que deux variantes de l'approche de recuit simulé, qui permettent de résoudre le problème de réordonnancement. Nous avons pu tester les performances de ces deux approches sur plusieurs cas du problème d'ordonnancement et de réordonnancement du personnel. L'ensemble des résultats démontre que l'algorithme à base d'agents conduit à de très bonnes solutions en comparaison avec le recuit simulé.

Enfin, nous avons exploité les algorithmes à base d'agents et de recuit simulé, qui sont développés dans cette recherche, pour étudier deux aspects de la gestion stratégique des ressources humaines : la flexibilité dans l'élaboration des horaires de travail et l'impact de la prise en considération des préférences dans le processus d'ordonnancement du personnel. Dans les deux cas, les résultats de simulation obtenus corroborent les hypothèses initiales de recherche, à savoir la pertinence et l'intérêt de la notion de flexibilité et de la prise en compte des préférences dans le processus d'ordonnancement du personnel.

Avant-propos

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a été réalisé au département d'opérations et systèmes de décision de la faculté des sciences de l'administration (FSA) de l'université Laval. Au terme de ce travail, je tiens à témoigner ma gratitude à Monsieur Benoit Montreuil, Professeur à l'université Laval, pour avoir dirigé ma recherche. Ses compétences tant scientifiques que pédagogiques et ses qualités personnelles m'ont été d'un grand soutien et m'ont permis d'aborder avec plus d'efficacité et de clarté les thèmes traités dans cette recherche. Aussi, sa rigueur de travail a été pour moi un véritable atout.

Je remercie également Monsieur Jean-Marc Frayret, Professeur à l'École Polytechnique de Montréal, d'avoir co-dirigé ce travail. Ses conseils, ses réflexions et son soutien constant m'ont été d'une grande utilité tout au long de ce travail.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance au Professeur Pierre Lefrançois de m'avoir encouragé à me lancer dans l'aventure passionnant de la recherche et pour ses précieux conseils.

Je tiens aussi à remercier chaleureusement les membres de mon jury qui ont accepté de consacrer une partie de leur temps à l'évaluation de mon travail.

Mes remerciements sont aussi destinés à la chaire de recherche du Canada en ingénierie d'entreprise et à la chaire de recherche CRSNG/Bell/Cisco en design d'affaires pour leur soutien financier à cette recherche.

Je remercie tous mes collègues et camarades du Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport (CIRRELT) et de la faculté des sciences de l'administration pour leur support et leur amitié, particulièrement, Leila El Kamel, Othman Idrissi, Tarik Sadik, Ségolène Dugué et Amine Kouche.

Enfin, je tiens à remercier plus personnellement mon père qui a cru en moi et a su me donner l'énergie et la confiance pour mener à bon terme ce travail.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	iv
Avant-propos.....	v
1. Introduction.....	1
2. La polyvalence inter-postes des employés : une stratégie pour l’agilité du personnel ...	7
3. Problèmes d’ordonnancement du personnel	12
4. Problématique de recherche.....	19
4.1. <i>Objectif de recherche</i>	19
4.2. <i>Contexte de recherche</i>	21
4.3. <i>Démarche retenue</i>	22
5. Cadre théorique de la recherche.....	24
5.1. <i>Approche de la gestion des ressources humaines axée sur les compétences</i>	24
5.1.1. La notion de compétences.....	25
5.1.2. Démarche de gestion par compétences.....	27
5.1.3. Application de l’approche par compétences dans la GRH	29
5.2. <i>L’approche multi-agents dans la gestion des systèmes manufacturiers</i>	30
5.2.1. Concept d’agent	31
5.2.2. Qu’est-ce qu’un système multi-agents ?.....	32
5.2.3. Mécanismes d’interaction inter-agents	33
<i>Coopération entre agents</i>	33
<i>Coordination des agents</i>	33
<i>Négociation entre agents</i>	34
<i>Communication entre agents</i>	34
5.2.4. Applications des SMA dans les systèmes de production.....	35
5.2.4.1. Classification des applications SMA en fonction du rôle encapsulé par les agents	36
Encapsulation de ressources physiques	37
Encapsulation d’entités externes.....	38
Encapsulation fonctionnelle.....	39
Encapsulation d’entités informationnelles ou transactionnelles.....	40
5.2.4.2. Classification des applications des SMA selon la structure de contrôle..	41
Structure de contrôle hiérarchique	41
Structure de contrôle avec agents intermédiaires.....	42
Structure de contrôle hétérarchique	43
5.3. <i>La théorie des jeux</i>	44
5.3.1. Définition et classification épistémologique de la théorie des jeux.....	45
5.3.2. Taxonomie du jeu	47
5.3.3. Jeux coopératifs : cas de coalitions.....	49
5.3.3.1. Définition de la coalition	49
5.3.3.2. Formation de coalitions : concept de la rationalité individuelle	51
5.3.3.3. Choix de la configuration de coalitions : critère de Pareto-dominance ...	51
5.3.3.4. Le Kernel : une solution pour la stabilité des coalitions.....	52
6. Formulation mathématique du problème d’ordonnancement du personnel ‘	60
6.1. Introduction.....	61

6.2. Problem definition and classification	61
6.3. Model Formulation.....	65
6.4. Numerical example.....	75
6.4.1 Experimental data	75
6.4.2. Computational results	78
6.5. Conclusion and future research	81
7. Ordonnancement du personnel : une approche à base d'agents	83
7.1. <i>Plateforme de simulation à base d'agents</i>	84
7.1.1. L'architecture du système multi-agents	84
7.1.2. L'architecture interne des agents	86
7.1.3. La communication entre les agents.....	91
7.1.4. Prototypage de l'architecture multi-agents	92
7.2. <i>Algorithme à base d'agents pour l'ordonnancement du personnel</i>	97
7.2.1. Hypothèses et choix de conception.....	98
7.2.2. Étapes de l'algorithme	98
7.2.2.1. Génération d'une solution initiale.....	101
7.2.2.2. Processus de négociation pour l'amélioration de la solution initiale.....	103
7.2.2.2.1. Phase 1 : Génération des structures de coalitions équilibrées.....	103
7.2.2.2.2. Phase 2 : Choix de coalition.....	105
7.3. <i>Résultats expérimentaux</i>	108
8. Réordonnancement du personnel : approche à base d'agents vs recuit simulé	113
8.1. Concept de réordonnancement.....	114
8.2. Perturbations dans le contexte de planification du personnel.....	115
8.3. Stratégies de réordonnancement	120
8.3.1. Typologie	120
8.3.2. Stratégie retenue pour le réordonnancement du personnel	122
8.4. Extension de l'algorithme à base d'agents pour faire face aux aléas	125
8.5. Approche de recuit simulé	128
8.5.1. Définition du recuit simulé	128
8.5.2. Algorithme de recuit simulé pour l'ordonnancement et le réordonnancement du personnel	129
8.6. Expérimentations	132
8.6.1. Description des scénarios et des paramètres de test.....	132
8.6.2. Résultats numériques	134
9. Étude de l'impact de la flexibilité et des préférences des employés sur l'ordonnancement du personnel : une approche par simulation	142
9.1. Analyse de l'impact de la flexibilité	142
9.2. Analyse de l'Impact des Préférences	149
9.3. Conclusion	153
10. Conclusion générale et perspectives	155
Bibliographie	159
Annexe	171

1. Introduction

L'intensification de la concurrence dans l'environnement manufacturier conduit les entreprises à opérer de profonds changements au niveau de leurs structures organisationnelles et de leurs approches de gestion de la production (Pemartin 1999). Afin de demeurer compétitives et de répondre aux exigences des consommateurs, les entreprises manufacturières portent plus d'intérêt à la réduction de leurs coûts de production, à l'amélioration des délais de livraison et à la qualité des produits offerts. Pour rester en lice, l'industriel doit offrir des produits et des services personnalisés adaptés aux goûts et aux besoins des clients.

Dans ce contexte, de nouveaux paradigmes de conception, de planification et de contrôle de systèmes manufacturiers ont été développés, notamment le paradigme de l'entreprise agile. Goldman et al. (1995, p 8) définissent l'entreprise agile comme une organisation capable de s'adapter dans un environnement continuellement compétitif et de prospérer dans des marchés imprévisibles. Selon Hermel (1986, p1) « *les exigences nouvelles des divers environnements des entreprises interpellent leur fonctionnement traditionnel et semblent conférer à la capacité de changement un statut de facteur stratégique de performance* ». Ces auteurs considèrent l'entreprise comme une entité proactive engagée dans un processus d'adaptation et de remise en question continue. À cet effet, pour être agile, l'entreprise doit être en mesure de réagir rapidement face aux changements de la demande et être capable de reconfigurer aisément ses processus d'affaires pour répondre aux nouveaux besoins du marché.

Selon Malecki (1996)¹, l'agilité dans le domaine manufacturier peut être considérée selon trois axes. Le premier axe porte sur l'agilité dans les relations interentreprises. Cela inclut, par exemple, une flexibilité dans la gestion de la chaîne logistique et le développement de partenariats stratégiques. Le deuxième axe s'intéresse à l'agilité des processus de production et des infrastructures utilisées. Cette agilité se manifeste à travers la capacité de planifier et de produire avec facilité et rapidité des lots de produits

¹ Cité par Hopp et Van Oyen (2004)

de natures et de tailles variantes de manière importante. Le troisième axe, qui traite du sujet de cette recherche, porte sur l'agilité dans la gestion des ressources humaines. C'est une agilité portant sur la capacité des employés à effectuer plusieurs types d'opérations sur différents postes de travail (*formation croisée*) et à répondre aux besoins des clients dans de courts délais tout en maintenant un niveau de qualité élevée (Hopp et Van Oyen, 2004; Kula et al. 2004). En effet, des employés polyvalents permettent à l'entreprise de réagir adéquatement aux fluctuations des charges de travail tout en profitant d'un vaste bassin de compétences (Jordan et al. 2004).

Goldman et al. (1995, p 107) considèrent que dans une entreprise agile, les ressources humaines constituent le noyau du système de production. Dans le même ordre d'idées, Wright et McMahan (1992) identifient les ressources humaines comme une source d'avantage concurrentiel durable dans les organisations. Ils soulignent que l'avantage concurrentiel procuré par les employés est lié, d'une part, à la capacité des organisations à les gérer et à les mobiliser et, d'autre part, à leurs compétences.

Dans cette perspective, la gestion des ressources humaines (GRH) constitue une préoccupation de premier plan pour les gestionnaires. Afin de s'ajuster aux nouvelles tendances du marché, certaines pratiques utilisées jusqu'à présent en matière de GRH sont remises en question. Notamment, l'approche de type taylorien-fordien du travail, où le poste constitue le pivot des pratiques de gestion des ressources humaines (Cazal et Dietrich 2003) et l'approche de gestion prévisionnelle des RH basée sur la recherche d'un équilibre entre l'offre et la demande en employés sans tenir compte des objectifs stratégiques de l'organisation (Hermel 1986 ; Bayad et al. 2001). Pour remédier à ces problèmes, plusieurs travaux se sont tournés vers des modèles de gestion et de planification des RH intégrant les activités des RH aux objectifs stratégiques de l'organisation et plaçant l'employé au centre des préoccupations managériales. Ces modèles ont été générés dans le cadre d'un courant de pensée appelé : Gestion Stratégique des Ressources Humaines (GSRH) (Bayad et al. 2001). Le modèle de gestion par compétences des RH s'inscrit dans ce courant de pensée. Il vise l'utilisation des compétences comme élément central de la gestion du capital humain au sein de l'organisation (Rivard 2001).

L'approche de gestion par compétences présente l'avantage d'être plus flexible et de s'adapter aux changements fréquents et aux réorganisations. Elle remplace ainsi la traditionnelle description de tâches souvent restrictive et inadaptée à la rapidité des mutations des types d'emplois (Rivard 2001).

Dans notre sujet de recherche, nous nous intéressons à la gestion des ressources humaines opérationnelles, et plus spécifiquement, aux problèmes de planification de ces ressources, dans un contexte dynamique. Un intérêt particulier est porté au problème d'ordonnement en temps réel des activités du personnel travaillant sur une chaîne d'assemblage. Nous abordons cette problématique dans une perspective de gestion par compétences, et ce, en nous basant sur le profil de compétences dans la modélisation de l'offre et de la demande en personnel.

En plus, pour marquer l'agilité du personnel, nous nous plaçons dans un contexte manufacturier favorisant la gestion par la polyvalence inter-postes des employés (formation croisée) (Vairaktarakis et Winch 1999 ; Hopp et al. 2004 ; Jordan et al. 2004 ; Bokhorst et al. 2004, Bard 2004 ; Kula et al. 2004 ; Sumukadas et Sawney 2004). Ce style de gestion porte sur le renforcement de la complémentarité entre les compétences disponibles et celles requises ainsi que sur l'augmentation de la redondance de certaines compétences primordiales à travers la formation des employés. L'objectif est d'augmenter le bassin des compétences disponibles à l'interne en rendant les employés de plus en plus polyvalents. Cela confère à l'entreprise une grande flexibilité (Hopp et al. 2004). De telles entreprises sont plus aptes à renforcer la capacité des ressources humaines sur certains postes affichant une augmentation imprévisible de la charge de travail (Jordan et al. 2004) ou bien pour faire face aux absences ou aux retards d'employés et ce, en mobilisant d'autres employés puisés à partir du bassin de compétences disponibles.

Selon Thompson (1999 et 1998), le problème d'ordonnement du personnel se définit à travers quatre principaux composants (T1-T4) :

T1. Estimation de la demande en production ou en service. Le but est de caractériser les fluctuations temporelles de la demande.

T2. Traduction des prévisions de la demande en besoins du personnel: leur nombre et leurs profils de compétences.

T3. Élaboration d'un plan d'ordonnancement et d'affectation des employés en prenant en considération les disponibilités, les compétences et les expériences de chacun d'eux. Ce plan doit spécifier les employés affectés, les machines sur lesquelles chaque employé doit opérer, l'intervalle du temps dans lequel il doit intervenir et les périodes de pause.

T4. Gestion et contrôle de l'exécution du plan d'ordonnancement.

Notre recherche se focalise sur les différents aspects de la troisième et de la quatrième composante (T3 & T4). Il est question de proposer une approche qui permet d'une part, un ordonnancement quotidien d'employés hétérogènes dans un contexte de chaîne d'assemblage et d'autre part, un ajustement en temps réel des plans d'affectation des employés en cas de perturbations, notamment l'absentéisme d'un ou de plusieurs employés.

Plusieurs méthodes, pour la plupart des heuristiques ou des méta-heuristiques (Alfares 2004), ont été proposées pour la résolution du problème d'ordonnancement du personnel. Le recours à de telles méthodes est dû à la nature complexe du problème. En effet, Garey et Johnson (1979) ont prouvé qu'il est de complexité NP-complet.

Dans cette perspective, l'approche des systèmes multi-agents (SMA) qui s'intéresse aux interactions d'un ensemble d'entités autonomes, appelées agents, ayant un comportement collectif qui permet d'atteindre une fonction désirée dans un environnement donné, nous semble très pertinente et prometteuse pour appréhender notre problématique. En effet, l'approche des systèmes multi-agents est appropriée pour le développement des systèmes manufacturiers distribués (Jennings et al. 1995; Jennings et Wooldridge 1998). Elle offre plusieurs possibilités de modélisation et de simulation des systèmes, particulièrement pour les systèmes sociaux (Panzarasa et Jennings 2001) où la composante humaine constitue un élément clé. C'est le cas, par exemple, de l'ordonnancement du personnel

nécessitant la coordination et la collaboration entre plusieurs acteurs (gestionnaires, contremaîtres, transporteurs, employés, etc.).

Par ailleurs, nous avons retenu comme mécanisme d'interaction et de négociation pour notre système multi-agents l'approche du jeu coopératif avec utilité transférable qui est une branche de la théorie des jeux à n-personnes.

Cette thèse s'inscrit dans une problématique de recherche concernant la conception et l'implémentation de systèmes multi-agents. Plus précisément, un des objectifs de la thèse est de contribuer au développement et à l'enrichissement du concept des systèmes multi-agents dédiés au domaine manufacturier à travers le développement d'une nouvelle approche à base d'agent pour résoudre un réel problème industriel complexe.

Cette thèse s'organise autour de huit chapitres. Le premier introduit la stratégie de la polyvalence inter-postes des employés. Un accent particulier est porté aux caractéristiques et aux approches utilisées dans le cadre de cette stratégie afin d'améliorer l'efficacité et l'agilité des entreprises. Dans le deuxième chapitre, nous nous intéressons aux problèmes de planification et d'ordonnement du personnel. Nous présentons une typologie des différentes configurations que peuvent adopter ces problèmes d'ordonnement ainsi qu'une typologie des approches de modélisation et de résolution adoptées par les gestionnaires pour aborder ces types de problèmes.

Dans le troisième chapitre, nous formulons une problématique liée à l'ordonnement en temps réel du personnel dans un environnement manufacturier dynamique. Nous décrivons aussi le contexte de notre recherche ainsi que la démarche retenue pour appréhender notre problématique.

Dans le quatrième chapitre, nous exposons la synthèse de notre étude théorique de trois courants de recherche qui nous semblent prometteurs pour appréhender la complexité de notre problématique : la gestion par compétences issue de la gestion stratégique, les systèmes multi-agents issus de l'intelligence artificielle distribuée et les jeux coopératifs issus de la théorie des jeux.

Dans le cinquième chapitre, nous nous intéressons à la formulation mathématique de notre problème de recherche. À ce sujet, nous avons proposé un modèle mathématique du problème d'affectation dynamique des employés sur une chaîne d'assemblage avec prise en considération des préférences, des compétences et des déplacements inter-postes des employés.

Dans le sixième chapitre, nous présentons la plateforme de système multi-agents que nous avons élaboré ainsi que l'algorithme à base d'agents de résolution de notre problématique d'ordonnancement du personnel. Par la suite, les résultats obtenus à travers la résolution d'une série de problèmes d'ordonnancement du personnel sont exposés afin de mesurer les performances de notre approche.

Dans le septième chapitre, nous nous mettons dans un contexte de réordonnancement. Nous présentons une extension de l'algorithme à base d'agents afin de réagir à un ou plusieurs cas d'absences d'employés. Aussi nous présentons une approche métaheuristique de recuit simulé, qui sert de base comparative pour tester les performances de l'algorithme à base d'agents, et ce, à travers la résolution de plusieurs scénarios d'ordonnancement et de réordonnancement du personnel.

Dans le chapitre huit, nous exploitons les plates-formes du système multi-agents et du recuit simulé, qui sont développées à ce stade de notre recherche, comme outils de simulation pour étudier deux aspects de la gestion stratégique des ressources humaines. Les aspects traités sont la flexibilité dans l'élaboration des horaires de travail et l'impact de la prise en considération des préférences des employés dans le processus d'ordonnancement du personnel.

Au chapitre neuf, nous présentons la conclusion de la présente thèse, et ce, en exposant un récapitulatif des contributions clés qui donnent sa pleine valeur à la thèse. Aussi, nous introduirons diverses perspectives de poursuites de recherche qui découlent de cette thèse.

2. La polyvalence inter-postes des employés : une stratégie pour l'agilité du personnel

Dans une vision dynamique de développement du potentiel humain, plusieurs entreprises ont recours à l'amélioration de la polyvalence de leur personnel. Cette stratégie a pour objectif de rendre les employés aptes à remplir plusieurs tâches et à diversifier leurs champs de compétences grâce à la formation (Field 1994).

La stratégie de la polyvalence inter-postes des employés s'avère particulièrement intéressante, dans la mesure où elle apporte une plus grande agilité à l'entreprise et permet une amélioration du taux d'utilisation du personnel (Hopp et al 2004). En effet, en possédant des employés polyvalents, l'entreprise a plus de possibilités et de variantes pour l'élaboration des plans d'allocation du personnel. Cela lui permet notamment de répondre à la demande en ressources humaines sur certains postes affichant une augmentation imprévisible de la charge de travail (Jordan et al. 2004) ou de faire face aux absences ou aux retards d'employés et ce, en mobilisant d'autres employés puisés à partir du bassin de compétences disponibles. Ainsi, cette stratégie permet d'instaurer une gestion dynamique des ressources humaines, c'est-à-dire une gestion axée sur les compétences et la mobilité des employés afin d'optimiser leur répartition en fonction des besoins spécifiques.

Plusieurs travaux ont exploré l'utilisation de la polyvalence inter-postes des employés (Vairaktarakis et Winch 1999 ; Hopp et al 2004 ; Jordan et al 2004 ; Bokhorst et al 2004, Bard 2004 ; kula et al. 2004 ; Sumukadas et Sawney 2004). On distingue trois types de polyvalence inter-postes (Jordan et al.2004) : polyvalence nulle ; polyvalence partielle ou polyvalence totale.

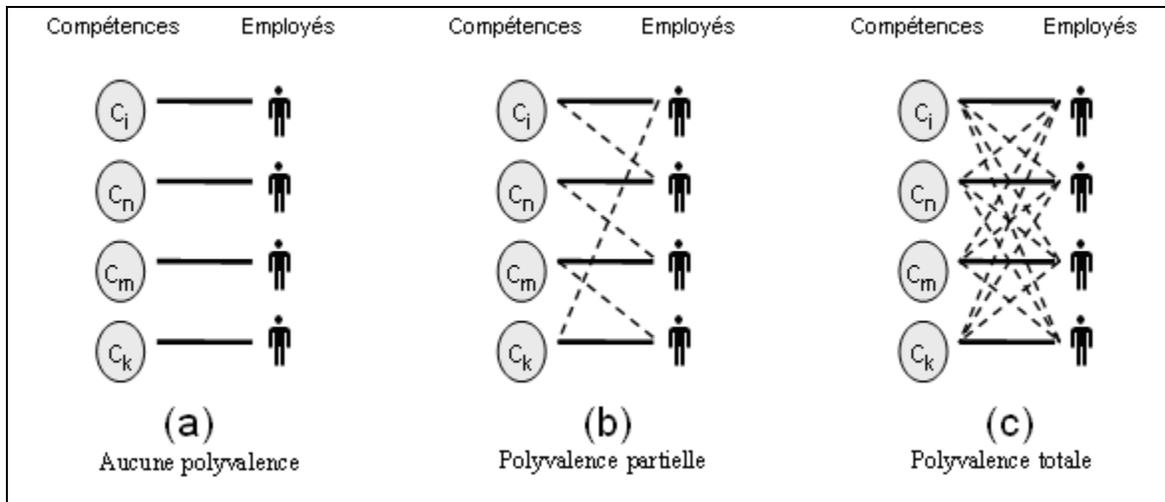


Figure 1 : Exemples de la polyvalence d'employés

(Figure adaptée de Jordan et al. 2004)

Le premier cas, où aucune polyvalence d'employés n'est permise, chaque employé se spécialise dans l'accomplissement d'une activité principale. C'est le cas le plus restrictif en termes d'agilité car en cas d'absence d'un opérateur, il serait difficile de le remplacer par une compétence équivalente, ce qui risque de ralentir la cadence de travail en créant des goulots d'étranglement.

Par ailleurs, en faisant abstraction du temps et des coûts que nécessite la formation du personnel, le cas d'une polyvalence totale du personnel où chaque employé est compétent pour la réalisation de l'ensemble des tâches serait le cas idéal pour toute entreprise (Jordan et al. 2004). Or, en raison des contraintes financières et des contraintes liées aux capacités d'apprentissage des employés (Misra et al. 2004, Jordan et al. 2004), très peu d'entreprises peuvent se permettre une telle pratique. Des exemples de polyvalence totale d'employés peuvent être rencontrés dans des organisations telles que les centres d'appel multilingues où les opérateurs téléphoniques doivent maîtriser l'ensemble des langues utilisées. Dans le domaine manufacturier, un des exemples les plus étudiés de la polyvalence totale d'employés réside dans l'utilisation de *brigade de seuu* (*Bucket Brigade*) (Bartholdi et al. 1999 ; Bartholdi et Einstein 1996 ; Bischak 1996). Cette approche est généralement utilisée dans le cas de chaîne d'assemblage où le nombre d'employés est inférieur au nombre de stations de travail. Les employés sont séquencés du plus lent au plus rapide et chacun est affecté à l'assemblage d'un item en

accompagnant l'item le long de la chaîne, d'une station à une autre. Dans ce cas, l'employé doit maîtriser l'ensemble des compétences requises au niveau de chaque station.

En ce qui concerne la polyvalence partielle, les travaux recensés portent sur l'évaluation des stratégies à adopter pour l'estimation du nombre de compétences requises et pour la répartition de ces compétences dans une perspective de maximisation de l'agilité de l'entreprise. Jordan et al. (2004) s'intéressent au cas du personnel de maintenance travaillant dans un contexte manufacturier. Leur étude porte sur l'analyse des performances de la stratégie de polyvalence inter-postes appelée « *Chaining* ». Selon cette stratégie, chaque employé doit être formé à la réalisation d'une activité principale et d'une activité secondaire pour laquelle il sera affecté en cas de besoin. La distribution des activités entre les employés se fait de telle sorte que chaque activité soit reliée au moins à un employé. Dans cette étude, Jordan et al. (2004) ont élaboré plusieurs tests comparant les performances résultantes de l'application d'une polyvalence totale et ceux de l'utilisation de la stratégie du « *Chaining* ». Les résultats obtenus démontrent que la stratégie du « *Chaining* » permet d'atteindre la plupart des performances d'une polyvalence totale en n'utilisant qu'une fraction des investissements requise par cette dernière. Deux autres variantes de cette stratégie ont été proposées par McCrerry (1996) dans un contexte de chaîne d'assemblage. La première consiste en une allocation de chaque employé à une station principale et de le former aux tâches de la station immédiatement en amont. Alors que dans la deuxième variante l'employé est formé, en plus, à la réalisation des tâches des deux stations en aval. Plus généralement, Tekin (2003) définit le « *D-skill chaining* ». Dans ce cas, chaque employé est apte à réaliser les activités de sa station de travail principale et celles des *D-1* stations en amont. L'auteur s'intéresse à la détermination des politiques et des stratégies efficaces de polyvalence. Il établit que la stratégie du « *Chaining* » présente des atouts d'une méthode robuste et efficace, et qu'elle permet de favoriser l'agilité du personnel dans un contexte de chaîne de production.

Brusco et Johns (1998) proposent un modèle mathématique pour l'évaluation de stratégies de polyvalence inter-postes d'employés dans le cadre de l'industrie du papier.

Les auteurs utilisent ce modèle pour comparer les performances de huit stratégies de polyvalence avec différents niveaux de besoins en personnel. Cette comparaison montre que la stratégie du « *Chaining* » est particulièrement utile pour développer l'agilité du personnel.

Par ailleurs, Campbell (1999) s'intéresse au problème d'allocation d'employés polyvalents dans un environnement de service multidépartemental. Il analyse l'impact du niveau de polyvalence des employés sur les performances de l'organisation. Les résultats concluent que dans plusieurs cas, une polyvalence assez légère des employés peut-être bénéfique à l'entreprise, mais au-delà d'un certain seuil, l'augmentation de la polyvalence des employés n'influence que légèrement les performances de l'entreprise. En plus, dans certains cas, une forte polyvalence des employés peut se transformer en un élément contre-productif (Jordan et al. 2004). En effet, d'après Pinker et Shumsky (2000), les employés fortement polyvalents risquent de ne pas acquérir une assez bonne expérience permettant de fournir des services de haute qualité. Dans ce cas, ce qui sera gagné d'un côté, en termes d'efficacité par l'organisation, sera perdu d'un autre, en termes de qualité.

Arrivé à ce stade de la revue de travaux portant sur la polyvalence inter-postes, nous constatons que la stratégie de renforcement de la polyvalence inter-postes du personnel est bénéfique pour les entreprises en termes d'efficacité et d'agilité. Cependant, au-delà d'un certain niveau de polyvalence les avantages recueillis deviennent minimes en comparaison avec les coûts de formation. En plus, la recherche d'une grande polyvalence du personnel risque de se répercuter négativement sur la qualité des services et de produits offerts. Ce constat suggère donc qu'il est important de rechercher un mix optimal d'employés situé entre des employés spécialisés et des employés totalement polyvalents.

Dans notre recherche, en plus de nous intéresser à l'ordonnancement en temps réel du personnel travaillant sur une chaîne d'assemblage, nous avons jugé pertinent de porter un intérêt particulier à certains aspects de la gestion stratégique des ressources humaines. Notamment, les dimensions liées à la flexibilité dans l'élaboration des horaires de travail

et à l'impact de la prise en considération simultanée des compétences et des préférences des employés dans le processus d'ordonnement du personnel.

Nous abordons ces aspects à travers une approche de simulation à base d'agents. Nous examinons plusieurs stratégies de flexibilités du personnel ainsi que plusieurs niveaux de prise en considération des préférences des employés. L'intérêt de chaque stratégie est estimé à travers l'évaluation de son impact sur les performances de la chaîne d'assemblage. Plusieurs scénarios reflétant différents états de la chaîne sont élaborés en variant la nature de la demande en produits et l'offre en main-d'œuvre.

3. Problèmes d'ordonnement du personnel

Les ressources humaines sont parmi les ressources les plus cruciales (Goldman et al. 1995) et les plus coûteuses pour la majorité des organisations (Alfares 2003). Par conséquent, il est capital que chaque entreprise élabore une stratégie efficace de planification de ces ressources. Dans cette perspective, un ordonnancement efficace du personnel permet de générer des réductions des coûts, d'améliorer la qualité des services ou des produits offerts et de maximiser la satisfaction des employés (Alfares 2004).

Les problèmes d'ordonnement du personnel sont des cas particuliers du problème d'allocation des ressources (Hao et al. 2004). Ils peuvent se présenter selon plusieurs configurations ou modèles en fonction des particularités du milieu organisationnel et de la durée de la période de planification. Généralement, ces problèmes portent sur la détermination du nombre d'employés requis pour répondre à une demande en produits ou en services, sur leurs affectations à des tâches précises le long d'intervalles de temps de durée variable, ou encore sur la détermination du lieu de travail pour chaque employé (Ernst et al. 2004, Thompson 1995).

Ainsi définis, les problèmes d'ordonnement du personnel peuvent être observés dans plusieurs types d'entreprises manufacturières ou de services. Ce sont des problèmes récurrents dans des domaines tels que : le transport (Brusco et al. 1995) ; la santé (Aickelin et Dowsland 2000) ; l'enseignement (DeGans 1981) ; la production manufacturière (Lee et Vairaktarakis 1997 ; Berman et al. 1997 ; Vairaktarakis et Winch 1999) ; les centres d'appel (Atlason et al. 2004) ; la restauration (Hur et al 2004) ou les services de protection et d'urgence (Ernst et al. 1999).

Dans les travaux recensés, on rencontre trois catégories de problèmes d'ordonnement du personnel : le problème de planification des jours de repos, le problème d'élaboration des quarts de travail et le problème d'élaboration des patrons de travail (Baker 1976, Bailey et Field; 1985, Bechtold 1991, Ernst et al. 2004).

1. Le problème de planification des jours de repos (*Days off scheduling problem*) porte sur l'affectation à chaque employé d'un ensemble de jours de

repos au cours de la période de planification, tout en respectant les normes de travail en vigueur et en satisfaisant la demande (Bechtold et Brusco 1995). Ce type de problème existe dans les secteurs d'activités où la présence des employés est nécessaire en permanence. Par exemple, dans les domaines hospitalier, policier ou des transports, les employés ne peuvent pas tous prendre des jours de repos simultanément. Habituellement, ce problème se définit par une recherche d'affectation de cinq jours de travail par semaine et par employé (Bailey et Field 1985). Une autre occurrence de ce problème consiste en une affectation d'un nombre consécutif de jours de repos pour chaque employé. Alfares (1998) analyse le cas de planification cyclique de jours de repos. Alfares (2003) s'intéresse au problème d'allocation de 3 et de 4 jours de repos successifs par semaine. Dans ces deux travaux, l'objectif consiste en une satisfaction de la demande tout en minimisant le nombre et le coût total d'employés.

2. Le problème de planification des quarts de travail (*Shift scheduling problem*) porte sur la conception des horaires quotidiens du personnel. Il s'agit d'élaborer des quarts de travail auxquels seront affectés les employés. Un quart de travail a généralement une durée de 8 à 9 heures, réparties en plusieurs intervalles de temps de 15 à 30 minutes appelés « intervalles de planification ». L'élaboration des quarts de travail consiste à définir les horaires de début et de fin de chaque quart ainsi que le nombre et la durée des pauses de travail de manière à satisfaire la demande en personnel pour chaque intervalle de planification (Bechtold et Brusco 1995; Aykin 2000).
3. Le problème de planification de patrons de travail (*Tour scheduling problem*) est la combinaison des deux problèmes ci-dessus. Il est qualifié de problème général d'ordonnancement du personnel. Ce problème consiste en une définition, à la fois, des quarts de travail et des jours de repos à affecter à chaque employé le long de la période de planification qui a souvent une durée d'une semaine (Bechtold et Brusco 1995).

À cette classification de base, on peut ajouter d'autres paramètres contextuels qui permettent de mieux décrire un problème spécifique d'ordonnancement du personnel

rattaché à un domaine d'activité particulier. Généralement, ces paramètres reflètent les spécificités organisationnelles, temporelles ou spatiales qui sont nécessaires au bon fonctionnement des opérations. Ainsi, on doit tenir en compte des paramètres incluant :

1. la nature de la demande en personnel (demande déterministe ou stochastique) (Baker 1976 ; Easton et Rossin 1996; Easton et Mansour 1999) ;
2. l'horizon de planification (cyclique ou acyclique) (Bartholdi 1981, Alfares 1998) ;
3. les préférences des employés (Eveborn et Rönnqvist 2004 ; Topaloglu et Ozkarahan 2004) ;
4. les règles d'ancienneté (Volgenant 2004) ;
5. la composition des équipes de travail exprimée en terme de pourcentage des employés à temps partiel par rapport à ceux à temps plein (Brusco et al.1995; Brusco et Jacobs 1998) ;
6. la flexibilité des durées et du nombre des quarts de travail et des pauses.

Ce dernier paramètre est l'objet d'une attention particulière dans la littérature. Plusieurs travaux soulignent les avantages et l'intérêt de l'intégration du concept de la flexibilité dans l'ordonnancement du personnel.

Selon Bailey et Field (1985), la flexibilité a un impact positif sur l'environnement de travail, qui se traduit par une motivation plus élevée des employés et une diminution du taux d'absentéisme et des retards.

D'après Topaloglu et Ozkarahan (2004), l'instauration d'une flexibilité dans le processus de planification du personnel passe par l'adoption de différents types de quart de travail, avec des durées et des plages horaires distinctes (shift-length flexibility) ; d'une flexibilité sur les jours ouvrables de la semaine (days-off flexibility) ; d'une flexibilité sur les emplacements des périodes de pause quotidiennes (break-placement flexibility); et d'une flexibilité sur les heures de démarrage de travail par jour et par semaine (start-time flexibility).

Jacobs et Bechtold (1993) ont étudié l'impact de la flexibilité dans le cas du problème de planification de patrons de travail. Ils ont démontré que l'utilisation des emplacements de périodes de pauses flexibles et de quarts de travail de durées variables était extrêmement efficace pour l'amélioration de l'utilisation du personnel. Cependant, l'utilisation de niveaux très élevés de flexibilité augmente considérablement la complexité et la taille du problème d'ordonnancement à cause de l'accroissement des alternatives d'allocation possibles (Bechtold et Brusco 1990 ; Aykin 2000 ; Topaloglu et Ozkarahan 2004). Cette complexité se manifeste, le plus souvent, par une augmentation de la taille et des nombres de variables du modèle mathématique permettant la modélisation et la résolution du problème d'ordonnancement (Aykin 2000).

En effet, pour aborder les problèmes de planification du personnel, plusieurs travaux ont eu recours à la formulation mathématique du problème d'ordonnancement en un problème d'optimisation combinatoire (Dantzig 1954; Baker 1976 ; Bechtold et Jacobs 1990 ; Brusco et Jacobs 1995 ; Thompson 1995 ; Aykin 1996 ; Easton et Rossin 1996; Aykin 1998 ; Brusco et Jacobs 1998 ; Easton et Mansour 1999 ; Aykin 2000 ; Alfares 2003 ; Topaloglu et Ozkarahan 2004).

Il s'agit de traduire le plus fidèlement possible une problématique rattachée à un contexte donné en un ensemble de contraintes (contraintes de priorités entre les opérations, préférences d'employés, satisfaction de la demande, conformité entre les compétences des employés et les tâches auxquelles ils sont affectés, nombre minimal ou maximal d'opérateurs par station de travail, etc.) et d'objectifs (réduction du coût global, réduction du nombre d'employés, maximisation de la satisfaction des employés, répartition équitable des opérations entre les différentes catégories d'employés, etc.).

Les approches de formulation mathématique des problèmes d'ordonnancement du personnel peuvent être classées en trois catégories. La première approche est celle de Dantzig (1954). Elle consiste en une modélisation du problème d'ordonnancement en un problème de couverture (Set Covering Problem). La deuxième approche consiste en une représentation implicite du problème (Implicit formulation) (Bechtold et Jacobs 1990 ; Aykin 1996). La troisième utilise la méthode de la programmation par objectifs pour la

modélisation du problème d'ordonnancement (Goals Programming) (Easton et Rossin 1996 ; Easton et Mansour 1999).

La modélisation du problème d'ordonnancement du personnel en un modèle de couverture proposée par Dantzig (1954) repose sur une représentation explicite de chaque combinaison de quarts de travail, d'heures de démarrage ou de pauses de travail par une variable de décision dans la matrice des contraintes du modèle mathématique linéaire (Aykin 1996). Cette représentation engendre une augmentation de la complexité et de la taille du problème d'optimisation à traiter (Aykin 2000), et le rend difficile à résoudre. Notamment, dans le cas d'intégration d'éléments de flexibilité sur les durées et les emplacements des pauses ou sur les longueurs et les périodes de début de quarts de travail (Bechtold et Brusco 1990). Pour éviter de telles complexités, Bechtold et Jacobs (1990) ainsi que Aykin (1996) et Thompson (1995) proposent l'approche de modélisation implicite. Un des éléments clés de cette approche consiste en l'utilisation de variables représentant des quarts de travail types plutôt que des quarts de travail spécifiques. Un quart de travail type est identifié par l'heure de démarrage de travail, la durée du quart et la fenêtre de temps à l'intérieur de laquelle les pauses de travail sont permises. En comparaison avec l'approche de Dantzig (1954), l'approche implicite permet une réduction considérable du nombre de variables de décision à manipuler.

Par ailleurs, l'approche de modélisation en un problème de couverture (Dantzig 1954) ne tient compte d'aucune borne supérieure concernant le nombre d'employés disponibles, ce qui est en contradiction avec le fait que les ressources, dans une organisation, soient limitées. En plus, la satisfaction de la demande en personnel est modélisée comme une contrainte rigide, ce qui n'autorise que des surplus d'employés le long des périodes de planification. Or, dans certains contextes réels, il est difficile pour le gestionnaire de garantir une satisfaction totale de la demande en employés, principalement dans les cas où cette demande dépasse le nombre total d'employés disponibles. Pour éviter ce type de problème, Baker (1976) et Easton et Mansour (1999) offrent une formulation du problème d'ordonnancement du personnel basée sur l'approche de programmation par objectifs. Les contraintes liées à la satisfaction de la demande en employés sont modélisées sous forme d'objectifs à atteindre. Dans ce cas, la fonction objectif porte,

généralement, sur une minimisation des déviations positives (surplus d'employés) ou négatives (manque d'employés) par rapport aux objectifs exprimant la demande en personnel pour chaque période. Ainsi définie, la programmation par objectifs permet d'avoir des plans d'ordonnement avec des pénuries ou des surplus en employés par période de planification (Easton et Mansour 1999). Cela donne plus de flexibilité aux gestionnaires des ressources humaines (Thompson 1998). Dans le même ordre d'idées, Loucks et Jacobs(1991) proposent un modèle mathématique basé sur l'approche de programmation par objectifs pour le cas du problème d'élaboration de patrons de travail des employés qui sont limités dans leurs heures de disponibilités. L'objectif étant de minimiser le sureffectif des employés tout en essayant d'affecter des heures de travail aussi proche que possible à celles préférées par les employés.

Pour cette raison, nous adoptons, dans ce travail, l'approche de modélisation par la programmation par objectifs pour proposer une formulation mathématique du problème d'affectation d'employés sur une chaîne d'assemblage en prenant en considération les préférences, les compétences et les capacités de déplacements inter-postes des opérateurs.

Plusieurs méthodes, pour la plupart des heuristiques ou des méta-heuristiques (Alfares 2004), ont été proposées pour résoudre les différentes occurrences du problème d'ordonnement du personnel. Le recours à de telles méthodes tient à la nature complexe du problème. En effet, Garey et Johnson. (1979) ont prouvé qu'il est de complexité NP-complet. Dans ce cas, les méthodes exactes garantissant l'obtention de la solution optimale deviennent souvent inapplicables étant donné le temps de calcul très élevé qu'elles requièrent (Garey et Johnson 1979). Par conséquent, l'utilisation de ce type de méthodes se limite, le plus souvent, à la résolution des cas les plus simples ou de petites tailles en termes de nombre de variables utilisées (Bailey et Field 1985; Bechtold et Jacobs 1990 ; Thompson 1995 ; Aykin 1996, Beasley et Cao 1998). Pour des problèmes plus complexes ou de grande taille, ces méthodes atteignent rapidement leurs limites (Bartholdi 1981). Dans ces cas, on privilégie les méthodes heuristiques (Handerson et Berry 1976; Chen 1995; Brusco et Jacobs 1998) ou encore les métaheuristiques tel que le recuit simulé (Brusco et Jacobs 1993; Brusco et al. 1995; Thompson 1996), la recherche avec tabou (Easton et Rossin 1996) ou les algorithmes

génétiques (Cai et Li 2000). Ces méthodes fournissent à moindres coûts, en termes de temps de calcul et de mémoire utilisée, des solutions satisfaisantes, mais ne garantissent pas pour autant leur optimalité.

Par ailleurs, les heuristiques et les métaheuristiques se basent sur une conception centralisée et statique de la résolution (Teredesai 1999). Il en résulte une rigidité et une moindre réactivité de la fonction d'ordonnancement face à des perturbations (Frayret et al. 2003). En plus, ces méthodes nécessitent des temps de calcul importants, ce qui les rend inadéquates pour les cas d'ordonnancement en temps réel. Par conséquent, ces méthodes de résolution sont inadaptées aux systèmes de production travaillant dans un environnement dynamique et incertain (Caridi et Sianesi 2000).

Pour contourner ce problème de manque de réactivité de l'architecture centralisée, la fonction d'ordonnancement a tendance à évoluer vers une structure de décision dynamique distribuée. En effet, l'approche de l'ordonnancement dynamique distribué repose sur la planification et l'ordonnancement des opérations en temps réel à travers une répartition des calculs d'ordonnancement sur plusieurs systèmes logiciels autonomes afin de mieux appréhender la complexité du problème d'ordonnancement (Tranvouez 2001). Cette approche permet au système d'ordonnancement de réagir et de s'adapter, en fonction des objectifs de production, aux fluctuations des besoins et aux aléas d'un environnement dynamique. Par exemple, l'utilisation des systèmes multi-agents (SMA), qui constituent un sous-domaine de l'intelligence artificielle distribuée (Tranvouez 2001), permet de contourner les problèmes et les limites de l'approche centralisée en donnant à des agents autonomes et intelligents la responsabilité de concevoir leurs plans de production, de les exécuter et de les adapter en fonction des aléas du système manufacturier (Cloutier 1999).

4. Problématique de recherche

4.1. Objectif de recherche

Dans cette recherche, nous nous intéressons au problème d'ordonnancement en temps réel du personnel travaillant dans un contexte d'agilité manufacturière. La revue et l'analyse des travaux ayant porté sur les problèmes d'ordonnancement du personnel nous ont permis de relever les limites suivantes :

- La plupart des problèmes d'ordonnancement du personnel sont de complexité NP-complet, ce qui rend difficile la recherche des solutions optimales;
- Certains modèles théoriques d'ordonnancement du personnel ne reflètent pas plusieurs aspects primordiaux de la gestion du personnel dans un contexte industriel. Par exemple, la plupart de ces modèles ne traduisent pas le caractère hétérogène des compétences et des performances des employés. Ils mettent l'accent uniquement sur la traduction de la demande en termes de nombre d'employés permettant le maintien d'un niveau de service satisfaisant;
- Les approches de résolution fréquemment utilisées pour résoudre les problèmes d'ordonnancement du personnel se basent sur une architecture centralisée. Il en résulte une rigidité et une moindre réactivité de la fonction d'ordonnancement face aux perturbations d'un environnement dynamique et incertain;
- De plus, plusieurs méthodes nécessitent des temps de calculs importants, ce qui les rend inadéquates pour les cas d'ordonnancement en temps réel.

Par ailleurs, la synthèse des principaux travaux liés à l'agilité du personnel fait ressortir que la polyvalence inter-postes du personnel est une stratégie très bénéfique pour les entreprises en termes d'efficacité et d'agilité. Cependant, au-delà d'un certain niveau de polyvalence les avantages recueillis deviennent minimes en comparaison avec les coûts de formation. En plus, une grande polyvalence du personnel risque de se transformer en un élément contre-productif et peut se répercuter négativement sur la qualité des services et des produits offerts. Ce constat suggère donc qu'il est important de rechercher un mix optimal d'employés situé entre des employés spécialisés et des employés totalement polyvalents. En transposant ce constat dans un contexte manufacturier, une question

majeure émerge : quel est le niveau et quelle est la structure de polyvalence inter-poste des employés à adopter pour améliorer les performances d'une chaîne d'assemblage ?

L'intérêt principal de notre recherche est de remédier aux limites des approches centralisées de l'ordonnancement du personnel mais aussi de proposer une stratégie de polyvalence inter-postes des employés qui permettra d'améliorer l'efficacité et l'agilité de la chaîne d'assemblage. À cet effet, nous nous sommes fixés les objectifs suivants :

1. L'amélioration de la modélisation en vue de la rendre plus adéquate à la réalité du contexte industriel cible. Pour cela, nous proposons l'élaboration d'un modèle d'ordonnancement qui dépasse le niveau d'une simple planification classique basée sur un équilibre entre la demande et l'offre en employés pour intégrer les aspects liés à une gestion des ressources humaines axée sur les compétences, les préférences et la capacité de mobilité inter-postes des employés.
2. L'ordonnancement du personnel selon une vision dynamique afin de faire face aux aléas. Pour y répondre, nous développons un cadre conceptuel pour l'ordonnancement et l'allocation du personnel en temps réel.
3. L'appréhension de la complexité du problème d'ordonnancement en développant un outil distribué à base d'agents pour la résolution du problème d'ordonnancement et d'allocation du personnel en temps réel.
4. L'exploration de deux aspects de la gestion stratégique des ressources humaines à travers une approche de simulation à base d'agents. Les aspects traités sont la flexibilité dans l'élaboration des horaires de travail et l'impact de la prise en considération des préférences des employés dans le processus d'ordonnancement du personnel. L'intérêt de chaque stratégie étudiée est estimé à travers l'évaluation de son impact sur les performances et l'agilité de la chaîne. Plusieurs scénarios reflétant différents états du système de production sont élaborés en variant la nature de la demande en produits et l'offre en main d'œuvre.

4.2. Contexte de recherche

Le contexte considéré dans cette recherche est celui d'un système d'assemblage de production flexible et mixte. La flexibilité du système se manifeste, principalement, à travers la capacité de produire de nombreux modèles et de passer d'un modèle à l'autre d'une manière rapide et économique pour faire face aux besoins de personnalisation des produits offerts.

La production mixte se caractérise par l'assemblage simultané de plusieurs types ou modèles de produits sur la même chaîne. On peut citer, comme exemple, les chaînes d'assemblage de véhicules automobiles ou de motoneiges. Généralement, le nombre élevé d'options dans ces types de production engendre de grandes variations au niveau du nombre et des compétences des opérateurs requis pour chaque poste de travail.

Au niveau structurel, le système d'assemblage considéré est constitué d'une ou plusieurs chaînes d'assemblage, d'un centre coordonnateur de main-d'œuvre et d'un agent maître de production. Chaque chaîne d'assemblage est composée de plusieurs stations de travail qui nécessitent un approvisionnement précis en produits (matières premières, composants semi-finis, composants finis, etc.) et en ressources humaines. Les stations de travail sont responsables de l'ordonnancement de leurs processus et de leur approvisionnement en ressources humaines auprès du « centre coordonnateur de main-d'œuvre ».

Le centre coordonnateur de main-d'œuvre est une entité décisionnelle responsable de la gestion d'un ensemble d'employés ayant chacun leurs compétences et préférences, et dotés de la faculté de mobilité inter-postes. Plus précisément, ce centre a pour mission d'affecter les employés aux stations de travail, aux pauses de travail ou aux activités secondaires. L'agent maître de production quant à lui a pour rôle de définir les besoins de la production. Il détermine par période la séquence des modèles des produits à assembler.

En fonction des besoins de la production, de la disponibilité des employés, ainsi que de leurs compétences et de leurs préférences, le centre coordonnateur de main-d'œuvre doit affecter des processus à un ou plusieurs employés sur une durée de temps précise.

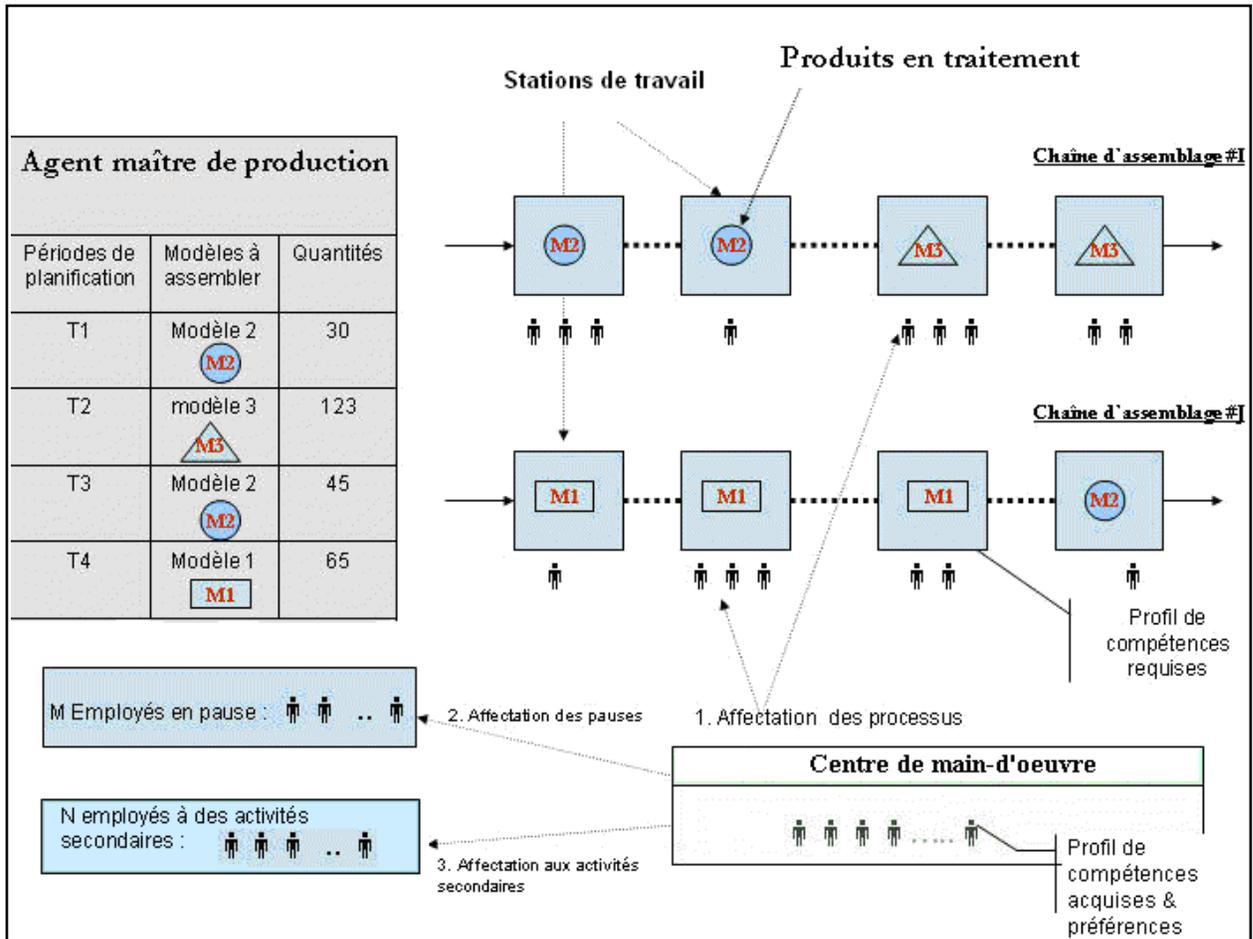


Figure 2 : Structure organisationnelle retenue du système d'assemblage

Notre recherche englobe l'élaboration des mécanismes permettant d'assurer les échanges d'information entre les stations de travail, l'agent maître de production et le centre coordonnateur de main-d'œuvre afin de soutenir l'ordonnancement et l'allocation en temps réel du personnel.

4.3. Démarche retenue

Nous abordons le problème d'ordonnancement et d'allocation du personnel en temps réel en nous basant sur l'étude approfondie des trois courants de recherche : la gestion des compétences relevant de la gestion stratégique des ressources humaines ; les systèmes multi-agents issus de l'intelligence artificielle distribuée et les jeux coopératifs issus de la

théorie des jeux à n-personnes. Notre problématique porte sur deux volets principaux. Le premier concerne la planification des ressources humaines, aspect étudié en gestion par compétences. Le second concerne la modélisation, la résolution distribuée et la simulation d'un problème complexe, aspects étudiés en systèmes multi-agents et en théorie des jeux. Notre démarche débutera par une revue des travaux existants dans ces domaines de recherche, nous permettant d'identifier les éléments conceptuels pouvant nous aider à appréhender notre problématique.

À la lumière des travaux couverts dans le cadre de notre étude de la gestion des compétences, des systèmes multi-agents et des jeux coopératifs, nous proposons un cadre conceptuel pour l'ordonnancement en temps réel du personnel ainsi qu'une modélisation mathématique du cas de l'ordonnancement du personnel dans un contexte de chaîne d'assemblage. Le modèle proposé tient compte des aspects liés à une gestion des ressources humaines axée sur les compétences et la capacité de mobilité inter-postes des employés. Ces deux éléments nous permettent de développer un outil de planification à base d'agents ayant pour objectif de résoudre le problème d'ordonnancement du personnel en temps réel et de simuler les différents états du système d'assemblage. Cet aspect de simulation nous permet d'étudier plusieurs configurations de polyvalence inter-postes des employés afin de définir les éléments de base d'une stratégie de polyvalence appropriée au contexte de chaîne d'assemblage.

Pour la validation de notre recherche, nous réalisons une série de tests. Pour cela, plusieurs cas du problème d'ordonnancement du personnel dans un contexte de chaîne d'assemblage sont élaborés. Les tests réalisés reposent sur la mise en œuvre du modèle mathématique et du cadre conceptuel proposés. La validation de la pertinence de notre approche à base d'agents se fait à travers la comparaison des résultats obtenus avec ceux du modèle mathématique. Cette comparaison repose sur l'utilisation de critères quantitatifs de mesure de performance, notamment le temps de résolution des problèmes et la qualité des solutions obtenues.

5. Cadre théorique de la recherche

Dans cette partie du travail, nous présentons une revue de littérature exhaustive sur l'état de l'art des domaines de la recherche scientifique qui nous servent de base pour la modélisation et la résolution de notre problème d'ordonnancement du personnel. Les domaines de recherche traités sont : la gestion par compétences, les systèmes multi-agents et la théorie des jeux.

5.1. Approche de la gestion des ressources humaines axée sur les compétences

Dans le but d'agir efficacement dans un contexte d'incertitude et afin de répondre à des critères de performance de plus en plus élevés, la plupart des entreprises ont dû remettre en cause l'organisation de type taylorien-fordien du travail, où le poste constitue le pivot des pratiques de gestion des ressources humaines (Cazal et Dietrich 2003). Dans une gestion traditionnelle par poste, l'accent est mis sur les descriptions des tâches. Cette description restrictive devient rapidement obsolète face à l'évolution des emplois et des structures organisationnelles (Rivard 2001). Plusieurs nouvelles approches de gestion de ressources humaines permettant de mieux répondre à cette évolution ont été proposées, notamment l'approche de la gestion par compétences.

En gestion des ressources humaines, la gestion par compétences définit les conditions dans lesquelles les ressources humaines constituent un avantage compétitif pour l'entreprise. Elle vise la redéfinition des emplois, le développement et le partage des savoir-faire et l'accroissement de la flexibilité et de la réactivité de l'entreprise grâce à une meilleure adéquation entre les emplois et les individus en comparant les compétences requises et les compétences acquises, tout en identifiant les écarts à combler par la formation (Rivard 2001; Cazal et Dietrich 2003).

L'utilisation de l'approche de gestion des ressources humaines par compétences est devenue de plus en plus répandue dans les grandes organisations. Les projections futures montrent que cette pratique se généralisera dans les années à venir. De plus en plus d'organisations de petite ou de moyenne taille auront tendance à l'utiliser (Rothwell et Lindholm 1999).

Dans cette partie, nous présentons les fondements du concept de compétence, les principales caractéristiques de l'approche de la gestion par compétences, ainsi que des exemples de l'application de cette approche dans la gestion des ressources humaines.

5.1.1. La notion de compétences

Dans la littérature, la définition de la notion de compétences ne fait pas consensus (Cazal et Dietrich 2003). Cette notion s'articule différemment selon les auteurs. La principale disparité est le résultat du fait que le terme a un sens diffus dans le langage commun, ce qui rend difficile la production d'une définition précise. Même au niveau des entreprises, ce phénomène d'ambiguïté dans la définition de la notion de compétence a été rapporté par Dewey (1997) qui a réalisé un sondage auprès de six services de ressources humaines appartenant à des entreprises différentes. Les résultats du sondage montrent une grande disparité dans la définition et l'utilisation de cette notion.

La définition utilisée fréquemment relie la compétence à la trilogie : savoir, savoir-faire et savoir-être (Cazal et Dietrich 2003 ; Soyer 2003) :

- Le savoir fait référence aux connaissances générales, scientifiques ou techniques d'un individu. Par exemple : énoncer les règles de gestion et les procédures de l'entreprise ou détailler la législation portant sur les contrats de travail. Selon Cazal et Dietrich (2003), c'est par la confrontation à l'action et par l'interaction que l'individu produit du savoir et développe sa capacité à connaître ;
- Le savoir-faire est associé à la capacité de mettre ces connaissances en pratique dans le cadre d'une activité professionnelle ou extraprofessionnelle. Il provient des apprentissages, des expériences personnelles ou professionnelles. Par exemple : assembler des pièces ou souder à l'étain; et
- Le savoir-être correspond à la capacité de manifester des attitudes ou des comportements adaptés à des situations de travail. Par exemple : analyser un conflit sans tension émotionnelle propre ou être en mesure de ne pas projeter ses propres sentiments.

D'autres conceptions de la notion de compétence ont été proposées dans la littérature. Spencer et Spencer (1993, p9) conçoivent la compétence comme une « *caractéristique sous-jacente d'un individu ayant une relation causale avec un critère d'efficacité ou de performance dans une situation donnée* ». Cela signifie qu'à travers les compétences de l'individu, il est possible de prédire son comportement, ses réactions et ses performances dans plusieurs contextes. Ces auteurs définissent cinq types de compétences qu'ils présentent en un modèle iceberg : les motivations, les traits, le concept de soi, les connaissances et les habilités (Spencer et Spencer (1993, p11). À la surface de l'iceberg, on trouve les connaissances et les habilités, car ces deux compétences sont les plus visibles et les plus faciles à développer chez un individu. La partie immergée de l'iceberg comprend la base de la personnalité. À ce niveau, on retrouve le concept de soi, les traits et les motivations qui reflètent les compétences les plus difficiles à mesurer et à développer.

Green (1999, p5) considère la compétence individuelle comme « *une description des habitudes mesurables de travail et des habilités personnelles utilisées dans l'atteinte d'un objectif de travail* ». Dans le même ordre d'idées, Flück et al. (1996)² définissent la compétence comme « *une capacité à combiner et à utiliser les connaissances et le savoir-faire acquis pour maîtriser des situations professionnelles et obtenir les résultats attendus* ». Selon Pemartin (1999), la compétence représente le savoir-faire associé à l'intelligibilité de l'acte.

Selon Cazal et Dietrich (2003), le concept de compétence est indissociable du contexte qui conditionne sa mise en œuvre. Ils considèrent que la compétence « *se construit à la jonction des connaissances explicites et tacites, de lois générales et de leur application à des contextes particuliers* ».

Par ailleurs, Hoffmann (1996) ainsi que Stuart et Lindsay (1994) distinguent deux classes de définitions du concept de compétence dans la littérature : la classe orientée intrant et la classe orientée extrant. Dans la classe des définitions de la notion de compétence orientée intrant, l'accent est mis sur des éléments entrants tels que les caractéristiques et les

² Cité par Rivard (2001), p 31.

attributs propres à l'individu, qui sont requis pour accomplir une tâche. Alors qu'au niveau de la deuxième classe, des définitions orientées-extrant, l'emphase est mise sur des éléments résultants. Notamment, les standards de performance qu'un individu peut atteindre en réalisant un travail donné dans un contexte précis.

Finalement, certains auteurs distinguent les compétences individuelles des compétences collectives (Pemartin, 1999). Au niveau organisationnel, l'entreprise cherche à construire les compétences collectives en élaborant une combinaison synergique de l'ensemble des compétences individuelles des membres de l'organisation (Le Boterf 1997). En effet, la présence d'un ensemble de compétences individuelles n'est pas garante de l'efficacité de l'entreprise. Cette efficacité dépend plutôt de la qualité de leur combinaison ou de leur articulation autour d'un objectif commun. La combinaison et l'agencement de diverses compétences génèrent souvent un apprentissage collectif qui crée un avantage concurrentiel intéressant, car difficile à imiter par les concurrents (Le Boterf 1997).

La revue de ces différentes définitions de la notion de compétences fait ressortir l'existence d'une grande disparité conceptuelle entre les différents travaux traitant du concept de la compétence. Selon Hoffman (1999), le choix d'une définition est souvent lié à la rationalité et au contexte d'utilisation des compétences à la vision des différentes parties prenantes.

Pour notre recherche et d'après la synthèse de ces différentes définitions, nous considérons que la compétence est une combinaison de connaissances, d'attitudes et de traits de personnalité structurés et intégrés en fonction des objectifs et des résultats visés dans un contexte d'application donné.

5.1.2. Démarche de gestion par compétences

La démarche d'instauration d'un système de gestion des ressources humaines axé sur les compétences consiste à concevoir, à mettre en place et à suivre une politique et des plans d'action visant la réduction, de façon anticipée et en fonction du plan stratégique, des écarts entre compétences requises et celles disponibles (Soyer 2003). Selon Rivard

(2001), une telle démarche devrait prendre en considération les objectifs et les orientations stratégiques de l'organisation. Les principales étapes de cette démarche sont :

1. Déterminer le modèle de compétences. Cela consiste en une élaboration d'une description détaillée des différentes habilités et traits de caractère requis chez un employé pour atteindre les objectifs présents ou anticipés de travail. Mansfield (1996) présente deux approches pour d'élaboration du modèle de compétence : l'approche du modèle de compétences mono-emploi et l'approche du modèle universel. Dans le premier cas, un modèle de compétence est élaboré pour chaque poste de travail à travers des techniques de collectes de données tels que les groupes de travail, les entretiens ou l'observation directe du poste. Cette approche fournit un descriptif détaillé des besoins, mais reste très coûteuse à implanter. L'approche du modèle universel porte sur l'élaboration de profils de compétences correspondant à une vaste gamme d'emplois, par exemple, tous les emplois de gestion. Dans ce cas, on se base sur des patterns de modèles présents dans la littérature. C'est une approche économique et utile dans le cas d'un grand nombre d'employés. Cependant, elle ne permet pas d'avoir un descriptif détaillé d'un emploi particulier.
2. Répertorier les compétences déjà en place en spécifiant pour chaque employé les compétences qu'il maîtrise et celles qu'il pourrait développer. Cela peut être réalisé à l'aide du modèle de compétences qui présente les compétences-clés recherchées par l'entreprise. Chaque employé doit préciser les compétences qu'il maîtrise ainsi que le niveau de performance qu'il atteint.
3. Évaluer les écarts entre les compétences requises et celles disponibles. Pour apprécier cet écart, on utilise souvent comme outil « la grille d'évaluation des écarts » (figure 3)³. Cette grille énumère les compétences de base dans l'organisation ainsi que les habilités des différents employés. Elle permet de dégager, compétence par compétence, le bilan d'entité qui traduit l'écart entre les profils de compétences requis et les profils acquis.

³ AFNOR 2003

4. Spécifier les programmes de formation ou de recrutement qui pourraient favoriser le développement des compétences ou combler les écarts entre compétences requises et compétences disponibles.

	Maintenance mécanique	Conduite de machine	Soudage en l'étain	Assemblage des pièces	DAO	Rédaction d'un compte rendu
Employé 1	●	-	-	□	-	✓
Employé 2		●	□			
Employé 3	●	●	-	Y	-	-
Employé 4	●	Y	-	-	●	-
Employé 5	●	●	✓	-	-	□
Bilan entité	☺	☺	🚚	☹	☹	🚚

- ☺ : adéquation entre compétence requise et disponibilité (quantitatif et qualitatif).
 ☹ : risque de manque, actions pour assurer continuité à mettre en place.
 ☹ : niveau de compétence insuffisant, action corrective à mettre en place.
 🚚 : niveau de compétence insuffisant, action corrective immédiate nécessaire.
 ● : maîtrise de la compétence, parfaite autonomie, transmission de la connaissance possible.
 □ : compétence présente, autonomie possible sauf exception (à définir).
 - : incompétence totale
 Y : la formation prévue est en cours.
 ✓ : connaissance théorique, débutant, nécessite accompagnement.

Figure 3 : Exemple de grille d'évaluation des écarts entre compétences requises et compétences disponibles⁴

Par ailleurs, il faut noter que le modèle de compétences et la grille d'évaluation des écarts entre compétences requises et compétences disponibles sont des éléments dynamiques qui évoluent, entre autres, en fonction de l'avancement dans la formation du personnel et dans les innovations technologiques et organisationnelles.

5.1.3. Application de l'approche par compétences dans la GRH

L'approche de gestion axée sur les compétences affecte plusieurs fonctions de gestion des ressources humaines, notamment, la planification des ressources humaines et la formation du personnel (Rivard 2001, Spencer et Spencer 1993).

⁴ Source : *Management des ressources humaines et des compétences*, p 62, AFNOR, Recueil Normes, 2003.

- La planification des ressources humaines porte sur l'allocation des employés aux différentes tâches et englobe le recrutement, la sélection, l'affectation et la promotion du personnel (Spencer et Spencer 1993). Cela consiste en l'élaboration d'un plan définissant l'offre et la demande en termes de compétences en se basant sur les caractéristiques du bassin de compétences-clés disponibles dans l'entreprise et sur la description des postes. Les employés sont affectés par la suite en respectant l'adéquation entre leurs compétences et celles requises pour les postes. Les principaux motifs pour justifier le recours à l'approche par compétences sont basés sur l'hypothèse suivante : « *Plus les compétences de l'employé se rapprochent des exigences de l'emploi, plus hautes sont les performances et la satisfaction dans le travail* » (Spencer et Spencer 1993, p 239).
- Les activités de formation représentent un élément central dans la gestion axée sur les compétences. Ces activités servent à améliorer des compétences ou à développer de nouvelles. La conception de la formation est liée à la nature des compétences à développer ainsi qu'à l'écart entre les compétences requises et celles que les employés possèdent. Ainsi, l'activité de formation peut être soit : des cours, des activités de parrainage, des ateliers, des séminaires, des rotations de postes de travail, etc.

Il ressort que la gestion des ressources humaines axée sur les compétences est un processus dynamique qui se développe au fil des interactions permanentes entre l'employé et l'organisation. Ce dynamisme nécessite l'amélioration des systèmes et des outils décisionnels pour qu'ils permettent une intégration cohérente de l'ensemble commun de compétences-clés de l'organisation.

5.2. L'approche multi-agents dans la gestion des systèmes manufacturiers

L'approche multi-agents constitue un apport considérable dans les domaines de la modélisation et du contrôle des systèmes. Plusieurs travaux ont eu recours à cette approche pour aborder la complexité des problèmes en gestion des systèmes de production (Pan et Tenenbaum 1991 ; Lin et Solberg 1992 ; Fox et al 1993 ; Liu et Sycara 1997 ; Brugali et al 1998 ; Miyashita 1998 ; Shen et Norrie 1999 ; McDonnell et al. 1999;

Cloutier 1999 ; Caridi et Sianesi 2000 ; Montreuil et al. 2000 ; Parunak et al. 2001 ; Frayret et al. 2001).

Dans cette section, nous nous attarderons sur des exemples d'approches des SMA utilisées dans le contexte de gestion de la production manufacturière. Dans un premier temps, nous présentons des définitions du concept d'agent et des systèmes multi-agents. Nous proposons aussi un aperçu des mécanismes d'interaction entre les agents. Dans un deuxième temps, nous nous intéresserons aux approches de modélisation multi-agents utilisées dans certains travaux pour appréhender des problèmes particuliers en gestion des systèmes de production. Un intérêt particulier sera porté à l'analyse des typologies des structures de contrôle des réseaux d'agents ainsi qu'aux rôles encapsulés par les agents utilisés dans ces approches.

5.2.1. Concept d'agent

Il existe de nombreuses définitions du terme agent dans la littérature. Ces définitions se distinguent par la liste des attributs et des caractéristiques prises en considération pour définir la notion d'agent. Selon Ferber (1995), un agent est une entité physique ou abstraite agissant dans un environnement, qui dispose d'une représentation partielle de cet environnement, qui peut communiquer directement avec d'autres agents et dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs. Pour ce faire, l'agent tient compte des ressources et des compétences dont il dispose, ainsi que de sa perception, de ses représentations et des informations qu'il reçoit. Selon Jennings et Wooldridge (1998), un agent est un système informatique, situé dans un environnement, et qui agit d'une façon autonome et flexible pour atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu. L'autonomie d'un agent se traduit par sa capacité d'agir de manière indépendante de toute intervention humaine tout en manifestant un contrôle sur son état interne.

Wooldridge et Jennings (1995) définissent un agent intelligent en se référant à trois caractéristiques :

- Réactivité : l'agent maintient une interaction continue avec son environnement et répond aux changements qui s'y produisent.

- Pro-activité : l'agent doit avoir des comportements « orientés-buts » en prenant les initiatives nécessaires à l'atteinte de ses objectifs.
- Habilité sociale : l'agent est capable d'interagir avec d'autres agents, via des langages de communication, dans le but d'atteindre ses objectifs.

D'autres auteurs proposent d'ajouter des propriétés tel que la mobilité des agents, la rationalité, l'engagement et l'adaptabilité.

Wooldridge (2002) définit trois classes d'agents en se basant sur leur niveau cognitif : les agents délibératifs, les agents réactifs et les agents hybrides.

- Les agents délibératifs sont des agents possédant des intentions et des objectifs à atteindre. Ils sont dotés d'une représentation interne symbolique de leur environnement et ils sont capables de tenir compte de leur passé. Ces caractéristiques leur permettent de planifier les actions à entreprendre pour atteindre les objectifs fixés.
- Les agents réactifs sont des agents n'ayant aucune représentation interne de leur environnement. Leur fonctionnement est du type stimulus/réponse. Ils réagissent en fonction de leur perception de l'environnement et d'un ensemble de règles pré-établies qui associent une action à chaque perception.
- Les agents hybrides sont des agents délibératifs dotés de capacités de réactions aux événements.

Aux niveaux physique et conceptuel, la différence entre ces agents se manifeste dans leur architecture interne qui peut contenir ou non, et à des degrés variables, des modules tel que le module des croyances, le module du savoir-faire, le module des intentions, le module d'expertise et le module de communication.

5.2.2. Qu'est-ce qu'un système multi-agents ?

Oliveira et al. (1998) définissent les SMA comme étant une collection d'entités informatiques, potentiellement hétérogènes, ayant des capacités de résolution de problèmes et capables d'interagir afin d'atteindre un but global. En effet, pour atteindre

leurs objectifs dans un SMA, les agents peuvent adopter plusieurs mécanismes d'interaction, notamment la coopération, la coordination et la négociation. Chaib-draa et al. (2001) définissent un système multi-agents (SMA) comme étant un système distribué, composé d'un ensemble d'agents interagissant entre eux selon des modes de coopération, de concurrence ou de coexistence.

5.2.3. Mécanismes d'interaction inter-agents

Coopération entre agents

La coopération est une des principales caractéristiques des SMA. Elle consiste en une participation de plusieurs agents dans une activité, dans le but d'atteindre un objectif commun (Wooldridge 2002; Chaib-draa et al. 2001). Elle peut se faire à travers deux modèles : coopération par partages de tâches ou coopération par partages de résultats (Wooldridge 2002).

La coopération par partage de tâches consiste en une décomposition du problème principal en un ensemble de sous-problèmes moins complexes, puis en la répartition de ces sous-problèmes entre les différents agents. Cette allocation se fait généralement par des mécanismes d'appels d'offres tel que le Contract Net (Smith 1980, Wooldridge 2002) ou directement par un agent supérieur qui maîtrise les compétences de chacun des agents du système.

Par ailleurs, la coopération par partage de résultats implique un partage des informations liées aux sous-problèmes. Ce partage d'information peut se faire d'une manière proactive (un agent qui envoie des informations à un autre en croyant que cela peut lui être utile) ou d'une manière réactive (un agent qui envoie des informations en réponse à une requête qui lui a été adressée).

Coordination des agents

La coordination porte sur l'organisation des activités des agents de manière à prévenir l'anarchie et le chaos et à exploiter les interactions bénéfiques (Nwana et al. 1996, Chaib-draa et al. 2001). Parmi les principales approches utilisées pour coordonner les activités

d'agents, on trouve la coordination par « *planification partielle globale* » (PGP : Partial Global Planning) et la coordination par intentions communes (Wooldridge 2002).

Dans la coordination par planification partielle globale, chaque agent génère des plans à court terme qui indiquent les actions futures à entreprendre pour atteindre ses objectifs. Ces plans sont partagés entre les agents dans le but d'identifier les améliorations potentielles à apporter à la coordination et ainsi d'éviter des actions inconsistantes ou contradictoires. En cas de nécessité, ces plans locaux peuvent être modifiés.

Dans le cas de la coordination par intentions communes, les SMA sont considérés comme une équipe de travail dont les membres peuvent générer une intention commune d'exécuter une activité commune.

Négociation entre agents

La négociation est un processus itératif correspondant au dialogue entre agents pour concilier des points de vue ou des intérêts divergents et pour atteindre un compromis sur la manière dont les agents doivent agir ensemble. Wooldridge (2002) définit ce processus à travers quatre composantes : (i) un ensemble de négociations, en d'autres termes, un ensemble de propositions que les agents peuvent manipuler; (ii) un protocole d'actions possibles ; (iii) un ensemble de stratégies spécifiques à chacun des agents et ; (iv) une règle qui précise l'atteinte de l'accord ou à défaut l'expiration du temps.

Les agents peuvent négocier par l'intermédiaire d'un médiateur (Sycara 1989) ou directement (Wooldridge 2002). Dans ce dernier cas, on peut avoir des négociations de type un-à-un, un à plusieurs ou plusieurs à plusieurs.

Communication entre agents

Pour échanger les informations durant les différents processus d'interaction, les agents se basent sur des protocoles de communication. En effet, la communication est une des bases de la résolution coopérative des problèmes. Il existe deux principaux modes de communication : la communication par échange direct de messages ou la communication

par partage d'informations via une structure d'information partagée telle que l'architecture par tableau noir (Blackboard) (Engelmore et Morgan 1988).

Plusieurs langages ont été développés pour favoriser les communications inter-agents. Les langages les plus utilisés sont : KIF (Knowledge Interchange Format), ACL (Agent Communication Language) et KQML (Knowledge Query and Manipulation Language) (Wooldridge 2002)

Grâce à cet ensemble de caractéristiques, les systèmes multi-agents constituent un apport considérable dans les domaines de modélisation et de contrôle des systèmes de production. Ils permettent l'élaboration de modèles d'architecture qui encapsulent les caractéristiques cognitives et décisionnelles d'entités hétérogènes et complexes. En effet, les systèmes multi-agent sont reconnus pour leurs capacités d'intégration, de réactivité, de flexibilité et d'autonomie. Ils semblent être appropriés pour des applications distribuées, complexes et hautement dynamiques, surtout pour celles dont l'interaction entre les composants est importante.

Plusieurs travaux de recherche ont eu recours aux systèmes multi-agents pour la modélisation et la résolution de problèmes liés aux systèmes de production (Pan et Tenenbaum 1991 ; Lin et Solberg 1992 ; Fox et al 1993 ; Liu et Sycara 1997 ; Brugali et al 1998 ; Miyashita 1998 ; Shen et Norrie 1999 ; McDonnell et al. 1999; Cloutier 1999 ; Caridi et Sianesi 2000 ; Montreuil et al. 2000 ; Parunak et al. 2001 ; Frayret et al. 2001). Généralement, les architectures de systèmes multi-agents proposées sont composées d'agents autonomes qui résolvent des sous-problèmes localement, coopèrent ou coordonnent leurs actions afin de produire une solution globale du problème.

Dans ce qui suit, nous exposerons plusieurs exemples d'applications des systèmes multi-agents dans le contexte de systèmes de production.

5.2.4. Applications des SMA dans les systèmes de production

Dans le but de faire face à la complexité des problèmes liés à l'intégration des activités des entreprises et à la gestion de la production, plusieurs travaux ont élaboré des approches de modélisation et de résolution à base d'agents (Pan et Tenenbaum 1991 ; Lin

et Solberg 1992 ; Fox et al 1993 ; Liu et Sycara 1997 ; Brugali et al 1998 ; Miyashita 1998 ; Shen et Norrie 1999 ; McDonnell et al. 1999; Cloutier 1999 ; Caridi et Sianesi 2000 ; Montreuil et al. 2000 ; Parunak et al. 2001 ; Frayret et al. 2001). Dans ces travaux, le comportement émergeant de la société d’agents permet de résoudre des problèmes liés par exemple à la planification et à l’ordonnancement des opérations, au pilotage de systèmes de production ou à l’intégration des centres d’activités au sein d’une entreprise.

Nous estimons que les approches des SMA proposées dans le domaine de la production peuvent être analysées selon deux dimensions. La première dimension porte sur les rôles joués par les agents et sur les ressources qu’ils encapsulent. La deuxième dimension est liée à la structure de contrôle du réseau d’agents utilisée.

Dimension 1	Entité encapsulée par l’agent	1. Encapsulation de ressources physiques 2. Encapsulation d’entités externes 3. Encapsulation fonctionnelle 4. Encapsulation d’entités informationnelles ou transactionnelles
Dimension 2	Structure de contrôle dans le réseau d’agents	1. Structure hiérarchique 2. Structure avec agents intermédiaires 3. Structure hétéroarchique.

5.2.4.1. Classification des applications SMA en fonction du rôle encapsulé par les agents

Dans un système multi-agents, chaque agent exerce une influence totale ou partielle sur une partie de son environnement, appelée « sphère d’influence » (Wooldridge 2002). Cette influence dépend principalement de la nature des compétences, des fonctions ou des entités encapsulées par cet agent.

Dans la littérature, on distingue plusieurs approches d’encapsulation possibles. Shen et Norrie (1999) ont proposé une classification de ces approches en deux classes : approche fonctionnelle et approche de décomposition physique. Cloutier (1999) propose une classification en trois classes : l’approche fonctionnelle, l’approche agent-processeur et l’approche tout-agent.

Nous considérons que ces deux classifications présentent un niveau élevé d’abstraction, car elles ne permettent pas de refléter, avec précision, certaines entités clés dans le

domaine manufacturier tel que les entités externes à l'entreprise ou bien les éléments informationnels ou transactionnels.

Dans cette synthèse, nous adaptons ces classifications pour proposer une typologie d'encapsulation en quatre classes : l'encapsulation de ressources physiques, l'encapsulation d'entités externes, l'encapsulation d'entités informationnelles ou transactionnelles et l'encapsulation fonctionnelle.

Encapsulation de ressources physiques

Dans cette catégorie d'encapsulation, les agents sont utilisés pour modéliser les ressources physiques qui interviennent dans un processus de production, tels que : les ressources humaines, les machines, les postes de travail, les matières premières, les produits semi-finis, etc. Dans ce cas, l'agent reflète les caractéristiques, le comportement et l'état interne liés à la ressource qu'il représente.

Parunak et al. (2001) présentent une approche basée sur l'utilisation des agents autonomes pour la conception et le développement de systèmes de planification et d'ordonnancement manufacturier. Cette approche est proposée dans le cadre du projet AARIA (Autonomous Agents at Rock Island Arsenal). Les auteurs définissent deux catégories d'agents :

- La première catégorie est celle des « agents persistants » dont le comportement est stable dans le temps. Elle est constituée de trois types d'agents. Premièrement, l'agent-pièce qui représente l'ensemble des informations liées à une pièce de production. Deuxièmement, l'agent-ressource, représentant une ressource physique du système et reflétant l'état de cette ressource, son historique ainsi que l'état de ses engagements. Troisièmement, l'agent-processus est responsable de la gestion des ressources nécessaires à l'exécution d'un processus donné.
- La deuxième catégorie est celle des « agents transitoires » qui servent à modéliser les interactions entre les trois agents persistants. Les agents transitoires représentent les engagements, les matériaux, les produits et les opérations.

Chaque agent transitoire est caractérisé par un cycle de vie en six étapes : investigation, accord, confirmation, disponibilité, activation et archivage.

Duffie et Piper (1986) ont proposé une approche basée sur des agents pour le contrôle de cellules manufacturières flexibles. Dans cette approche, les pièces, les stations de travail et le robot de transport sont représentés par des agents autonomes qui coopèrent et négocient entre eux pour atteindre les objectifs de la production.

Lin et Solberg (1992) ont proposé un cadre conceptuel pour le contrôle de systèmes manufacturiers. Ce cadre conceptuel est fondé sur l'utilisation de six types d'agents, dont des agents-pièces et des agents-ressources. L'agent-pièce est chargé du contrôle de la pièce et de son cycle de vie dans le système. Il doit négocier, en plusieurs étapes, avec les agents-ressources afin de sélectionner les ressources les plus appropriées à la production.

Par ailleurs, ce type d'encapsulation a été adopté par plusieurs travaux qui s'intéressent à la planification et à l'ordonnancement manufacturier dont, entre autres ceux de Liu et Sycara (1997), McDonnell et al. (1999), ainsi que Caridi et Sianesi (2000).

Encapsulation d'entités externes

Dans ce type d'encapsulation, on retrouve les agents qui représentent des entités externes à l'entreprise, mais qui font partie de son milieu d'interaction, tels que les sous-traitants les fournisseurs ou les clients.

Brugali et al (1998) ont utilisé cette approche pour l'intégration des activités de chaînes logistiques. Ils se sont intéressés au cas de l'entreprise virtuelle. L'approche de SMA proposée consiste en une transmission de la commande de produits par l'entreprise acheteuse via un agent mobile jouant le rôle d'intermédiaire. Cet agent mobile se déplace vers le serveur du fournisseur. Il transmet la commande à un agent statique (Supplier Factory Agent) pour le traitement des données et ensuite il informe le client de l'état de sa commande. Ces agents statiques reflètent les entités externes à l'entreprise. Chacun d'eux encapsule le modèle d'affaires, le modèle informationnel et le modèle de gestion des produits de l'entreprise qu'il représente.

Encapsulation fonctionnelle

L'encapsulation fonctionnelle désigne le cas où un agent est chargé d'accomplir une fonction bien précise dans le système. Les fonctions les plus souvent encapsulées par les agents sont : la planification, l'ordonnancement, le contrôle et le pilotage.

Fox et al. (1993) ont avancé l'idée d'une organisation de la chaîne logistique en un réseau d'agents intelligents qui collaborent entre eux pour atteindre les objectifs globaux du système. Ils ont suggéré un cadre conceptuel à base d'agents, dont chacun est responsable d'une ou plusieurs activités de la chaîne. Les auteurs ont proposé deux types d'agents : des agents informationnels et des agents fonctionnels. Ces derniers sont responsables de la planification et du contrôle. Les principaux agents de cette approche sont :

- Agent d'acquisition des commandes : responsable de la négociation des commandes des clients.
- Agent de logistique : responsable de la coordination entre les centres de production, les fournisseurs et les centres de distribution dans le but de livrer la commande en respectant les dates limites tout en minimisant les coûts.
- Agent de transport : responsable de la gestion et planification des ressources de transport.
- Agent d'ordonnancement : responsable de l'ordonnancement et du ré-ordonnancement des activités pour les usines.
- Agent ressource : responsable de la gestion des achats et des stocks.
- Agent de diffusion : responsable de la diffusion des commandes et des fonctions de contrôle tel qu'indiquées par l'agent d'ordonnancement.

Lefrançois et Montreuil (1993) ont proposé une approche conceptuelle à base d'agents pour les processus décisionnels de pilotage et de contrôle de système manufacturier. Ils se sont basés sur l'utilisation d'un agent générique nommé « organisme » afin d'élaborer des modèles représentatifs des entités manufacturières. Ainsi, selon le niveau d'abstraction choisi pour la modélisation du système manufacturier, chaque entité de simulation hérite des propriétés et des méthodes d'un organisme-parent. Deux catégories d'organismes sont proposées pour la modélisation du système manufacturier : les organismes intelligents et les

organismes non intelligents. La première catégorie est utilisée afin de représenter des activités de prise de décision tel que l'ordonnancement ou la planification alors que la deuxième catégorie représente les ressources physiques comme les machines ou les véhicules. Ces organismes coopèrent et interagissent entre eux afin de décider des actions à mettre en œuvre tenant compte des objectifs de planification et des changements d'état du système.

Miyashita (1998) propose une structure hiérarchique d'agents fonctionnels pour la planification et l'ordonnancement de système manufacturier. L'architecture proposée est constituée de trois types d'agents : un agent gestionnaire qui supervise l'ensemble du système, des agents d'ordonnancement et des agents planificateurs.

D'autres auteurs ont aussi adopté cette approche d'encapsulation dont, entre autres Barber et al. (1998), Sikora et Shaw (1998), ainsi que Kutanoglu et Wu (1999).

Encapsulation d'entités informationnelles ou transactionnelles

Dans cette catégorie d'encapsulation, les agents sont associés à des entités informationnelles ou transactionnelles du système de production telles que les commandes, les bases de données, les factures ou les messages de notification.

Dans l'approche proposée par Fox et al (1993), les agents informationnels ont pour rôle de collecter et de diffuser les informations auprès des autres agents selon le contenu de l'information et des intérêts de chaque agent. Brugali et al (1998) proposent une approche basée sur l'utilisation de la technologie des agents mobiles pour l'intégration et l'implantation des réseaux de chaînes logistiques. Ils ont défini des agents voyageurs qui sont capables de se déplacer entre les entreprises. Ces agents servent à placer des commandes, à transmettre des informations liées à une requête ou à un produit spécifique ou pour notifier le client d'un événement donné.

En ce qui concerne l'ordonnancement et le contrôle manufacturier, Hadavi et al. (1992) ont décrit une architecture basée sur l'utilisation de six agents dont une partie est responsable de la communication et des échanges d'informations dans le système. Les autres sont des agents fonctionnels chargés de l'ordonnancement. Parmi les agents de

communication proposés, on retrouve un agent collecteur de données, pour l'encapsulation et le contrôle de données, ainsi qu'un un agent de traitement de commandes pour l'encapsulation de commandes. Valckenaers et al. (1999) ont également conceptualisé un agent de commande associé à un produit dont il garde les informations.

Lin et Solberg (1992) ont proposé une architecture de SMA avec des agents qui encapsulent la base de données du système manufacturier. Dans le même ordre d'idées, Lefrançois et al. (1996) ont présenté une approche à base d'agents pour l'élaboration de systèmes d'information dans un contexte manufacturier. Ils ont proposé une architecture générique de système d'information qui consiste en un ensemble de quatre groupes d'agents : (1) des agents de planification et de contrôle du système qui communiquent entre eux grâce à une architecture par tableau noir, (2) des agents conducteurs qui sont des agents de liaison par transfert de messages entre le réseau constitué d'agents de planification & contrôle et d'autres agents externes qui représentent par exemple des clients ou des serveurs spécialisés, (3) des agents intelligents d'interface homme-machine, et (4) des agents de gestion de données. Les auteurs ont démontré la flexibilité de cette approche grâce à l'illustration de deux exemples de modèles de contrôles : contrôle hiérarchique vs contrôle par objet.

5.2.4.2. Classification des applications des SMA selon la structure de contrôle

Au niveau de la structure de contrôle du réseau d'agents, on distingue trois types de mécanismes de contrôle : mécanismes hiérarchiques, mécanismes avec agents intermédiaires et mécanismes hétérarchiques.

Structure de contrôle hiérarchique

Dans le cas d'un système multi-agents structuré hiérarchiquement, un ou plusieurs agents contrôlent l'ensemble des activités des autres agents qui sont peu autonomes et peu collaboratifs entre eux.

Parunak (1987) a proposé un système de contrôle manufacturier appelé YAMS (Yet Another Manufacturing System). Dans ce système, chaque usine et chaque composante manufacturière sont représentées par un agent. L'entreprise manufacturière est modélisée

comme une structure hiérarchique de cellules de travail ou de groupes fonctionnels de machines. Cette structure hiérarchique est constituée d'un ensemble de nœuds-parents et de nœuds-enfants. Chaque nœud est un composant pour son parent et un composé de ses enfants. Il est capable de communiquer uniquement avec ses enfants, son parent ou les nœuds du même niveau hiérarchique et ce, en utilisant le protocole Contract-Net.

Fischer (1994) a proposé une structure hiérarchique de planification et de contrôle manufacturier. Cette structure est composée de six couches : la couche du système de planification et de contrôle de la production, la couche du système de contrôle de l'atelier, la couche de coordination de tâches, la couche de planification de tâches, la couche d'exécution de tâches et la couche de contrôle de machines.

Burke et Prosser (1994) ont offert une architecture distribuée pour les systèmes d'ordonnancement appelée DAS (Distributed Asynchronous Scheduler). Le système d'ordonnancement est décomposé et distribué à travers trois niveaux hiérarchiques : niveau stratégique, niveau tactique et niveau opérationnel. À chacun de ces niveaux, on associe un type d'agents. Les agents-opérationnels sont responsables de la gestion des ressources et des machines. L'agent-tactique est chargé de la supervision de ses agents-opérationnels. L'agent-stratégique est responsable de gérer l'ensemble du processus d'ordonnancement. La communication entre ces trois types d'agents se fait d'une manière hiérarchique. Elle se fait entre un agent-stratégique et un agent-tactique ou entre un agent-tactique et un agent-opérationnel. Dans ce cas, aucune communication n'est possible entre les agents du même niveau et en cas de problème chaque agent doit aviser son agent supérieur.

Structure de contrôle avec agents intermédiaires

Dans une structure dotée d'agents intermédiaires, un ou plusieurs agents jouent le rôle de médiateurs pour atteindre un certain niveau de collaboration ou de coordination entre les autres agents. Selon Maturana et Norrie (1997) de telles structures de contrôle permettent l'élaboration de systèmes manufacturiers à la fois souples, évolutifs et faciles à reconfigurer. Ils proposent une architecture générique d'agents médiateurs pour l'ordonnancement dynamique des systèmes manufacturiers. Ils définissent deux

catégories d'agents médiateurs : médiateurs statiques et médiateurs dynamiques. Le médiateur statique possède une représentation des états des différents acteurs intervenant dans le système de production. Pour accomplir les tâches nécessaires à la production manufacturière, cet agent commence par les décomposer en des activités élémentaires. Par la suite, il sollicite les services des autres agents en utilisant le protocole Contract-Net. Après réception et analyse des offres des différents agents, des équipes virtuelles de travail sont constituées (selon les compétences et les disponibilités de chaque agent) et des agents médiateurs-dynamiques sont créés par clonage. Ils ont pour rôle de coordonner les activités inter-agents au niveau des équipes virtuelles. Chaque équipe virtuelle de travail est rattachée à un agent-ressource qui a pour rôle de coordonner et d'affecter les ressources physiques et informationnelles entre les agents selon les besoins et les priorités des tâches. Les équipes virtuelles de travail et les agents de médiation créés dynamiquement ont un cycle de vie limité. Ils sont modifiés en cas de besoins et supprimés à la fin de leur mission.

Dans le cadre du projet Netman, qui porte sur l'élaboration d'un cadre conceptuel de collaboration et de coordination multi-agents dans un contexte de réseaux manufacturier, un agent intermédiaire a été proposé. L'agent nommé ACTEL (Agent de coordination des transactions électroniques) a pour rôle de coordonner les différentes interactions entre son unité de travail et les autres entités d'affaire internes ou externes de l'organisation et ce, à travers des transactions électroniques. Cette coordination est basée sur les principes de contrat et d'accords qui définissent les relations entre des agents partageant un ensemble de conventions (Cloutier 1999; Montreuil et al. 2000; Frayret et al. 2001; Cloutier et al. 2001).

Structure de contrôle hétérarchique

Le troisième mécanisme est celui de l'approche hétérarchique. Dans ce cas, les agents sont totalement autonomes, collaboratifs et responsables de leurs décisions et de la gestion de leurs ressources.

Lin et Solberg (1992) présentent une structure hétérarchique pour le contrôle d'ateliers de fabrication. Cette structure est basée sur six types d'agents. Pour atteindre les objectifs du

système de production, ces agents ont recours à la négociation. Notamment, pour définir les affectations des ressources et pour sélectionner les opérations à effectuer. Le mécanisme de négociation utilisé est semblable à Contract-Net. Chaque agent qui participe à une négociation essaie de maximiser ses profits en vendant ses services.

Netman propose une approche hétérarchique pour la planification et la conduite des systèmes manufacturiers structurés en réseau (Cloutier 1999; Montreuil et al. 2000; Frayret et al. 2001; Cloutier et al. 2001). Cette approche est basée sur un ensemble d'unités autonomes, appelées centres Netman. Ces centres sont des entités d'affaires élémentaires interconnectées à travers des relations de collaboration. Les transactions entre les centres sont basées sur des relations du type client-fournisseur (gagnant-gagnant). Pour garantir un processus flexible de coordination et d'échange d'informations entre les centres Netman, Cloutier (1999) et Cloutier et al (2001) proposent un cadre de coordination appelé CAT à partir de la théorie des systèmes multi-agents et sur la théorie des contrats. Ce cadre de coordination se base sur trois concepts : convention, accord et transaction.

5.3. La théorie des jeux

Nous présentons dans cette section de la revue de littérature les principaux concepts de la solution retenue comme mécanisme d'interaction et de négociation pour notre système multi-agents. Il s'agit de la théorie du jeu coopératif avec utilité transférable, laquelle est une branche de la théorie des jeux à n-personnes.

Après un rappel de la définition de la théorie des jeux, nous introduisons les notions reliées à la typologie des jeux. Une place privilégiée est consacrée à l'étude du cas des jeux visant à l'élaboration des coalitions entre les joueurs. En effet, dans notre conceptualisation de la méthode de résolution à base d'agents pour le problème d'ordonnancement du personnel, nous considérons que chaque agent, qui représente un opérateur dans le système d'assemblage, détient un vecteur d'activités d'assemblage à accomplir. Les agents-employés cherchent à former des coalitions pour échanger ces activités afin d'augmenter leurs gains individuels et d'améliorer la solution globale

d'allocation des tâches. Ainsi, le principal choix d'un agent dans une telle situation est celui de la coalition à intégrer.

Pour tester l'équilibre de coalitions entre les agents, nous nous basons sur le concept de stabilité de la coalition. On parle de stabilité de la coalition ou du jeu lorsqu'aucun joueur n'a intérêt à se retirer de la coalition. Pour cela la coalition doit lui assurer un gain au moins égal ou supérieur à ce qu'il peut obtenir en restant seul. En particulier, il est question dans ce travail, du concept d'équilibre du Kernel (*The Kernel based stability*) (Davis & Maschler, 1965 ; Rapoport, 1970 ; Klusch & Shehory 1996 ; Shehory & Kraus, 1999) qui fournit une méthode pour tester la stabilité d'une configuration de coalitions, étant donné un vecteur de profits.

5.3.1. Définition et classification épistémologique de la théorie des jeux

Selon Binmore (1991)⁵, « *La théorie des jeux est une théorie mathématique qui étudie les interactions entre deux ou plusieurs protagonistes ayant des objectifs distincts* ». Rapoport (1969) définit la théorie des jeux comme étant une des branches des mathématiques qui traite des problèmes de décision en situation de conflit. Le problème de décision désigne une situation dans laquelle deux joueurs ou plus doivent réaliser un choix parmi un ensemble d'actions possibles en tenant compte des conséquences qui en résulteront. Les résultats de ces choix représentent une solution du jeu à laquelle est associé un profit pour chacun des joueurs. Un tel problème n'a de sens que dans la mesure où celui qui choisit a des préférences. De plus, pour parler d'une situation de jeu, il faut qu'il y ait une interaction entre les décisions des joueurs. Ainsi, les résultats du jeu ne dépendent pas de la décision d'un seul joueur, mais de l'interférence des décisions de l'ensemble des joueurs.

D'un point de vue épistémologique, on peut identifier trois courants de pensée distincts qui portent sur le rôle et le positionnement de la théorie des jeux dans la recherche scientifique. La question de divergence des théoriciens, appartenant à ces courants, est la suivante : « la théorie des jeux traite-t-elle de ce qui est ou de ce qui doit être ? ».

⁵ Cité par Wooldridge, (2001, p 10)

L'absence d'un consensus pour répondre à cette question donne lieu à la coexistence des théories suivantes : la théorie normative, la théorie descriptive et la théorie prescriptive (Luce & Rai, 1989 ; Van Damme, 1999 ; Bell et al., 1988).

L'approche normative de la théorie des jeux porte sur l'analyse des conséquences et des répercussions du comportement stratégique des joueurs qui sont considérées comme étant rationnels (Van Damme, 1999). Le but est de fournir à ces joueurs des outils et des démarches qui leur seront utiles dans leurs processus de prise de décision. D'après Van Damme (1995), « *La Théorie des Jeux est une théorie normative. Elle vise à préconiser ce que devrait faire chaque joueur afin de servir de façon optimale ses intérêts* ». En revanche, dans l'approche descriptive, la théorie des jeux a pour principal but de rendre compte de ce qu'on observe dans le monde économique. Elle vise à décrire et à expliquer les comportements décisionnels des joueurs dans des cas réels et bien définis. Selon Kreps (1990), « l'objet de la théorie des jeux est d'aider les économistes à comprendre et à prédire ce qui se produit dans différentes situations économiques ».

Enfin, l'approche prescriptive constitue une synthèse des approches normatives et descriptives dans la mesure où elle considère que la théorie des jeux doit se baser sur des données empiriques observées dans des situations décisionnelles réelles, auxquelles on applique la rationalité de l'approche normative (Van Damme, 1999). Cette approche vise d'une part, à anticiper et à expliquer le comportement des joueurs en supposant qu'ils agissent rationnellement et d'autre part, à prescrire les protocoles et les stratégies qui orienteront les joueurs dans leurs prises de décisions.

Notre travail de recherche s'inscrit dans l'approche normative de la théorie des jeux. Nous développons des agents intelligents fortement rationnels qui sont dotés du même modèle de rationalité. Leur objectif est d'analyser un ensemble de situations et de réaliser des choix liés à la constitution d'éventuelles coalitions afin d'échanger entre eux, de manière optimale, les activités d'assemblage planifiées par le système de production tout en maximisant leurs degrés de satisfaction.

5.3.2. Taxonomie du jeu

Dépendamment du contexte d'étude, un jeu peut être classé selon plusieurs dimensions qui permettent de décrire l'environnement dans lequel évoluent les joueurs ainsi que les règles prédéterminées qui régissent leurs interactions. Les dimensions les plus importantes dans la littérature sont les suivantes :

1. Jeux à information complète ou à information incomplète (Rasmusen, 1989; Friedman, 1990).
2. Jeux à information parfaite ou à information imparfaite (Rasmusen, 1989; Friedman, 1990).
3. Jeux coopératifs ou non-coopératifs (Friedman, 1990).
4. Jeux à 2-joueurs ou Jeux à n-joueurs (Rapoport, 1970 & 1969).

Généralement, les jeux se distinguent selon que l'information est complète ou incomplète. On parle de jeu à information complète si les joueurs ont une connaissance totale du jeu et de sa structure. Dans ce cas, chaque joueur connaît l'ensemble des choix qui s'offrent à lui et aux autres joueurs, leurs conséquences, ainsi que les profits qui y sont associés. Dans le cas contraire, le jeu est dit à information incomplète. Ainsi, par exemple, le jeu d'échec est à information complète, alors que le Bridge est un jeu à information incomplète.

Toujours selon la dimension informationnelle, on distingue les jeux selon que l'information est parfaite ou imparfaite. Un jeu est défini comme étant à information parfaite lorsque chaque joueur a une connaissance parfaite de l'ensemble des décisions prises antérieurement par les autres participants. On parle de jeu à information imparfaite si un ou plusieurs joueurs ne connaissent pas, lors de leurs prises de décisions, ce que les autres joueurs ont choisi. Ce cas se manifeste, par exemple, lorsque les joueurs doivent miser simultanément sans savoir ce que misent les autres.

Par ailleurs, la théorie des jeux est répartie en deux principales catégories : jeu non-coopératif et jeu coopératif. Dans le premier cas, les joueurs sont en conflit et ne collaborent pas entre eux. Leurs raisonnements se basent uniquement sur les concepts de la rationalité économique. Chaque joueur cherche à prendre la meilleure décision qui maximise son gain ou concrétise ses objectifs individuels.

Dans le deuxième cas, les joueurs ont la possibilité de communiquer entre eux. Leurs objectifs sont d'établir des ententes, de coordonner leurs stratégies afin d'optimiser leur bien-être collectif, et de trouver des mécanismes de répartition de la richesse collective basés sur des propriétés telle que l'équité, l'altruisme, etc. Dans ce cadre de jeu, les joueurs peuvent former des coalitions entre eux. Les coalitions génèrent des profits qui résultent de la coopération de leurs membres. En plus, on distingue deux classes de coalitions, à savoir : la coalition avec utilité transférable et la coalition avec utilité non transférable. Pour une coalition avec utilité transférable, il est permis d'additionner les utilités des joueurs et de les redistribuer à ses membres. Chaque joueur reçoit une part proportionnelle au rôle qu'il joue dans la création de la valeur de la coalition. Cela suppose l'existence d'une unité monétaire ou d'une utilité commune à tous les participants avec laquelle on peut effectuer des transferts de gains (Friedman, 1990).

Les jeux peuvent être classés aussi selon le nombre de joueurs participant au jeu. On distingue le jeu à 2-personnes du jeu à n-personnes. Même si le jeu à 2-personnes peut être considéré comme étant un cas particulier du jeu à plusieurs personnes ($n=2$), les méthodes de résolution appliquées à ces deux cas sont différentes (Rapoport, 1970). Par exemple, dans le cas des jeux coopératifs à n-personnes, une des solutions possibles consiste en une élaboration de coalitions entre deux ou plusieurs joueurs. Cette technique ne s'applique pas pour le cas d'un jeu à 2-personnes.

Dans le présent travail, nous nous intéressons surtout aux jeux coopératifs à n-personnes avec utilité transférable. Dans ce qui suit, nous définissons plus formellement ce type de jeux, de même que le concept d'équilibre que nous utiliserons.

5.3.3. Jeux coopératifs : cas de coalitions

5.3.3.1. Définition de la coalition

Une coalition est définie comme étant un groupe d'agents ayant décidé de coopérer afin d'accomplir des tâches communes tout en prédéfinissant la stratégie de distribution des bénéfices et des gains générés par leur alliance. Généralement, un agent accepte de former une coalition avec les autres uniquement dans le but de maximiser son propre gain. La formation de coalitions est un cas particulier de jeu coopératif (Zhou 1994).

Plus formellement, une coalition est définie par le couple (N, v) . $N = \{1, 2, \dots, n\}$ désigne l'ensemble de tous les agents participant à un jeu à n -personnes. Dans ce cas, tout sous-ensemble N_c de N est appelé une coalition. v désigne la fonction caractéristique qui associe à toute coalition de N une valeur exprimant le gain maximal espéré. Cette fonction est aussi appelée : valeur de la coalition (Shehory & Kraus, 1999 ; Klusch & Shehory, 1996). Dans le cas d'une coalition composée d'un seul agent a_i , la valeur de cette fonction est notée : $v\{a_i\}$. Pour une coalition de trois agents a_i ; a_j et a_k , la valeur de la coalition est notée : $v\{a_i, a_j, a_k\}$.

Généralement, on suppose que la fonction caractéristique d'un jeu de coalition satisfait les deux conditions suivantes (Klusch & Shehory, 1996):

- a. La coalition vide ne génère aucun gain, ce qui signifie que $v(\emptyset) = 0$.
- b. La condition exprimant la super-additivité de la fonction v est une condition minimale pour que les personnes aient intérêt à intégrer la coalition. Elle signifie que si deux coalitions disjointes s'unissent, elles génèrent un gain au moins égal ou supérieur à celui obtenu dans le cas où elles demeurent seules i.e. $v(C_1 \cup C_2) \geq v(C_1) + v(C_2)$ où C_1 et C_2 sont deux coalitions disjointes ($C_1 \cap C_2 = \emptyset$).

Dans le même ordre d'idées, Klusch & Gerber (2002) introduisent les notions de configuration de coalitions et de configuration de profits.

La solution d'un jeu coopératif avec utilité transférable est une configuration de coalitions $CS=(C_1, \dots, C_m)$ qui est définie comme étant une partition de l'ensemble des

joueurs N en coalitions (Klusch & Gerber, 2002). Chaque ensemble C_k est non-vide, $C_j \cap C_k = \emptyset \quad \forall j, k \in \{1, \dots, m\}$ avec $j \neq k$, et $\bigcup_{k \in \{1, \dots, m\}} C_k = N$. Par exemple, dans un système composé de trois joueurs $\{a_1, a_2, a_3\}$, il existe sept coalitions possibles : $\{a_1\}$, $\{a_2\}$, $\{a_3\}$, $\{a_1, a_2\}$, $\{a_1, a_3\}$, $\{a_2, a_3\}$, $\{a_1, a_2, a_3\}$ et cinq configurations de coalitions faisables : $\{\{a_1, a_2, a_3\}\}$, $\{\{a_1\}, \{a_2, a_3\}\}$, $\{\{a_2\}, \{a_1, a_3\}\}$, $\{\{a_3\}, \{a_1, a_2\}\}$, $\{\{a_1\}, \{a_2\}, \{a_3\}\}$.

Une configuration de profits $PC = (u, CS)$ pour une configuration de coalitions CS consiste en une distribution des valeurs de coalitions entre leurs membres : $(u_1, \dots, u_n; C_1, \dots, C_m)$, avec $u_i \equiv u(\{a_i\})$ et $\sum_{i \in C_k} u_i = v(C_k)$.

Dans un jeu de formation de coalitions, les joueurs sont confrontés à deux problèmes :

1. Quelle coalition choisir ou bien quelle configuration de coalitions adopter parmi toutes celles possibles ?
2. Comment choisir le mode de distribution des profits générés par les coalitions entre les agents-partenaires ?

En ce qui concerne la première question, deux concepts sont généralement utilisés par les agents dans leur processus décisionnel : le concept de rationalité individuelle et le concept de dominance.

Par ailleurs, pour la répartition des profits, plusieurs approches ont été proposées dans la littérature, notamment celles qui portent sur la stabilité de coalitions telles : le cœur (*the Core*) (Gillies 1953), la solution de Von Neumann et Morgenstern (1974), l'ensemble de marchandage (*the Bargaining Set*) (Aumann & Maschler, 1964), la valeur de Shapley (*the Shapley Value*) (Shapley 1953) et le Kernel (*the Kernel*) (Davis & Maschler, 1965 ; Rapoport, 1970 ; Friedman, 1990). Nous centrons notre recherche sur le concept du Kernel comme solution pour la division du gain entre les joueurs d'une même coalition.

Afin de mieux cerner les différents concepts liés au jeu de formation de coalitions qui sont utilisés dans cette recherche, nous proposons ci-dessous un ensemble de définitions de ces concepts recueillies dans la littérature.

5.3.3.2. Formation de coalitions : concept de la rationalité individuelle

Dans un problème de formation de coalitions, le concept de la rationalité individuelle est habituellement tenu pour acquis. Il se traduit par le fait qu'un agent n'accepterait de se joindre à une coalition que si le profit u_i qu'il obtiendrait au sein de cette coalition serait supérieur à celui qu'il obtiendrait en restant seul : $\forall a_i \in N, u_i \geq v(\{a_i\})$ (Rapoport, 1970 ; Shehory & Kraus, 1999).

5.3.3.3. Choix de la configuration de coalitions : critère de Pareto-dominance

D'un point de vue collectif, et face à un choix entre deux ou plusieurs configurations de coalitions possibles, le critère de Pareto-dominance (Shehory & Kraus, 1999) nous semble le plus pertinent pour chercher la configuration préférée des joueurs. Dans la littérature, on trouve d'autres critères de dominance, notamment le critère de risque-dominance (Harsanyi & Selten, 1988) qui repose sur l'idée selon laquelle chaque joueur aura tendance à opter pour les stratégies qui lui assurent une dépendance minimale du choix des autres joueurs.

Selon le critère de Pareto-dominance, une configuration de coalitions CS1 domine une autre configuration CS2 si et seulement si tous les joueurs ont une utilité dans la configuration CS1 égale ou supérieure à celle obtenue dans la configuration CS2 et si au moins un joueur i reçoit dans CS1 une utilité strictement supérieure à celle qu'il aurait dans CS2. Formellement, cela se traduit de la façon suivante : CS1 avec la configuration de profits $\langle u_1^1, u_2^1, \dots, u_n^1 \rangle$ domine CS2 avec la configuration de profits $\langle u_1^2, u_2^2, \dots, u_n^2 \rangle$ ssi : $\forall 1 \leq i \leq n : u_i^1 \geq u_i^2 \wedge \exists i : u_i^1 > u_i^2$ (Shehory & Kraus, 1999). Une configuration de coalitions est dite Pareto-optimale si elle n'est dominée par aucune autre configuration.

Par ailleurs, dans le but de comparer les utilités que peut obtenir chaque agent dans d'éventuelles coalitions, il est nécessaire de déterminer au préalable les valeurs de ces utilités. Dans cette perspective, nous décrivons à la section suivante l'approche du Kernel

introduite par Davis & Maschler (1965), qui permet la répartition de la fonction « valeur de la coalition » entre les joueurs afin que les coalitions obtenues soient stables.

5.3.3.4. Le Kernel : une solution pour la stabilité des coalitions

Le Kernel est un concept de stabilité pour les configurations de coalitions (Davis et Maschler, 1965 ; Rapoport, 1970 ; Klusch & Shehory 1996 ; Shehory & Kraus, 1999). Le Kernel en soit n'est pas un algorithme de formation de coalition, mais plutôt une étape à incorporer dans l'algorithme qui permet, étant donné une éventuelle configuration de coalitions et une distribution du profit liée à cette dernière, de tester la stabilité des coalitions. En effet, pour chaque configuration de coalitions possible, le Kernel permet d'avoir une distribution stable de l'utilité ($v(C) - \sum_{i \in C} v(i)$) générée à travers la formation de la coalition entre les différents joueurs.

Une configuration de coalitions est dite stable si aucun agent n'a d'incitation à se retirer de sa coalition actuelle afin d'agir seul ou de se joindre à une autre coalition (Klusch & Gerber, 2002). Pour atteindre cet équilibre, chaque agent doit obtenir un profit proportionnel au rôle qu'il joue dans la coalition et aux gains qu'il pourrait obtenir dans d'autres coalitions. Durant le processus de formation de coalitions, les agents peuvent utiliser le concept du Kernel pour annoncer leurs objections au sujet de la distribution du profit liée à une configuration de coalitions. L'argument utilisé par chaque joueur pour négocier son profit est le suivant : « *Puisque je pourrais obtenir plus sans vous dans d'autres coalitions que vous sans moi, je mérite plus, mais sans intention de vous nuire* » (Klusch & Gerber, 2002).

Dans une configuration de coalitions stable, tous les agents qui sont membres d'une même coalition C sont en équilibre les uns envers les autres. a_i et a_j sont en équilibre si l'un ne domine pas l'autre. On dit que l'agent a_i domine a_j , s'il est en mesure de réclamer une part du profit réalisé par a_j dans la coalition C , et ce, en se basant sur l'argument ci-dessus. Cela se traduit par une demande de transfert d'une partie de l'utilité de a_j vers a_i (Shehory & Kraus, 1999).

Ainsi, en se basant sur les différentes distributions de profit obtenues à travers les différents transferts d'utilités entre les agents et après l'atteinte de l'état de la stabilité du Kernel, chaque agent est en mesure de choisir la coalition qui lui permet de maximiser son profit.

En comparaison avec d'autres approches de stabilité de coalitions tel que l'ensemble de marchandage ou le noyau (Rapoport, 1970; Friedman, 1990), le Kernel présente deux avantages essentiels. D'une part, les agents symétriques ayant le même poids dans une coalition, reçoivent des parts égales du profit distribué. D'autre part, le formalisme mathématique du Kernel permet la division du calcul en un ensemble de processus calculatoires polynomiaux non connexes, ce qui simplifie la résolution du problème de la recherche de l'équilibre, même dans les cas de problèmes de grande taille (Shehory & Kraus, 1999).

Selon le concept du Kernel, les agents se basent sur deux mesures pour estimer leur force dans une configuration : l'excès et le surplus.

5.3.3.4.1. Définition : l'excès

L'excès est une mesure du gain potentiel d'une coalition ou d'un agent par rapport à un vecteur de gain particulier. Pour une configuration de coalitions PC avec un vecteur de gains $u = \langle u_1, u_2, \dots, u_n \rangle$ et pour une coalition C , qui n'est pas nécessairement une coalition dans la configuration PC , l'excès de C par rapport à u est défini par :

$$e(C) = v(C) - \sum_{a_i \in C} u_i \text{ (Rapoport 1970, Klusch & Shehory 1996 ; Shehory & Kraus, 1999).}$$

Les agents utilisent l'excès afin de mesurer leurs forces relatives. Un excès élevé est synonyme d'un pouvoir de marchandage élevé (Shehory & Kraus, 1999). Par conséquent, chaque agent doit chercher à définir son excès le plus élevé, qu'on nomme le surplus.

5.3.3.4.2. Définition : le surplus

Le surplus mesure la capacité de marchandage d'un agent a_i face à un agent a_j . Étant donné une configuration de coalitions PC , le surplus de a_i par rapport à a_j est : $S_{ij} = \text{MAX}_{C|a_i \in C, a_j \notin C} e(C)$. C'est l'excès maximal des coalitions contenant a_i et excluant a_j (Rapoport 1970, Klusch & Shehory 1996 ; Shehory & Kraus, 1999).

Selon le concept du Kernel, l'agent a_i domine a_j si : $S_{ij} > S_{ji}$ et $u_j \geq v(a_j)$, où $v(a_j)$ est le profit généré par l'agent j s'il choisit de ne former aucune coalition (Shehory & Kraus, 1999).

5.3.3.4.3. L'équilibre du Kernel

Sur la base d'une configuration de coalitions et d'un vecteur de distribution des profits, les agents comparent leurs surplus. L'agent qui détient le surplus le plus élevé est le plus fort de son groupe. Cet agent est en mesure de réclamer une partie du profit d'un agent plus faible de la même coalition. Cependant, la part exigée doit tenir compte de la rationalité individuelle de l'agent dominé. De ce fait, ce dernier doit garder un gain au moins égal à ce qu'il pourrait obtenir en restant seul.

Par ailleurs, une configuration de coalitions est dite K-stable si pour toute paire d'agents a_i et a_j dans la même coalition l'une des trois conditions suivantes est satisfaite (Rapoport 1970, Klusch & Shehory 1996 ; Shehory & Kraus, 1999) :

1. $S_{ij} = S_{ji}$
2. $S_{ij} > S_{ji}$ et $u_j = v(a_j)$
3. $S_{ji} > S_{ij}$ et $u_i = v(a_i)$

Ainsi, le Kernel d'un jeu est tel que si les surplus des agents d'une même coalition sont égaux, alors il devient impossible à un des agents de s'objecter à la distribution des profits. Cependant, si les surplus de deux agents, appartenant à la même coalition, ne sont

pas égaux, par exemple si $S_{ji} > S_{ij}$, alors l'agent i reçoit le profit qu'il aurait obtenu individuellement. Dans le cas contraire, si l'agent i recevrait plus que son gain minimal (i.e. $S_{ji} > S_{ij}$ et $u_i > v(a_i)$), alors l'agent j serait en position de faire une objection à l'agent i en lui exigeant de lui céder une partie de son profit. Ce faisant, l'agent j améliore son profit aux dépens de l'agent i .

À ce stade, il reste à déterminer, dans le processus de formation d'une coalition, la part du profit que peut exiger un agent dominant d'un autre dominé, appelée la demande. Pour cela, nous décrivons ci-dessous la notion du schéma de transfert de Stearns (1968) qui permet, étant donné une configuration de coalitions et un vecteur de distribution arbitraire du profit, de spécifier la quantité de gain à transférer entre les agents afin de converger vers la stabilité du Kernel.

5.3.3.4.4. Schéma de transfert et la fonction de demande

Dans un jeu coopératif avec utilité transférable, un schéma de transfert est défini comme étant une séquence de propositions, à travers laquelle les joueurs négocient de façon séquentielle, sur la base d'une distribution initiale du profit généré par la coalition, le transfert de l'utilité d'un agent vers un autre, et ce, en respectant certaines règles de rationalité.

Le schéma de transfert peut être exprimé par une séquence de configurations de profits $(u^1, CS), (u^2, CS) \dots (u^i, CS) \dots$ dans laquelle le vecteur des profits u^i peut varier alors que la structure de coalitions CS reste la même. Le changement dans le vecteur de profits est dû à un transfert d'utilité égale à α d'un joueur l vers un joueur k à l'étape i (Stearns, 1968). Cela se traduit par la formule suivante :

$$(u^i, CS) = \begin{cases} u_l^i := u_l^{i-1} - \alpha \\ u_k^i := u_k^{i-1} + \alpha \\ u_p^i := u_p^{i-1}, p \neq k, l \end{cases}$$

Par ailleurs, dans le cadre des jeux à n-personnes, Stearns (1968) a introduit la notion de la fonction de demande d_{ij} comme étant la borne supérieure du transfert d'utilité α d'un agent j vers l'agent i . Dans le cas particulier du Kernel et en considérant une fonction de demande égale à $d_{ij} = \begin{cases} \min((S_{ij} - S_{ji})/2, u(j) - v(j)) & \text{si } S_{ij} > S_{ji} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$, Stearns (1968) a prouvé

dans son théorème qu'un transfert d'utilité α entre deux agents i et j qui vérifie $0 < \alpha \leq d_{ij}$ permet de converger vers un équilibre du Kernel, alors qu'un $\alpha = d_{ij}$ engendrera une convergence plus rapide vers l'équilibre. La rapidité de la convergence est exprimée en termes de nombre requis d'itérations.

5.3.3.4.5. Exemple de recherche de la stabilité de la coalition

Considérons le jeu coopératif avec utilité transférable des trois agents a_1 , a_2 et a_3 dont les valeurs de coalitions possibles sont :

$$v(\{a_1\}) = 2, v(\{a_2\}) = 1.5, v(\{a_3\}) = 1$$

$$v(\{a_1, a_2\}) = 6, v(\{a_1, a_3\}) = 8, v(\{a_2, a_3\}) = 7$$

$$v(\{a_1, a_2, a_3\}) = 15$$

Notre objectif porte sur la recherche de la distribution stable, selon l'approche du Kernel, du profit réalisé par la coalition C formée des trois agents : $C = \{a_1, a_2, a_3\}$. Nous commençons notre recherche de la solution équilibrée, par une distribution aléatoire du gain généré par cette coalition : $v(\{a_1, a_2, a_3\}) = 15$. Ainsi, par exemple, si nous prenons comme valeur initiale le vecteur de gain $(5, 5, 5)$, le calcul successif d'excès pour chaque agent, des surplus et de la fonction demande se présente comme suit :

- L'ensemble d'excès de l'agent a_1 :

$$e(a_1) = v(a_1) - u(a_1) = 2 - 5 = -3$$

$$e(a_1, a_2) = v(a_1, a_2) - (u(a_1) + u(a_2)) = 6 - (5 + 5) = -4$$

$$e(a_1, a_3) = v(a_1, a_3) - (u(a_1) + u(a_3)) = 8 - (5 + 5) = -2$$

- L'ensemble d'excès de l'agent a_2 :

$$e(a_2) = v(a_2) - u(a_2) = 1.5 - 5 = -3.5$$

$$e(a_2, a_1) = v(a_2, a_1) - (u(a_2) + u(a_1)) = 6 - (5 + 5) = -4$$

$$e(a_2, a_3) = v(a_2, a_3) - (u(a_2) + u(a_3)) = 7 - (5 + 5) = -3$$

- L'ensemble d'excès de l'agent a_3 :

$$e(a_3) = v(a_3) - u(a_3) = 1 - 5 = -4$$

$$e(a_3, a_1) = v(a_3, a_1) - (u(a_3) + u(a_1)) = 8 - (5 + 5) = -2$$

$$e(a_3, a_2) = v(a_3, a_2) - (u(a_3) + u(a_2)) = 7 - (5 + 5) = -3$$

- Calcul des surplus :

- $S(a_1, a_2) = \text{Max}(e(a_1), e(a_1, a_2)) = -2$; $S(a_2, a_1) = \text{Max}(e(a_2), e(a_2, a_1)) = -3$
- $S(a_1, a_3) = \text{Max}(e(a_1), e(a_1, a_3)) = -3$; $S(a_3, a_1) = \text{Max}(e(a_3), e(a_3, a_1)) = -3$
- $S(a_2, a_3) = \text{Max}(e(a_2), e(a_2, a_3)) = -3.5$; $S(a_3, a_2) = \text{Max}(e(a_3), e(a_3, a_2)) = -2$

- Calcul des demandes :

$$\begin{aligned} \text{■ } S(a_1, a_2) > S(a_2, a_1) \text{ et } u(a_2) = 5 > 2 = v(a_2) \rightarrow \begin{cases} a_1 \text{ domine } a_2 \\ d_{21} = 0 \\ d_{12} = \text{Min}((-2 - (-3))/2, (5 - 1.5)) = 0.5 \end{cases} \end{aligned}$$

■ $S(a_3, a_1) = S(a_1, a_3) \rightarrow a_3$ et a_1 sont en équilibre.

$$\begin{aligned} \text{■ } S(a_3, a_2) > S(a_2, a_3) \text{ et } u(a_2) = 5 > 2 = v(a_2) \rightarrow \begin{cases} a_3 \text{ domine } a_2 \\ d_{23} = 0 \\ d_{32} = \text{Min}((-2 - (-3.5))/2, (5 - 1.5)) = 0.75 \end{cases} \end{aligned}$$

Avec une demande $d_{23}=0.75$, la relation entre l'agent a_2 et a_3 est celle qui crée le plus grand déséquilibre dans la coalition. Afin de réduire ce déséquilibre, nous choisissons de transférer la totalité de la demande exigée de a_2 vers a_3 . Le vecteur de distribution de

profits ainsi obtenu, à partir de l'ancienne distribution (5,5,5), est le suivant : nouvelle distribution (5, 4.25, 5.75).

Si on teste cette nouvelle distribution de profits à travers une deuxième itération de calculs, les surplus obtenus sont :

$$S(a_1, a_2)=e(\{a_1, a_3\})=-2.75; S(a_2, a_1)=e(\{a_2\})=-2.75 \quad \rightarrow S(a_1, a_2)=S(a_2, a_1)$$

$$S(a_1, a_3)=e(\{a_1\})=-3; \quad S(a_3, a_1)=e(\{a_2, a_3\})=-3 \quad \rightarrow S(a_3, a_1)=S(a_1, a_3)$$

$$S(a_2, a_3)=e(\{a_2\})=-2.75; \quad S(a_3, a_2)=e(\{a_1, a_3\})=-2.75 \quad \rightarrow S(a_2, a_3) = S(a_3, a_2)$$

L'égalité entre les surplus prouve qu'aucun agent de la coalition n'en domine un autre. Tous les joueurs sont en équilibre, ce qui démontre que cette solution est stable au sens du Kernel.

5.3.3.4.6. Complexité du processus de recherche d'équilibre

Dans un jeu coopératif avec utilité transférable (N, v) , le nombre de coalitions possibles est égal à 2^n (incluant l'ensemble vide). Chaque séquence du schéma de transfert est composée des étapes suivantes (Shehory & Kraus, 1999) :

- Le calcul de 2^n excès, car à chaque coalition correspond un excès. Le calcul de chaque excès est de l'ordre $O(n)$.
- Le calcul des excès et des surplus est de l'ordre $O(n2^n)$.
- La recherche du surplus le plus élevé requiert des opérations de l'ordre $O(2^n)$.

D'après ces étapes, la complexité totale d'une séquence du schéma de transfert est de l'ordre $O(n2^n)$, ce qui engendre un nombre exponentiel d'itérations afin de converger vers une solution stable. Cette complexité peut être réduite en limitant le nombre d'agents par coalitions, en prédefinisant une borne inférieure $K1$ et une borne supérieure $K2$ pour le nombre d'agents formant une coalition. Dans ce cas, la complexité calculatoire du schéma de transfert est (Klusch & Shehory 1996; Shehory & Kraus, 1999) :

- Le nombre de coalitions possibles : $n_{coalitions} = \sum_{i=K1}^{K2} \binom{n}{i} = \sum_{i=K1}^{K2} \frac{n!}{i!(n-i)!}$.
- Nombre d'excès à calculer pour chaque étape : $n_{coalitions}$. Le calcul de chaque excès est de l'ordre $O(n)$.
- La complexité du calcul d'excès et des surplus est de l'ordre : $O(n \times n_{coalitions})$.
- La recherche du surplus maximal requiert $O(n_{coalitions})$ opérations.

Klusck & Shehory (1996) et Shehory & Kraus (1999) ont incorporé l'approche du Kernel avec la limitation des tailles de coalitions dans deux algorithmes orientés-négociation pour la formation de coalitions et la distribution de profits entre leurs membres. Pour les deux algorithmes, les résultats de simulation obtenus démontrent que même dans le cas d'un nombre élevé d'agents la formation de coalitions se fait dans un temps polynomial.

6. Formulation mathématique du problème d'ordonnancement du personnel^{6,7}

⁶ Cette section est un extrait de l'article : Sabar, M. Montreuil, B. Frayret, J.M. (2005) « *Competency based personnel scheduling in large assembly lines* », IESM, Marrakech, Maroc.

⁷ Article publié dans l'International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Volume 21, Issue 4 June 2008, pages 468 - 479.

This section introduces a formal description and mathematical modelling of the personnel scheduling problem in the context of a paced multi-product assembly center. The model explicitly takes into consideration the individual competencies; mobility and preferences of each worker, as well as the personnel and competency requirements associated with each assembly activity given both the current master assembly schedule and the line balancing for each product. The paper then validates and analyses the performance of the model through the optimal resolution of a small yet representative case using a commercial solver.

6.1. Introduction

Large assembly lines sequentially producing a variety of complex products often require tens up to hundreds of assemblers. The number of assemblers required at each station of the assembly line varies depending both on the product currently assembled and the assembly activities assigned to that station. Due to product changeovers and the specific manpower competency requirements associated to each product at each station, there are often large waves of personnel moves among stations, which cause significant disruptions to operations, deterring the overall productivity of the line and causing dissatisfactions among the personnel.

In this paper, we address the optimization of the dynamic assignment of personnel to stations to minimize the operational costs and personnel dissatisfactions to sustain the product assembly schedule. We first review the personnel scheduling literature to position the addressed problem. We then propose a mathematical model formally representing the problem. We finally provide empirical results and present conclusive remarks.

6.2. Problem definition and classification

Personnel scheduling problems are particular cases of allocation resource problems (Hao *et al.* 2004). They can take several configurations according to the characteristics of the organizational environment and the duration of the planning period. Generally, they aim to construct a working timetable for each employee by defining start time periods,

duration of work, break intervals, as well as the tasks to be fulfilled. The objective is for the timetable to optimize one or several criteria while respecting a set of constraints such as labour requirements, individual preferences, or specific competencies (Thompson 1995, Ernst *et al.* 2004). Personnel scheduling problems can be found in several types of industrial or service companies. They are recurring problems in domains such as transport (Brusco *et al.* 1995), health (Aickelin *et al.* 2000), education (DeGans 1981), industrial production (Berman *et al.* 1997, Lee and Vairaktarakis 1997, Vairaktarakis and Winch 1999), call centers (Atlason *et al.* 2004), as well as protection and emergency services (Ernst *et al.* 1999).

Personnel scheduling problems are typically classified in three categories (Bailey and Field 1985, Ernst *et al.* 2004). First, days-off scheduling problems deal with the assignment of days off to employees (e.g. scheduling 2-day or 3-day off patterns into one week). Second, shift scheduling problems typically deal with the elaboration of 8-hour or 9-hour shifts that must be allocated to employees across a daily planning horizon, in order to meet demand. Third, tour scheduling problems deal with the construction of a weekly set of work schedules for employees. Typically, these latter problems integrate the days-off and shift scheduling problems.

To this basic classification can be added contextual parameters which allow the description of specific personnel scheduling problems connected with a particular activity domain. Generally, these parameters reflect the organizational, temporal or spatial specificities. Examples are: (1) demand nature, such as cyclic vs. acyclic and determinist vs. stochastic (Baker 1976, Easton and Rossin 1996, Easton and Mansour 1999); (2) employee preferences (Topaloglu and Ozkarahan 2004); (3) employee seniority (Volgenant 2004); (4) composition of working teams expressed in terms of part-time employee percentages in comparison to full-time employees (Brusco *et al.* 1995, Brusco and Jacobs 1998), and (5) scheduling flexibility (Bailey and Field 1985, Baker 1976).

Flexibility is given particular attention in the literature. Several works underline the advantages and the interest of integrating the flexibility concept in personnel scheduling problems. Flexibility has a positive impact on the working environment, elevating

employee motivation and decreasing absentee rates and delays (Bailey and Field 1985). According to Topaloglu and Ozkarahan (2004), in order to provide flexibility, organizations use different alternatives of shift start times, shift lengths, daily break windows, and days-on work patterns. Jacobs and Bechtold (1993) address the flexibility impact in cases of tour scheduling problems. They confirm that use of break placement flexibility and shift length flexibility is extremely effective for work force utilization improvement. However, the use of high levels of flexibility considerably increases the complexity of personnel scheduling problems because it increases the allocation space (Bechtold *et al.* 1990, Aykin 2000, Topaloglu and Ozkarahan 2004). This complexity results in an exponential expansion of the size of mathematical models used in the formulation and resolution of the personnel scheduling problem (Aykin 2000).

Mathematical programming is used for solving personnel scheduling problems since the fifties (Dantzig 1954). Since then, it has become an acknowledged key methodology exploited by many researchers (e.g. Baker 1976, Bechtold and Jacobs 1990, Thompson 1995, Aykin 1996, Easton and Rossin 1996, Brusco and Jacobs 1998, Easton and Mansour 1999, Brusco and Jacobs 2000, Ernst *et al.* 2004, Topaloglu and Ozkarahan 2004). Personnel scheduling problem have long been recognized as being complex and hard to solve, being identified as NP-complete (Garey and Johnson 1971, Bartholdi 1981). This has lead to adopt models that are as simple as possible. In fact, three generic mathematical programming modelling approaches are widely exploited for formulating personnel scheduling problems: the set covering formulation (Dantzig 1954), the implicit formulation (Bechtold and Jacobs 1990, Aykin 1996), and the goal programming formulation (Easton and Rossin 1996, Easton and Mansour 1999).

When using a set covering approach, every potential individual schedule combining decisions about shift type, shift start time, and break placement requires a separate integer variable (Aykin 1996). According to Aykin (1996 & 2000), the resulting size of the integer model is making them very difficult to optimally solve in most practical applications. To avoid such complexity, Bechtold and Jacobs (1990) and Aykin (1996 & 2000) propose the implicit modelling approach. This approach is based upon the implicit representation of break assignments for all shifts. Experimental analysis demonstrates

that this formulation leads to significantly improved integer programming models requiring a significantly smaller number of variables and less computer memory than Dantzig's set covering model (Aykin 2000). Baker (1976), Easton and Rossin (1996), and Easton and Mansour (1999) propose goal-programming models for personnel scheduling problems. Labor demand is modeled as goals rather than hard constraints. This modeling approach allows solutions to deviate above and below the staffing goals prescribed for each period, but imposes cost penalties for overstaffing and understaffing.

Most models consider that employees are homogeneous. These models concentrate mainly on the conversion of the forecasted demand to requirements for workers and on the generation of the schedule which ensures the required number of employees for each period at the lowest cost. However, the homogeneous hypothesis is not adequate in many settings where individual specificities have impact on schedule feasibility and performance. Several authors thus advocate that employee heterogeneity should be explicitly taken into account in the scheduling process (Henderson and Berry 1976, Bechtold and Jacobs 1990, Aykin 1998, Billionnet 1999, Aykin 2000). Moreover, in many contexts, the allocation of employees has to be made according to criteria such as required and available competencies, seniorities and preferences.

The objective of this research is to study personnel scheduling flexibility in large assembly lines by considering several dimensions which best describe the reality and the complexity of such industrial environments. Indeed, we are convinced that the quality of our research is based on the fact that the elaborated mathematical model has to represent the most faithfully possible all the characteristics of the industrial reality. This will allow us to have a better appreciation and implantation of the obtained results. For that purpose, we propose the elaboration of a personnel scheduling model which exceeds the level of a traditional planning based often only on a balance between the demand and the offer in employees. We integrate aspects connected to human resources management centred on competency profiles and inter-workstation mobility of employees.

The special emphasis of the current paper is to develop a mathematical model in order to deal with shift-scheduling problems in a large assembly line environment where the pace

setting takt time between individual product units is preset equal to at least a few minutes. Our model takes into account individual competencies, mobility and preferences. Specifically, we consider that workers can be cross-trained and allowed to move between workstations in order to fulfil specific assembly tasks as per the product assembly schedule. The proposed approach also considers the possibility to assign employees to secondary activities, which can be either productive, administrative or learning, when the employees are not assigned to an assembly workstation.

6.3. Model Formulation

The objective of the proposed model is to allocate employees along the stations of the line to satisfy the personnel requirements at each station in each period during the planning horizon while minimizing human resources costs and dissatisfactions. A period is set equal to the line's preset takt time between two product units, setting the pace of the line. The costs are affected by the number of employees and the flow of employee transfers from station to station.

We consider the context of an assembly line with multiple workstations (ST_1, ST_2, \dots, ST_M) responsible to sequentially assemble different product-models. For each product, there is a predetermined line balancing which specifies the assembly tasks to be realized at each station when this product is assembled. An assembly activity is defined by the vector \langle workstation number, assembly task to be fulfilled \rangle . Each assembly activity requires one or several employees whom contribute to the execution of assembly tasks. Each assembly activity a requires ω_a employees with profile of competencies $r_a = \langle c_{1a}, \dots, c_{la}, \dots, c_{La} \rangle$. We consider that $c_{la} = 1$ if competence l is required for the fulfilling of a ; and zero otherwise.

Figure 4 shows an example of the master assembly schedule and the required assembly activities. It shows that three product models M, N and B have to be assembled. The line takt time is 15 minutes. The activities performed at each workstation differ for different models. Workstation changeover from model to model requires two 15-minute periods.

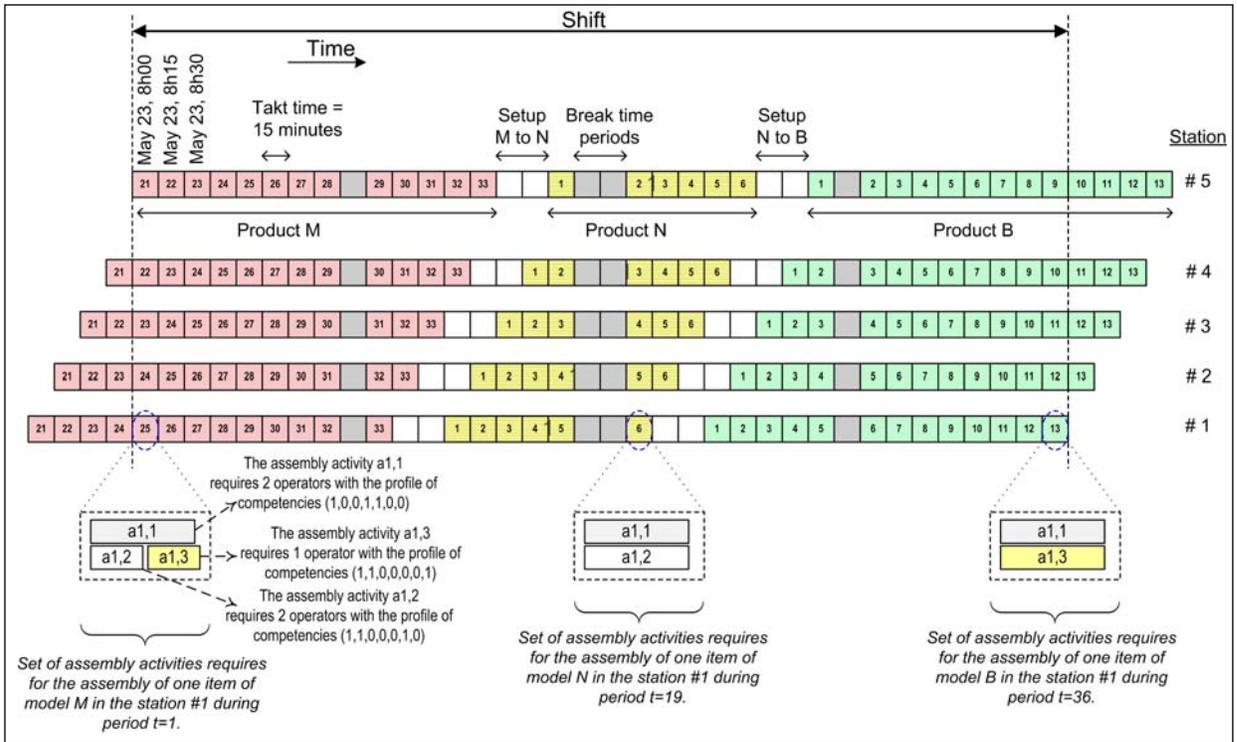


Figure 4: Illustrating the assembly schedule and the assembly activities (Adapted from Montreuil (2005))

The number of employees present in the system can vary according to demand. However, at the beginning of every shift, a minimum number of employees are required. If necessary, other operators can be introduced into the assembly line. We suppose that every employee e introduced into the assembly system has a required minimal presence duration equal to $d_{\min,e}$ periods.

We assume that each worker can be cross-trained and possesses a number of competencies referred to as competency vector $c_e = \langle c_{1e}, \dots, c_{Le} \rangle$. We consider that $c_{le}=1$ if worker e has acquired competence l ; and zero otherwise. Each worker can be reallocated and transferred from station to station in order to fulfil assembly activities according to their competencies. To allocate employee e to the execution of activity a , the inclusion relation must be satisfied between sets c_e and r_a . Indeed, they have to satisfy the relation: $r_a \subseteq c_e$.

In cases where the number of present workers exceeds the requirements for production during period t , extra workers can be assigned to execute secondary activities, to be trained in other stations, or to perform elementary administrative operations, according to specified availability of such work.

We consider that during a time slot, an employee can be allocated to a single secondary activity. However, an employee can realize several assembly activities, on condition that these assembly activities are compatible between them and with the employee's competencies. The incompatibility between two activities is mainly due to temporal or technical constraints. For example, the temporal incompatibility between activities a and a' may be because an employee allocated to the execution of a cannot realize a' if a' begins before the end of a . Technical incompatibility can result from the fact that according to the enterprise policy an employee should not be allocated to fulfil an assembly activity and to perform a quality control activity on this assembly.

In our model, we incorporate two levels of shift structure flexibility: shift start-time flexibility and break-placement flexibility. For shift start-time flexibility, we define a set of planning periods T_q in which the shift can be started. Relative to break-placement flexibility, we define three types of pauses: first-half-shift break (pause type 1), lunch break (pause type 2), and second-half-shift break (pause type 3). For every kind of break " i " we associate two time intervals. The first interval reflects the periods along which the pause can spread out. The second interval defines the periods during which this break can be started. The duration of each break is fixed.

In addition, three types of employee preferences are taken into consideration in our model. These individual preferences relate to (1) the shift duration, (2) the assignable activities and (3) the number of transfers between activities.

Finally, our model tracks the state of each worker present in the assembly system at any time. We consider that during a given shift, an employee can have five states: idle, assigned to assembly activities, assigned to secondary activities, in break or in movement.

We now formally describe our personnel shift-scheduling model. We first introduce the notation that is used to formulate the model: sets, indices, parameters, and variables. Then the constraint sets and the objective function are introduced.

Sets.

- A : Set of all possible activities on the assembly line;
- A_t : Subset of A which represents assembly activities to be fulfilled in period t , according to the master assembly plan. An assembly activity is defined by the vector: \langle workstation number, assembly task to be fulfilled \rangle ;
- A_t^s : Subset of A that represents secondary activities to which an employee can be assigned in period t .
- A^d : Set of pairs of activities a' and a'' such that an employee can be assigned to activity a'' just after having been assigned to activity a' ;
- E : Set of employees.
- ES_e : Set of pairs of states s and s' such that employee e can be in state s in a period and in state s' in the next period;
- I_e : Set of pairs of activities a' and a'' such that employee e cannot be assigned to both activities a' and a'' in the same period;
- L : Set of all competencies;
- T : Set of time periods, linearly sequenced from 1 to t^T ;
- T_q : Set of n periods at which an employee can start his shift of work, sequenced from $t_{q,1}$ to $t_{q,n}$;
- $T_p = T_{p1} \cup T_{p2} \cup T_{p3}$: Set of all periods at which an employee can take a rest and lunch breaks;
- T_{p1} : Set of periods at which an employee can take morning break (break type 1);
- T_{p2} : Set of periods at which an employee can take lunch break (break type 2);
- T_{p3} : Set of periods at which an employee can take afternoon break (break type 3).

Indices.

- a : an activity;
- e : an employee;
- i : a break type, $i=1, 2$ or 3 .
- l : a competency, $l=1 \dots L$;

- s : an employee state;
- t : a planning period of duration equal to the takt time of assembly line production, $t = 1 \dots T$.

Parameters.

- $\alpha_{aa'}$: Number of required planning periods for the transfer of an operator from activity a towards activity a' ;
- \bar{a}_e : Maximal number of assembly activities that employee e can fulfil during a planning period;
- b_{et}^S : Marginal net revenue for assigning worker e to a secondary activity at time t ;
- $c_{e=} = \langle c_{1e}, \dots, c_{le}, \dots, c_{Le} \rangle$: Competency vector for employee e , where $c_{le}=1$ if the employee e possesses the competence l , and zero otherwise;
- c_{et}^a : Marginal cost for assigning a present employee e to an assembly activity at time t ;
- c_e^o : Marginal cost per over time period for the presence of employee e ;
- c_e^r : Marginal cost per regular time period for the presence of employee e ;
- c_e^{tr} : Marginal cost for transferring worker e from an activity to another;
- c_t^+ : Marginal cost for adding a worker in period t ;
- c_t^- : Marginal cost for removing a worker in period t ;
- $d_{\min,e}$: Required minimal duration of work presence for employee e ;
- d_i^p : Duration of break type i ;
- h_t : Duration of planning period t ;
- ht_e : Total work hours per day preferred by employee e ;
- k_i : Earliest period during which a pause of type i can be started;
- q_i : Latest period during which a pause of type i can be started;
- $n_{\min,t}$: Minimum allowed number of workers at time t ;
- $n_{\max,t}$: Maximum allowed number of workers at time t ;
- $o_{\max,e}$: Maximum number of over time periods allowable for employee e ;
- p_{et}^i : Penalty for letting in idle state employee e at time t ;

- p_e^{tr+} : Penalty for a unitary positive deviation from the number of reallocations preferred by employee e ;
- p_e^{tr-} : Penalty for a unitary negative deviation from the number of reallocation preferred by employee e ;
- p_e^{ht+} : Penalty for unitary positive deviation from the number of work hours preferred by employee e ;
- p_e^{ht-} : Penalty for unitary negative deviation from the number of work hours preferred by employee e ;
- p_{eat}^a : Penalty for employee dissatisfaction about his allocation to assembly activity a ($p_{eat}^a > 0$ if dissatisfied, $p_{eat}^a = 0$ if neutral and $p_{eat}^a < 0$ if satisfied);
- $r_a = \langle c_{1a}, \dots, c_{la}, \dots, c_{La} \rangle$: Vector of required competencies for performing activity $a \in A$, where $c_{la} = 1$ if competence l is required, and zero otherwise;
- $r_{\max,e}$: Maximum allowed number of regular working periods for employee e ;
- tr_e : Total number of reallocations preferred by employee e ;
- ω_a : Number of employees needed for assembly activity $a \in A_t$;
- $\bar{\omega}_a^s$: Maximum number of employees needed for secondary activity $a \in A_s$;

Variables.

- A_{eat} : Binary variable stating whether or not worker e is assigned to activity a in period t ;
- B_{eit} : Binary variable stating whether or not employee e begins his type i pause in period t ;
- E_{et}^a : Binary variable set to one if employee e is assigned to assembly activities in period t , and zero otherwise;
- E_{et}^d : Binary variable set to one if employee e state is in movement in period t , and otherwise zero;
- E_{et}^i : Binary variable set to one if employee e is idle at time t , and zero otherwise;
- E_{et}^p : Binary variable set to one if employee e is in break in period t , and zero otherwise;
- E_{et}^s : Binary variable set to one if employee e is assigned to a secondary activity in period t , and zero otherwise;

- HT_e⁺: Nonnegative linear variable computing the positive deviation from the total work hours preferred by employee e ;
- HT_e⁻: Nonnegative linear variable computing the negative deviation from the total work hours preferred by employee e ;
- N_t: Nonnegative integer variable computing the number of workers in the center in period t ;
- N_t⁺: Nonnegative integer variable computing the number of workers added to the center in period t ;
- N_t⁻: Nonnegative integer variable computing the number of workers removed from the center in period t ;
- O_e: Nonnegative integer variable computing the number of overtime periods worked by employee e ;
- P_{et}: Binary variable stating whether or not worker e is present in the center in period t ;
- S_{et}: Binary variable stating whether or not employee e starts his work shift in period t ;
- TR_e⁺: Nonnegative linear variable computing the positive deviation from the number of reallocations preferred by employee e ;
- TR_e⁻: Nonnegative linear variable computing the negative deviation from the reallocation number preferred by employee e ;
- W_e: Nonnegative integer variable computing the number of regular time periods worked by employee e .

Constraints.

C1. Satisfaction of staff size requirements: assigns ω_a employees with competency vector r_a required for assembly activity $a \in A_t$ in period t .

$$\sum_{e|r_a \subset c_e} A_{eat} = \omega_a \quad \forall t \in T, \forall a \in A_t \quad (1a)$$

$$A_{eat} \in \{0,1\} \quad (1b)$$

C2. Extra worker assignment: allows the allocation of extra workers to secondary activity $a \in A_t^s$ in period t .

$$\sum_{e|r_a \subset c_e} A_{eat} \leq \bar{\omega}_a^s \quad \forall t \in T, \forall a \in A_s \quad (2)$$

C3. Worker state: assigns each employee to one of the five potential states in period t .

$$P_{et} = E_{et}^a + E_{et}^s + E_{et}^i + E_{et}^d + E_{et}^p \quad \forall t \in T, \forall e \in E \quad (3a)$$

$$E_{et}^a, E_{et}^i, E_{et}^s, E_{et}^d, E_{et}^p, P_{et} \in \{0,1\} \quad (3b)$$

C4. Shift allocation: (4a) makes sure that each employee works during at most one shift per day. (4b) ensures that during a period t that is part of a set of periods at which an employee can start his shift of work, an employee can be present in the assembly center only if he begins his shift of work during this period or if he was already present during the period $(t-1)$. (4c) ensures that during a time period t with the exception of the periods at which an employee can start his shift of work, an employee can be present in the assembly center only if he was already present during the period $(t-1)$.

$$\sum_{t \in T_q} S_{et} \leq 1 \quad \forall e \in E \quad (4a)$$

$$P_{et} \leq S_{et} + P_{e,t-1} \quad \forall t \in T_q, \forall e \in E \quad (4b)$$

$$P_{et} \leq P_{e,t-1} \quad \forall t \in T - T_q, \forall e \in E \quad (4c)$$

$$S_{et} \in \{0,1\} \quad \forall e \in E; \forall e \in T \quad (4d)$$

C5. Minimal duration of worker presence: ensures that if an employee e is added in the assembly center, his presence is at least $d_{\min,e}$ planning periods long.

$$\sum_{t=\tau}^{\tau+d_{\min,e}} P_{et} \geq d_{\min,e} S_{e\tau} \quad \forall e \in E, \forall \tau = 1, \dots, t^T - d_{\min,e} \quad (5)$$

C6. Maximal duration of worker presence: compute regular and over time worked by each employee and ensures that none works more than his maximum allowed time.

$$\sum_{t \in T} P_{et} = W_e + O_e \quad \forall e \in E \quad (6a)$$

$$W_e \leq r_{\max,e} \quad \forall e \in E \quad (6b)$$

$$O_e \leq o_{\max,e} \quad \forall e \in E \quad (6c)$$

$$O_e \geq 0; W_e \geq 0 \quad \forall e \in E \quad (6d)$$

C7. Primary state enforcement: ensures that an employee e can be assigned to assembly activities at time t only if he is present and in primary activity state:

$$\bar{a}_e E_{et}^a \geq \sum_{a \in A_t} A_{eat} \quad \forall t \in T, \forall e \in E \quad (7a)$$

$$\sum_{a \in A_t} A_{eat} \geq E_{et}^a \quad \forall t \in T, \forall e \in E \quad (7b)$$

C8. Secondary state enforcement: ensures that an employee e can be assigned to a secondary activity at time t only if he is present and in secondary activity state:

$$E_{et}^s = \sum_{a \in A_s} A_{eat} \quad \forall t \in T, \forall e \in E \quad (8)$$

C9. Worker transfer computing: ensures that if employee e was assigned to activity a at time t and then to activity a' at time $t + \alpha_{aa'}$, then there is a transfer of employee e during the planning periods $t' \in]t, t + \alpha_{aa'}[$:

$$E_{et'}^d \geq A_{eat} + A_{ea', t + \alpha_{aa'}} - 1 \quad \forall t \in T, \forall (a, a') \in A^d, \forall e \in E, \forall t' \in]t, t + \alpha_{aa'}[\quad (9)$$

C10. Break starting: ensures that each employee present in the assembly center is entitled to a single break of type i during a shift:

$$\sum_{t=k_i}^{q_i} B_{eit} = P_{ek_i} \quad \forall e \in E, i = 1, 2, 3 \quad (10)$$

C11. Break duration: ensures that each break of type i is d_i^p time periods long:

$$\sum_{t=\tau}^{\tau + d_i^p} E_{et}^p = d_i^p B_{ei\tau} \quad i = 1, 2, 3; \forall \tau = k_i, \dots, q_i; \forall e \in E \quad (11)$$

C12. Worker arrival: computes the number of workers added to the center in period $t \in T_q$:

$$N_t^+ = \sum_e S_{et} \quad \forall t \in T_q \quad (12a)$$

$$N_t^+ \geq 0 \quad (12b)$$

C13. Worker count: computes the number of workers present in the center in period t :

$$N_t = \sum_e P_{et} \quad \forall t \in T \quad (13)$$

C14. Worker departure: computes the number of workers departing the center in period t :

$$N_t = N_{t-1} + N_t^+ - N_t^- \quad \forall t \in T \quad (14a)$$

$$N_t^- \geq 0 \quad (14b)$$

C15. Workforce bounds: keeps the number of present employees within the allowed upper and lower limits in period t :

$$n_{min,t} \leq N_t \leq n_{max,t} \quad \forall t \in T \quad (15)$$

C16. Unfeasible transfers: prevents from transferring employee between incompatible activities:

$$A_{eat} + A_{ea't'} \leq 1 \quad \forall ((a,t), (a',t')) \in I_e \quad (16)$$

C17. Employee transfer preference: computes the gap between the preferred and actual number of reallocations incurred by employee e .

$$\sum_t E_{et}^d + TR_e^- - TR_e^+ = tr_e \quad \forall e \in E \quad (17)$$

C18. Employee work duration preference: computes the gap between the preferred and actual work duration of employee e .

$$\sum_t h_t P_{et} + HT_e^- - HT_e^+ = ht_e \quad \forall e \in E \quad (18)$$

C.19. State alteration without transfer: allows employee state change without incurring a transfer when the layout of the center and management rules makes it feasible:

$$E_{et}^d \leq 2 - E_{e,t-1}^j - E_{e,t+1}^k \quad \forall t \in T, \forall (E_e^j, E_e^k) \in ES_e, \forall e \in E \quad (19)$$

Objective function.

$$\text{Minimize } F1 + F2 + F3 - F4 + F5 + F6 + F7 + F8$$

The elements of the objective function are specified as follows:

1. Salary cost associated to the employees presence in the center:

$$F1 = \sum_{e \in E} (c_e^r W_e + c_e^o O_e) + \sum_{t \in T} (c_t^+ N_t^+ + c_t^- N_t^-)$$

2. Employee-to-assembly-activity assignment cost:

$$F2 = \sum_{t \in T} \sum_e c_{et}^a E_{et}^a$$

3. Penalty cost associated to idleness of present workers :

$$F3 = \sum_{t \in T} \sum_e p_{et}^i E_{et}^i$$

4. Cost savings generated by the assignment of workers to secondary activities:

$$F4 = \sum_{t \in T} \sum_e b_{et}^s E_{et}^s$$

5. Employee transfer cost:

$$F5 = \sum_e \sum_t c_e^{tr} E_{et}^d$$

6. Penalty cost associated to the deviation from the preferred number of transfers for each employee e :

$$F6 = \sum_e (p_e^{tr+} TR_e^+ + p_e^{tr-} TR_e^-)$$

7. Penalty cost associated to the deviation from the total work duration preferred by each employee e :

$$F7 = \sum_e (p_e^{ht+} HT_e^+ + p_e^{ht-} HT_e^-)$$

8. Penalty cost (positive or negative) associated to the employee dissatisfaction or satisfaction for his assignment to the activity a in period t ;

$$F8 = \sum_t \sum_e \sum_a p_{eat}^a A_{eat}$$

6.4. Numerical example

In order to validate the model and assess its performance, this section first introduces a numerical example allowing a case based exploratory experimental investigation. Then it provides and analyses the empirical results.

6.4.1 Experimental data

We here introduce a small numerical example created to validate and assess the performance of our personnel scheduling model when solved using a commercial solver.

The studied assembly center operates nine hours a day. It is paced with a 15-minute takt time, which becomes the duration of a period in the model. The model is to optimize employee scheduling for a single day. Thus, there are 36 15-minute periods in the planning horizon. The assembly center is organized as an assembly line with $m=5$ assembly stations. The center has access to a pool of 30 workers. Each worker is cross-trained for three skills.

The master assembly schedule is summarized in Figure 4. It states the product to be assembled at each station at each period. For each station, the employee requirements in a given period are determined according to the assembly activities to be fulfilled on the scheduled product according to the preset line balancing. This line balancing states the assembly activities to be performed for each product at each station, as provided in Table 1.

	Station#1	Station#2	Station#3	Station#4	Station#5
Product M	a11, a12 & a13	a21 & a23	a31 & a32	a41, a42 & a43	a51, a52 & a53
Product N	a11, a12	a21, a22 & a23	a32 & a33	a42 & a43	a51, a52 & a53
Product B	a11, a13	a21, a22	a31, a32 & a33	a41 & a43	a52 & a51

Table 1: Set of assembly activities required for each product

Workers can start their shift in periods $t=1, 10$ and 20 . The minimal work duration for each employee is two hours, which translates into eight periods. Each present worker is given a fifteen-minute relief break, one at $t=9$ in the morning and one at $t= 28$ in the afternoon. The duration of the lunch break is set at 30 minutes. It starts at $t= 18$. No flexibility is allowed relative to break duration and start period in this illustrative example. The extra workers can be assigned to two secondary operations: $c1$ and $c2$. The maximum number of employees allowed concurrently to perform these secondary activities varies from 4 to 6. Tables 2 and 3 summarize the values used in the illustrative example.

We consider that workers move between stations in a synchronized fashion. A worker can be reallocated to another station only at the end of each planning period. We assume that the movements taken into account are those that are realized between two assembly activities on different stations or between an idle state and an assembly state. For the other state changes we consider that employee movements are an integral part of the current activity.

Stations	St1			St2			St3			St4			St5						
Assembly activities	a11	a12	a13	a21	a22	a23	a31	a32	a33	a41	a42	a43	a51	a52	a53	Setup	\bar{a}_e	tr_e	ht_e
ω_a	2	1	2	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	1	1			
Worker 1	1(1)				1(0)				1(-1)								1	0	6
Worker 2		1(0)				1(1)								1(-1)			1	2	4
Worker 3			1(-1)	1(1)							1(0)						1	1	9
Worker 4	1(0)							1(1)					1(-1)				1	2	6
Worker 5				1(0)				1(1)		1(-1)							1	2	9
Worker 6		1(0)			1(1)		1(-1)										1	1	4
Worker 7									1(-1)			1(0)				1(1)	1	1	4
Worker 8					1(-1)				1(0)						1(1)		1	1	6
Worker 9	1(-1)									1(0)			1(1)				1	2	9
Worker10		1(-1)		1(1)											1(0)		1	1	8
Worker11		1(1)				1(-1)				1(0)							1	2	9
Worker12							1(-1)						1(0)			1(1)	1	2	8
Worker13	1(1)	1(0)												1(-1)			2	1	9
Worker14			1(1)		1(0)			1(-1)									1	1	9
Worker15									1(0)			1(-1)			1(1)		1	2	9
Worker16	1(1)					1(0)						1(-1)					1	1	8
Worker17							1(0)				1(1)			1(-1)			1	1	4
Worker18	1(0)										1(1)					1(-1)	1	2	4
Worker19			1(0)		1(-1)								1(1)				1	1	6
Worker20						1(-1)				1(1)						1(0)	1	3	6
Worker21		1(1)						1(0)			1(-1)						1	1	9
Worker22			1(-1)						1(1)				1(0)				1	1	6
Worker23				1(-1)							1(0)			1(1)			1	1	9
Worker24			1(-1)		1(0)			1(1)									1	2	6
Worker25				1(0)	1(1)											1(-1)	2	3	8
Worker26							1(-1)						1(-1)	1(0)			2	2	9
Worker27								1(-1)		1(1)						1(0)	1	2	8
Worker28	1(-1)		1(0)		1(1)												2	0	9
Worker29						1(1)				1(0)	1(-1)						2	2	8
Worker30												1(1)			1(-1)	1(0)	1	0	8

a_{ij} : assembly activity j at station i

ω_a : number of employees needed for performing activity $a \in A_i$

(p): p= 1 means the least desired activity, 0 Indifferent and -1 the most preferred

ht_e : work duration preferred by employee e

tr_e : total number reallocations preferred by employee e

\bar{a}_e : maximum number of assembly activities that employee e can perform during a planning period t

Table 2: Employee qualifications and preferences

Costs (\$)	C_e^r	C_{et}^o	C_{et}^a	P_{et}^i	b_{et}^s	C_e^{tr}	C_t^+	C_t^-	P_e^{tr+}	P_e^{tr-}	P_e^{ht+}	P_e^{ht-}	P_{eat}^a
Case 1	4	0	0	1	-0.1	1	2.5	1	0	0	0	0	0; -1; or 1*
Case 2	4	0	0	1	-0.1	1	2.5	1	0	1	0	0	0; -1; or 1*
Case 3	4	0	0	1	-0.1	1	2.5	1	0	1	0	1	0; -1; or 1*

*: 1 for the least desired activity, 0 Indifferent and -1 for the most preferred

Table3: The costs and the penalties used in experimental test

The proposed personnel scheduling model of the illustrative assembly center is solved optimally for three different objectives:

- **Case 1:** minimize workforce costs and penalty associated to the employees' dissatisfaction for their assignment to non-preferred assembly activities.
- **Case 2:** minimize as in case 1 plus the penalty costs for the deviation from the number of transfers preferred by each employee.
- **Case 3:** minimize as in case 2 plus the penalty costs for the deviation from the work duration preferred by each employee.

As can be seen above, from one to three, the cases gradually offer more treatment of personnel preferences.

Moreover, to analyze the impact of considering employee preferences on the value of the objective function, we use the optimal solution for each case to calculate the values of the two other objective functions. This allows us to better understand the behaviour of the objective function while considering employee preferences or choosing to exclude them.

6.4.2. Computational results

Ilog CPLEX Version 9.0 was used to solve the model on a 2.60GHz, Pentium 4 microcomputer. The formulation of the most complex model, corresponding to case 3,

required a total of 69 872 nonzero variables. This emphasizes the large scale nature of such problems since a five-station, three-product per day, 30-worker center is far from being a large assembly center.

Table 4 gives the optimal objective function value, the solution time, and the number of iterations up to optimality for each case. First, the results show that the problems are solved to optimality within five to 135 minutes. On the one hand, this is attractive since it proves that for smaller cases such as the present, it is possible to get the optimal solution using a commercial solver. On the other hand, this explicitly demonstrates that optimal resolution times are bound to be huge for larger size cases and that even for smaller cases, optimal solvers cannot be reliably used in a fast interactive environment requiring the generation of solutions in short times, pointing toward the need to develop heuristic optimization approaches.

Second, the results show that the nature of the objective function has significant impact on the computation time required for reaching optimality. The computation time climbed significantly from 305 seconds to 484 seconds and then sharply to 8084 seconds by respectively incorporating the consideration of transfer frequency preference and work duration preference in the objective function. Reflecting on this issue, it appears that the solution space had many solutions with the same objective function value in the first case. However, this situation faded when adding more preference related elements in the objective function, making many more solutions with distinct objective function value. This phenomenon slowed the reach and proof of optimality.

Objective function	# Iterations	Solution time	Optimal solution
Case 1: minimize (workforce costs + penalty concerning employees' dissatisfaction for their assignment to non-preferred assembly activities)	31740	305.05 sec	2126.8 \$
Case 2 : minimize (as in case 1 + penalty concerning the deviation from the number of transfers preferred by each employee)	52154	483.55 sec	2158.9 \$
Case 3 : minimize (as in case 2 + penalty for the deviation from the work duration preferred by each employee)	1015223	8083.81 sec	2458.9 \$

Table 4: Optimal results

Table 5 presents the values of the three objective functions which are simultaneously applied to the three obtained optimal solutions. Each function is expressed in three parts: workforce costs and penalty associated to the employees' dissatisfaction for their assignment to non-preferred assembly activities; penalty costs for the deviation from the number of transfers preferred by each employee; penalty costs for the deviation from the work duration preferred by each employee. This table demonstrates on the one hand, that by integrating more employee preferences into the function to be optimized we can improve the quality of life of the staff all the while improving the quality of the objective function. Indeed, we observe that when we take into account the preferences, the deviation of the objective functions from the optimal solutions is in the order of 0 to 0.7%. On the other hand, this table also demonstrates that by neglecting the dimension linked to employee preferences we risk to degrade dramatically the quality of the solution. In this case, the deviations with regards to the optimal solutions are in the order of 2.5 to 10 %. These results highlight the advantage of modelling the personnel scheduling problem taking into consideration the dimension linked to employee preferences.

	Objective function of case 1	Objective function of case 2	Objective function of case 3
Optimal solution case 1	2126.8 (2126.8; 0; 0)	2214.8 (2126.8; 88 ; 0)	2705.8 (2126.8; 88 ; 491)
Optimal solution case 2	2126.9 (2126.9; 0; 0)	2158.9 (2126.9; 32 ; 0)	2582.9 (2126.9; 32 ; 424)
Optimal solution case 3	2139.9 (2139.9; 0; 0)	2174.9 (2139.9; 35; 0)	2458.9 (2139.9; 35 ; 284)

Table 5: impact of considering employee preferences on the value of the objective function

Table 6 illustrates the personnel schedule obtained for case 3. It shows that the optimal solution has between 15 and 19 workers present in the center depending on the period. The majority of workers that are called to work are present for their full shift; however a number of workers are called in only for a few hours. Some full shift workers have a very stable work assignment, such as worker four who performs activity a51 most of the day, interlaced with a few periods devoted to secondary activity c1. In contrast, some workers switch stations, as worker 14 who switches from station three to two in period 13. Some others are assigned to more than a single activity during a planning period, such as worker 28 whose competency permits him to perform activities a11 and a13 at station

one from period 1 to 10. On one side, table 6 permits us to validate the feasibility of the optimized solution based on the introduced model. On the other side, it allows to recognize that there is a wide interplay of scheduling considerations and options at play, making the optimal solution non trivial to guess, since it exploits the multi-skill flexibility of the workers while concurrently weighing in their multi-faceted preferences.

	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8	w9	w10	w11	w12	w13	w14	w15	w16	w17	w18	w19	w20	w21	w22	w23	w24	w25	w26	w27	w28	w29	w30	Tot	Rmv	add		
t1				a51	a41								a23	a31	a11+a12	a32	a43	a42			a23	a32	a13	a21		a21	a51+a52	a11+a13	a42	a53	17				
t2				a51	a41								a23	a31	a11+a12	a32	a43	a42			a23	a32	a13	a21		a21	a51+a52	a11+a13	a42	a53	17				
t3				a51	a41								a23	a31	a11+a12	a32	a43	a42			a23	a32	a13	a21		a21	a51+a52	a11+a13	a42	a53	17				
t4				a51	a41								a23	a31	a11+a12	a32	a43	a42			a23	a32	a13	a21		a21	a51+a52	a11+a13	a42	a53	17				
t5				a51	a41								a23	a31	a11+a12	a32	a43	a42			a23	a32	a13	a21		a21	a51+a52	a11+a13	a42	a53	17				
t6				a51	a41								a23	a31	a11+a12	a32	a43	a42			a23	a32	a13	a21		a21	a51+a52	a11+a13	a42	a53	17				
t7				a51	a41								a23	a31	a11+a12	a32	a43	a42			a23	a32	a13	a21		a21	a51+a52	a11+a13	a42	a53	17				
t8				a51	a41								a23	a31	a11+a12	a32	a43	a42			a23	a32	a13	a21		a21	a51+a52	a11+a13	a42	a53	17				
t9				br	br						br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br
t10				a51	a41		c2						a23	a31	a12	a32	a43			a11	a23	a32	a13	a21		a21	a51+a52	a42	a11+a13	a42	a53	19	1	3	
t11				a51	a41		c2						a23	a31	c2	a32	a43			s1	a23	a32	a21		a21	a51+a52	a42	c1	a42	a53	18	1			
t12				a51	a41		c2						a23	a31	c1	a32	a43			s1	c1	a32	c2		s2	a51+a52	a42	c1	a42	a53	18				
t13				a51	a41		s3						c2		a11+a12	ds	a43			ds	c2	c1	c1		s2	a51+a52	a42	a11	a42	a53	17	1			
t14				a51	ds		s3						a23		a11+a12	a22	c1			s4	a23	c2	a21		a22+a21	a51+a52	ds	a11	c2	a53	17				
t15				c1	a32		a33						a23		a11+a12	a22	c2			s4	a23	a32	a21		a22+a21	c1	a33	a11	c2	s5	17				
t16				c1	a32		a33						a23		a11+a12	a22	a43			a42	a23	a32	a21		a22+a21	c2	a33	a11	a42	s5	17				
t17				a51	a32		a33						a23		a11+a12	a22	a43			a42	a23	a32	a21		a22+a21	a51+a52	a33	a11	a42	a53	17				
t18				br	br		br						br	br	br	br	br			br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	
t19				br	br		br						br	br	br	br	br			br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	
t20	a33			a51	a32	a12		a22						a32	a43	a23			a11	a23	a42	a21	a22	a21	a51+a52	a33	a11	a42	a53	19	3	5			
t21	a33			a51	a32	c1		a22						a32	a43	a23			s1	a23	a42	a21	a22	a21	a51+a52	a33	c1	a42	a53	19					
t22	a33			a51	a32	c1		c1						a32	a43	ds			s1		a42	c2	ds	s2	a51+a52	a33	c1	a42	a53	18	1				
t23	c1			a51	c1	c2		c1						c1	a43	a11			ds		a42	c2	a13	s2	a51+a52	s3	a11+a13	a42	a53	18					
t24	c2			a51	c2	c1		a22						c1	c1	a11			s4		ds	a21	a13	a22+a21	a51+a52	s3	a11+a13		a53	17	1				
t25	a33			c1	c1	a31		a22						a32	c1	a11			s4		a32	a21	a13	a22+a21	c2	a33	a11+a13		s5	17					
t26	a33			c1	a41	a31		a22						a32	a43	a11					a32	a21	a13	a22+a21	c1	a33	a11+a13		s5	16	1				
t27	a33			a51	a41	a31		a22						a32	a43	a11					a32	a21	a13	a22+a21	a51	a33	a11+a13		s5	15	1				
t28	br			br	br		br							br	br	br					br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	br	
t29	a33			a51	a41	a31		a22						a32	a43	a11					a32	a21	a13	a22+a21	a51+a52	a33	a11+a13			15					
t30	a33			a51	a41	a31		a22						a32	a43	a11					a32	a21	a13	a22+a21	a51+a52	a33	a11+a13			15					
t31	a33			a51	a41	a31		a22						a32	a43	a11					a32	a21	a13	a22+a21	a51+a52	a33	a11+a13			15					
t32	a33			a51	a41	a31		a22						a32	a43	a11					a32	a21	a13	a22+a21	a51+a52	a33	a11+a13			15					
t33	a33			a51	a41	a31		a22						a32	a43	a11					a32	a21	a13	a22+a21	a51+a52	a33	a11+a13			15					
t34	a33			a51	a41	a31		a22						a32	a43	a11					a32	a21	a13	a22+a21	a51+a52	a33	a11+a13			15					
t35	a33			a51	a41	a31		a22						a32	a43	a11					a32	a21	a13	a22+a21	a51+a52	a33	a11+a13			15					
t36	a33			a51	a41	a31		a22						a32	a43	a11					a32	a21	a13	a22+a21	a51+a52	a33	a11+a13			15					

shift start
 shift end
 Tot: number of present workers in the assembly centre at time t
 Rmv: number of workers removed from the assembly center at time t
 Add: number of workers added in the assembly centre at time t
 aij: worker is assigned to fulfilling the assembly activity j at station i
 si: worker is assigned to fulfilling the setup activity at station i
 cj: worker is assigned to the secondary activity j
 ds: employee e is in movement
 br: employee is in break

Table 6: Optimal personnel schedule for case 3

6.5. Conclusion and future research

This paper has introduced the first formal description and mathematical modelling of the personnel scheduling problem in the context of a paced multi-product assembly center, explicitly taking into consideration the individual competencies and preferences of each worker, as well as the personnel and competency requirements associated with each

assembly activity given both the current master assembly schedule and line balancing for each product. The mathematical programming model optimizes the dynamic assignment of personnel to stations so as to minimize the operational costs and personnel dissatisfactions to sustain the product assembly schedule. The sample cases empirically solved and analyzed permit (1) to validate the model, (2) to prove that it can be solved for smaller problems, (3) to indicate that heuristic optimization approaches are to be required for larger cases, (4) to demonstrate that the intricate interplay of constraints, options and preferences is to be exploited to generate optimized personnel schedules in such environments, and (5) to highlight the advantage of considering employee preferences in the modelling of the personnel scheduling problem.

In the next stage of our research program, we intend to address large industrial size cases, generally characterized by a high number of products, stations and employees. This will require the development of heuristic optimization approaches as stated above. In addition, we will investigate the impact of dynamic random events such as an employee failing to arrive or having to depart during their shift, product quality issues on the line, and probabilistic operation times potentially depending on the operator's skill level. This will require embedding the personnel scheduling engine in an assembly center simulator to perform an experimental investigation capable of dealing with the dynamic and stochastic nature of the problem. In addition, our capacity to resolve large problems will allow us to give an in depth analysis of the impact of modelling employee preferences on the quality of the scheduling solutions obtained.

7. Ordonnement du personnel : une approche à base d'agents

L'objectif de cette section est de développer un environnement de simulation et de résolution du problème d'ordonnement du personnel selon une approche à base d'agents. Nous décrivons notre approche pour l'élaboration d'une plateforme générique et évolutive adaptée au problème d'ordonnement du personnel dans un contexte manufacturier. Cette approche consiste dans un premier temps, en l'élaboration d'un ensemble d'agents hétérogènes qui modélisent le plus fidèlement possible la complexité et le comportement de l'environnement d'assemblage et qui intègrent et cherchent à atteindre un ou plusieurs objectifs locaux d'ordonnement tout en prenant en considération des éléments d'information émanant, en temps réel, d'autres agents ou d'entités externes. Ces objectifs locaux peuvent être modifiés ou adaptés en cas de besoin dans la perspective d'atteindre les objectifs globaux du système. Dans un deuxième temps, ces agents doivent être dotés de mécanismes d'interaction qui leur permettront de se coordonner afin de trouver un ordonnancement global satisfaisant, d'éviter l'anarchie et le chaos dans le système multi-agents (SMA) et de minimiser l'impact des perturbations générées par des événements inattendus.

Dans ce qui suit, nous décrivons dans un premier temps l'architecture multi-agents élaborée, les principales fonctions des agents adoptés, leurs structures internes, ainsi que leurs différents canaux de communication. Dans un deuxième temps, nous présentons l'implémentation de cette architecture dans un environnement orienté-objet du type Java⁸. Dans un troisième temps, nous présentons l'algorithme et les stratégies qui permettront aux différents agents de notre SMA de négocier afin d'élaborer une solution du problème d'ordonnement du personnel dans un contexte de chaîne d'assemblage. Par la suite, des exemples de résultats de simulations seront exposés.

⁸ <http://java.sun.com>

7.1. Plateforme de simulation à base d'agents

7.1.1. L'architecture du système multi-agents

Une architecture multi-agents est définie comme étant une architecture contenant un modèle du monde réel, dans lequel les décisions et le raisonnement sont distribués parmi les agents (Marcenac & Giroux, 1998 ; Gokturk & Polat, 2003). Traditionnellement, une telle architecture décrit deux niveaux. Le premier niveau est celui des entités réelles de l'environnement qu'on cherche à modéliser (p. ex. les entités physiques ; les entités externes ; les entités fonctionnelles et les entités informationnelles). Le deuxième niveau représente, quant à lui, les agents qui sont responsables de la manipulation, de la planification et du contrôle de toutes les requêtes et les actions de ces entités.

Dans le cas de cette recherche, le monde réel à modéliser est celui d'un système d'assemblage composé de plusieurs stations de travail qui nécessitent un approvisionnement précis en main-d'œuvre. Afin de modéliser un tel système d'assemblage, nous avons développé un système multi-agents composé d'une population d'agents hétérogènes dont une partie désigne des entités physiques du système d'assemblage, alors que l'autre partie représente des fonctions de planification et d'ordonnancement. L'ensemble de ces agents est réparti en quatre classes : l'agent maître de la production, l'agent coordonnateur de main-d'œuvre, les agents-stations et les agents-employés. Ces agents sont autonomes, rationnels et capables de communiquer entre eux. Ils ont des niveaux distincts de représentation d'eux-mêmes ainsi que de leur environnement. Les rôles de ces différents agents au sein du système de simulation se présentent comme suit :

- L'agent maître de production définit le plan de production en déterminant la séquence et la quantité des modèles du produit à assembler par période. Ce plan est communiqué par la suite aux différents agents-stations. Cet agent se base sur un ensemble de règles de priorité pour déterminer, un par un, les ordres de fabrication à planifier, et ce, afin d'optimiser certains critères tels que : maximisation de l'occupation des stations de travail ; minimisation des retards, etc. Dans cette recherche, nous considérons que les décisions liées à l'élaboration

du plan de production ne sont pas influencées pas les agents relatifs aux ressources humaines. De telles influences seront prises en compte dans une recherche subséquente.

- Un agent-station est chargé de la gestion et du contrôle des activités d'assemblage d'une station de travail. En se basant sur le plan de production, il doit ordonnancer les processus de la station et l'approvisionner en personnel auprès de l'agent coordonnateur de main-d'œuvre. Le besoin en personnel est exprimé par le nombre d'employés avec l'ensemble des compétences requises durant une période de planification.
- Un agent-employé représente les intérêts d'un employé. Il encapsule l'état ainsi que les principales caractéristiques de son employé, notamment, ses compétences d'assemblage, ses préférences et son historique. Ces agents sont capables de négocier et de coopérer entre eux afin de maximiser leurs gains. Dans l'architecture proposée, ils sont contrôlés par l'agent coordonnateur de main-d'œuvre qui joue un rôle de médiateur.
- L'agent coordonnateur de main-d'œuvre est responsable de coordonner un nombre d'agents-employés. Il a pour mission d'élaborer une solution initiale d'allocation des employés aux stations de travail, aux pauses de travail ou aux activités secondaires. Par la suite, il prend le rôle de médiateur dans les différentes étapes de négociation entre les agents-employés qui chercheront à améliorer leurs plans initiaux de travail en échangeant entre eux des parties de leurs emplois de temps.

La figure 5 représente l'architecture élaborée pour le système multi-agents. Elle reflète d'une part, la nature des relations qui relient les différents groupes d'agents entre eux. Et d'autre part, la nature des ressources ou des rôles encapsulés par chaque type d'agents.

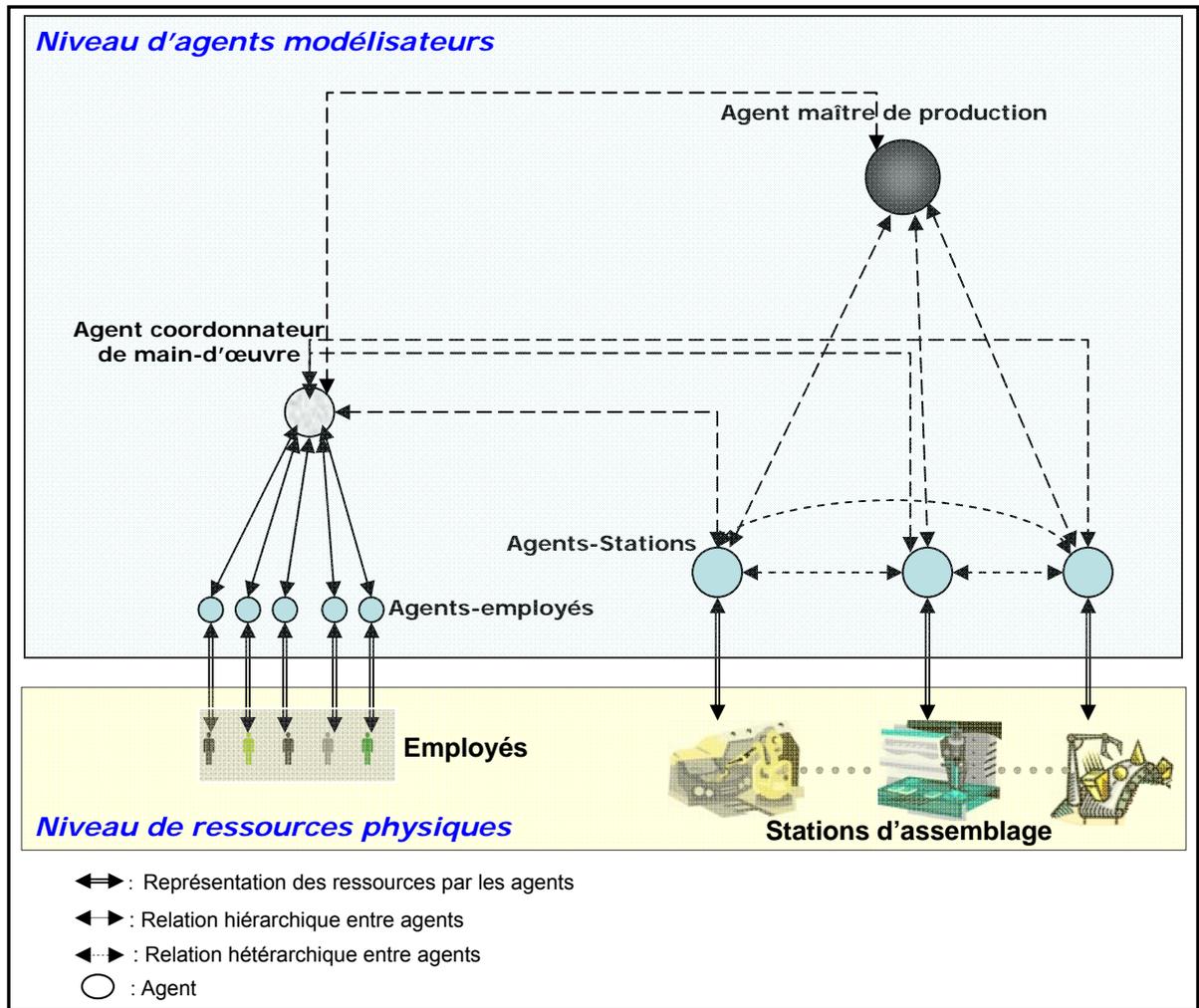


Figure 5 : Architecture élaborée du système multi-agents pour l'ordonnancement du personnel

7.1.2. L'architecture interne des agents

Cette section focalise sur la conception de l'architecture interne des agents. Une telle architecture est définie comme étant un modèle structurel des composants qui constituent l'agent. Elle décrit les interconnexions entre les interfaces et les éléments fonctionnels qui reflètent les aptitudes basiques de l'agent (Lind 2001, p 184). Selon Wooldridge (1999, p 38), l'architecture interne d'un agent est une carte de ses modules internes, de ses structures de données ainsi que des opérations qui peuvent être appliquées à ces structures de données. Il existe plusieurs architectures d'agents. Elles se distinguent généralement par leurs modes de prise de décision. Les principaux groupes

d'architectures sont (cf. section 5.2.1) : les architectures d'agents réactifs, les architectures d'agents délibératifs et les architectures hybrides (Russel & Norvig, 2003 ; Wooldridge, 1999 ; Wooldridge, 2000).

Dans cette recherche, nous nous intéressons à des agents dotés d'une architecture basée sur l'approche délibérative. Ce type d'agents possède un modèle de son environnement et son processus décisionnel est basé sur la manipulation des structures de données qui représentent ses états mentaux, notamment, ses croyances, ses désirs et ses intentions (Russel & Norvig, 2003 ; Wooldridge, 1999 ; Wooldridge, 2000). Il existe deux types d'agents délibératifs : les agents ayant des buts et les agents utilisant une fonction d'utilité (Russel et Norvig 2003, p 49).

Les agents ayant des buts possèdent des buts clairement définis qu'ils cherchent à atteindre. Pour ce faire, chaque agent requiert un ensemble d'informations qui décrit d'une part, l'état actuel de son environnement et d'autre part, la situation désirable qu'il souhaite atteindre. L'agent doit chercher une séquence d'actions qui lui permettra d'évoluer de son état actuel vers son but. Pour faciliter cette recherche, deux sous-domaines de l'intelligence artificielle sont généralement utilisées : les algorithmes de recherche et les méthodes de planification (Russel & Norvig 2003, p 50).

Par ailleurs, les agents ayant une fonction d'utilité disposent d'une fonction qui relie chacun de leurs états à une valeur numérique. Généralement, cette valeur traduit le degré de satisfaction d'un agent ou mesure sa performance. Elle lui permet d'évaluer ou de comparer plusieurs actes possibles et de décider ainsi quel est l'état le plus désirable ou le plus satisfaisant. En effet, avec une telle fonction, un agent peut délibérer entre plusieurs choix d'actions possibles. Notamment, dans les cas où il est face à plusieurs alternatives potentielles qui se distinguent par leur coût, leur rapidité ou leur qualité (Russel & Norvig 2003, p 50).

Dans notre système multi-agents, les différents agents délibératifs utilisés ont :

- Soit des buts : agents stations, agent maître de production ;
- Soit une fonction d'utilité : agents employés, agent coordonnateur de main-d'œuvre.

En effet, notre objectif principal étant de minimiser le coût d'allocation du personnel tout en maximisant la satisfaction des différents employés, nous avons opté pour l'emploi de fonctions d'utilité dans le cas des agents employés et de l'agent coordonnateur de main-d'œuvre. Les agents employés s'appuient sur la fonction d'utilité dans leur processus de coopération, et ce, afin d'évaluer leurs offres mutuelles de formation de coalitions. Dans le cas de l'agent coordonnateur de main-d'œuvre, la fonction d'utilité est utilisée afin d'évaluer la qualité de la solution globale d'allocation du personnel.

Du point de vue de l'architecture interne, les différents types d'agents de notre SMA se distinguent par la nature des modules internes qui les composent ainsi que par la manière dont ces modules sont imbriqués les uns aux autres. En effet, dans notre conception du SMA nous avons opté pour la décomposition de l'architecture interne des agents en plusieurs modules. Chaque module est dédié à une fonction spécifique requise pour l'accomplissement de la mission de l'agent (Bryson & Stein, 2000). Cette décomposition modulaire de l'architecture interne d'agents favorise l'amélioration, l'ajout, et la réutilisation des modules principaux.

Dans le cas de notre plateforme multi-agents, l'architecture interne générique des agents est composée de six modules pour les agents-employés et de cinq modules pour les autres types d'agents. La figure 6 illustre la structure générique de l'architecture interne de nos agents, ainsi que l'imbrication des modules utilisés. Ces principaux modules sont :

1. Un module de connaissances qui se décompose en deux parties : les connaissances individuelles et les connaissances sociales. Les connaissances individuelles reflètent la vue qu'a l'agent de lui-même, notamment, son nom, son adresse, ses objectifs individuels, ses protocoles de décision et ses différents états possibles. Les connaissances sociales reflètent la représentation qu'a l'agent de l'environnement social dans lequel il évolue. Ces connaissances particulières portent sur les agents qu'il peut contacter ou avec lesquels il peut coopérer ainsi que sur les protocoles de communication ou d'interaction à utiliser. En effet, elles permettent à l'agent de sélectionner les agents les plus appropriés qui seront en mesure de l'aider afin d'atteindre son but ou d'améliorer sa fonction d'utilité.

Chaque agent possède une modélisation appropriée des informations et des connaissances qui lui sont associées.

2. Un module de traitement/planification qui se base sur un ensemble de connaissances acquises par l'agent et sur les messages provenant des autres agents afin d'élaborer ou de sélectionner, selon les cas, soit une réponse à une requête ou soit une solution d'ordonnancement. Au niveau de ce module, le processus décisionnel qui permet à l'agent de choisir la solution ou la réponse appropriée est fondé soit sur des critères de performance encapsulés par une fonction d'utilité ou sur un ensemble de buts à atteindre.
3. Un module d'expertise qui décrit les actions de base que l'agent peut accomplir ainsi que ses compétences. Il reflète les capacités métiers et cognitives de l'entité organisationnelle encapsulée par l'agent modélisateur. En effet, ce module détaille le comportement de l'agent qui lui permettra d'améliorer sa fonction d'utilité ou d'atteindre son but et ce, à travers une série d'actions élémentaires.
4. Un module pour la gestion des communications avec les autres agents. D'une part, ce module reçoit de la part du « module de traitement/planification » des demandes de transmission de message à destination d'un ou plusieurs agents; de l'autre, il lui relaye les messages émanant des autres agents. Les différents types de messages manipulés au niveau de ce module sont décrits à la section 7.1.3 ci-après.
5. Un module d'interface avec les éléments de l'environnement extérieur au SMA. Ce module offre des méthodes de base pour supporter les interactions du type humain/agent sous le mode intrant/extrant. Il offre en particulier des méthodes d'affichage des résultats, de saisie des valeurs des paramètres et de perception des perturbations externes.
6. En plus de ces modules, chacun des agents-employés est doté d'un module de coopération qui lui permet de s'engager dans un processus de négociation avec d'autres agents du même type, et ce, afin de former des coalitions qui lui permettront d'améliorer son plan d'ordonnancement. Ce module correspond à une bibliothèque de procédures et de règles qui fixent les mécanismes de coopération et de résolution de conflits. Dans notre conception, chacun des agents-employés

détient un plan initial de ses affectations qui résulte d'une heuristique d'initialisation des quarts de travail qui a pour rôle d'assurer une solution réalisable. Comme ces plans initiaux d'allocation peuvent ne pas être satisfaisants pour la plupart des agent-employés, ces derniers cherchent à former des coalitions afin d'échanger des tâches d'assemblage de manière à améliorer leurs fonctions d'utilités qui reflètent la mesure de performances utilisée. En effet, les agents-employés doivent coopérer afin de concilier leurs objectifs individuels (maximisation de leur satisfaction) et leurs objectifs collectifs (minimisation du coût global d'allocation du personnel). La section 7.2 décrit successivement l'heuristique d'initialisation des quarts de travail ainsi que l'ensemble des procédures et des règles de coopération.

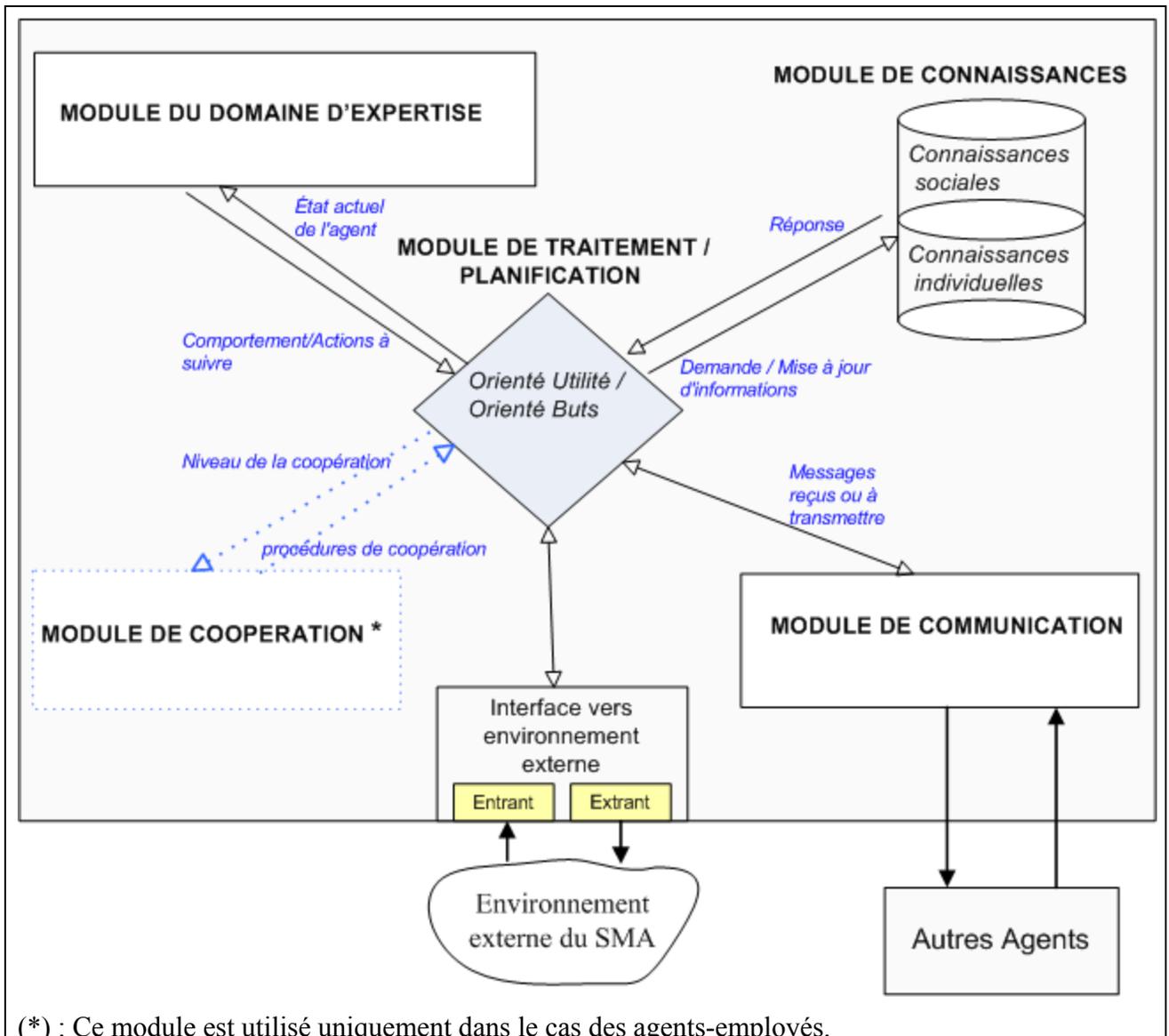


Figure 6 : Structure générique de l'architecture interne des agents

7.1.3. La communication entre les agents

Dans le but de faciliter les interactions et de permettre un échange efficace d'information, plusieurs canaux de communications ont été établis entre nos différents types d'agents. Chaque agent est doté de mécanismes explicites pour communiquer et interagir avec les autres agents. Nous avons implémenté la communication entre les agents sous forme d'échanges de messages. Selon son état et le sujet d'interaction, un agent peut jouer simultanément le rôle d'un transmetteur ou d'un récepteur de messages.

Le tableau 6 illustre les principaux sujets de communication échangés entre les différents types d'agents de notre système. Les expéditeurs des messages sont les agents de la 1^{ère} colonne et les destinataires sont les agents de la 1^{ère} ligne du tableau.

		<i>Agent Récepteur</i>			
		L'agent maître de production	Agent station	L'gent coordonnateur de main-d'oeuvre	Agent employé
<i>Agent Transmetteur</i>	L'agent maître de production		Plan de production (séquence des modèles & quantités à assembler)	La demande totale requise en compétences et en nombre d'employés	
	Agent station	État de la station : peut accepter un nouveau produit ou non	*. État de la station : a terminé l'assemblage d'un item et peut accepter un nouveau produit ou non	Nombre d'employés avec les compétences requises	
	L'gent coordonnateur de main-d'oeuvre	État du bassin de compétences disponibles : permet de répondre à la demande totale ou non	Si la demande en employés sera satisfaite : oui ou non. Si oui, communique la liste des employés affectés à cette station.		L'adresse de la station à laquelle l'employé est affecté ainsi que la durée estimée pour le travail
	Agent employé			Son état, ses compétences et ses préférences	Proposition de coalition afin de maximiser leurs profits respectifs

*. Message envoyé uniquement à l'agent-station situé immédiatement à son amont sur la chaîne d'assemblage.

Tableau 7 : Principaux messages échangés entre les agents de l'architecture proposée

7.1.4. Prototypage de l'architecture multi-agents

Afin de mettre en application notre approche à base d'agents pour l'ordonnancement du personnel, nous avons utilisé l'architecture SMA proposée (cf. section 7.1.1) pour implanter un prototype de système manufacturier composé d'une chaîne d'assemblage avec plusieurs stations de travail. Les différentes entités qui caractérisent l'environnement manufacturier et la problématique d'ordonnancement du personnel sont modélisées sous forme de société d'agents. Ces agents sont imbriqués et intégrés entre eux grâce à une plateforme de simulation. Pour l'implantation de notre plateforme, nous

avons utilisé l'outil AnyLogic™, qui offre un environnement de développement et de simulation de systèmes à base d'agents.

Dans ce qui suit, nous présentons, dans un premier lieu, les principales caractéristiques de l'outil de développement AnyLogic™. Ensuite, nous illustrons la mise en œuvre de la plateforme de simulation grâce à des figures de l'interface utilisateur développée.

7.1.4.1 Outil de développement du prototype : Anylogic™

AnyLogic™ de XJ Technologies Company⁹ est un outil de simulation pour les systèmes de type discret, continu et hybride, de même que pour le développement de modèles déterministes, stochastiques ou de systèmes à base d'agents (Borshchev et al. 2002). C'est un outil basé sur l'approche orientée objet. L'ensemble de ses éléments de simulation et d'animation est développé en langage de programmation Java¹⁰. La modélisation des comportements des agents et des objets repose sur l'utilisation du langage de modélisation UML-RT pour *Unified Modeling Language for Real Time* (Filippov & Andrei, 2001; Borshchev et al. 2002).

Afin de faciliter le développement de systèmes de simulation, Anylogic™ offre d'une part, l'accessibilité à un ensemble de bibliothèques d'objets prédéfinis et paramétrables, et d'autre part, la possibilité de concevoir de nouveaux objets qui modélisent les entités d'un environnement réel particulier. En plus, il permet, grâce à son éditeur graphique, la représentation visuelle et animée des différentes entités d'une simulation.

La bibliothèque d'objets de type entreprise, dite *Enterprise Library*, est un exemple des objets prédéfinis qu'offre l'outil Anylogic™. Elle permet la modélisation des processus génériques de systèmes manufacturiers et logistiques, et ce, grâce à des composants paramétrables tels que les files d'attente, les délais, les convoyeurs, les ressources, etc. Les objets manipulés dans un modèle de simulation sont des instances d'une classe générique appelée *ActiveObjects* qui, à son tour, hérite d'une classe standard d'objet de Java implantée au niveau du moteur de simulation Anylogic™ (Filippov & Andrei,

⁹ <http://www.xjtek.com>.

¹⁰ Conçu par Sun Microsystems, <http://java.sun.com>.

2001). La figure 7 présente un aperçu du modèle conceptuel de l'outil d'Anylogic™. Il schématise l'imbrication des différents objets et structures de données manipulés selon les types de simulations.

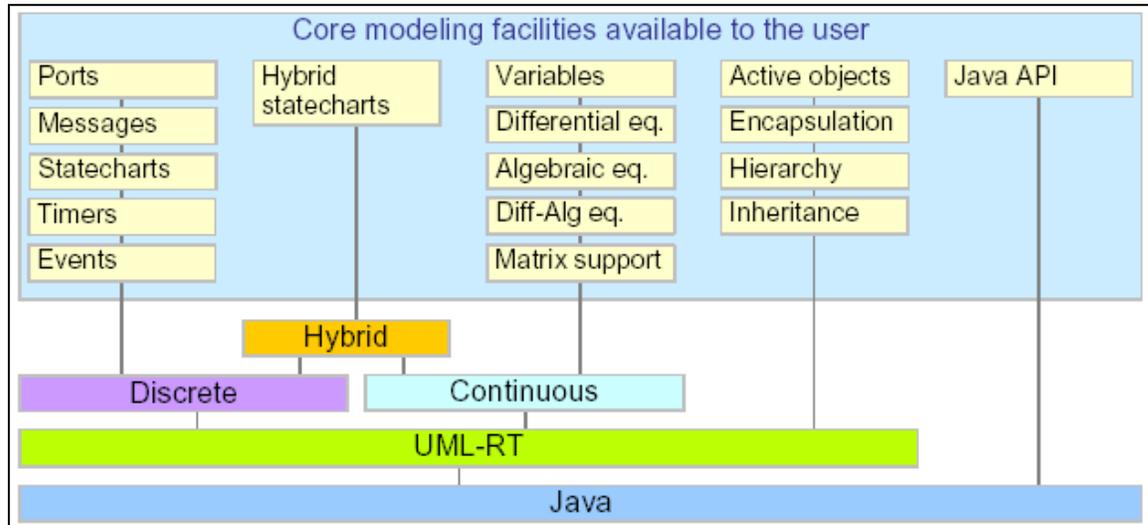


Figure 7 : Modèle conceptuel d'Anylogic™ (source XJ Technologies¹¹)

Pour dresser le comportement d'une simulation discrète ou pour définir les interactions entre plusieurs objets, Anylogic™ se base sur cinq composants prédéfinis : les ports, les messages, les diagrammes d'états, les événements et les minuteurs (Filippov & Andrei, 2001). L'objet Port est le mécanisme qui permet l'échange de messages entre les différents objets actifs d'une simulation. En effet, les objets communicants sont connectés à travers ces ports, créant ainsi des canaux le long desquels les paquets de données sont relayés. Les Ports sont des interfaces bidirectionnelles. Ils sont utilisés tant pour l'envoi que pour la réception de messages. Un diagramme d'état permet de décrire les changements d'états d'un objet en raison d'un ou plusieurs événements. Un événement est défini comme étant l'occurrence d'une action à un instant précis qui engendre un changement d'état du système. Les temporisateurs sont des composants d'Anylogic™ utilisés pour planifier ou retarder le déclenchement des événements.

Anylogic™ offre un certain nombre d'avantages adaptés à notre problématique de modélisation et d'implantation d'une plateforme à base d'agents qui encapsule les

¹¹ <http://www.xjtek.com/>

principales caractéristiques d'une chaîne d'assemblage. Notamment, la bibliothèque des processus préconçus, la portabilité du langage de programmation Java utilisé, l'intuitivité de la démarche de développement de l'interface visuelle et des animations, ainsi que la possibilité de la prise en compte d'agents ou de fichiers externes. L'ensemble de ces caractéristiques a guidé notre choix vers l'adoption d'Anylogic™ comme outil de développement de notre SMA.

7.1.4.2 Implantation du prototype

Afin de mettre en évidence la démarche proposée dans cette recherche, nous avons développé une simulation de chaîne d'assemblage qui repose sur notre architecture multi-agents et sur notre approche conceptuelle de modélisation du problème d'ordonnancement du personnel. Cette simulation comporte quarante agents-stations, un agent maître de production, un agent coordonnateur de main-d'œuvre et un nombre modifiable d'agents-employés. Plusieurs canaux d'interaction relient ces différents types d'agents. L'échange de messages, tel qu'il a été décrit à la section 7.1.3, se fait via les ports que permet d'incorporer Anylogic™ aux différentes structures d'agents.

Les figures 8 et 9 sont deux exemples de l'interface utilisateur de la simulation développée. La figure 8 représente la configuration du système d'assemblage à l'état initial avant le lancement de la production. La figure 9 reflète l'état opérationnel du système. Dans les deux cas, on distingue les entités graphiques qui sont mises en œuvre pour représenter les différents types d'agents de notre SMA.

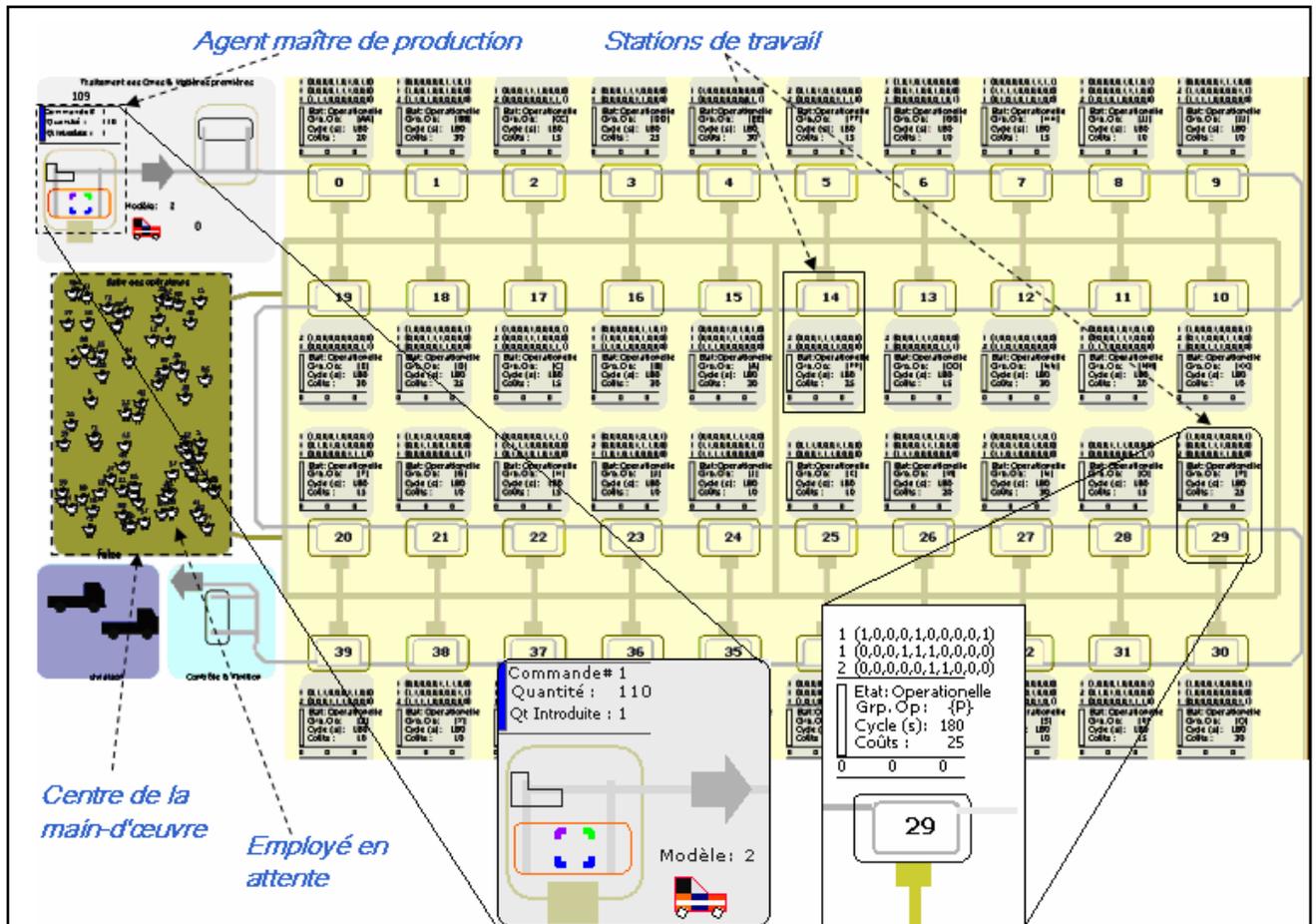


Figure 8 : Interface du système d'assemblage à l'état initial

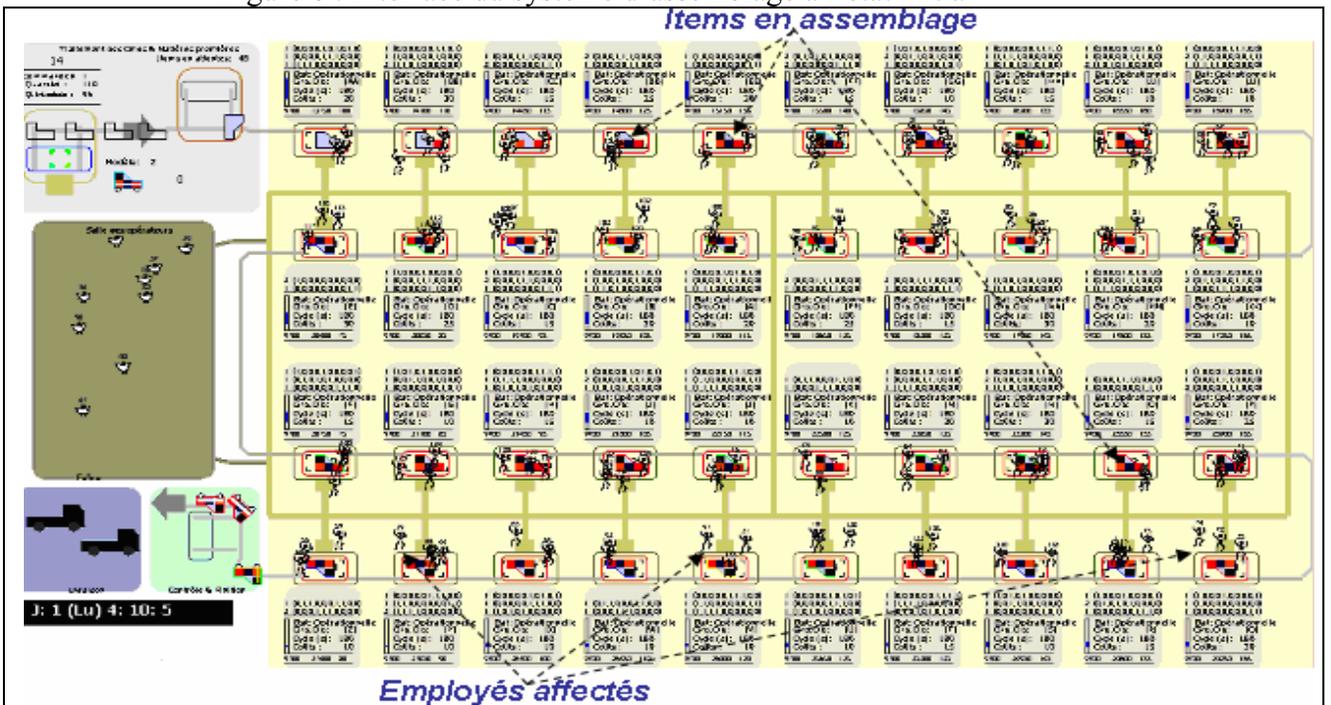


Figure 9 : Interface du système d'assemblage à l'état opérationnel

7.2. Algorithme à base d'agents pour l'ordonnancement du personnel

Dans la section précédente, nous avons proposé une modélisation conceptuelle à base d'agents de l'environnement de chaînes d'assemblage, et ce, dans une perspective de résolution du problème d'ordonnancement du personnel. Le modèle conceptuel établi intègre plusieurs agents intelligents qui encapsulent des entités physiques et des entités fonctionnelles d'une chaîne d'assemblage. Nous allons à présent nous intéresser au niveau logique de ce système multi-agents. Ce niveau correspond à la prise en compte de l'aspect comportemental des différents agents. En effet, le niveau logique constitue une phase de conception dans laquelle nous précisons les règles et les mécanismes qui régissent les interactions intra-agents. En plus, une sémantique est attribuée aux différents actes que peut entreprendre un agent. Nous précisons cet aspect logique à travers un algorithme qui définit une approche de coopération entre les agents afin de trouver un ordonnancement global satisfaisant, d'éviter l'anarchie et le chaos dans le SMA et de minimiser l'impact des perturbations générées par des événements inattendus.

En raison de la complexité élevée du problème d'ordonnancement que nous traitons dans cette recherche (problème NP-complet), nous avons opté pour un algorithme orienté-négociation du type « Anytime algorithms » (Russell & Zilberstein, 1991; Zilberstein & Russell, 1995; Zilberstein, 1996). Ce type d'algorithme permet d'améliorer graduellement la qualité des résultats au fur et à mesure que le temps de calcul augmente. La solution obtenue dépend essentiellement du temps de calcul écoulé (Russell & Zilberstein, 1991 ; Zilberstein & Russell, 1995 ; Zilberstein, 1996; Shehory & Kraus 1998). En effet, c'est un processus itératif de recherche de solutions, pour lequel le temps de calcul ou de recherche de la solution n'est pas requis à l'avance. De tels algorithmes peuvent être stoppés à tout instant. Ils sont en mesure de retourner la meilleure solution atteinte tout en continuant d'améliorer sa qualité au fur et à mesure (Russell & Zilberstein, 1991; Zilberstein, 1996).

7.2.1. Hypothèses et choix de conception

Dans le processus d'élaboration de notre algorithme d'ordonnement du personnel, nous considérons que les hypothèses et les choix de conception suivants sont satisfaits :

- Les agents sont rationnels et cherchent à maximiser leurs profits et leurs satisfactions personnelles.
- Les agents négocient entre eux à travers des échanges de messages.
- Les activités d'assemblage peuvent être transférées entre les agents-employés, mais à condition que les compétences acquises par ces agents soient supérieures ou égales à celles requises pour l'assemblage.
- Le transfert des activités d'assemblage entre deux agents-employés se fait à travers la formation de coalitions (cf. 5.3.3.1). Cela nécessite une répartition du gain généré de manière à ce que chaque agent obtienne un profit égal ou supérieur à celui qu'il peut réaliser en gardant ses activités initiales (cf. 5.3.3.4). Dans ce cas, on parle d'un environnement super-additif.
- Une fonction d'utilité est adoptée afin d'évaluer le profit que peut obtenir chaque agent en accomplissant un ensemble d'activités d'assemblage.
- Les informations liées aux activités d'assemblage et aux compétences de chaque agent sont accessibles aux autres. Cependant, l'ensemble des préférences d'un agent est du domaine du privé, et ne peut être communiqué aux autres qu'à travers la valeur finale de la fonction d'utilité estimée par l'agent concerné.

7.2.2. Étapes de l'algorithme

Les interactions entre les agents de notre SMA sont modélisées sous forme d'un jeu coopératif avec utilité transférable (cf. section 5.3). Chaque agent-employé $i \in N = \{1, \dots, n\}$ détient un vecteur d'activités d'assemblage $\rho^i = [a_{nm,0}^i, \dots, a_{kl,t}^i]$ qu'il doit accomplir, avec $a_{kl,t}^i$ l'activité k à réaliser sur la station l à la période t par cet agent-employé i . Ce vecteur est le résultat d'une étape préliminaire qui consiste en une heuristique d'initialisation. Cette heuristique s'inspire de la théorie des graphes. Notamment, de l'algorithme de Welsh et Powell (1967). En se basant sur le plan de

production et les activités à réaliser au niveau de chaque station, cette heuristique décrite à la section 7.3.2.1 permet d'allouer les activités d'assemblage aux agents-employés selon leurs compétences.

Par la suite, le plan initial d'allocation, résultant de l'heuristique d'initialisation, est affiné à travers la formation de coalitions entre les agents-employés qui cherchent individuellement à acquérir les activités qui maximisent leurs profits et à se débarrasser de celles qui le minimisent.

Chaque coalition est formée de deux agents-employés qui auront décidé de coopérer entre eux en s'échangeant une partie de leurs activités d'assemblage afin d'améliorer leur profit respectif.

L'estimation du profit, pour chaque agent-employé, est calculé via une fonction d'utilité linéaire V_e qui traduit en termes monétaires d'une part, les préférences de l'employé pour les activités à réaliser, pour la durée du quart de travail, pour le nombre de déplacements inter-postes, ainsi que le coût de sa présence, et d'autre part, la vision du gestionnaire des ressources humaines qui cherche à minimiser les coûts d'allocation du personnel. Pour un agent $e \in N$, nous définissons cette fonction comme suit : $V_e = S - f(e)$, avec S une constante qui représente un solde initial alloué à chaque agent-employé et $f(e)$ une fonction linéaire croissante de la durée de travail et du taux d'insatisfaction de l'employé e . De ce fait, nous considérons la fonction $f(e)$ égale à la partie de la fonction objectif de notre modèle mathématique, décrit au chapitre 6, qui correspond à l'employé e , soit :

$$f(e) = (c_e^r W_e + c_e^o O_e) + \sum_{t \in T} c_{et}^a E_{et}^a + \sum_{t \in T} p_{et}^i E_{et}^i + \sum_{t \in T} b_{et}^s E_{et}^s + \sum_t c_e^{tr} E_{et}^d + (p_e^{tr+} TR_e^+ + p_e^{tr-} TR_e^-) + (p_e^{ht+} HT_e^+ + p_e^{ht-} HT_e^-) + \sum_t \sum_a p_{eat}^a A_{eat}$$

La fonction d'utilité V_e est conçue de manière à générer davantage de profit pour un employé qui réussit à se libérer de ses tâches d'assemblage ou à acquérir un ensemble qui lui génère une haute satisfaction.

La structure générale de l'algorithme adopté se présente comme suit :

1. Génération d'une solution initiale
2. Négociation entre les agents-employés pour former des coalitions afin d'améliorer la solution initiale.
 - 2.1. Les agents-employés génèrent des structures de coalitions équilibrées.
 - 2.2. L'agent coordonnateur de main-d'œuvre vérifie le nombre de coalitions faisables. Si plusieurs coalitions sont possibles, il choisit aléatoirement une coalition qui améliore la solution globale d'allocation du personnel. Par contre, si aucune coalition n'améliore la solution globale (c.-à-d. aucune coalition n'offre aux agents qui y participent des gains supérieurs ou égaux à leurs gains initiaux), la solution a atteint un optimum local. Dans ce cas, l'agent coordonnateur de main-d'œuvre introduit une fonction de perturbation qui a pour rôle d'attribuer aléatoirement des gains fictifs à un certain nombre d'agents, de telle manière à les inciter à former des coalitions. Reprendre l'étape 2.1.

La figure 10 illustre la structure globale des différentes étapes de l'algorithme pour l'ordonnancement du personnel.

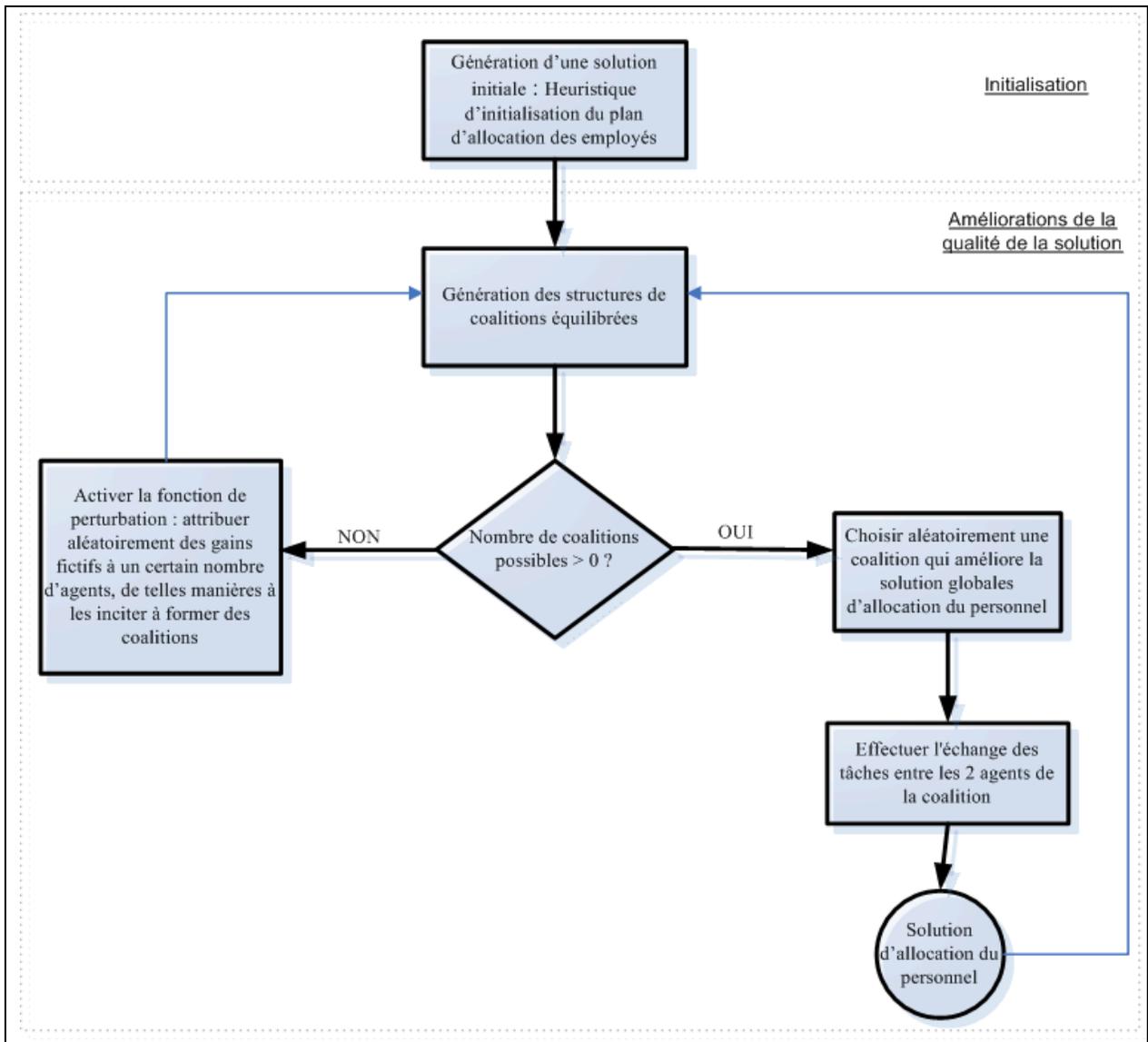


Figure 10 : Étapes générales de l’algorithme

7.2.2.1. Génération d’une solution initiale

Le but de cette heuristique est de générer une solution initiale du problème d’allocation des employés, et ce, à partir d’un ensemble de paramètres initiaux. La solution générée à ce niveau sera améliorée dans une prochaine étape grâce aux échanges d’activités à travers la formation de coalition.

Intrants de l'heuristique:

- Plan de production ;
- Besoins de chaque station en termes du nombre des employés et des compétences requises ;
- Ensemble des compétences acquises par chaque employé.

Résultats : Plan initial d'allocation des employés

1. Estimation des besoins totaux en personnel :
 - L'agent maître de production communique le plan de production aux différentes stations de travail.
 - Chaque station définit ses besoins en ensembles de compétences et en nombre d'employés requis pour chaque période.
2. L'agent coordonnateur de main-d'œuvre transmet aux différentes stations les caractéristiques du bassin de main d'œuvre disponible : nombre et compétences des employés.
3. Pour chaque ensemble de compétences requises et pour chaque période de temps, les stations calculent leurs excédents en employés qui satisfont les exigences en compétences requises. Pour une station, l'excédent à une période de temps égale la différence entre le nombre disponible et le nombre requis des employés.
4. Les stations transmettent le résultat des calculs des excédents à l'agent coordonnateur de main-d'œuvre.
5. Allocation d'un employé à la station la plus critique :
 - L'agent coordonnateur de main-d'œuvre classe les stations par ordre croissant de leurs excédents.
 - Par la suite, il choisit la station qui a le plus petit excédent et lui affecte l'employé le moins polyvalent qui détient l'ensemble des compétences requises.
6. S'il reste des stations avec des demandes non satisfaites, revenir à l'étape 3. Sinon, l'initialisation du plan d'allocation est terminée.

À la fin de cette heuristique, nous obtenons une solution d'allocation faisable, mais qui est souvent loin d'être optimale et peut être de piètre qualité. L'objectif de l'étape

suivante porte sur l'amélioration de cette solution à travers la formation de coalitions entre des agents rationnels.

7.2.2.2. Processus de négociation pour l'amélioration de la solution initiale

La négociation entre les agents-employés pour la formation de coalitions se fait en deux étapes itératives. La première étape porte sur la recherche des structures de coalitions possibles et la distribution équilibrée des profits entre les différents agents. La deuxième étape s'intéresse au choix de la coalition à former parmi l'ensemble des possibilités.

7.2.2.2.1. Phase 1 : Génération des structures de coalitions équilibrées

Pour qu'un couple d'agents (i,j) détenant les ensembles d'activités d'assemblage ρ^i et ρ^j forme une coalition, ils doivent s'assurer d'une part que le profit $v(C_{ij})$ généré suite à l'échange d'activités¹² ρ_{new}^i et ρ_{new}^j est supérieur ou égale à la somme de leurs utilités initiales : $v(C_{ij}) = V_i(\rho_{new}^i) + V_j(\rho_{new}^j) \geq V_i(\rho^i) + V_j(\rho^j)$ et d'autre part, que le gain qu'obtiendrait chacun d'eux suite à la répartition du profit de la coalition dépasse ou égale celui qu'il a initialement : $v(C_{ij}) = u_i + u_j; u_i \geq V_i(\rho^i)$ et $u_j \geq V_j(\rho^j)$.

Pour estimer leurs parts de gains dans d'éventuelles coalitions, les agents se basent sur le concept d'équilibre du Kernel et sur le schéma de transfert de Stearns (1968) (cf. section 5.3.3.4.). La stratégie adoptée par chaque agent-employé $i \in N = \{1, \dots, n\}$ est comme suit :

Intrant : Plan initial d'allocation et ensemble des préférences

Résultat : Ensemble des coalitions possibles et distribution équilibrée des profits

1. Chaque agent-employé conserve un registre des coordonnées des autres agents-employés avec lesquels il peut échanger certaines activités. L'élaboration de ce registre se fait à chaque début de quart de travail. Dans un premier temps, chaque agent-employé communique aux autres, à travers un broadcast général, la liste des

¹² ρ_{new}^i désigne le nouvel ensemble d'activités détenu par l'agent i suite à l'échange d'une partie de ses activités avec l'agent j .

activités pour lesquelles il dispose des compétences requises. Dans un deuxième temps, chaque agent-employé compare sa propre liste avec celles reçues de la part des autres agents, puis il ajoute à son registre les références de chaque agent avec lequel il a au moins une compétence commune par rapport à une activité d'assemblage.

2. Pour chaque agent figurant sur son registre, il teste l'ensemble des permutations faisables des activités et calcule la valeur de chacune de ces coalitions.
3. En cas de plusieurs permutations possibles avec un agent j , il ne retient que celle qui génère l'utilité la plus élevée $v_{\max}(C_{ij})$ qui excède ou égale la somme de leurs utilités initiales¹³.
4. Il envoie une proposition de coalition PR_{ij} à l'agent j . Cette proposition encapsule l'ensemble d'activités à échanger entre les deux agents, la valeur de la coalition $v(C_{ij})$ et une valeur du profit u_j que recevra l'agent j en acceptant de participer à cette coalition. Initialement, les profits des agents i et j , suite à la formation d'une coalition, sont estimés respectivement à : $u_i = V_i(\rho^i) + \frac{v(C_{ij}) - (V_i(\rho^i) + V_j(\rho^j))}{2}$ et $u_j = V_j(\rho^j) + \frac{v(C_{ij}) - (V_i(\rho^i) + V_j(\rho^j))}{2}$.
5. Il reçoit les propositions de coalitions émanant des autres agents.
6. En utilisant le concept du Kernel (cf. section 5.3.3.4.), il teste l'équilibre des coalitions qu'il peut joindre.
7. En cas d'une coalition instable, l'agent utilise le schéma de transfert de Streans (cf. section 5.3.3.4.4) pour estimer la valeur de la fonction de demande qu'il doit céder ou recevoir.
8. Pour chaque coalition instable, il reçoit ou transmet les valeurs des demandes dues.

¹³ Nous considérons que les agents sont intègres et équitables. De ce fait, le calcul de la valeur d'une coalition de deux agents est symétrique. Qu'il soit fait par l'agent i ou j , le résultat final est le même : $v_{\max}(C_{ij}) = v_{\max}(C_{ji})$. Cette propriété sera exploitée par la suite dans l'implantation de l'algorithme afin de réduire le nombre d'opérations de calcul et ce, en déléguant le calcul de la valeur de la coalition à un seul agent du couple.

Grâce à ce processus, nous obtenons un ensemble de structures de coalitions faisables avec une distribution équilibrée des profits. Chaque agent peut avoir plusieurs offres de coalitions avec différents gains possibles, parmi lesquels il doit réaliser un choix. Ce choix est effectué à travers un processus de négociation entre les agents-employés et une médiation de l'agent coordonnateur de main-d'œuvre.

7.2.2.2.2. Phase 2 : Choix de coalition

Nous considérons que les agents sont individuellement rationnels. Pour cette raison, chacun d'eux cherche à joindre la coalition qui lui génère la plus grande utilité. Cependant, si un agent i choisit de former une coalition avec l'agent j , rien ne garantit que ce dernier accepte, car il se peut que l'agent j gagne plus en formant une autre coalition avec un troisième agent k .

À titre d'exemple, considérons les deux cas suivants de distribution des profits pour trois agents (a_1, a_2, a_3) dans deux jeux distincts. Le premier cas illustre l'exemple d'une coalition faisable. Le deuxième présente plutôt un exemple de coalition infaisable en raison de conflits entre les trois agents.

<i>Coalitions</i>	<i>a1</i>	<i>a2</i>	<i>a3</i>
{a1}	2	0	0
{a2}	0	1	0
{a3}	0	0	1
{a1, a2}	3	6	0
{a1, a3}	1	0	5
{a2, a3}	0	2	2
Utilité maximale $u_{i,max}$	3	6	5

$$\begin{cases} a1: a2 \succ a1 \succ a3 \\ a2: a1 \succ a3 \succ a2 \\ a3: a1 \succ a2 \succ a1 \end{cases}$$

Classement croissant des préférences de choix de coalitions/agent

Figure 11 : Exemple de distribution des profits pour des coalitions faisables

<i>Coalitions</i>	<i>a1</i>	<i>a2</i>	<i>a3</i>
{a1}	1	0	0
{a2}	0	1	0
{a3}	0	0	1
{a1, a2}	3	7.5	0
{a1, a3}	2	0	3.5
{a2, a3}	0	9	2.5
Utilité maximale $u_{i,max}$	3	9	3.5

$$\begin{cases} a1 : a2 \succ a3 \succ a1 \\ a2 : a3 \succ a1 \succ a2 \\ a3 : a1 \succ a2 \succ a3 \end{cases}$$

Classement croissant des préférences de choix de coalitions/agent

Figure 12 : Exemple de distribution des profits pour des coalitions infaisables

Dans le premier exemple à la figure 11, les agents a1 et a2 obtiennent leurs utilités maximales respectives en formant la coalition {a1, a2}. Cependant, dans le deuxième exemple, dans le but d'atteindre leurs utilités maximales possibles, les agents a1, a2 et a3 choisissent respectivement les coalitions {a1, a2}, {a2, a3} et {a3, a1}. De tels choix ne peuvent être concrétisés en raison des conflits d'intérêts entre les agents. Dans ce cas, aucune coalition n'est possible sans concession de la part d'un ou de plusieurs agents.

Afin de remédier à ce problème, nous introduisons une fonction de régression f_{reg} qui permet aux agents, en cas de conflit, de réviser leurs gains à la baisse de manière à converger vers un consensus. Cette fonction est : $f_{reg}(a_i, \eta) : u_{i,max} \rightarrow \eta \times u_{i,max}, \eta \in [0,1]$. Elle est définie explicitement comme étant la multiplication de la valeur de l'utilité la plus élevée $u_{i,max}$ que peut atteindre un agent i , à travers une coalition potentielle, par un coefficient de régression $\eta \in [0,1]$. Ce coefficient représente le taux que peuvent céder les agents de leurs profits afin d'arriver à un terrain d'entente. Simultanément, chaque agent applique cette fonction de régression pour calculer la valeur minimale du profit $u_{i,min}$ qu'il peut accepter. Suite à cela, il cherche l'ensemble des coalitions $\Lambda_{i,\eta}$ qui lui permettent d'avoir un gain supérieur ou égal à $u_{i,min}^\eta$. En cas d'accord entre un ou plusieurs couples d'agents, la coalition qui génère la plus grande valeur est retenue. Sinon le coefficient de

régression est révisé à la baisse et une nouvelle itération pour le calcul de la fonction f_{reg} est requise.

Si on prend le deuxième exemple à la figure 12, l'application d'un coefficient de régression $\eta = 0.8$ aboutit aux résultats suivants : $u_{1,\min}^{0.8} = 0.8 \times u_{1,\max} = 0.8 \times 3 = 2.4$; $u_{2,\min}^{0.8} = 0.8 \times 9 = 7.2$ et $u_{3,\min}^{0.8} = 0.8 \times 3.5 = 2.8$. Pour chacun des trois agents, l'ensemble des coalitions possibles¹⁴ est : $\Lambda_{1,0.8} = \{\{a1, a2\}\}$, $\Lambda_{2,0.8} = \{\{a1, a2\}; \{a2, a3\}\}$ et $\Lambda_{3,0.8} = \{\{a1, a3\}\}$. La coalition $\{a2, a3\}$ est écartée car elle n'appartient pas à l'ensemble des coalitions acceptées par a3. De même pour la coalition $\{a1, a3\}$ qui ne figure pas dans $\Lambda_{1,0.8}$. La seule coalition qui crée un consensus est celle formée par l'agent a1 et a2.

Formellement, la deuxième phase, qui porte sur le choix d'une coalition, se présente ainsi :

Intrant : Ensemble des structures de coalitions obtenues à la phase 1 avec les distributions équilibrées des profits

Résultat : Formation d'une coalition

1. Initialisation du coefficient de régression : $\eta = 1$.
2. Chaque agent $i \in \{1, \dots, n\}$ élabore une liste $\Lambda_{i,\eta}$ des coalitions qui lui garantissent un profit égal ou supérieur à $u_{i,\min}^\eta = \eta \times u_{i,\max}$.
3. Chaque agent i communique l'ensemble $\Lambda_{i,\eta}$ à l'agent coordonnateur de main-d'œuvre.
4. L'agent coordonnateur de main-d'œuvre choisit, parmi toutes les propositions reçues, les coalitions qui obtiennent l'accord mutuel des deux agents qui y participent. À ce stade, on se trouve dans l'un des cas de figure suivants :

¹⁴ Pour un agent i , les éventuelles coalitions sont celles dans lesquelles il perçoit une utilité supérieure ou égale à la valeur minimale $u_{i,\min} = \eta \times u_{i,\max}$ calculée à partir de l'utilisation de la fonction de régression.

- Il y a une ou plusieurs coalitions possibles, alors l'agent coordonnateur de main-d'œuvre en choisit une aléatoirement. Les deux agents concernés par cette coalition seront notifiés afin d'effectuer l'échange des activités d'assemblage.
- Par contre, si aucun consensus n'est atteint dans la formation de coalitions, le coefficient de régression est révisé à la baisse $\eta \leftarrow \eta - \varepsilon$:
 - Si $\eta \geq 0$, une nouvelle itération à partir de l'étape 2 sera nécessaire.
 - Sinon, si $\eta < 0$, la solution globale a atteint un optimum local. Dans ce cas, nous appliquons une fonction de perturbation qui a pour rôle d'attribuer aléatoirement des gains fictifs à un certain nombre d'agents, de telles manières à les inciter à former des coalitions. En suite, on doit reprendre de nouveau la phase de génération des structures de coalitions équilibrées (cf. 7.2.2.2.1)

7.3. Résultats expérimentaux

Nous présentons dans cette section des résultats expérimentaux issus de la résolution de plusieurs problèmes d'ordonnancement du personnel en utilisant notre approche de résolution à base d'agents. L'objectif de cette section est principalement de prouver que notre approche donne des résultats d'ordonnancement satisfaisants.

Afin d'évaluer la qualité des solutions fournies et de montrer l'efficacité de notre approche, nous procédons à la comparaison des performances de notre algorithme à base d'agents avec celles obtenues à travers la résolution exacte du modèle linéaire proposé à la section 6.3 qui sera appliqué aux différents problèmes.

Afin d'obtenir une évaluation significative de notre approche, nous avons réalisé une série de tests qui nous semblent représentatifs de la dynamique de gestion du personnel dans un contexte manufacturier réel. Cette série de tests est composée de six problèmes d'ordonnancement. Nous avons choisi pour ces tests de fixer l'ensemble des paramètres liés au plan de production et de varier l'offre et la demande en employés. La taille du

bassin de la main-d'œuvre varie entre 30 et 60 employés. Le système d'assemblage est composé de 5 stations d'assemblage. L'horizon de planification est égal à un quart de travail de 9 heures. Nous avons considéré un temps de cycle de 15 min, ce qui donne une planification étalée sur 36 périodes de temps. La figure 4 illustre le plan de production utilisé pour les six problèmes d'ordonnancement. Le tableau 1 représente la liste des activités d'assemblage requises pour chaque type de produit et au niveau de chaque station. Les données liées à l'offre et à la demande en employés, pour chacun des problèmes, sont résumées dans le tableau 8 ci-dessous.

Problèmes	Offre en employés	Demande en employés / stations / activité d'assemblage															
		Station 1			Station 2			Station 3			Station 4			Station 5			Setup
		a11	a12	a13	a21	a22	a23	a31	a32	a33	a41	a42	a43	a51	a52	a53	
1	30	2	2	1	2	2	2	1	2	2	1	3	1	2	2	2	1
2	30	2	2	1	2	2	2	1	2	3	1	4	2	3	2	2	1
3	40	3	2	2	2	3	2	1	2	3	2	3	2	2	2	1	1
4	50	4	3	3	2	3	3	1	2	2	1	4	2	2	2	2	1
5	50	5	4	2	4	4	2	1	2	5	2	4	2	4	3	2	1
6	60	4	5	3	4	6	3	3	5	5	2	5	3	5	2	2	1

Tableau 8 : Caractéristiques de l'offre et de la demande en employés

L'annexe 1 décrit les différents paramètres pour chacun des problèmes étudiés, notamment les compétences des employés, leurs préférences, ainsi que les valeurs des différents coûts et pénalités utilisés.

Les programmes mathématiques associés aux différents problèmes ont été résolus en utilisant le solveur Cplex 10.0 de Ilog. La résolution par l'approche à base d'agents a été réalisée grâce à l'usage de la plateforme multiagents élaborée à la section 7. Dans les deux cas, les calculs ont été effectués sur un ordinateur doté d'un processeur de type Intel Centrino mobile technology, 1.6 GHz et 1 Go de RAM.

En ce qui concerne l'outil Cplex, nous avons choisi de ne fixer aucune limite sur le temps requis pour la résolution des problèmes. En effet, à travers la résolution exacte de chacun des scénarios élaborés, nous cherchons à trouver la solution optimale, mais aussi à avoir une idée sur le temps de calcul que nécessite la recherche d'une telle solution. Ces deux

éléments nous permettent de juger de la qualité de notre heuristique à base d'agent. En effet, nous cherchons à démontrer, pour chacun des scénarios, que notre heuristique de résolution génère une solution qui se rapproche de l'optimal tout en nécessitant moins de temps de calcul. Dans cette perspective, nous avons fixé une limite supérieure de calcul de 300 secondes pour le cas de la résolution par l'heuristique à base d'agents. En plus, afin d'apprécier la progression de cette heuristique dans la recherche d'une solution, nous nous sommes intéressés aux valeurs des meilleures solutions atteintes après différentes durées de calcul. Les durées choisies sont : d=15 s, d=30 s, d=60 s, d=120 s et p=300 s.

Le tableau 9 présente les résultats de la résolution exacte des six scénarios. Le tableau 10 présente les meilleures solutions obtenues par l'heuristique à la fin de chaque durée limite de calcul. Le tableau 11 compare les performances des solutions optimales vis-à-vis de celles obtenues par l'heuristique après différentes durées de calcul.

Problème n°	Nombre de variables	Nbr. d'itérations pour la solution optimale	Temps de résolution (s)	Fonction objectif (\$)	Nbr. minimal d'employés
1	57252	795865	2 520.47	2 468.4	25
2	57252	1228410	3791.20	2 901.4	28
3	76529	1288361	5 934.64	2 870.6	30
4	95957	2109420	11 817.23	3 121.2	34
5	95957	2589034	16 317.99	4 143.9	42
6	114761	4392967	28 419.56	5 098.8	51

Tableau 9 : Résultats numériques associés à la résolution exacte des problèmes

	Phase d'initialisation			Phase d'amélioration (formation de coalitions)									
				15 s		30 s		60 s		120 s		300 s	
	temps (s)	Fonc. Obj (\$)	Nbr. opr	Fonc. Obj (\$)	Nbr. opr	Fonc. Obj (\$)	Nbr. opr	Fonc. Obj (\$)	Nbr. opr	Fonc. Obj (\$)	Nbr. opr	Fonc. Obj (\$)	Nbr. opr
Problème 1	4,44	2787,4	28	2562,3	26	2558,9	26	2545,3	26	2526,0	26	2515,7	25
Problème 2	4,80	3325	30	3091,0	29	3043,0	29	2991,3	29	2990,0	29	2958,0	29
Problème 3	5,06	4389,3	40	2964,5	31	2966,6	30	2919,2	31	2903,5	30	2894,7	30
Problème 4	5,90	4153,0	50	3371,3	37	3313,8	35	3233,8	35	3203,5	35	3203,5	35
Problème 5	7,10	5492	47	4293,3	44	4250,9	44	4160,2	43	4160,0	43	4160,0	43
Problème 6	7,60	6296,2	54	5360	54	5296,8	53	5227,3	52	5126,5	52	5126,5	52

Tableau 10 : Résultats numériques associés à l'utilisation de l'heuristique à base d'agents

	Phase d'initialisation		Phase d'amélioration (formation de coalitions)									
			15 s		30 s		60 s		120 s		300 s	
	Écart Fonc. Obj (%)	Frac. oper	Écart Fonc. Obj (%)	Frac. oper	Écart Fonc. Obj (%)	Frac. oper	Écart Fonc. Obj (%)	Frac. oper	Écart Fonc. Obj (%)	Frac. oper	Écart Fonc. Obj (%)	Frac. oper
Problème 1	12,92	28/25	3,80	26/25	3,67	26/25	3,12	26/25	2,33	26/25	1,92	25/25
Problème 2	14,60	30/28	6,53	29/28	4,88	29/28	3,10	29/28	3,05	29/28	1,95	29/28
Problème 3	52,91	40/30	3,27	31/30	3,34	30/30	1,69	31/30	1,15	30/30	0,84	30/30
Problème 4	33,06	50/34	8,01	37/34	6,17	35/34	3,61	35/34	2,64	35/34	2,64	35/34
Problème 5	32,53	47/42	3,61	44/42	2,58	44/42	0,39	43/42	0,39	43/42	0,39	43/42
Problème 6	23,48	54/51	5,12	54/51	3,88	53/51	2,52	52/51	0,54	52/51	0,54	52/51

- Écart Fonc. Obj (%) : Écart entre le coût de la solution optimale et la solution de l'heuristique
- Frac. Oper : Fraction du nombre d'employés alloués par l'heuristique vs nombre minimal requis

Tableau 11 : Comparaison numérique entre les valeurs des solutions optimales et celles de l'heuristique

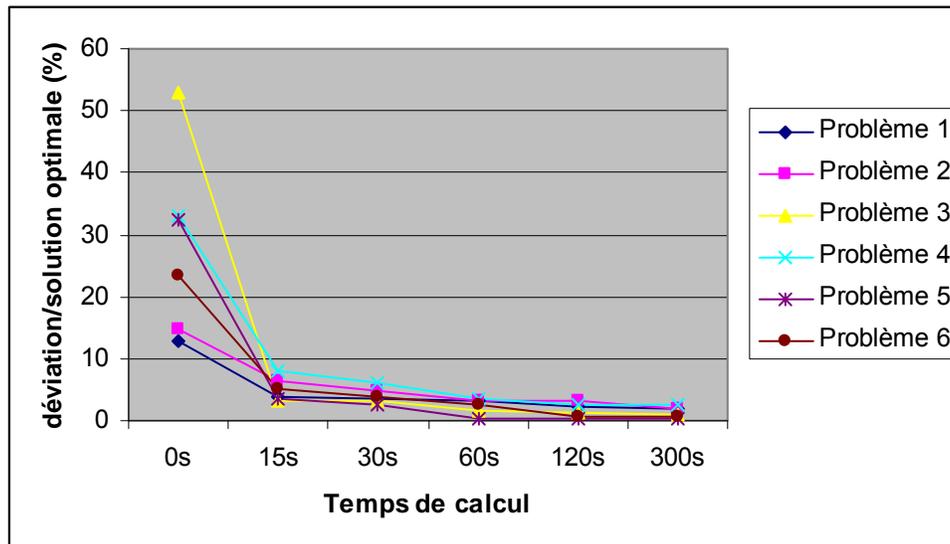


Figure 13 : Écart à la solution optimale pour chaque phase de calcul

Le tableau 9 montre que pour les six problèmes, CPLEX fournit la solution optimale. Par ailleurs, on constate que le temps de résolution requis croît fortement avec la taille des problèmes étudiés. Dans le cas des trois premiers problèmes, qui sont considérés comme étant des problèmes de petite taille, il parvient à la solution optimale dans un temps acceptable, de l'ordre de 1h40min environ. Cependant pour les autres cas de taille moyenne, on remarque que la convergence vers la solution optimale était très lente. En effet, le temps de calcul requis varie de 3h16min pour le cas d'un bassin de 50 employés à 7h55min pour le cas d'un bassin à 60 employés. En conséquence, il paraît difficilement

envisageable de se baser uniquement sur une telle approche de résolution pour faire face à la dynamique d'un environnement manufacturier qui requière une grande réactivité dans la recherche des plans d'allocation des employés.

A partir du tableau 10, on constate la convergence nettement plus rapide de notre heuristique vers des solutions d'ordonnancement d'excellente qualité. En effet, pour les six instances étudiées, l'écart entre la meilleure solution obtenue grâce à l'heuristique au bout de 300 secondes et la solution optimale varie entre 0,39 % et 2,64%.

En plus, la figure 13 illustre que pour les six instances du problème, on a fortement amélioré la performance de la solution obtenue après 30 secondes de calcul, et ce, en termes du nombre d'employés utilisés et de la valeur de la fonction objectif. Ainsi, la comparaison des résultats expérimentaux obtenus montrent bien la bonne performance de notre approche à base d'agents pour l'ordonnancement du personnel. En effet, elle a permis, dans deux instances des problèmes traités, d'affecter le même nombre d'employés que la solution optimale. Pour les quatre autres la différence entre le nombre minimal requis et celui alloué est uniquement d'un employé.

Les tests effectués jusqu'à présent avec l'heuristique à base d'agents prouvent la qualité des résultats obtenus, ce qui justifie la poursuite de la recherche, dans les prochaines étapes, sur des instances du problème de plus grande taille.

Par ailleurs, il est primordial de souligner que les essais effectués lors de l'implémentation de notre approche n'exploitent pas pleinement le côté distribution physique (multi-ordinateur) du calcul tel que proposé dans l'architecture SMA et où le processus de décision fait appel à plusieurs entités logicielles en interaction. Cet aspect de l'implémentation constitue une des limites de notre recherche et présente par la même occasion un sujet pertinent de recherche ultérieure.

8. Réordonnement du personnel : approche à base d'agents vs recuit simulé

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté un algorithme à base d'agents pour l'ordonnement du personnel. Nous avons par ailleurs testé les performances de cet algorithme selon une approche prédictive qui se base sur des données collectées avant le début de la production. La solution obtenue à travers cette approche peut ne pas être maintenue tout au long du quart de travail, car elle risque de devenir irréalisable ou caduque en raison des aléas de la production. En effet, une des dimensions importantes à prendre en compte dans le processus d'ordonnement auquel nous nous intéressons réside dans l'aspect incertain et dynamique de l'environnement manufacturier. Par nature, il est sujet à plusieurs perturbations et aléas qui risquent d'altérer l'état et les performances du système. Cette dynamique nous amène à nous intéresser à l'aspect réactif de notre algorithme à travers la notion de réordonnement du personnel. Nous cherchons notamment à mesurer ses facultés d'absorber les impacts d'une perturbation.

Le présent chapitre débute par la définition de la notion de réordonnement. Dans un deuxième temps, nous exposons les principaux concepts liés d'une part, aux perturbations que peut subir une solution d'ordonnement du personnel dans un contexte manufacturier, et d'autre part, aux stratégies de réordonnement. Ensuite, nous présentons une adaptation de l'approche à base d'agents pour l'ordonnement du personnel, que nous avons précédemment développée. Cette adaptation a pour objectif le réordonnement du personnel face à un ou plusieurs cas d'absences d'employés. De plus, afin d'évaluer de manière comparative les performances de notre algorithme et la qualité des solutions obtenues dans un contexte dynamique, nous développons en alternative une approche métaheuristique de type recuit simulé pour l'ordonnement et le réordonnement du personnel. Enfin, nous présentons une analyse comparative des algorithmes à base d'agents et de recuit simulé, et ce, à travers la résolution de plusieurs scénarios d'ordonnement et de réordonnement du personnel.

8.1. Concept de réordonnancement

L'ordonnancement du personnel dans un contexte manufacturier se base sur des paramètres internes qui reflètent les caractéristiques endogènes du système manufacturier, notamment le nombre et les compétences des opérateurs ainsi que l'état et la capacité des stations d'assemblage. Il se base également sur des paramètres exogènes, qui sont liés à des entités externes comme la demande des clients ou les délais et les volumes des livraisons établis par les fournisseurs. Or, ces paramètres risquent souvent de subir des modifications imprévisibles en raison d'événements inattendus ou mal évalués. De telles modifications imposent la révision de toute solution d'ordonnancement préétablie, car elle risque de devenir irréalisable ou de mauvaise qualité compte tenu de l'évolution du système et de la remise en cause des paramètres initiaux (Stoop et Wiers 1996 ; Vieira et al. 2003 ; Chong et al. 2003 ; Aytug et al. 2005 ; Herrmann 2006). En conséquence, il est désormais primordial de réagir de plus en plus rapidement à l'occurrence de perturbations afin de conserver un niveau élevé de performance et de qualité.

Face aux aléas de l'environnement manufacturier, la notion de réordonnancement est ainsi apparue comme processus connexe à celui de l'ordonnancement. Selon Vieira et al. (2003), le réordonnancement est défini comme étant le processus de mise à jour d'un ordonnancement existant en réponse à des perturbations ou à des changements dans l'état initial du système. Il vise la réparation des solutions d'ordonnancement initialement calculées ou l'élaboration de nouvelles solutions qui tiennent compte de l'impact des aléas sur l'état du système manufacturier. L'objectif principal étant de minimiser les conséquences néfastes d'éventuelles perturbations sur les performances du système.

La figure 14 illustre l'imbrication du processus de réordonnancement aux différents processus de planification et de gestion de la production. Dans notre recherche, nous nous intéressons essentiellement aux aléas liés aux ressources humaines, notamment, le cas d'absence totale ou partielle d'employés prévus initialement dans la solution d'ordonnancement.

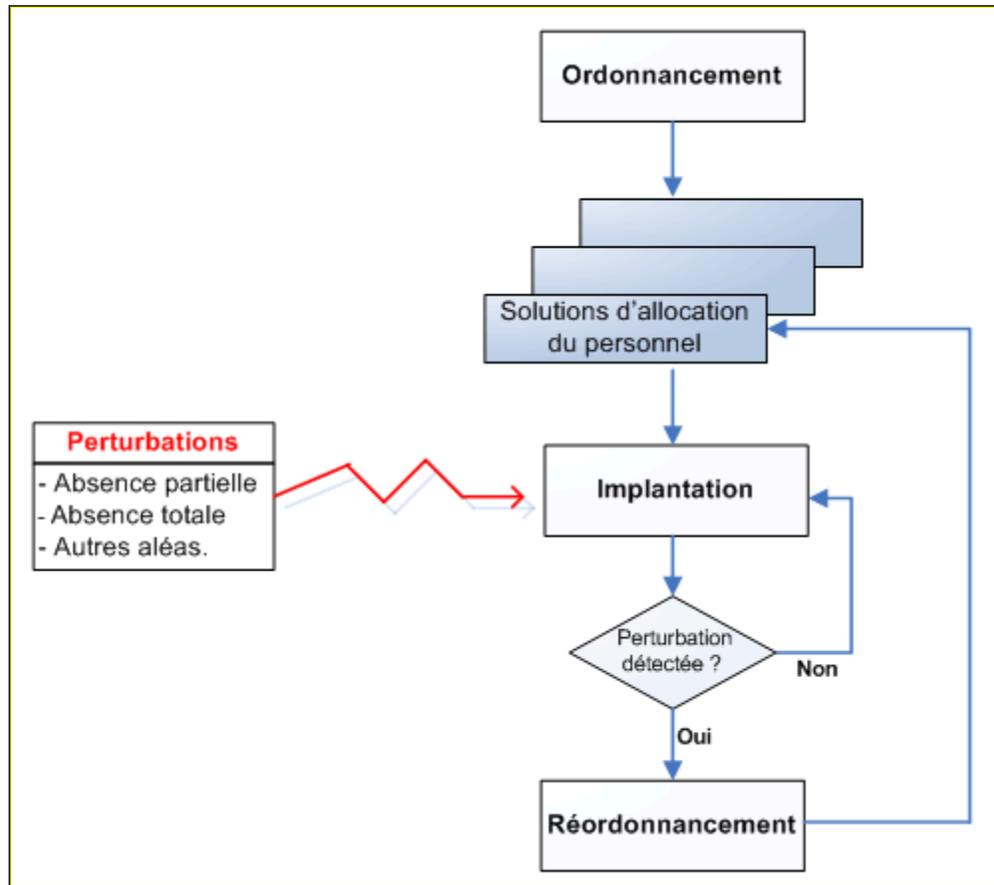


Figure 14 : Processus de réordonnancement (Adaptée de Subramaniam et al. 2005)

8.2. Perturbations dans le contexte de planification du personnel

Dans la pratique, l'environnement manufacturier est soumis à diverses perturbations liées à des événements imprévisibles qui peuvent changer le statut du système et affecter négativement ses performances. Ces perturbations se divisent en trois catégories principales (Stoop et Wiers 1996 ; Vieira et al. 2003 ; Chong et al. 2003 ; Herrmann 2006). On distingue ainsi :

1. les perturbations liées aux capacités des ressources : absence d'employés, pannes de machines, non-disponibilité ou usure d'outils ;
2. les perturbations liées aux commandes : arrivé d'une commande urgente, annulation d'une commande, changement de la date de livraison d'une commande, retards d'approvisionnement ;

3. les perturbations liées aux mesures de données : différence entre temps réel et temps estimé d'une tâche, différence de qualité.

De telles perturbations risquent d'interrompre la production et par conséquent engendrer des frais et des pénalités dues essentiellement aux temps d'arrêt des opérateurs et des machines ainsi qu'aux retards de livraisons aux clients.

La multitude des perturbations, la diversité des composants qui les caractérise et la complexité qui en découle nous ont conduit, dans une perspective d'ordonnement du personnel, à nous focaliser sur la première classe de perturbations liées aux capacités des ressources, et plus particulièrement au cas d'absence d'employés.

L'absence du travail est un phénomène auquel les gestionnaires doivent inévitablement faire face. Ce phénomène requiert une gestion proactive des ressources humaines et une mobilisation des ressources appropriées afin d'en diminuer les coûts et d'en atténuer les conséquences (Firms et al. 2006). C'est un phénomène qui touche l'ensemble des secteurs d'activités. Selon une étude du « Bureau of Labor Statistics, 2001 », le secteur des services aux États-Unis enregistre des pertes de 2.3% des heures de travail à cause des absences non planifiées (Easton & Goodale, 2005). Une autre étude récente de ce bureau en 2005 révèle qu'à chaque instant, environ 3.3% de la main d'œuvre des États-Unis sont absents de leur travail (Steel et al. 2007). Dans le secteur industriel, on estime que le coût réel lié directement ou indirectement à l'absence des employés atteint 12 à 18% de la masse salariale d'une entreprise (Robinson 2002). Les coûts directs sont ceux qui sont perçus, par exemple, sous forme de prestations ou de salaire par l'employé absent en cas de maladie. Les coûts indirects englobent les salaires et les heures supplémentaires payées aux employés permanents ou temporaires afin de remplacer ceux qui sont absents ; les retards dans la production et les pertes de qualité en cas d'allocation d'employés de remplacement qui sont peu performants à certaines tâches (Easton & Goodale 2005).

D'un point de vue de la gestion de ressources humaines, l'absence au travail est généralement classée en deux catégories (Firms 2006) :

- Absences involontaires et justifiées : absence pour raison de maladie, accident ou incapacité ; mauvais temps ; raisons familiales ou parentales ou toute autre raison qui empêche un employé de remplir ses fonctions.

- Absences non justifiées.

La plupart des articles qui traitent de l'absence des employés abordent ce sujet selon une approche exploratoire ou causale des variables ayant un effet sur l'absentéisme. Leur objectif est principalement d'élaborer des modèles de gestion afin de prévenir les risques d'absentéisme. Hur et al. (2004) notent que malgré l'intérêt indéniable du réordonnement dans une gestion efficace du personnel, notamment en cas d'absentéisme, les travaux de recherche qui se sont penchés sur ce sujet restent rares.

Dans cette recherche, nous considérons que l'absence est un fait inévitable dont on cherche à atténuer l'ampleur. Notre intérêt porte dans un premier temps, sur la nature d'absences d'employés et dans un deuxième temps, sur l'approche à utiliser afin de retrouver une solution de qualité qui permet de remplacer les absences.

Dans cette perspective, nous caractérisons l'absence au travail selon des dimensions opérationnelles qui reflètent l'impact et l'ampleur de cette perturbation. Les quatre dimensions retenues sont :

- Nombre et profils des absents : reflète le nombre et la description des compétences des employés déclarés absents pour chaque période de planification.

- Période de l'avis de notification d'absentéisme pour chaque employé. C'est à cette période que la décision de recherche d'une solution de remplacement est prise.

- Période effective du début d'absence pour chaque employé. Plus l'écart entre cette période et celle de l'avis de notification est grand, plus la gestionnaire dispose d'une marge de manœuvre importante qui lui permet de chercher une meilleure solution de remplacement.

- Intervalle d'absence : il traduit la durée d'absence d'un employé le long du quart de travail.

Au niveau de l'intervalle d'absence, on distingue deux catégories : une absence totale de l'employé tout le long du quart de travail ou bien une absence partielle. Dans le deuxième cas, l'employé est absent seulement pendant une partie du quart de travail. La figure 15 illustre un exemple des deux catégories. Dans le premier exemple, l'opérateur est absent de 11h00 à 14h15. La notification est établie 35 min avant le début effectif de l'absence. Cependant, dans le deuxième exemple, l'opérateur est absent durant tout le quart. De plus, l'absence n'est constatée qu'au début de la première période de travail planifiée. C'est un exemple fréquent dans la gestion des ressources humaines où l'employé ne se présente pas au travail à la date prévue sans aucun préavis.

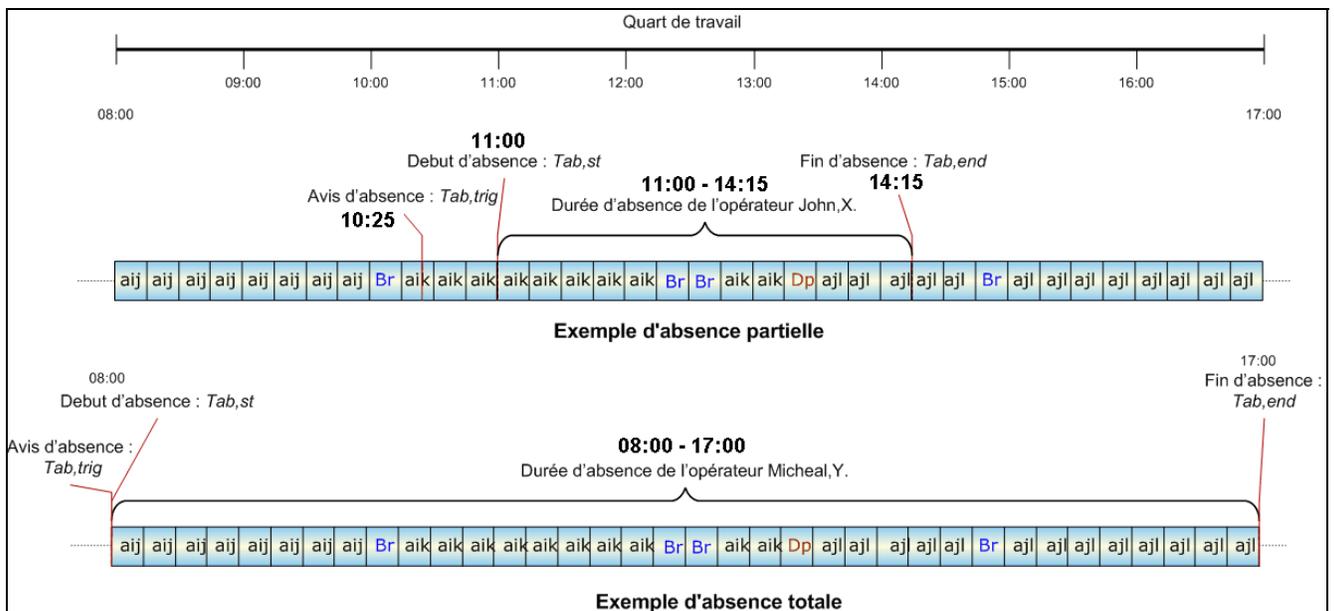


Figure 15 : Absence totale vs absence partielle

Lorsqu'une absence est notifiée, ou à l'avènement de nouvelles informations sur d'éventuels changements par rapport à la présence des effectifs planifiés, il est généralement nécessaire d'effectuer une mise à jour plus ou moins importante du plan d'allocation du personnel initialement établi. Cela consiste en un redéploiement des employés de telle manière à pallier les absences.

Afin de remplacer l'absence d'un ou plusieurs employés, plusieurs règles de redéploiement et de recouvrement sont utilisées (Easton & Goodale 2005 ; Fry et al. 2006). Par exemple :

- Transfert d'employés à partir des tâches de basse priorité vers les tâches de haute priorité ;
- Recours aux heures supplémentaires ;
- Puiser dans une réserve de main-d'œuvre composée de travailleurs temporaires ou de travailleurs sur appel. Dans ce cas, l'entreprise fait appel à ces travailleurs au besoin. Ils ont généralement des horaires de travail imprévisibles et irréguliers. Les travailleurs sur appel sont souvent appelés en urgence à la dernière minute pour regagner le travail.

Ces règles permettent une meilleure adaptation aux fluctuations de la demande et de l'offre en main d'œuvre. Néanmoins, la mise en œuvre de ces règles risque de ne pas être une tâche simple, et ce, car certains employés ne sont pas directement interchangeables ou aisément remplaçables. En plus, une utilisation mal appropriée risque d'engendrer des coûts importants (Easton & Goodale, 2005).

Dans ce contexte, plusieurs stratégies de réordonnancement s'offrent à nous. La section suivante présente une typologie des différents mécanismes qui distinguent ces stratégies. Aussi, nous présentons la stratégie de réordonnancement qui s'apprête le mieux, selon nous, au contexte de chaînes d'assemblage. Cette stratégie sera implantée premièrement, à travers l'algorithme à base d'agents précédemment élaboré et ensuite, à travers une approche métaheuristique de type recuit simulé.

8.3. Stratégies de réordonnement

8.3.1. Typologie

À l'occurrence d'un événement perturbateur, il devient impératif d'effectuer un réordonnement des employés afin de maintenir la faisabilité et la qualité de la solution. Cela consiste à porter des modifications à la solution élaborée initialement en mode prédictif ou à générer une nouvelle solution faisable (Abumaizar et Svestka 1997 ; Sabuncuoglu et Karabuk 1999 ; Herrmann 2006).

Plusieurs stratégies de réordonnement sont proposées dans la littérature. Elles sont généralement adaptées à des contextes manufacturiers bien spécifiques. Ces approches se distinguent par la façon de répondre à deux questions (Vieira et al. 2003 ; Aytug et al. 2005 ; Herrmann 2006). À savoir :

1. Quand opérer le réordonnement : périodiquement, par événement ou hybride ?
2. Comment réagir à la perturbation : réordonnement partiel ou global ?

a. Quand opérer le réordonnement ? : Il s'agit de préciser quand la révision de la solution d'ordonnement initial doit avoir lieu, et ce, afin de prendre en considération les nouvelles mises à jour du système. La réponse à cette question est étroitement liée au pouvoir de nuisance de l'événement perturbateur (Aytug et al. 2005). Trois options sont possibles : périodiquement, par événement ou hybride.

Dans le cas périodique, le réordonnement est programmé plusieurs fois à intervalles réguliers durant un quart de travail. Ainsi, l'horizon de planification est divisé en un ensemble de points de réordonnement (Vieira et al. 2003 ; Chong et al. 2003 ; Herrmann 2006). Une solution de réordonnement obtenue au début de la période t ne peut être révisée qu'au début de la période suivante $t+1$. Cette approche a l'avantage d'assurer un certain niveau de stabilité pour la solution d'ordonnement (Ouelhadj 2003). Cependant, elle risque de compromettre les performances du système en décalant la prise en considération des perturbations qui surgissent entre deux périodes de

réordonnancement, notamment lorsque les perturbations sont fréquentes (Aytug et al. 2005). De plus, la détermination de la périodicité du réordonnancement, qui représente l'intervalle de temps idéal entre deux réordonnements successifs, est souvent une tâche délicate (Ouelhadj 2003), car il faut trouver un compromis entre la stabilité de l'ordonnement et l'actualisation des informations.

La stratégie du réordonnement par événement consiste à déclencher le processus de réordonnement à chaque occurrence d'un événement imprévu qui change l'état initial du système de production (Vieira et al. 2003 ; Aytug et al. 2005 ; Chong et al. 2003 ; Herrmann 2006). Par exemple, dans le cas de cette recherche, les événements pris en compte sont l'absence totale ou partielle d'employés durant un quart de travail.

La politique hybride est une combinaison de l'approche de réordonnement périodique et de l'approche de réordonnement par événement. Elle consiste à réordonner le système périodiquement et à l'occurrence d'une perturbation significative (Vieira et al. 2003 ; Chong et al. 2003 ; Herrmann 2006).

b. Comment réagir à la perturbation? : Afin d'améliorer la réactivité du système d'ordonnement et d'absorber les perturbations qui peuvent advenir lors de l'exécution du plan d'allocation du personnel, deux stratégies sont possibles : le réordonnement partiel et le réordonnement global.

Le réordonnement partiel est une réparation de la solution d'ordonnement existant. Cela consiste à apporter des modifications plus ou moins restreintes à la solution initiale en vue de minimiser aux mieux les conséquences d'une perturbation sur les performances du système. Ces modifications visent les entités ou les opérations affectées directement ou indirectement par la perturbation (Vieira et al. 2003 ; Herrmann 2006). L'intérêt de cette stratégie réside dans le potentiel gain en termes de temps de calcul, mais aussi en stabilité de l'ordonnement qu'elle offre (Ouelhadj 2003).

Le réordonnement global consiste à régénérer une nouvelle solution d'ordonnement qui implique l'ensemble des employés, ainsi que les activités qui ne sont pas encore achevées au moment de la perturbation (Vieira et al. 2003 ; Herrmann

2006). Cette stratégie vise principalement à conserver une qualité très élevée de la solution et éventuellement obtenir la solution optimale. Cependant, cela risque de nécessiter un temps de calcul assez important, ce qui n'est pas toujours compatible avec la dynamique de la production (Vieira et al. 2003 ; Subramaniam et al. 2005). De plus, le changement radical et complet de l'ordonnancement peut engendrer une discontinuité majeure dans le processus de production (Ouelhadj 2003).

Dans ce qui suit, nous présentons la stratégie de réordonnancement que nous avons retenue pour notre recherche.

8.3.2. Stratégie retenue pour le réordonnancement du personnel

Dans cette recherche, nous optons pour un réordonnancement événementiel et global du personnel. Il s'agit donc d'adapter le plan initial d'allocation des employés à l'occurrence de chaque perturbation en remplaçant les absences. En effet, nous considérons que l'ensemble des décisions d'allocation d'employés ultérieures à la période de notification de l'avis d'absence est remis en question.

Grâce au caractère mobile et polyvalent du personnel, il est possible de déplacer certains employés initialement prévus sur une station d'assemblage vers d'autres stations. Nous considérons que chaque employé est en mesure d'effectuer des remplacements pour des activités dont il a les compétences requises. Cette interchangeabilité peut être complexe à mettre en œuvre compte tenu de la multitude des compétences et des préférences des employés. Certains remplacements peuvent requérir plusieurs changements impliquant de nombreux transferts d'employés.

Dès l'instant de notification de l'absence d'un employé, le processus de réordonnancement du personnel est déclenché en intégrant diverses informations liées à l'absence. La partie du plan initial qui est déjà exécutée est considérée comme étant figée et ne peut donc être modifiée. Le réordonnancement porte sur l'horizon qui s'étale entre la période de notification de l'avis d'absence et la période de fin du quart de travail, mais tout en prenant en considération le coût de la partie de la solution initiale déjà exécutée. Ainsi, l'objectif est de minimiser le coût global de la solution d'allocation du personnel le

long du quart de travail en tenant compte de la partie figée du plan initial. La figure 16 illustre la stratégie de réordonnancement global et orienté événement qui sera utilisé dans la suite de cette recherche.

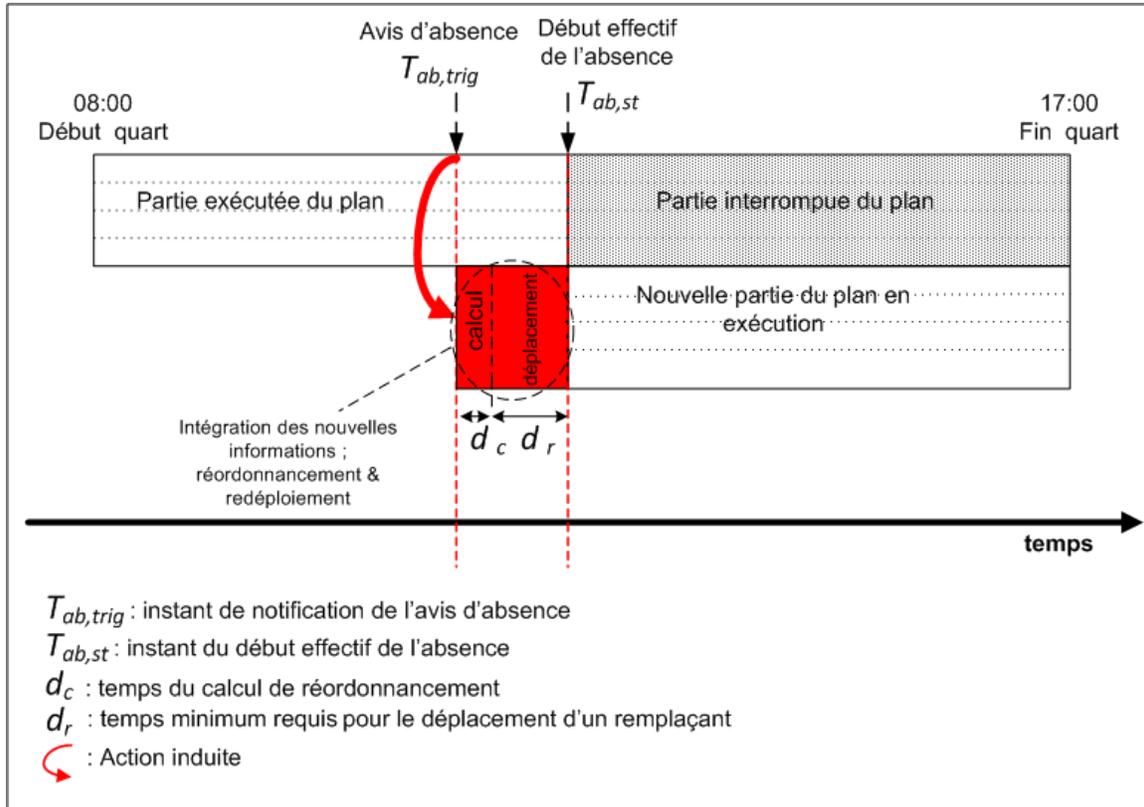


Figure 16 : Stratégie de réordonnancement adoptée

Dans la mise en œuvre de cette stratégie, nous tenons compte de la dimension liée au temps requis pour le déplacement des remplaçants. Les employés de substitution choisis auront des effets distincts sur la dynamique de la production, et ce, dépendamment de leur type. Par exemple, le transfert d'un employé, déjà présent sur la chaîne, d'une activité secondaire vers une tâche de haute priorité nécessite moins de temps que d'avoir recours à un employé travaillant sur appel. À cette dimension s'ajoute la nécessité de produire une solution de réordonnancement réalisable en un temps de calcul extrêmement réduit. Cet aspect est d'autant plus crucial dans le contexte d'une absence sans préavis ($T_{ab,st} = T_{ab,trig}$). En effet, afin d'éviter l'arrêt temporaire de la production sur la chaîne d'assemblage, il faut que la somme de l'addition du temps minimum de déplacement du remplaçant et du temps de calcul soit inférieure à la période qui s'écoule

entre l'avis et le début effectif de l'absence. Cela se traduit par la condition suivante : $d_c + d_r \leq T_{ab,st} - T_{ab,trig}$. Dans le cas contraire, l'arrêt de la chaîne aura une durée égale à : $d_c + d_r - (T_{ab,st} - T_{ab,trig})$.

Par ailleurs, dans la perspective de modéliser mathématiquement l'état d'absence, nous désignons par B_t l'ensemble des employés absents durant la période t ; $\forall t$. Pour traduire l'absence d'un employé dans notre modèle mathématique (cf. section 6.3), la contrainte (3), qui traite des différents états d'employés, doit tenir compte du fait qu'aucune activité ne peut être allouée à un employé durant ses périodes d'absence. Cela se traduit comme suit :

$$P_{et} = E_{et}^a + E_{et}^s + E_{et}^i + E_{et}^d + E_{et}^p \quad \forall t \in T, \forall e \in E - B_t \quad (3a')$$

$$P_{et} = E_{et}^a + E_{et}^s + E_{et}^i + E_{et}^d + E_{et}^p = 0 \quad \forall t \in T, \forall e \in B_t \quad (3b')$$

$$E_{et}^a, E_{et}^i, E_{et}^s, E_{et}^d, E_{et}^p, P_{et} \in \{0,1\} \quad (3c')$$

À ce stade, nous avons introduit le concept de réordonnement du personnel. Nous avons ensuite exposé une taxonomie des différentes stratégies de réordonnement face aux aléas liés à l'absence d'employés. Dans le cas de cette recherche, nous avons positionné notre choix de stratégie sur un réordonnement global orienté événement.

Dans ce qui suit, nous présentons la mise en œuvre de cette stratégie, premièrement, dans le cadre de l'algorithme à base d'agents (cf. section 7.2). Ensuite, dans le cadre d'une approche d'ordonnement du personnel de type recuit simulé qui sert de base comparative pour tester les performances de l'algorithme à base d'agents.

8.4. Extension de l'algorithme à base d'agents pour faire face aux aléas

L'ordonnancement du personnel déjà établi doit être révisé à chaque occurrence de perturbations liées à l'absence d'employés. Pour cela, nous proposons une extension de l'algorithme à base d'agents pour l'ordonnancement du personnel. Ce nouvel algorithme vise le réajustement de la solution perturbée à travers la coopération des différents agents-employés.

Dès qu'une absence est détectée, le processus de coopération, à travers la formation de coalitions, est remis en œuvre afin de générer une solution faisable pour l'allocation d'employés. L'idée de base consiste à favoriser le transfert des activités initialement allouées aux agents-employés dont l'état d'absence est établi vers d'autres agents-employés libres. Ainsi, tant qu'il y a des agents-employés qui ne sont pas délivrés de tâches durant leurs périodes d'absences, la priorité sera donnée à la formation de coalitions qui permettent à ces agents de se désengager totalement ou partiellement. Grâce à la coopération, ces agents peuvent transférer la réalisation de leurs tâches à d'autres agents-employés qui participent aux coalitions.

Dans l'algorithme de réordonnancement proposé, les mécanismes de négociation et de choix de coalitions sont similaires à ceux qui sont exposés précédemment à la section 7.2.2.2. La figure 17 illustre la structure générale de cet algorithme. Les différentes étapes de réordonnancement se présentent comme suite :

Étape 1 : La solution de référence pour le réordonnancement est prise égale à la solution courante.

Étape 2 : Négociation entre les agents-employés pour former des coalitions afin de remplacer les absents et d'améliorer la solution de réordonnancement. À ce niveau, la génération des structures de coalitions équilibrées se fait sur la base d'échanges des activités qui ne sont pas encore exécutées. Il s'agit des activités planifiées entre la période de notification de l'avis d'absence et la période de fin du quart de travail. Les activités qui sont déjà exécutées sont considérées comme étant figées et ne peuvent donc être

modifiées. Cependant, elles sont prises en compte dans l'évaluation du coût de la solution globale d'allocation du personnel.

Étape 3 : L'agent coordonnateur de main-d'oeuvre vérifie le nombre de coalitions faisables.

- Si aucune coalition n'est possible, introduction d'une fonction de perturbation qui a pour rôle d'attribuer aléatoirement des gains fictifs à un certain nombre d'agents, de manière à les inciter à former des coalitions. Reprise de l'étape 2.

- Sinon : plusieurs coalitions sont possibles.

- À choisir en priorité une coalition parmi celles qui désengagent totalement ou partiellement un agent-employé de ses activités durant ses périodes d'absence.

- Si aucune coalition ne désengage un agent-employé absent, choix aléatoire d'une coalition parmi celles qui améliorent la solution globale d'allocation du personnel.

Étape 4 : Si une coalition est formée, les deux agents concernés par cette coalition sont notifiés par l'agent coordonnateur de main-d'oeuvre afin d'effectuer l'échange des activités.

Étape 5 : Si une solution faisable est trouvée, récupération de la solution et reprise de l'implémentation si sa qualité est satisfaisante, tout en continuant à chercher à l'améliorer. Reprise de l'étape 2.

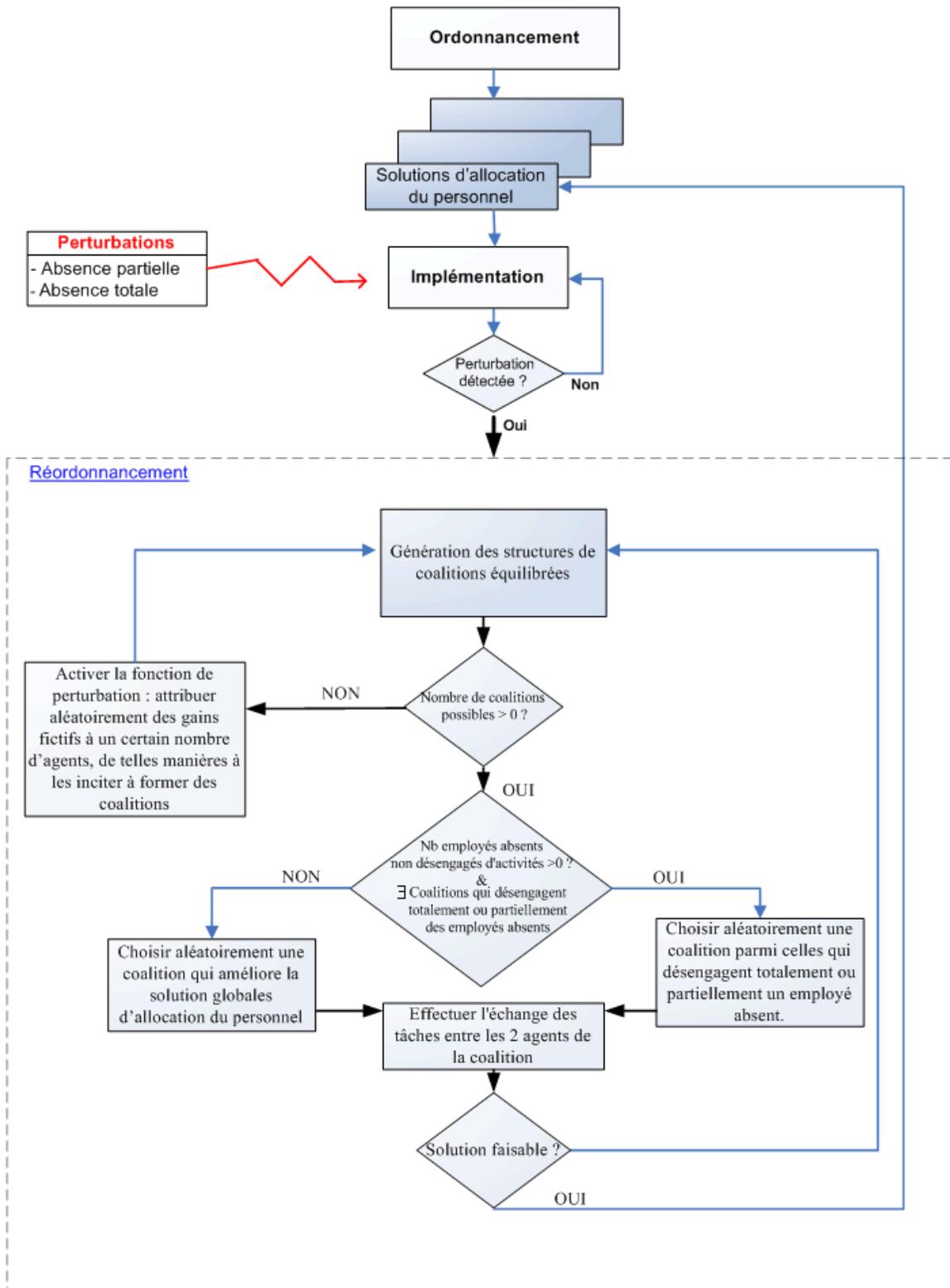


Figure 17 : Structure de l'algorithme d'ordonnancement et de réordonnancement à base d'agents

Afin de tester les performances de cet algorithme, nous proposons, dans ce qui suit, une approche métaheuristique de type recuit simulé pour l'ordonnement et le réordonnement du personnel.

8.5. Approche de recuit simulé

8.5.1. Définition du recuit simulé

Le recuit simulé est une méthode de recherche locale dont l'origine est attribuable aux résultats des travaux de Kirkpatrick et al. en 1983. Elle est inspirée d'un processus thermodynamique de refroidissement utilisé en métallurgie. Le processus consiste à refroidir graduellement un corps en fusion afin d'obtenir un corps solide dans un état d'énergie minimale. Le refroidissement se fait en plusieurs paliers de température. La longueur de ces paliers est choisie de telle manière que le corps atteigne l'équilibre thermique à chaque température. Par analogie avec ce processus physique de refroidissement, le recuit simulé suggère que la fonction objectif f à minimiser soit considéré comme étant la fonction d'énergie, et qu'une solution s du problème soit considérée comme étant un état du système physique. Dans ce cas, la valeur $f(s)$ exprime l'énergie associée à l'état s .

L'approche de résolution par recuit simulé est un processus itératif. À chaque nouvelle itération, une solution s' voisine de la solution courante s est générée. Dépendamment de sa qualité, la nouvelle solution s' sera soit retenue pour remplacer la solution s , soit elle sera rejetée. Si s' réduit la valeur de la fonction objectif, i.e., $f(s') \leq f(s)$, alors elle est systématiquement retenue. Sinon, l'acceptation de s' sera évaluée à travers le critère de Metropolis (Metropolis et al. 1953). Selon ce critère la probabilité d'accepter une telle solution est égale à : $P(\Delta f, T) = \exp\left(\frac{-\Delta f}{T}\right)$. Le facteur $\Delta f = f(s') - f(s)$ caractérise l'importance de la dégradation de la solution. Plus la dégradation est faible, plus l'acceptation de s' sera probable. T correspond à la température actuelle du système. Au fur et à mesure que la température diminue, la probabilité d'accepter s' sera faible.

La méthode de résolution par recuit simulé a l'avantage d'être simple et facile à implémenter. Cependant, l'efficacité de la méthode est fortement liée aux choix du

schéma de refroidissement et des paramètres initiaux (Pirlot, 1996). Notamment, la température initiale, la taille des paliers de température, ainsi que les critères d'arrêt.

Le recuit simulé trouve son application dans de nombreux domaines (Pirlot, 1996), notamment dans le domaine de planification et d'ordonnement de patrons de travail hebdomadaire (Brusco et Jacobs 1993 ; Brusco et al. 1995 ; Thompson 1996). Des travaux ont démontré en théorie que sous certaines hypothèses, le recuit simulé converge de manière asymptotique vers un optimum global (Hajek, 1988, Eglese, 1990).

8.5.2. Algorithme de recuit simulé pour l'ordonnement et le réordonnement du personnel

Dans cette section, nous mettons en œuvre deux variantes d'un algorithme de type recuit simulé pour l'ordonnement et le réordonnement du personnel. Ces deux variantes se distinguent par le mécanisme de recherche des solutions voisines. Dans la première variante, une solution voisine est générée à travers la permutation d'une seule activité d'un employé, choisi aléatoirement, vers un autre employé. Dans la deuxième variante, la permutation se fait par bloc d'activités. Un bloc d'activités désigne un ensemble continu d'activités de même type alloué à un employé. La figure 18 illustre les deux types de permutations.

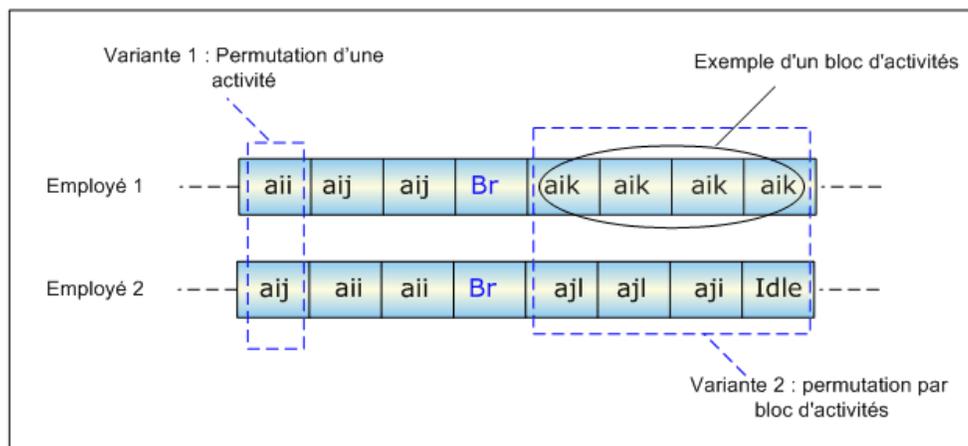


Figure 18 : Exemples de permutation d'une seule activité vs un bloc d'activités

Pour les deux variantes, le mécanisme de recherche d'une solution voisine consiste en premier lieu à sélectionner un employé. Ensuite, selon le cas, il requiert de choisir une

activité ou un bloc d'activités à permuter. Le second employé qui participe à la permutation est choisi parmi ceux qui ont certaines compétences communes avec le premier employé, de manière à ce que chacun d'eux soit apte à accomplir les activités échangées. Dans le cas d'ordonnement, le choix des employés se fait d'une manière aléatoire, tout en respectant la compatibilité entre les compétences requises pour l'accomplissement des activités et celles qui sont acquises par les employés. Cependant, en cas de réordonnement, la priorité est donnée aux employés absents afin qu'ils puissent transférer leurs activités à d'autres employés libres.

La structure générale de l'algorithme de recuit simulé pour l'ordonnement et le réordonnement du personnel est schématisé dans la figure 19. La fonction f à minimiser par cet algorithme est égale à la fonction objectif spécifiée dans le modèle mathématique (cf. section 6.3). En outre, la solution initiale utilisée pour le recuit simulé est identique à celle générée lors de la première phase d'initialisation de l'algorithme à base d'agents (cf. section 7.2.2.1).

La résolution débute à une température initiale T_0 qui est déterminée en fonction de la probabilité initiale d'acceptation et de l'écart moyen entre les solutions et leurs voisines. Ainsi, en générant un nombre limité m de solutions voisines et en choisissant un seuil initial d'acceptation p_i , la valeur de la température initiale est déduite de la formule

$$\text{suivante (Charon et al. 1996) : } T_0 = - \frac{\sum \frac{|f(\text{solution voisine}) - f(\text{solution courante})|}{m}}{\ln(p_i)} .$$

Par ailleurs, afin d'adapter la décroissance de la température à l'évolution du temps alloué au calcul, nous fixons le nombre de paliers de température à 100. Le changement de palier qui traduit l'équilibre thermique se fait au bout d'une période de calcul égale à : $\frac{\text{temps total de calcul}}{100}$. La décroissance de la température lors d'un changement de palier

$$n \text{ est calculée par la suite : } T_{n+1} = T_n - \frac{T_0}{100} .$$

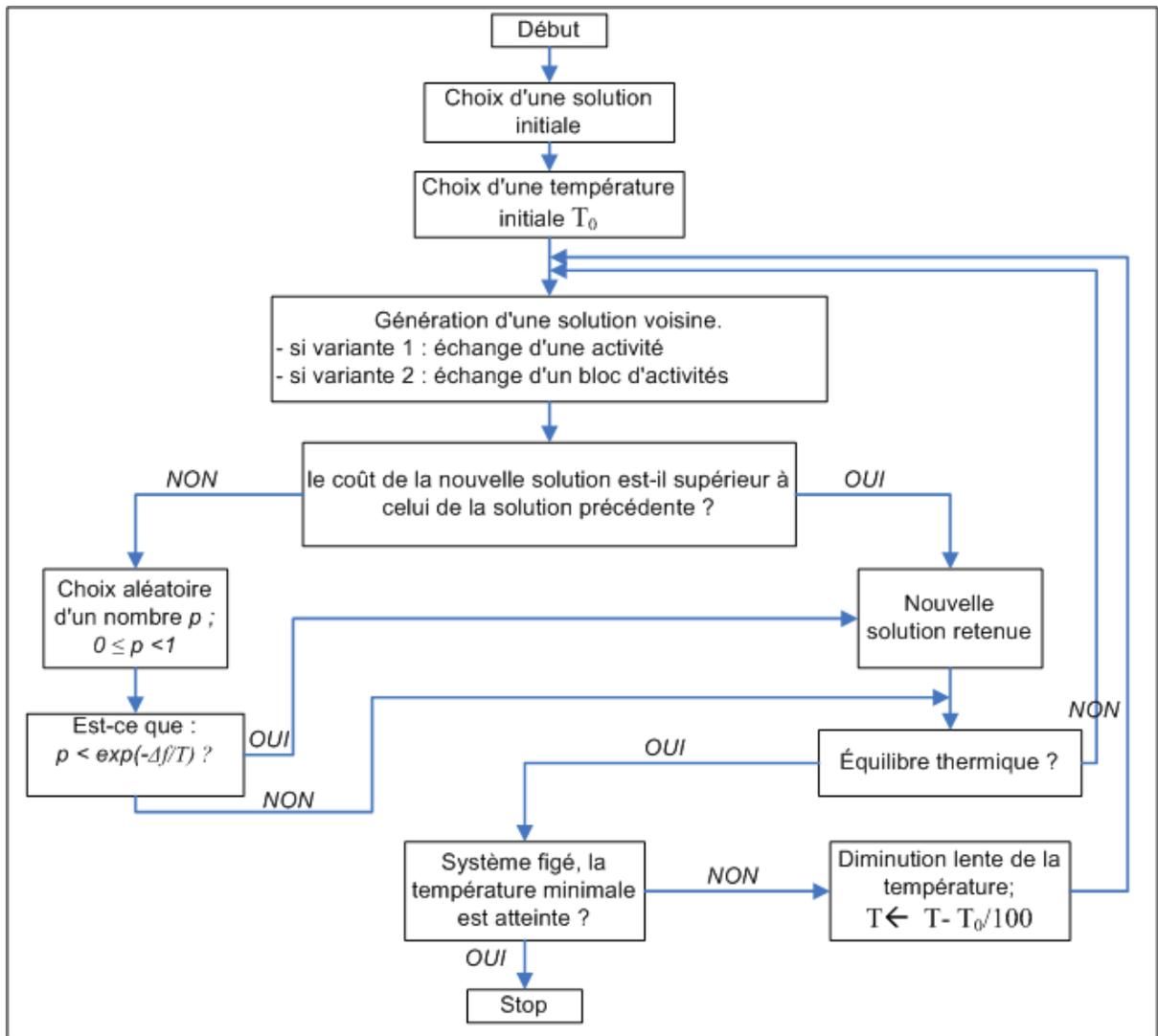


Figure 19: Algorithme de recuit simulé pour l'ordonnancement et le réordonnancement du personnel

8.6. Expérimentations

Dans cette section, nous présentons les résultats numériques obtenus à partir de la résolution d'une série de problèmes d'ordonnancement et de réordonnancement du personnel. Ces problèmes sont résolus en utilisant successivement :

1. L'algorithme à base d'agents
2. L'algorithme de recuit simulé avec la variante 1 (permutation d'une activité).
3. L'algorithme de recuit simulé avec la variante 2 (permutation d'un bloc d'activités).

Nous détaillons dans un premier temps les scénarios de la production ainsi que de l'offre et de la demande en main-d'œuvre. Dans un deuxième temps, nous analysons et nous comparons les résultats obtenus. Nous nous intéressons aux performances de chacun de ces algorithmes aussi bien en mode d'ordonnancement, qu'en mode réactif par le réordonnancement face à l'occurrence d'absences.

8.6.1. Description des scénarios et des paramètres de test

Le système de production considéré dans cette expérimentation est celui d'une chaîne d'assemblage composée de quarante stations. L'horizon de planification est égal à un quart de travail de 9 heures. Le temps de cycle vaut 15 minutes, ce qui donne une planification étalée sur 36 périodes de temps. La gamme de produits à assembler est composée de trois modèles distincts. Au niveau de chaque station, le passage d'un modèle à un autre requiert un temps de setup égal à 30 min.

La série de tests que nous utilisons est composée de cinq problèmes qui se distinguent par l'offre et la demande en employés. La taille du bassin de la main-d'oeuvre varie entre 60 et 200 employés. Le tableau 12 donne la distribution de l'offre en main-d'œuvre, ainsi que la demande moyenne en employés par station et par période.

	<i>Offre en main-d'œuvre</i>	<i>Demande moyenne en employés/station/période</i>
Problème 1	60 employés	1
Problème 2	100 employés	1,83
Problème 3	120 employés	2,3
Problème 4	160 employés	3
Problème 5	200 employés	3,67

Tableau 12 : Offres et demandes en employés

Nous considérons qu'environ 5 % de la main-d'œuvre est composée de chefs d'équipe. Ils sont plus polyvalents que le reste des employés. En plus de leur rôle de pilotage des activités, les chefs d'équipe peuvent intervenir immédiatement pour effectuer temporairement des remplacements en cas d'absences imprévues. Cependant, en raison de leur statut, le coût lié à l'affectation des chefs d'équipe à des activités d'assemblage est plus élevé que celui des autres employés.

Par ailleurs, en cas de surplus d'employés, les employés qui ne seront pas affectés à des activités durant le quart de travail seront considérés comme étant des travailleurs sur appel. De plus, nous utilisons une réserve d'employés occasionnels qui constituent 5 % de la main-d'œuvre totale. Ces deux types d'employés peuvent être appelés à n'importe quel moment afin de remplacer des absences. Dans ce cas, le temps minimum requis pour le déplacement sera égalé à 60 minutes.

Pour chacun des problèmes à résoudre, nous exécutons les algorithmes de résolution à cinq reprises. Nous nous intéressons aux valeurs moyennes des solutions obtenues et ce, en termes de coût et de nombre d'employés utilisés.

Afin d'apprécier l'évolution de chacune des méthodes de résolution dans le cas de l'ordonnement, nous nous intéressons aux valeurs des solutions atteintes après différentes durées de calcul. Les durées choisies sont : $d=15s$, $d=60s$, $d=300s$ et $d=600s$. Cependant, dans le cas du réordonnement, il nous apparut pertinent de mettre l'emphase sur le temps requis par chacun des algorithmes afin de trouver la première solution réalisable qui permet de remplacer les absences. De plus, nous nous intéressons aux solutions de recouvrement obtenues après un temps de calcul égal à 300 secondes.

8.6.2. Résultats numériques

Dans un premier temps, nous utilisons l'algorithme d'initialisation proposé à la section 7.2.2.1 afin de construire une solution initiale pour chacun des problèmes traités. Les résultats obtenus sont exposés dans le tableau 13. On constate que le temps de calcul de l'initialisation croît fortement avec la taille des problèmes à résoudre. Les solutions ainsi obtenues sont utilisées ensuite, d'une part, comme base de négociation entre les agents dans le cadre de l'algorithme d'ordonnancement à base d'agents. Et d'autre part, comme solution initiale dans le cas de l'approche de recuit simulé.

	<i>temps (s)</i>	<i>Nbr. employés affectés</i>	<i>Fonction. Objectif (\$)</i>
Problème 1	8,34	50	5801
Problème 2	23,95	87	10640
Problème 3	34,8	106	12672
Problème 4	58,29	141	17046
Problème 5	84,26	178	21963

Tableau 13 : Solutions initiales

Le tableau 14 présente les résultats moyens d'ordonnancement associés à l'utilisation de chacun des trois algorithmes. Chacun des problèmes traités est résolu à cinq reprises. Les valeurs S_{moy} et σ_s correspondent respectivement à la valeur moyenne et à l'écart-type de la fonction objectif. Les valeurs N_{moy} et σ_e représentent la valeur moyenne et l'écart-type du nombre d'employés affectés à des activités durant le quart de travail. Pour chaque problème, les valeurs en gras correspondent aux meilleures valeurs trouvées pour la fonction objectif et le nombre d'employés. Les figures 20 à 24 illustrent l'évolution des solutions à différents temps de calcul.

À partir des résultats obtenus, on peut constater que l'algorithme à base d'agents performe relativement bien en comparaison avec les deux variantes du recuit simulé. En effet, au bout de 600 secondes de calcul, cet algorithme offre les meilleures solutions dans le cas des cinq problèmes résolus, et ce, en termes de nombre d'employés utilisés et de la valeur de la fonction objectif. Ainsi, en ce qui concerne la fonction objectif, la différence moyenne entre l'algorithme à base d'agents et les deux variantes de recuit

simulé est respectivement de -21,5% pour la première variante et de -3,5% pour la deuxième variante.

Pour l'ensemble des instances des problèmes résolus, l'écart en faveur de l'algorithme à base d'agents est très important dès les cinq premières minutes de calcul. Aussi, on peut remarquer la piètre performance de la variante #1 de l'algorithme de recuit simulé. En effet, dans la plupart des cas traités, les solutions obtenues par cette variante après 600 secondes de calcul sont de moindre qualité que celles données par les deux autres algorithmes après seulement 15 secondes de calcul.

Par ailleurs, l'analyse du rapport (écart-type/moyenne), qui traduit la dispersion des solutions par rapport à la moyenne, démontre que les trois algorithmes présentent des valeurs très basses qui varient de 0,001 à 0,012. Cela signifie une faible dispersion des valeurs autour de la moyenne et assure une certaine constance des résultats obtenus.

	15 secondes		60 secondes		300 secondes		600 secondes	
	$S_{mov} \pm \sigma_s(\$)$	$N_{mov} \pm \sigma_e$						
Problème 1 (60 employés)								
Algo_SMA	4746 ± 37,9	47 ± 0,7	4688 ± 59,3	47 ± 0,7	4643 ± 36,6	46,8 ± 0,8	4591 ± 30,2	46,2 ± 0,4
RS_VAR1	5648 ± 31,5	50 ± 0	5636 ± 37,8	50 ± 0	5615 ± 37,7	50,8 ± 0,8	5563 ± 61,2	50,6 ± 0,5
RS_VAR2	5165 ± 76,1	51,4 ± 0,9	4999 ± 79,5	50 ± 0,7	4820 ± 28,4	47,6 ± 0,9	4737 ± 61,7	47 ± 0,7
Problème 2 (100 employés)								
Algo_SMA	8978 ± 92,5	85,4 ± 1,1	8604 ± 36,7	83 ± 0,7	8460 ± 61,3	82,2 ± 0,8	8428 ± 78,9	82 ± 1
RS_VAR1	10474 ± 42,3	87 ± 0	10466 ± 50,9	87 ± 0	10420 ± 64,8	87,2 ± 0,4	10405 ± 65,8	87 ± 0
RS_VAR2	9521 ± 197,1	87 ± 0,7	8902 ± 38,9	85 ± 0,8	8727 ± 105,9	83,2 ± 1,1	8717 ± 67,4	82,8 ± 0,8
Problème 3 (120 employés)								
Algo_SMA	11568 ± 105,1	105 ± 0,7	10799 ± 105,5	102,8 ± 0,8	10457 ± 63,4	101 ± 1	10351 ± 78	100 ± 1
RS_VAR1	12610 ± 37,4	105 ± 0	12591 ± 17,3	105 ± 0	12551 ± 30	105,6 ± 0,5	12300 ± 38,6	105,6 ± 0,5
RS_VAR2	11611 ± 148,4	105,6 ± 1,5	11199 ± 162,7	105,2 ± 1,3	10756 ± 147,3	102,6 ± 1,7	10686 ± 136,9	101,2 ± 1,1
Problème 4 (160 employés)								
Algo_SMA	15990 ± 66,3	139,6 ± 0,5	14826 ± 110,2	139,4 ± 0,9	13655 ± 43,8	134,4 ± 0,9	13486 ± 92,5	131,6 ± 0,9
RS_VAR1	16631 ± 52,3	140 ± 0	16629 ± 46,1	140 ± 0	16607 ± 17,7	140,2 ± 0,4	16599 ± 48,3	140,2 ± 0,4
RS_VAR2	15298 ± 118,1	140,2 ± 1,1	14940 ± 276,5	140,2 ± 0,8	14329 ± 166	136,8 ± 1,6	14056 ± 134,5	134 ± 1
Problème 5 (200 employés)								
Algo_SMA	21152 ± 107,4	176,2 ± 0,8	19763 ± 87,8	175 ± 1	17443 ± 117,1	166,8 ± 1,3	16711 ± 127,8	161,8 ± 0,8
RS_VAR1	20521 ± 34,1	172 ± 0	20471 ± 32,7	171,6 ± 0,5	20368 ± 71,9	171,8 ± 0,4	20238 ± 51,8	171,6 ± 0,5
RS_VAR2	19520 ± 245,8	172,8 ± 1,6	18877 ± 326,4	171,8 ± 1,6	17460 ± 249,6	165,8 ± 2,5	17339 ± 125,2	165 ± 1,2

Tableau 14 : Résultats d'ordonnement associés à l'utilisation des trois algorithmes

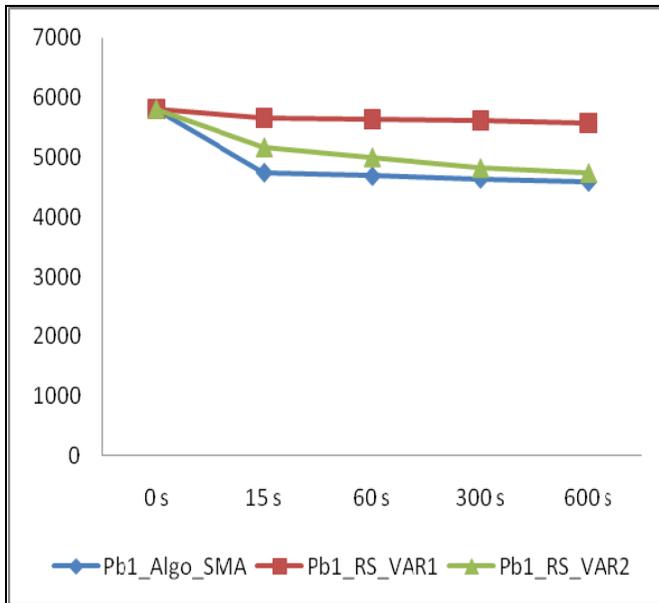


Figure 20 : Évolution de la qualité des solutions pour le problème 1

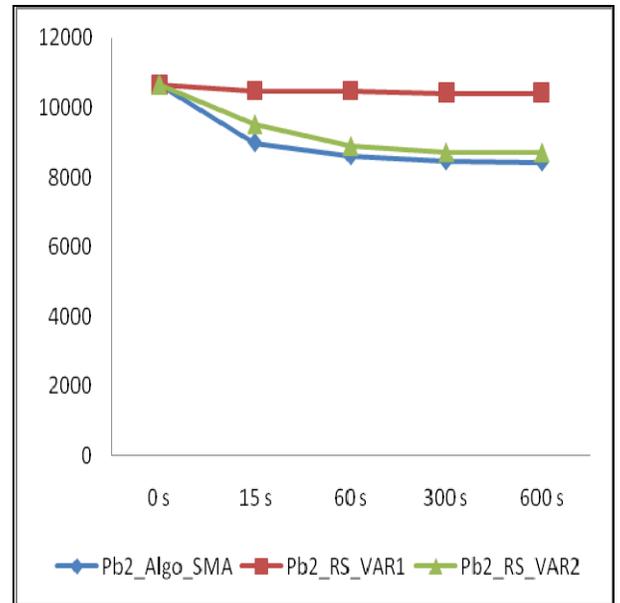


Figure 21 : Évolution de la qualité des solutions pour le problème 2

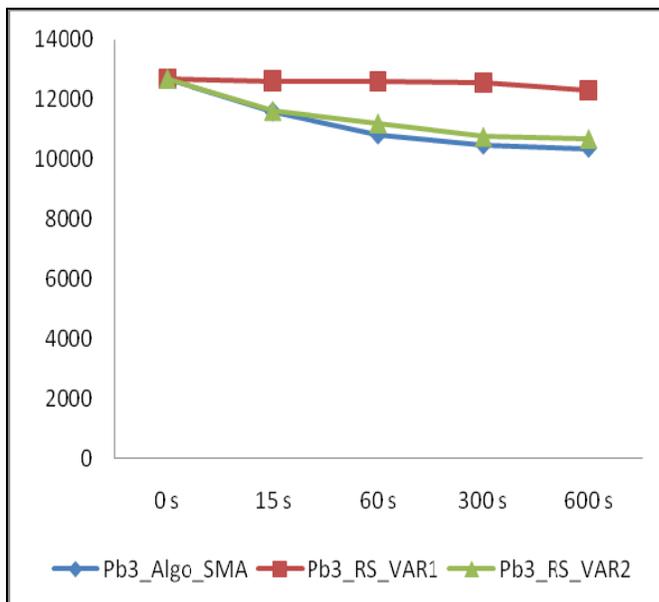


Figure 22 : Évolution de la qualité des solutions pour le problème 3

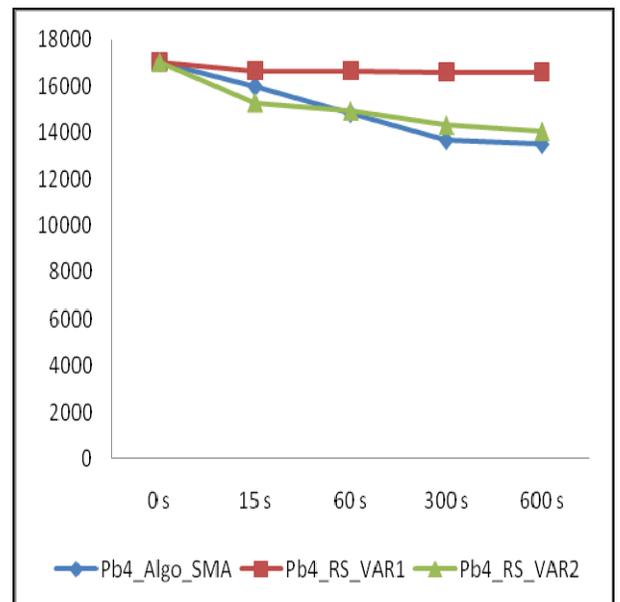


Figure 23 : Évolution de la qualité des solutions pour le problème 4

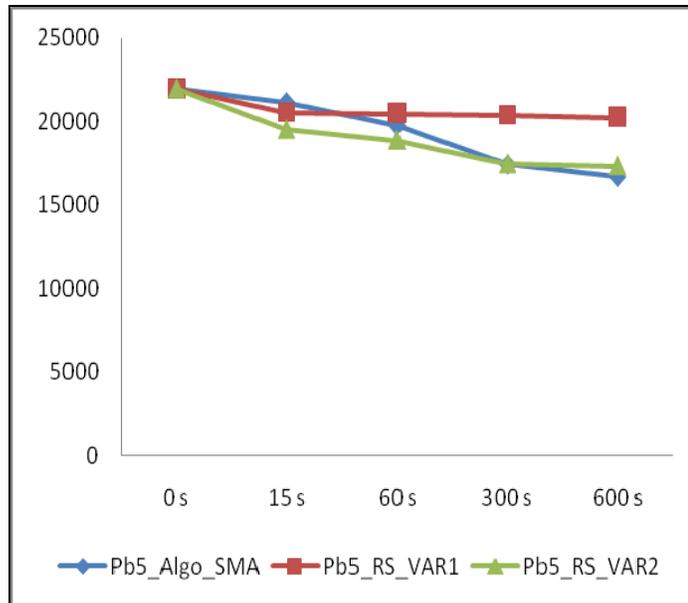


Figure 24 : Évolution de la qualité des solutions pour le problème 5

Dans le cas de réordonnement, nous nous basons sur les solutions d'ordonnement obtenues après 600s de calcul afin de générer deux catégories de perturbations liées à l'absence d'employés. La première catégorie porte sur l'absence totale d'employés. Alors que la deuxième s'intéresse au cas d'absences partielles. Dans les deux cas, le taux d'absentéisme varie de 1 à 5 % de l'effectif total. La durée des absences partielles varie de 1h à 3h30min.

Afin de mesurer la réactivité de chacun des algorithmes, nous mettons l'accent sur la première solution réalisable générée, qui permet de remplacer les absences, et ce, à travers la mesure des résultats liés au temps de recouvrement t_r ; la valeur de la solution de recouvrement $S_{r,moy}$ et le nombre d'employés utilisés $N_{r,moy}$. Aussi, nous mesurons les performances des solutions de réordonnement obtenues après un temps de calcul égal à 300 secondes.

Les tableaux 15 et 16 synthétisent les résultats de réordonnement obtenus respectivement pour les absences totales et les absences partielles. En ce qui a trait à la génération des premières solutions réalisables, nous remarquons, que pour les trois algorithmes, le temps de recouvrement est généralement très faible et qu'il croît à mesure que la taille des instances augmente. Ce temps varie de 0,1 à 2,35 secondes. Cependant, on constate que

l'algorithme à base d'agents se distingue par la qualité des solutions de recouvrement qu'il génère et ce, en termes du coût et du nombre d'employés utilisés. En effet, pour l'ensemble des instances résolues, cet algorithme offre les meilleurs résultats. Il offre une amélioration moyenne égale à 23,5 % par rapport à la première variante de recuit simulé. Cette amélioration diminue à 4,9 % en comparaison avec la deuxième variante.

Après un temps de réordonnancement égal à 300 secondes, l'amélioration offerte par l'algorithme à base d'agents se confirme et s'amplifie légèrement. Elle vaut respectivement 24% vis-à-vis de la première variante de recuit simulé et 5,9 % par rapport à la deuxième. Les résultats de réordonnancement confirment aussi les mauvaises performances de la première variante de recuit simulé. En effet, après un temps de réordonnancement égal à 300s, cet algorithme offre des résultats de moindre qualité que les premières solutions de recouvrement générées par les deux autres algorithmes.

Les résultats de l'algorithme à base d'agents sont prometteurs. En effet, que ça soit pour l'ordonnancement ou le réordonnancement du personnel, cet algorithme présente généralement des performances supérieures à celle de l'approche de recuit simulé. Ce constat vient corroborer l'idée que l'approche des systèmes multi-agents constitue un apport considérable dans les domaines de la modélisation et du contrôle des systèmes. Notamment, pour aborder la complexité des problèmes en gestion des systèmes de production.

Par ailleurs, même si l'algorithme à base d'agents offre indéniablement des résultats intéressants, il serait imprudent de tirer des conclusions généralisées en ce qui concerne la validité totale de l'approche proposée. Il est nécessaire d'approfondir la recherche en comparant les résultats avec d'autres approches de résolution de manière à diversifier les contextes d'ordonnancement et la nature des perturbations.

	<i>Ordonnancement de référence</i>		<i>Réordonnancement : Absences totales</i>				
	600 secondes		1 ^{ère} solution réalisable			300 secondes	
	$S_{moy} \pm \sigma_s(\$)$	$N_{moy} \pm \sigma_e$	$t_r \pm \sigma_t (s)$	$S_{r,moy} \pm \sigma_s(\$)$	$N_{r,moy} \pm \sigma_e$	$S_{moy} \pm \sigma_s(\$)$	$N_{moy} \pm \sigma_e$
Problème 1							
Algo_SMA	4591 ± 30,2	46,2 ± 0,4	0,12 ± 0,1	5009 ± 164	48 ± 1	4684 ± 82	46,6 ± 0,5
RS_VAR1	5563 ± 61,2	50,6 ± 0,5	0,37 ± 0,25	5940 ± 188	54 ± 0,7	5606 ± 160	53,4 ± 1,1
RS_VAR2	4737 ± 61,7	47 ± 0,7	0,16 ± 0,07	5101 ± 214	49,4 ± 1,1	4956 ± 165	48,4 ± 0,9
Problème 2							
Algo_SMA	8428 ± 78,9	82 ± 1	0,21 ± 0,02	8868 ± 249	82,4 ± 1,5	8531 ± 114	82,4 ± 1,1
RS_VAR1	10405 ± 65,8	87 ± 0	1,4 ± 0,62	11050 ± 206	91,8 ± 1,6	10806 ± 155	91,6 ± 1,5
RS_VAR2	8717 ± 67,4	82,8 ± 0,8	0,33 ± 0,15	9199 ± 197	84,4 ± 1,1	8914 ± 123	83 ± 1,2
Problème 3							
Algo_SMA	10351 ± 78	100 ± 1	0,31 ± 0,04	10797 ± 208	100,2 ± 0,8	10565 ± 115	100,2 ± 1,1
RS_VAR1	12300 ± 38,6	105,6 ± 0,5	1,35 ± 0,59	13352 ± 300	111,4 ± 1,9	12893 ± 185	111 ± 1,6
RS_VAR2	10686 ± 136,9	101,2 ± 1,1	0,55 ± 0,4	11315 ± 233	105,2 ± 2,4	10908 ± 88	102,4 ± 1,1
Problème 4							
Algo_SMA	13486 ± 92,5	131,6 ± 0,9	0,62 ± 0,06	14037 ± 293	134,4 ± 1,7	13622 ± 70	133 ± 1
RS_VAR1	16599 ± 48,3	140,2 ± 0,4	2,3 ± 1,26	17743 ± 588	147,2 ± 1,9	17270 ± 323	146,8 ± 1,8
RS_VAR2	14056 ± 134,5	134 ± 1	0,69 ± 0,26	14753 ± 221	137,8 ± 1,3	14405 ± 176	135,2 ± 1,3
Problème 5							
Algo_SMA	16711 ± 127,8	161,8 ± 0,8	1,72 ± 0,31	17215 ± 93	162,2 ± 1,3	16602 ± 83	159,4 ± 1,5
RS_VAR1	20238 ± 51,8	171,6 ± 0,5	2,35 ± 0,96	22724 ± 624	186,8 ± 1,9	21388 ± 416	184 ± 1,6
RS_VAR2	17339 ± 125,2	165 ± 1,2	1,78 ± 1,21	18582 ± 692	169,2 ± 3,2	17787 ± 308	165,4 ± 0,9

Tableau 15: résultats du réordonnancement en cas d'absence totale

	<i>Ordonnancement de référence</i>		<i>Réordonnancement : absences partielles</i>				
	600 secondes		1 ^{ère} solution réalisable			300 secondes	
	$S_{moy} \pm \sigma_s (\$)$	$N_{moy} \pm \sigma_e$	$t_r \pm \sigma_t (s)$	$S_{r,moy} \pm \sigma_s (\$)$	$N_{r,moy} \pm \sigma_e$	$S_{moy} \pm \sigma_s (\$)$	$N_{moy} \pm \sigma_e$
Problème 1							
Algo_SMA	4591 ± 30,2	46,2 ± 0,4	0,07 ± 0,01	4901 ± 158	48,8 ± 1,1	4773 ± 83	47,6 ± 0,9
RS_VAR1	5563 ± 61,2	50,6 ± 0,5	0,1 ± 0,05	5733 ± 184	54,8 ± 1,8	5580 ± 164	53,6 ± 1,5
RS_VAR2	4737 ± 61,7	47 ± 0,7	0,26 ± 0,15	5212 ± 109	50,6 ± 1,1	5138 ± 106	50,2 ± 1,3
Problème 2							
Algo_SMA	8428 ± 78,9	82 ± 1	0,32 ± 0,09	8630 ± 212	84 ± 1,9	8411 ± 91	83 ± 1,6
RS_VAR1	10405 ± 65,8	87 ± 0	0,32 ± 0,22	10828 ± 430	94 ± 2,7	10662 ± 287	93,4 ± 2,2
RS_VAR2	8717 ± 67,4	82,8 ± 0,8	0,27 ± 0,15	9110 ± 214	86,2 ± 2,4	9021 ± 160	85,4 ± 2,1
Problème 3							
Algo_SMA	10351 ± 78	100 ± 1	0,37 ± 0,1	10729 ± 287	103 ± 2,1	10453 ± 109	102 ± 1,6
RS_VAR1	12300 ± 38,6	105,6 ± 0,5	0,35 ± 0,39	13041 ± 441	113 ± 3,7	12871 ± 294	112 ± 3,2
RS_VAR2	10686 ± 136,9	101,2 ± 1,1	0,28 ± 0,18	11214 ± 329	106,4 ± 2,7	11068 ± 280	104,8 ± 1,8
Problème 4							
Algo_SMA	13486 ± 92,5	131,6 ± 0,9	1,59 ± 0,54	13816 ± 203	135,6 ± 1,7	13536 ± 210	134 ± 2,3
RS_VAR1	16599 ± 48,3	140,2 ± 0,4	0,45 ± 0,2	17206 ± 368	148,6 ± 2,9	16961 ± 240	147,2 ± 2,4
RS_VAR2	14056 ± 134,5	134 ± 1	0,47 ± 0,08	14613 ± 286	139,4 ± 2,6	14437 ± 215	138 ± 1,9
Problème 5							
Algo_SMA	16711 ± 127,8	161,8 ± 0,8	1,82 ± 0,84	17186 ± 335	165,8 ± 1,9	16616 ± 132	163,2 ± 2
RS_VAR1	20238 ± 51,8	171,6 ± 0,5	0,6 ± 0,5	20998 ± 486	181,8 ± 3,9	20688 ± 349	178,6 ± 3,6
RS_VAR2	17339 ± 125,2	165 ± 1,2	0,93 ± 0,64	17909 ± 284	170 ± 3,2	17576 ± 219	167 ± 2,2

Tableau 16 : résultats du réordonnancement en cas d'absences partielles

9. Étude de l'impact de la flexibilité et des préférences des employés sur l'ordonnancement du personnel : une approche par simulation

Dans ce chapitre nous exploitons les algorithmes à base d'agents et de recuit simulé, qui sont développées à ce stade de notre recherche, pour étudier deux aspects de la gestion stratégique des ressources humaines. Ces aspects sont : la flexibilité dans l'élaboration des horaires de travail et l'impact de la prise en considération des préférences dans le processus d'ordonnancement du personnel.

9.1. Analyse de l'impact de la flexibilité

9.1.1. Introduction et description des simulations

Dans le processus d'ordonnancement du personnel, la dimension liée à la flexibilité du temps de travail apparaît aujourd'hui comme étant un élément clé pour l'amélioration de la gestion des ressources humaines. De nombreuses recherches ont démontré les effets bénéfiques de la flexibilité (Bailey & Field 1985 ; Jacobs & Bechtold 1993). Il se dégage de ces recherches qu'une flexibilité élevée offre plus de souplesse dans l'élaboration des plannings de travail et permet par la même occasion d'améliorer la productivité des employés. En effet, selon Bailey et Field (1985), la flexibilité a un impact positif sur l'environnement de travail, qui se traduit par une motivation plus élevée des employés et une diminution du taux d'absentéisme et des retards. L'idée de base de la flexibilité du temps de travail consiste à diversifier les modèles des horaires de travail possibles en termes de durées et d'emplacements des périodes de travail, ou à réduire au minimum les limites temporelles de tels modèles et ce, afin de faire face aux fluctuations et aux aléas de la production et pour s'accommoder aux préférences et aux contraintes personnelles des employés.

La flexibilité dans l'ordonnancement du personnel peut prendre plusieurs formes. Les exemples les plus répandus sont :

1. Adoption de plusieurs types de quart de travail qui ont des durées et des plages horaires distinctes (Shift-length flexibility) (Jacobs & Bechtold 1993 ; Thompson 1995 ; Brusco & Jacobs 2000 ; Klabjanet al. 2000 ; Rekik et al 2004) ;
2. Flexibilité sur les heures de démarrage du quart de travail par jour et par semaine (Start-time flexibility) (Thompson 1995 ; Rekik et al. 2004) ;
3. Flexibilité sur l'emplacement et la durée des jours de repos hebdomadaire (Days-off flexibility) (Jacobs & Brusco 1996 ; Topaloglu & Ozkarahan 2004). Ce type de flexibilité est lié principalement au cas du problème d'élaboration de patrons de travail (Tour scheduling problem);
4. Flexibilité liée aux emplacements des périodes de pause quotidiennes (Break-placement flexibility) (Bechtold & Jacobs 1990 ; Jacobs & Bechtold 1993 ; Thompson 1995 ; Brusco & Jacobs 2000 ; Rekik et al 2004).

Dans cette recherche, nous nous intéressons à la flexibilité liée d'une part, à la dimension de durée du quart de travail, et d'autre part, à la dimension de l'heure de démarrage du quart de travail. Notre objectif consiste à évaluer les gains potentiels que peut produire une stratégie flexible d'aménagement du temps de travail en comparaison avec le modèle traditionnel et typique du quart de travail qui se caractérise généralement par une durée de 9-heures et une seule période de début de travail, généralement à 8 h du matin (appelé dans ce qui suit : *modèle#1*).

Pour chacune des deux dimensions de flexibilité choisies, nous considérons deux niveaux distincts qui reflètent respectivement un niveau moyen et un niveau élevé de flexibilité :

- Pour la dimension de la durée du quart de travail, le premier niveau de flexibilité consiste en quatre durées de travail possibles pour un employé spécifique à chaque quart. Les durées choisies sont respectivement 4, 5, 7 et 9 heures de travail. Dans le cas du deuxième niveau de flexibilité, aucune durée de présence n'est préétablie. La seule contrainte à ce niveau porte sur la durée minimale de présence d'un employé. Cette durée est considérée comme étant égale à 4 heures consécutives de travail par quart.

- Pour la dimension du démarrage du quart de travail, nous considérons dans un premier niveau qu'un quart de travail peut débuter toutes les 2 heures en commençant à partir d'une heure de référence (8 h du matin par exemple). Dans le deuxième niveau, la fréquence de démarrage est plus élevée. Dans ce cas, un quart de travail peut commencer toutes les heures.

La combinaison de ces deux dimensions donne lieu à quatre modèles possibles pour l'aménagement du temps de travail tel qu'illustré dans la figure 25.

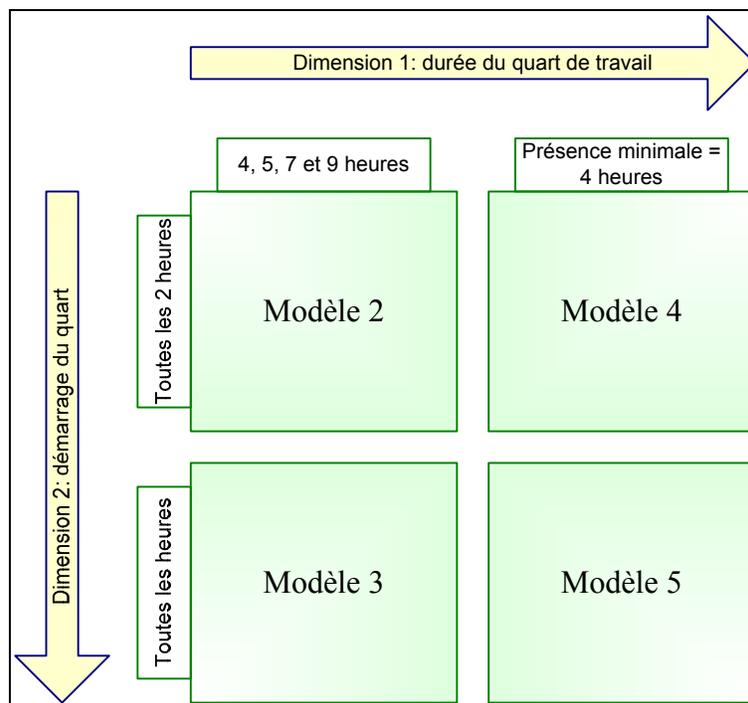


Figure 25 : modèles flexibles d'aménagement du temps de travail

Afin d'évaluer l'impact des cinq modèles de flexibilité choisis, nous procédons à la résolution d'un problème d'ordonnancement du personnel qui correspond à un plan de production s'étalant sur un horizon de soixante quarts de travail. Un soin particulier a été accordé à l'élaboration de ce plan de production, et ce, de telle manière à avoir une multitude de types de charge de travail, qui varie d'une charge faible à une charge forte en termes du nombre d'employés requis. En plus, au niveau de chaque quart, nous simulons un certain nombre de perturbations liées à l'absence totale ou partielle

d'employés. Nous considérons un taux d'absence variant entre 1 à 5 % du nombre total de la main-d'œuvre. La taille du bassin de la main-d'œuvre est de 200 employés dont 5% sont des chefs d'équipes. En cas de surplus d'employés, les employés qui ne seront pas affectés à des activités durant le quart de travail seront considérés comme étant des travailleurs sur appel. Le système d'assemblage est composé de 40 stations d'assemblage. Pour chaque quart, l'horizon de planification est égal à 9 heures. Nous avons considéré un temps de cycle de 15 min, ce qui donne une planification étalée sur 36 périodes de temps. Durant un quart de travail, la fréquence de changement de gamme de produits à assembler varie de 1 à 4 fois. Au niveau de chaque station, le passage d'un modèle à un autre requiert un temps de setup égal à 15 min.

Pour la mise en œuvre de ces différents modèles, nous utilisons deux approches de résolution pour l'ordonnement du personnel : l'approche à base d'agents ainsi que la deuxième variante de l'algorithme de recuit simulé (permutation par bloc d'activités). Cela nous permet par la même occasion de comparer les performances de ces deux approches sur un horizon assez important. En ce qui concerne le temps de calcul utilisé pour chaque quart de travail, nous nous sommes fixés une durée égale à 10 minutes pour le processus d'ordonnement et une durée de 100 secondes pour le réordonnement en cas d'absence totale ou partielle d'employés.

9.1. 2. Résultats et analyse de l'impact de la flexibilité

Nous allons maintenant étudier les résultats expérimentaux issus de la résolution de la série des cinq modèles à travers l'utilisation simultanée de l'approche à base d'agents et du recuit simulé. Dans un premier temps, nous nous focalisons sur l'analyse de l'impact de la flexibilité, et ce, en comparant les coûts des différents modèles d'aménagement du temps de travail. Dans un deuxième temps, nous réexaminons les performances des deux approches de résolution, car grâce à la durée assez importante des simulations (60 quarts/modèle), nous serons en mesure d'avoir une idée plus représentative de la performance de l'approche à base d'agents vis-à-vis de l'algorithme de recuit simulé.

Le tableau 17 présente les résultats cumulés de la fonction objectif pour les différents modèles de flexibilité et pour chacune des deux méthodes d'ordonnement-réordonnement.

	Modèle 1 (quart de travail traditionnel)	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4	Modèle 5
Approche SMA	1 502 191 \$	1 489 087 \$	1 479 411 \$	1 469 174 \$	1 462 620 \$
Recuit simulé (variante 2)	1 514 589 \$	1 499 607 \$	1 491 662 \$	1 487 892 \$	1 485 603 \$

Tableau 17 : Résultats cumulés des solutions d'ordonnement/ réordonnement

Les tableaux 18 et 19 comparent les écarts entre les différents modèles de flexibilité. Pour chacune des deux méthodes de résolution, l'écart entre deux modèles distincts est calculé

selon la formule :
$$\frac{(\text{Solution du modèle en colonne} - \text{Solution du modèle en ligne})}{\text{Solution du modèle en ligne}}$$
.

	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4	Modèle 5
Modèle 1	_	- 0,9 %	- 1,5 %	- 2,2 %	- 2,6 %
Modèle 2		_	- 0,6 %	- 1,3 %	- 1,8 %
Modèle 3			_	- 0,7 %	- 1,1 %
Modèle 4				_	- 0,4 %
Modèle 5					_

Tableau 18 : Comparaison des coûts des modèles de flexibilité pour l'approche SMA

	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4	Modèle 5
Modèle 1	_	- 1 %	- 1,5 %	- 1,8 %	- 1,9 %
Modèle 2		_	- 0,5 %	- 0,8 %	- 0,9 %
Modèle 3			_	- 0,3 %	- 0,4 %
Modèle 4				_	- 0,2 %
Modèle 5					_

Tableau 19 : Comparaison des coûts des modèles de flexibilité pour le recuit simulé

On constate qu'en termes d'écart entre les trois premiers modèles, les deux approches de résolution aboutissent à des résultats similaires. Par contre, pour les modèles les plus

flexibles 4 et 5, les écarts obtenus par l'approche SMA sont presque le double de ceux du recuit simulé.

Au niveau de l'impact de la flexibilité sur le coût d'ordonnancement et de réordonnancement du personnel, les deux approches de résolution apportent des résultats intéressants, et ce, dans la mesure où elles démontrent que l'adoption de la notion de flexibilité peut générer des gains notables. En effet, le principal résultat est que la diminution des coûts est au moins égale à 0,9 % entre l'utilisation d'une part, d'un quart de travail conventionnel de 9-heures de travail sans aucune flexibilité sur le démarrage du quart (modèle 1) et d'autre part, de n'importe lequel des modèles de flexibilité proposé. En comparant le modèle 1 au modèle 5, cette diminution des coûts peut atteindre jusqu'à 1,9 % dans le cas d'utilisation du recuit simulé et 2,6 % dans le cas de l'approche SMA.

Par ailleurs, en comparant le modèle 2 respectivement aux modèles 3 et 4, les résultats suggèrent que la flexibilité sur la durée du quart de travail peut s'avérer plus intéressante que la flexibilité sur les périodes de démarrage de quarts de travail. En effet, en passant du modèle 2 au 3 (démarrage de quarts toutes les 2 heures vs toutes les heures), la diminution des coûts est de l'ordre de 0,5 % à 0,6 %, alors que le passage du modèle 2 au 4 (durée du quart fixée à 4, 5, 7 et 9h vs uniquement une limite de présence minimale des employés égale à 4h) permet des réductions des coûts de l'ordre de 0,8 % à 1,3 %.

Au niveau de la gestion des ressources humaines, ces résultats confirment la pertinence et l'intérêt de la notion de flexibilité dans le processus d'ordonnancement du personnel. Cependant, il est primordial que toute stratégie de flexibilité prenne en considération les spécificités liées d'une part, à la nature du secteur d'activité de l'entreprise et d'autre part, au statut, à la disponibilité et aux préférences des employés. Car l'utilisation abusive d'une grande flexibilité par l'employeur peut engendrer des effets pervers. Notamment, des horaires fréquemment irréguliers pour les employés ou amener des employés à travailler moins que d'autres. De tels effets augmentent le risque que la vie professionnelle des employés empiète sur leur temps familial. En pratique, l'implantation d'une stratégie de flexibilité dans certains secteurs d'activité peut s'avérer une tâche difficile qui nécessite l'adaptation de l'organisation de l'entreprise à cette nouvelle

situation et parfois même requiert de nouveaux investissements liés par exemple aux moyens de transport des employés en cas de travail à des heures tardives de la journée.

Par ailleurs, sur la base des résultats qui proviennent de la résolution du problème d'ordonnement du personnel pour soixante quarts de travail et pour cinq modèles de flexibilité distincts suivant les approches SMA et recuit simulé, il est possible de procéder à un réexamen des performances de ces deux approches sur un horizon plus vaste que celui précédemment utilisé à la section 8.6.

La figure 26 illustre l'évolution de l'écart entre les coûts cumulés obtenus par les deux approches pour chacun des modèles de flexibilité. Au niveau de chaque quart de travail q , l'écart entre les deux approches est calculé à travers la formule :

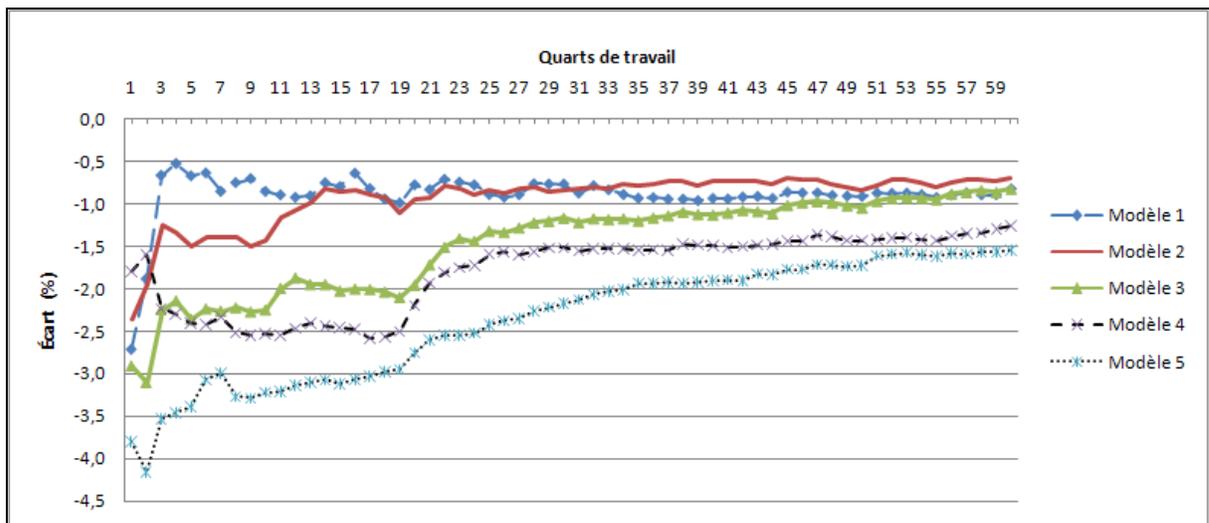
$$\frac{(\text{Coût cumulé SMA au niveau de } q - \text{Coût cumulé recuit simulé au niveau de } q)}{\text{Coût cumulé recuit simulé au niveau de } q}$$


Figure 26 : Comparaison des performances de l'approche à base d'agents vs recuit simulé

Nous observons aisément que les résultats obtenus confirment les bonnes performances de l'approche à base d'agents en comparaison avec l'approche de recuit simulé. La meilleure performance est obtenue pour le cas du modèle des horaires les plus flexibles (modèle 5). Dans ce cas, les résultats indiquent un écart de -1,6 %. L'écart le plus faible est enregistré dans le cas du modèle 2. Cet écart égal -0,7 %.

Sur la base de ces résultats, il est pertinent de noter que même si les valeurs des écarts entre les deux approches de résolution apparaissent peu significatives en terme relatif de pourcentage, leurs valeurs absolues peuvent s'avérer significatives. À titre d'exemple, pour une moyenne entreprise de 200 employés, la masse salariale hebdomadaire du personnel peut atteindre $180\ 000\ \$ = 200\ \text{employés} \times 5\ \text{jours/employé} \times 9\ \text{heures/jour} \times 20\ \$/\text{heures}$. Dans ce cas, une économie moyenne de 1 % grâce à l'utilisation de l'approche SMA représente 1800 \$ par semaine, cela se traduit en une économie de 93 600 \$ par an. Si on additionne à ce montant une économie moyenne de 2 % grâce à l'instauration d'une politique flexible de gestion des horaires de travail, on obtient un total d'environ 280 800 \$ par an. À notre sens, ce montant représente une économie substantielle qui peut être allouée à différents usages, notamment, à la formation des employés et à l'amélioration de leur environnement de travail. Dans cette perspective, un des moyens consiste à accorder un intérêt particulier à la prise en considération des préférences des employés dans le processus d'ordonnement. Afin d'évaluer l'impact d'une telle démarche, nous analysons dans ce qui suit l'influence de la prise en compte des préférences des employés sur le coût total d'ordonnement du personnel.

9.2. Analyse de l'Impact des Préférences

Dans cette section, notre intérêt porte sur l'évaluation de l'impact de la prise en considération des préférences des employés sur le coût de la solution d'ordonnement et de réordonnement du personnel. Plusieurs recherches ont souligné l'importance et l'impact positif de la satisfaction des employés et des mesures qui améliorent leur qualité de vie sur la productivité au travail (Deery & Mahony 1994 ; Gärtner 2004). De plus, plusieurs recherches ont intégré les dimensions liées aux préférences des employés dans le processus de résolution du problème d'ordonnement du personnel (Warner 1976 ; Sinuany-Stern & Teomi 1986 ; Dowsland 1998; Dowsland & Thompson 2000 ; Ernst et al.2004). Les aspects de préférences les plus fréquents dans l'ordonnement sont liés à la durée du quart de travail, au nombre d'heures de travail hebdomadaire, au nombre des journées de travail consécutif, au modèle de rotation entre les employés, et aux jours de repos. Au meilleur de notre connaissance, la plupart des recherches liées à l'ordonnement du personnel se sont limitées à la modélisation du problème en tenant

compte des aspects de préférences et à la recherche d'une meilleure approche de résolution. Aucune exploitation des résultats n'a été faite dans le sens d'explorer l'impact des préférences sur le coût d'ordonnancement.

À ce stade de notre recherche, nous avons intégré dans notre modélisation trois dimensions qui expriment les préférences des employés. Les dimensions retenues dans notre modèle sont (cf. section 6.3) :

1. Préférences des employés au sujet de la durée du quart de travail. Cette préférence est exprimée en termes d'heures de travail souhaitées ;
2. Préférences des employés au sujet des activités préférées. Chaque employé exprime ses choix en précisant si une activité en question est souhaitée, non souhaitée ou bien s'il est indifférent ;
3. Préférences des employés au sujet du nombre de transferts inter-postes.

Ces préférences sont modélisées dans notre fonction objectif à travers des pénalités et des gains qui reflètent l'amplitude de la déviation par rapport aux valeurs souhaitées par chacun des employés.

Afin d'évaluer l'impact de ces préférences sur le résultat d'ordonnancement, nous procédons à une série de six simulations. À chaque simulation, on varie le poids relatif accordé aux pénalités et aux gains liés aux préférences dans la fonction objectif. Cette démarche permet de relever les variations de l'incidence des préférences sur le résultat d'ordonnancement.

Pour chaque employé, nous considérons que la valeur nominale p des pénalités et des gains rattachés à ses préférences est choisie en corrélation avec le coût correspondant à sa présence au travail durant une unité de temps. Le tableau 20 illustre les différents coefficients de corrélation choisis pour chaque simulation. Ainsi, pour chacune des six simulations, nous considérons un coefficient de corrélation C , la valeur nominale p est calculée à travers la formule : $p = C \times \text{coût unitaire de présence}$. Avec un coefficient

égal à 0 %, la simulation#1 reflète la non-considération des préférences dans l'ordonnancement.

	simulation 1	simulation 2	simulation 3	simulation 4	simulation 5	simulation 6
Coefficient de corrélation C	0%	6,5%	20%	50%	80%	100%

Tableau 20 : coefficients de corrélation des valeurs de pénalités et de gains liés aux préférences / aux coûts de présence d'employés

Par ailleurs, la distribution de la valeur nominale p entre les trois catégories des préférences est effectuée selon le schéma suivant :

- Préférence des activités : une pénalité de $p/3$ si l'employé est affecté à une des activités non désirées ; 0 s'il est indifférent ; et un gain de $- p/3$ s'il est affecté à une des activités préférées.
- Préférence pour la durée du quart de travail : une pénalité de $p/3$ pour chaque période de planification de plus ou de moins par rapport à la durée souhaitée par l'employé.
- Préférence pour le transfert inter-postes : une pénalité de $p/3$ pour chaque transfert de plus ou de moins par rapport au nombre souhaité par l'employé.

Pour la mise en œuvre des simulations, nous avons choisi des paramètres de production identiques à ceux qui sont utilisés dans la section précédente avec le modèle 5 comme stratégie de flexibilité. En plus, nous avons utilisé l'approche à base d'agents comme méthode de résolution du problème d'ordonnancement du personnel.

Dans la comparaison des résultats des simulations, nous nous intéressons à deux mesures de performance :

- Le coût net de la solution : désigne le coût total de présence des employés. Il ne tient pas compte des pénalités ou des gains rattachés aux préférences.

- Les préférences des employés : vu que les simulations ont des valeurs nominales distinctes pour les pénalités et les gains rattachés aux préférences, nous présentons les résultats des trois dimensions de préférences ramenés à base unitaire de coût (i.e. appliquer à la solution de chaque simulation une pénalité de 1 \$ et un gain de -1 \$ pour le calcul des préférences), et ce, afin de simplifier l'interprétation et la comparaison des résultats sur une base commune à toutes les simulations.

Pour chacune de ces deux mesures, nous nous intéressons à l'écart relatif par rapport à la valeur obtenue dans le cas de la simulation #1, dont les résultats sont considérés comme étant la base comparative pour les cinq autres simulations qui tiennent compte des préférences des employés. Le tableau 21 présente une synthèse des résultats de simulation obtenus.

	Coefficient de corrélation	Fonction objectif (\$)	Coût net (\$)	Var. Coût net	Pénalité & gain moyen/employé/préférence/quart de travail					
					Activités préférées		Durée du quart		Transfert inter-postes	
					Pénalité /gain	Var. %	Pénalité /gain	Var. %	Pénalité /gain	Var. %
simulation 1	0%	1 502 845	1 502 845	-	-4,4 \$	-	5,48 \$	-	2 \$	-
simulation 2	6,5%	1 462 620	1 505 016	0,14 %	-24 \$	448%	5,43 \$	-1%	2 \$	0%
simulation 3	20%	1 370 415	1 506 308	0,23 %	-24,5 \$	461%	5,43 \$	-1%	2 \$	0%
simulation 4	50%	1 166 042	1 509 816	0,46 %	-25 \$	470%	5,20 \$	-5%	2 \$	0%
simulation 5	80%	945 510	1 511 413	0,57 %	-25 \$	470%	5,07 \$	-8%	2 \$	0%
simulation 6	100%	812 243	1 517 295	0,96 %	-25 \$	470%	4,95 \$	-10%	2 \$	0%

Tableau 21 : résultats des simulations de l'impact des préférences sur les résultats d'ordonnement

Nous observons que l'augmentation du poids relatif des préférences affecte à une moindre échelle le coût net de la solution en comparaison avec son impact sur les mesures de préférences des employés. En effet, en comparant les simulations 1 et 6, on constate qu'une augmentation de 100 % du poids des préférences dans la fonction objective donne lieu d'une part, à une augmentation d'environ 0.96 % du coût net de la solution d'ordonnement, et d'autre part à une amélioration dans l'affectation des activités et des durées de quart de travail préférées par les employés dont la valeur est respectivement égale à 470 % et 10 %.

De plus, tenant compte du fait qu'un employé est affecté au maximum à 32-périodes de travail par quart (un quart de 9-heures = 32-périodes de 15 min de travail + 4-périodes de 15 min de pauses), un gain moyen de 25 \$/quart dû aux activités préférées est équivalent à une affectation moyenne de l'employé durant $83\% = 25/32$ de son temps de travail aux activités qu'il préfère le plus. On note aussi, qu'une légère augmentation du poids de préférences à 6.5 % permet d'accroître exponentiellement la satisfaction des employés en ce qui concerne les activités qui leur sont allouées (environ 448 % d'amélioration). Au-delà d'un poids égal à 20 %, le taux d'amélioration de cette préférence est très peu significatif.

Par ailleurs, concernant la pénalité moyenne liée au nombre de transfert inter-postes des employés, nous n'observons aucune variation en fonction du changement du poids de cette préférence dans la fonction objective. Une explication possible de ce phénomène tient au caractère rigide de la contrainte utilisée pour modéliser l'état de transfert des employés. En effet, un transfert d'un employé entre deux postes de travail ne peut être constaté que si le plan de production impose une telle mesure. Les contraintes liées à cet aspect ne permettent pas de créer un état artificiel de déplacement des employés uniquement pour satisfaire les préférences de l'employé.

9.3. Conclusion

Dans cette partie de notre recherche, nous nous sommes intéressés à l'impact de la flexibilité dans l'aménagement du temps de travail sur la solution d'ordonnancement du personnel. Les résultats de simulation que nous avons élaborés ont démontré que la flexibilité peut conduire à une réduction du coût d'allocation du personnel. Suivant la stratégie adoptée, la réduction varie de -0.9 à -2.6 % en comparaison avec un modèle conventionnel de quart de travail.

Nous avons également cherché à connaître l'impact de la prise en compte des préférences sur le coût net d'ordonnancement. L'analyse des résultats de simulations montre qu'une amélioration de la satisfaction des employés de 448 % au sujet des activités allouées et de 1 % au sujet de la durée du quart de travail (simulation 2) augmente le coût

d'ordonnement d'environ 0.14 %. Alors qu'une amélioration de 470 % et de 10 % pour les mêmes préférences augmente le coût d'environ 0,96 %.

De cet ensemble de résultats, on constate que les gains liés à l'implantation de la stratégie de flexibilité permettraient de compenser les coûts rattachés à la prise en considération des préférences des employés dans le processus d'ordonnement. Ainsi, la combinaison de ces deux dimensions de gestion du personnel permet de répondre le mieux possible aux intérêts de l'employeur et de l'employé. En effet, d'un côté, grâce à la flexibilité, l'entreprise gagne en réactivité et en dynamique afin de s'adapter et de faire face aux aléas de la production et aux fluctuations du marché, et d'un autre côté, les employés seront plus satisfaits de leurs conditions de travail.

10. Conclusion générale et perspectives

Dans cette recherche, nous nous sommes intéressés aux problèmes de planification et d'ordonnancement du personnel opérationnel travaillant dans un contexte d'agilité manufacturière.

Dans un premier temps, nous avons présenté une revue de travaux de recherche portant sur la stratégie de polyvalence inter-postes des employés. Nous avons constaté que ces travaux sont unanimes à affirmer que cette stratégie est bénéfique pour les entreprises en termes d'efficacité et d'agilité du personnel. Cependant, au-delà d'un certain niveau de polyvalence, ils reconnaissent que les avantages recueillis deviennent minimes en comparaison avec les coûts de formation. En plus, ils stipulent qu'une grande polyvalence du personnel risque de se transformer en un élément contre-productif et peut se répercuter négativement sur la qualité des services et des produits offerts.

Dans un deuxième temps, nous avons exposé les différentes configurations que peuvent adopter les problèmes d'ordonnancement du personnel. Dans les travaux recensés, la classification la plus répandue est celle qui divise les problèmes d'ordonnancement du personnel en trois catégories : le problème de planification des jours de repos, le problème d'élaboration des quarts de travail et le problème d'élaboration de patrons de travail. À cette classification générique peuvent s'ajouter d'autres caractéristiques contextuelles qui expriment le cas d'un problème d'ordonnancement réel pour un secteur d'activité bien précis

Nous avons constaté la complexité des problèmes d'ordonnancement du personnel. La majorité de ces problèmes sont de type NP-complet. Il ressort des recherches examinées que l'utilisation des méthodes exactes de résolution se limite à des problèmes de petite taille. Pour le cas des problèmes d'ordonnancement complexes et de grande taille, les méthodes de résolution les plus utilisées sont les heuristiques et les métaheuristiques.

Arrivé à ce niveau d'analyse, nous avons formulé notre problématique de recherche qui porte sur le problème d'ordonnancement en temps réel du personnel travaillant dans un

contexte de production manufacturière agile. Afin d'aborder cette problématique, nous nous sommes basés sur trois domaines de recherche. Premièrement, la gestion axée sur les compétences, issue de la gestion stratégique des ressources humaines. Deuxièmement, les systèmes multi-agents issus de l'intelligence artificielle distribuée. Et troisièmement, les jeux coopératifs qui sont une branche de la théorie des jeux à n-personnes. Les fondements théoriques de ces trois courants de recherche ont alimenté notre démarche pour la modélisation et le développement des solutions préconisées pour la résolution du problème inhérent à l'ordonnancement en temps réel du personnel dans un contexte manufacturier caractérisé par une incertitude et une dynamique de plus en plus imprévisible.

Ainsi, nous avons élaboré un modèle mathématique de notre problème d'ordonnancement des employés travaillant sur une chaîne d'assemblage. Ce modèle tient compte des dimensions telles que les préférences, les compétences et la capacité de déplacements inter-postes des employés. En nous basant sur ce modèle, et grâce à l'utilisation du solveur commercial de type Cplex, nous avons pu résoudre des instances de problèmes de petite taille. Les résultats obtenus ont démontré que la production d'une solution optimale requiert un temps de calcul important, ce qui risque de générer une rigidité et une moindre réactivité de la fonction d'ordonnancement face à des perturbations d'un environnement dynamique.

À cet effet, nous avons jugé qu'une approche de résolution dynamique et distribuée à base d'agents serait judicieuse. Dans cette perspective, nous avons présenté une approche à base d'agents pour la résolution des problèmes d'ordonnancement. Cette approche est structurée autour de la notion de coopération inter-agent et ce, grâce à la formation de coalitions.

Afin de mettre en œuvre cette approche, nous avons présenté une modélisation multi-agents d'une chaîne d'assemblage. Cette modélisation se base sur l'utilisation de plusieurs types d'agents intelligents qui encapsulent d'une part, les processus décisionnels d'ordonnancement du personnel et d'autre part, les entités physiques de la chaîne. Les résultats d'ordonnancement du personnel obtenus à partir des premiers tests

sont encourageants. Ils démontrent que notre approche à base d'agents permet d'avoir des solutions de bonne qualité en des temps raisonnables.

De plus, pour faire face aux aléas liés à l'absence d'employés, nous nous sommes intéressés au processus de réordonnement du personnel. À cet effet, nous avons développé une extension de l'approche à base d'agents ainsi qu'une approche de recuit simulé, qui permettent de résoudre le problème de réordonnement. Nous avons pu tester les performances de ces deux approches sur plusieurs cas du problème d'ordonnement et de réordonnement du personnel. L'ensemble des résultats démontre que l'algorithme à base d'agents conduit à de très bonnes solutions en comparaison avec le recuit simulé.

Enfin, nous avons exploité les algorithmes à base d'agents et de recuit simulé, qui sont développés dans cette recherche, pour étudier deux aspects de la gestion stratégique des ressources humaines : la flexibilité dans l'élaboration des horaires de travail et l'impact de la prise en considération des préférences dans le processus d'ordonnement du personnel. Dans les deux cas, les résultats de simulation obtenus corroborent les hypothèses initiales de recherche, à savoir la pertinence et l'intérêt de la notion de flexibilité et de la prise en compte des préférences dans le processus d'ordonnement du personnel.

Par ailleurs, en dressant le bilan de ce travail de recherche, on constate l'intérêt d'une approche d'ordonnement à base d'agents ainsi que celui d'une approche de gestion des ressources humaines axée sur les compétences. En effet, la qualité des résultats obtenus suggère des perspectives de recherche pertinentes. Ainsi, on distingue trois axes pour les perspectives de recherche, qui sont liés respectivement à la modélisation des compétences, à l'intégration du processus d'ordonnement de la production et à l'environnement d'application de notre approche à base d'agents.

Dans un premier lieu, en termes de modélisation des compétences, nous avons utilisé dans cette recherche des variables binaires afin de spécifier si un employé est compétent pour la réalisation d'une activité d'assemblage. Cet aspect peut être amélioré par la suite en considérant une modélisation basée sur plusieurs niveaux de compétences et de

performances. Cela permet d'aborder par exemple des thèmes tels que l'impact de l'allocation d'un employé avec un certain niveau de compétence ou de performance sur la qualité du produit assemblé et aussi sur la dynamique de la production, et ce, dans la mesure où en raison d'erreurs humaines, certains produits nécessiteront leur réintégration dans la chaîne d'assemblage afin d'accomplir des opérations de réparation, nécessitant par la même occasion la réallocation d'employés.

En second lieu, la problématique d'ordonnancement du personnel présentée dans ce travail de recherche suppose que le plan de production est une donnée du problème qui est défini au préalable sans tenir compte des caractéristiques du bassin de compétences des employés. Nous avons considéré qu'il n'y avait aucune interaction entre les processus d'ordonnancement de la production et du personnel. De ce fait, il serait intéressant de mettre en œuvre une approche qui intègre simultanément les deux catégories d'ordonnements et d'évaluer l'intérêt d'une telle approche sur la gestion des ressources humaines et des systèmes de production.

Enfin, il serait également intéressant de mettre en œuvre notre approche d'ordonnancement du personnel dans d'autres contextes de gestion de ressources humaines. On peut citer à titre d'exemple, l'ordonnancement du personnel dans un contexte d'une organisation multi-sites ou qui opère dans le secteur des services. Dans ce cas, les contraintes de présences et de mobilisation des employés sont différentes de celles de la production dans une chaîne d'assemblage. Aussi, il serait pertinent d'étendre notre approche à base d'agents à d'autres catégories de problèmes d'ordonnancement du personnel, notamment au problème d'élaboration de patrons de travail (tour-scheduling problem) qui requiert à la fois l'élaboration des quarts de travail et l'affectation des jours de repos hebdomadaire.

Bibliographie

- Abumaizar, R. J. and Svestka, J. A. (1997), *Rescheduling job shops under random disruptions*, International Journal of Production Research, 35 (7) : 2065-2082.
- Aickelin.U et Dowsland, K, (2000), *Exploiting problem structure in a genetic algorithm approach to a nurse rostering problem*, Journal of Scheduling, 3:139-153.
- Alfares. H. K., (1998), *An efficient two-phase algorithm for cyclic days-off scheduling*. Computers and Operations Research, 25(11):913–923.
- Alfares. H. K., (2003), *Compressed workweek scheduling with differing weekdays weekends labor demands*, Asia-Pacific Journal of Operational Research 20: 1-20.
- Alfares. H. K. (2004), *Survey, categorization, and comparison of recent tourscheduling literature*. Annals of Operations Research, 127:145–175
- Atlason, J. et.EPELMAN, M.A. (2004), *Call Center Staffing with Simulation and Cutting Plan*, Annals of Operations Research 127 : 333–358.
- Aumann, R. Land Maschler, M. (1964), *The Bargaining Set for Cooperative Games*, in M. Dresher, L. S. Shapley, and A. W. Tucker (eds.), *Advances in Game Theory*, Princeton University Press, Princeton, N.J..
- Aykin T., (1996), *Optimal shift scheduling with multiple break windows*. Management Science, 42 : 591–603.
- Aykin T., (1998), *A composite branch and cut algorithm for optimal shift scheduling with multiple breaks and break windows*, Journal of the Operational Research Society, 49 : 603-615.
- Aykin T. (2000), *A comparative evaluation of modelling approaches to the labor shift scheduling problem*. European Journal of Operational Research, 125 :381–397.
- Aytug, H., Lawley, M., McKay, K., Mohan, S. and Uzsoy, R. (2005), *Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions*, European Journal of Operational Research, 161 : 86-110.
- Bailey, J. et Field, J. (1985) *Personnel Scheduling with Flexshift Models*. Journal of Operations Management. 5(3) : 327-338.
- Baker. K. (1976), *Workforce allocation in cyclical scheduling problems, A survey*. Operational Research Quarterly, 27(1) :155–167.
- Bayad, M., Arcand, G., Arcand, M. et Allani, N., (2001), *Gestion stratégique des ressources humaines : fondements et modèles*, Communication ESA – Grenoble, séminaire de recherche, jeudi 22 mars.

- Bard, J.F. (2004), *Staff Scheduling in High Volume Service Facilities with Downgrading*, IIE Transactions on Scheduling & Logistics 36(10) : 985-997.
- Bartholdi J. (1981), *A guaranteed-accuracy round-off algorithm for cyclic scheduling and set covering*. Operations Research, 29:501-10.
- Bartholdi, J.J. III, Bunimovich, L.A. et Eisenstein, D.D., (1999), *Dynamics of Two- and Three-Worker "Bucket Brigade" Production Lines*, Operations Research, 47(3) :488-491.
- Bartholdi, J.J. III. et Eisenstein, D. D. (1996), *A production line that balances itself*, Operations Research, vol. 44(1) :21-34.
- Beasley, J. et Cao, B. A, (1998), *A dynamic programming based algorithm for the crew scheduling problem*. Computers & Operations Research, 25 : 567-582.
- Bechtold S.E., Brusco M.J. et Showalter M.J., (1991). *A comparative evaluation of labor tour scheduling methods*. Decision Sciences, 22:683–699.
- Bechtold, S.E. et Brusco, M.J. (1995). *Microcomputer-based working set generation methods for personnel scheduling*. International Journal of Operations & Production Management 15(10) : 63-74.
- Bell D.E., Raiffa H., Tversky A., (1988), *Descriptive, Normative and Prescriptive inter-actions in Decision Making*, in D.E. Bell, H. Raiffa, A. Tversky, eds., Decision Making:descriptive, normative and prescriptive interactions, Cambridge University Press, Cambridge.
- Berman O., Larson R. C., et Pinker E. (1997). *Scheduling workforce and workflow in a high volume factory*. Management Science, 43:158–172.
- Binmore, K. (1992), *Fun and games: a text on game theory*. D.C Heath and company, Lexington, MA.
- Bischak, D.P. (1996), *Performance of a manufacturing module with moving workers*, IIE Transactions 28(9) : 723-733.
- Bokhorst, J.A.C, Slomp, J. et Molleman, E. (2004), *Development and evaluation of cross-training policies for manufacturing team*, IIE transactions on Scheduling & Logistics, 36(10) : 969-984.
- Borshchev, A. V. , Yu. G. Karpov, V. A. Kharitonov, (2002). *Distrebuted simulation of hybrid systems with AnyLogic and HLA*, Future Generation Computer Systems. 18(6): 829-839.
- Brugali, D., Menga, G. et Galarraga, S. (1998). *Inter-Company Supply Chains Integration via Mobile Agents*. In Proceedings of PROLAMAT'98, Trento, Italy.
- Brusco, M. J. et Jacobs. L. W, (1993), *A simulated annealing approach to the solution of flexible labour scheduling problems*. Journal of Operational Research Society. 44(12) :1191-1200.

- Brusco M.J., Jacobs L.W., Bongiorno R.J., Lyons, D. et Tang, B., (1995). *Improving Personnel Scheduling at Airline Stations*. Operations Research, 43(5): 741-751
- Brusco M. J. et Jacobs L. W. (1998). *Personnel tour scheduling when starting-time restrictions are present*. Management Science, 44(4):534-547.
- Brusco, M.J. et Johns, T.R. (1998). *Staffing a multiskilled workforce with varying levels of productivity: An analysis of cross-training policies*. Decision Sciences, 29 (2): 499-515.
- Burke, P. et Prosser, P. (1994). The Distributed Asynchronous Scheduler. Intelligent Scheduling, Zweben, M. and Fox, M.S., eds., Morgan Kaufman Publishers, San Francisco, CA, 309-339.
- Bryson, J. et Stein, L.A. (2000), *Modularity and specialized learning in the organization of behaviour*. In Robert French and Jacques Sougné, editors, The Sixth Neural Computation and Psychology Workshop (NCPW6). Springer-Verlag: Heidelberg, Germany, 2000.
- Campbell, G.M. (1999), *Cross-Utilization of Workers Whose Capabilities Differ*, Management Science, 45(5): 722-732.
- Cai X. et Li, K. N. (2000). *A genetic algorithm for scheduling staff of mixed skills under multi-criteria*, European Journal of Operational Research, 125(2) : 359-369.
- Caridi, M. et Sianesi, A., (2000). Multi-agent systems in production planning and control: An application to the scheduling of mixed-model assembly lines. International Journal of Production Economics, 68(1), 29-42.
- Cazal, Didier et Anne Dietrich (2003), *Compétences et savoirs : entre GRH et stratégie ?*, Les Cahiers de la recherche, CLAREE, UPRESA, CNRS 8020.
- Chaib-Draa, B. Jerras, I, et Moulin B., (2001), *Systèmes multi-agents : principes généraux et applications*, Hermès.
- Charon, I., Germa, A., et Hudry, O. Méthode d'optimisation combinatoire. Masson, Paris, 1996.
- Chen H.-G, (1995), *Operator scheduling approaches in group technology cells-information request analysis*," Ieee Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 25(3) : 438-452
- Chong, C.S., Sivakuma, A.I. et Gay, R. (2003). *Simulation-based scheduling for dynamic discrete manufacturing*, Winter Simulation Conference, New Orleans, USA, 1465-1473.
- Cloutier L. (1999), *Une Approche multi-agents par conventions et contrats pour la coordination de l'entreprise manufacturière*. Thèse de doctorat, Université de Droit, D'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III.

- Cloutier L., Frayret, J.-Y. D'Amours, S. Espinasse B. et Montreuil, B. (2001), *A Commitment-Oriented Approach to Networked Manufacturing*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing (IJCIM). 14(6): 522-534
- Dantzig, G. B. (1954). *A comment on edie's traffic delays at toll booths*. Operations Research, 2:339–341
- Davis,M. et Maschler, M. (1965). *The Kernel of a cooperative game*, Naval research Logistics Quarterly, 12:223-259.
- Deery, SJ and Mahony , A,. (1994) ,*Temporal Flexibility: Management Strategies and Employee Preferences in the Retail Industry*, Journal of Industrial Relations. 36: 332-352.
- DeGans, O.B. (1981), *A computer timetabling system for secondary schools in the Netherlands*, European Journal of Operational Research, 7 :175-182
- Dewey, B. (1997), *Six companies share their insights : The challenges in applying competencies*, Compensation and Benefits Review; 29(2) : 64-76.
- Dowsland, K. (1998), *Nurse scheduling with tabu search and strategic oscillation*, European Journal of Operational Research, 106(2-3):393-407
- Dowsland, K. and Thompson, J. (2000), *Solving a nurse scheduling problem with knapsacks, networks and tabu search*, Journal of the Operational Research Society, 51 :825–833.
- Duffie, N.A. et Piper, R.S. (1986), *Non-Hierarchical control of manufacturing Systems*, Journal of Manufacturing Systems, 5(2): 39-137.
- Easton F. F. et Rossin D. F. (1996) *A stochastic goal program for employee scheduling*. Decision Sciences, 27(3) :541–568.
- Easton, F. F. et Mansour, N. (1999). *A Distributed Genetic Algorithm for Deterministic and Stochastic Labor Scheduling Problems*. European Journal Of Operational Research 118(3) : 505-523.
- Easton, F.F. et Goodale, G.C, (2005), *Schedule Recovery: Unplanned Absences in Service Operations*, Decision Sciences 36 (3) : 459–488.
- Engelmores, R. S. et Morgan T. (1988), *Blackboard Systems*, Addison-Wesley.
- Eglese, R.W (1990), *Simulated annealing: a tool for operational research*, European Journal of Operational Research, 46 : 271-81.
- Ernst, A., Hourigan, P., Krishnamoorthy, M., Mills, G., Nott, H. et Sier, D. (1999), *Rostering ambulance officers*, in Proceedings of the 15th National Conference of the Australian Society for Operations Research, (ed. Kozan, E.), pp 470-481.

- Ernst, A.T., H. Jiang, M. Krishnamoorthy et D. Sier (2004), *Staff Scheduling and Rostering, A review of applications, methods and models*, European Journal of Operational Research ,153(1) : 3-27
- Eveborn, P. et M. Ronnqvist. (2004), *Scheduler-A System for Staff Planning*, Annals of Operations Research, Special Issue on Staff Scheduling and Rostering, 128 : 21-45
- Ferber J. (1995), *Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective*, InterEditions, Paris.
- Filippov, A. Borshchev, A. (2001), *Modeling S-Class Car Seat Control with AnyLogic — Daimler-Chrysler Modeling Contest*, Object-Oriented Modeling of Embedded Real-Time Systems (OMER-2), Herrsching am Ammersee, Germany, pp 46-50
- Fischer, K. (1994). *The Design of an Intelligent Manufacturing System*. In Proceedings of the 2nd International Working Conference on Cooperating Knowledge-based Systems, University of Keele., 83-99.
- Firms, I., Travaglione, A. et Neill. GO, (2006), *Absenteeism in times of rapid organizational change*, Strategic Change, 15(3).
- Frayret, J.-M., D'Amours, S., Montreuil, B. (2003), *Coordination and control in distributed and agent-based manufacturing systems*, Production Planning and Control, 15(1) :1-13.
- Frayret, J.-M., D'Amours, S., Montreuil, B., et Cloutier, L. (2001), *A Network Approach to Operate Agile Manufacturing Systems*. International Journal of Production Economics. 74, 239-259.
- Friedman, J-W. (1990). *Game theory with applications to economics*. Oxford University Press.
- Fry, M. J, Magazine, M.J. et Rao, U.S (2006), *Firefighter Staffing Including Temporary Absences and Wastage*, Operations Research, 54(2) : 353-365.
- Fox, M.S., Chionglo, J.F., et Barbuceanu, M., (1993), *The Integrated Supply Chain Management System*. Internal Report, Dept. of Industrial Engineering, Univ. of Toronto
- Garey M. R. et Johnson D. S., (1979), *Computers and Intractability, a Guide to the Theory of NP-Completeness*, ed. Freeman.
- Gärtner ,J., (2004), *Conflicts between employee preferences and ergonomic recommendations in shift scheduling: regulation based on consent is not sufficient*, Revista de saúde pública,:38- 65
- Gillies, D. B. (1953), *Some Theorems on n-Person Games*, Ph.D. Thesis, Department of Mathematics, Princeton University, Princeton, N.J.
- Gokturk,E. and Polat,F.(2003), *Implementing Agent Communication for a Multiagent Simulation Infrastructure on HLA*, Proc. of the International Symposium on Computer and Information Science (ISCIS 2003), LNCS, Springer-Verlag.

- Goldman, L.S. Nagel, R.N. et Preiss, K. (1995), *Agile competitors and Virtual Organizations. Strategies for enriching the Customer*, Van Nostrand Reinhold.
- Green, P.C. (1999). *Building robust competencies: linking human resource systems to organizational strategies*. San Francisco : Jossey-Bass Publishers, 213 Seiten.
- Hadavi, K., Hsu, W.-L., Chen, T. et Lee, C.-N., (1992). *An Architecture for Real Time Distributed Scheduling*. In: Famili, A., Nau, D.S. and Kim, S.H. (Eds.), *Artificial Intelligence Applications in Manufacturing*, Menlo Park, CA: AAAI Press/The MIT Press, 215-234.
- Hajek, B. (1988), *Cooling schedules for optimal annealing*, *Mathematics of Operations Research*, 13 :311-329.
- Hao, G. Lai, K.K. Tan, M., (2004), *A Neural Network Application in Personnel Scheduling*. *Annals of Operations Research* 128 : 65–90.
- Harsanyi, J.C. , Selten, R. (1988), *A general theory of equilibrium selection in games*, MIT Press
- Henderson, W.B. et Berry, W.L. (1976), *Heuristic methods for telephone operator shifting scheduling: An experimental analysis*, *Management Science*. 22(12) : 1372-1380.
- Hermel,P. (1986), *Stratégie, changement et ressources humaines : quelles relations?.*, Centre d'étude et de recherche sur les organisations et la gestion, Aix en Provence.
- Herrmann, J.W, (2006), *Rescheduling Strategies, Policies, and Methods*, *International Series in Operations Research & Management Science*, 89 : 135-148.
- Hoffmann, T. (1999), *The meanings of competency*, *Journal of European Industrial Training*. 23(6): 275.
- Hopp, W.J. et Van Oyen, M.P (2004), *Agile workforce evaluation : a framework for cross-training and coordination*. *IEE transactions on Scheduling & Logistics*, 36(10) : 919-940.
- Hur, D. Mabertb, V.A. et Bretthauerc, K.M. (2004), *Real-time schedule adjustment decisions : a case study*, *Omega* 32, 333 – 344
- Hur, D., Mabert, V. A., et Bretthauer, K. (2004), *Real time work schedule adjustment decisions: An investigation and evaluation*, *Production and Operations Management*, 13(4) : 322-339.
- Jacobs, L.W; Bechtold, S.E. (1993), *Labor utilization effects of labor scheduling flexibility alternatives in atour scheduling environment*, *Decision Sciences*; 24(1) :148-166.
- Jennings, N.R. Corera, J.M. et Laresgoiti, I. (1995). *Developing Industrial Multi-Agent Systems*. In *Proceedings of ICMAS'95*, San Francisco, and The AAAI press/The MIT press, pp. 423-430.
- Jennings, N.R. et Wooldridge, M.J. (1998). *Applications of Intelligent Agents*. *Agent Technology: Foundations, Applications, and Markets*. Jennings, N.R. and Wooldridge, M.J (Eds.), Springer, pp. 3-28.

- Jordan, W.C., Inman, R.R. et Blumenfeld, D.E. (2004), *Chained cross-training of workers for robust performance*, IEE transactions on Scheduling & Logistics, 36(10) :953-968.
- Kirkpatrick, S., C.D. Gellat, and M.P. Vecchi, (1983), *Optimization by simulated annealing*, Science, 220(4598) : 671-680.
- Klabjan, D., E. Johnson, G. Nemhauser, E. Gelman, and S. Ramaswamy. (2002). *Airline Crew Scheduling with Time Windows and Plane Count Constraints*. Transportation Science ,36(3).
- Klusch, M. et Shehory,O. (1996). *A Polynomial Kernel-Oriented Coalition Algorithm for Rational Information Agents*. Proc. Second International Conference on Multi-Agent Systems, AAAI Press, 157-164.
- Klusch, M. et Gerber, A.(2002). *Dynamic Coalition Formation Among Rational Agents*. IEEE Intelligent Systems. 17(3): 42-47.
- Kreps, D. (1992). *Théorie des jeux et modélisation économique*. Dunod.
- Kula, U. Duenyas et Iravani, S.MR. (2004), *Estimating job waiting times in production systems with cross-trained setup crews*, IEE transactions on Scheduling & Logistics, 36(10) :999-1010.
- Kutanoglu, E. et Wu, S.D., (1999). *On combinatorial auction and lagrangean relaxation for distributed resource scheduling*. IIE Transactions, 31(9): 813-826.
- Laurie, F. (1994), *Skills training for tomorrow's work force*, Pfeiffer& Company.
- Le Boterf, Guy (1997) , *Construire la compétence collective de l'entreprise*, Gestion, vol. 22, no 3, p. 82-85.
- Lee, C.-Y. et G. Vairaktarakis, (1997), *Workforce Planning in Mixed Model Assembly Systems*, Operations Research, 45: 553-567.
- Lefrançois, P. & B. Montreuil (1993). *An Organism-Oriented Modeling Approach to Support the Analysis and Design of Manufacturing Systems*, Journal of Intelligent Manufacturing, v5, 121-142.
- Lefrançois P., L. Cloutier & B. Montreuil (1996). *An Agent-Driven Approach to Design factory Information Systems*, Computers in Industry, v32, 197-217.
- Lin, G. Solberg, J. (1992), *Integrated shop floor control using autonomous agents*, IIE Transactions, Vol.24, N0.3, p 57-67
- Lind, J. (2001). *Iterative Software Engineering for Multiagent Systems: The MASSIVE Method*, Springer-Verlag New York, Inc. Secaucus, NJ, USA
- Liu, J.S. et Sycara, K., (1997), *Coordination of multiple agents for production management*. Annals of Operations Research, 75, 235-289.

- Loucks, J. and F. Jacobs. (1991). *Tour Scheduling and Task Assignment of a Heterogeneous Work Force: A Heuristic Approach*, Decision Sciences 22(4), 719-739.
- Luce R.D. et Rai H.A. (1989), *Games and Decisions*. Dover Publications, Inc., New York.
- Marcenac, P. et Giroux, S. (1998), *GEAMAS: A Generic Architecture for Agent-Oriented Simulations of Complex Processes*, chapter not yet available. International Journal of Applied Intelligence, Kluwer Academic Publishers.
- Maturana, F. et Norrie, D. (1996), *Multi-Agent Mediator Architecture for Distributed manufacturing*. Journal of Intelligent Manufacturing, 7: 257-270.
- McDonnell, P., Smith, G., Joshi, S. et Kumara, S.R.T., (1999), *A Cascading Auction Protocol as a Framework for Integrating Process Planning and Heterarchical Shop Floor Control*. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 11(1): 37-62.
- McCreery, J.K. (1996), *Worker flexibility and process choice : responding to market demands*, thèse de doctorat, Ohio State University.
- Misra, S. Pinker, E.J. et Shumsky, R.A. (2004), *Saleforce design with experience-based learning* IIE Transactions on Scheduling & Logistics 36(10) : 941-952.
- Miyashita, K. (1998). *CAMPS: a constraint-based architecture for multi-agent planning and scheduling*. Journal of Intelligent Manufacturing, 9(2): 147-154.
- Melecki, E.J. (1996), *Technology, competitiveness, and flexibility*. Knudsen, D.C (ed.), Kluwer, Boston, MA, p :15-32.
- Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N., Teller A.H. and Teller E. (1953), *Equation of State Calculations by Fast Computing Machines*, J. Chem. Phys. 21 : 1087-1092.
- Montreuil B., J.-M. Frayret et S. D'Amours (2000). *A Strategic Framework for Networked Manufacturing*, Computers for Industry, Special Issue on Computer Aided Production, 42, 299-317.
- Montreuil, B., (2005), *Production planning optimization modelling in demand and supply chains of high-value consumer products*. In Logistics Systems: Design and Optimization. ed. By A. Langevin and D. Riopel, Kluwer Academic Publishers, 351-388.
- Valckenaers, P., Van Brussel, H., Wyns, J., Peeters, P. et Bongaerts, L., (1999). *Multi-agent manufacturing control in holonic manufacturing systems*. Human Systems Management, 18(3/4): 233-243.
- Nwana, H. S., Lee, L., et Jennings, N. R., (1996), *Co-ordination in software agent systems*. The British Telecom Technical Journal 14(4) :79-88.
- Oliveira E., Fischer K., Stepankova O. (1999), *Multi-agent systems: which research for which applications*. Robotics and Autonomous Systems. 27 : 91-106.

- Ouelhadj, D. (2003), *A Multi-agent System for the Integrated Dynamic Scheduling of Steel Production*, PhD thesis, School of Computer Science and Information Technology, University of Nottingham.
- Pan, J.Y.C. et Tenenbaum, M.J. (1991). *An intelligent agent framework for enterprise integration*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 21(6): 1391-1408.
- Panzarasa, P. et Jennings, N. R. (2001), *The organisation of sociality: a manifesto for a new science of multi-agent systems*. In Proceedings 10th European Workshop on Multi-Agent Systems (MAAMAW-01), Annecy, France.
- Parunak, H.V.D., Baker, A.D. et Clark, S.J., (2001). *The AARIA agent architecture: From manufacturing requirements to agent-based system design*. Integrated Computer-Aided Engineering, 8(1), 45-58.
- Pemartin, D. (1999), *Gérer par les compétences ou comment réussir autrement ?*, Éd. EMS, management & société.
- Pinker, E. et Shumsky, R. (2000), *The Efficiency-Quality Trade-Off of Cross-Trained Workers*, Manufacturing & Service Operations Management, 2 (1) :32-48.
- Pirlot,M.(1996), *General local search methods*, European Journal of Operational Research, 92 : 493-511.
- Rapoport, A. (1969). *Théorie des jeux à deux personnes : les principes essentiels*, Dunod.
- Rapoport, A. (1970). *N-person game theory : concepts and applications*. University of Michigan Press.
- Rasmusen, E. (1989). *Games and information: an introduction to game theory*. Blackwell Publishers, Oxford.
- Rekik, M., J.-F. Cordeau, and F. Soumis. (2004). *Using Benders Decomposition to Implicitly Model Tour Scheduling*. Annals of Operations Research, Special Issue on Staff Scheduling and Rostering, 111–133.
- Rivard, Patrick (2001) *La gestion de la formation en entreprise – Pour préserver et accroître le capital compétence de votre organisation*, chapitre 1, section 4, «La gestion des compétences», p. 31-38, Presses de l'Université du Québec (Sainte-Foy).
- Rotwell, W.J. et Lindholm J.E., (1999), *Competency Identification, Modelling and Assessment in the USA*. International Journal of Training and Development, 3(2) : 90-105.
- Russel, S. et Norvig, P. (2003), *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 2nd Edition, Prentice Hall.
- Russell,S.J. & Zilberstein,S. (1991), *Composing Real-Time Systems*, Proceedings of the Twelfth International Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-91).

- Sabuncuoğlu, I. and Karabuk, S., (1999), *Rescheduling frequency in an FMS with uncertain processing times and unreliable machines*, Journal of Manufacturing Systems, 18(4) 268-283
- Shapley, L. S. (1953), *A Value for n-Person Games*, in H. W. Kuhn and A. W. Tucker (eds.), Contributions to the Theory of Games, Vol. II, Princeton University Press, Princeton, N.J.
- Shehory, O et Kraus, S. (1999). *Feasible formation of coalitions among autonomous agents in nonsuperadditive environments*. Computational Intelligence, 15(3): 218-251.
- Shehory, O. et Kraus, S. (1998), *Methods for task allocation via agent coalition formation*. Artificial Intelligence 101:165-200
- Shen W. & Norrie D.H., (1998), *An Agent-Based Approach for Manufacturing Enterprise Integration and Supply Chain Management*, In G. Jacucci, et al (eds.), Globalization of Manufacturing in the Digital Communications Era of the 21st Century: Innovation, Agility, and the Virtual Enterprise, Kluwer Academic Publishers. 579-590.
- Sikora, R. et Shaw, M.J (1997), *Coordination mechanisms for multi-agent manufacturing systems: application to integrated manufacturing scheduling*, IEEE Transactions on Engineering Management, 44(2), 175-187.
- Sinuany-Stern, Z., and Teomi, Y. (1986), *Multi-objective scheduling plans for security guards*, Journal of the Operational Research Society. 37 (1) 67–77.
- Smith, R. G. (1980), *The Contract Net Protocol*, IEEE Trans. on Computers, C-29: 12
- Soyer, J (2003), *Fonction formation*, Editions d'Organisation. Personnel / ANDCP.
- Spencer, L., Spencer, S., (1993), *Competence at work, models for superior performance*, John Wiley et Sons, New-york.
- Stearns R. E. (1968), *Convergent Transfer Schemes for N-Person Games*. Transactions of the American Mathematical Society, 134: 449-459.
- Steel, R.P, Rentsch, J.R, et Van Scotter, J.R. (2007) , *Timeframes and Absence Frameworks: A Test of Steers and Rhodes' (1978) Model of Attendance*, Journal of Management, 33(2) :180-195
- Stoop, P.P.M., & Wiers, V.C.S. (1996), *The Complexity of Scheduling in Practice*, International Journal of Operations and Production Management, 16(10): 37–53.
- Stuart, R. et Lindsay, P. (1997), *Beyond the frame of management competenc(i)es: towards a contextually embedded framework of managerial competence in organizations*, Journal of European Industrial Training. 21(1) : 26
- Sycara. K. P., (1989), *Multiagent compromise via negotiation*. In L. Gasser and M. Huhns, editors, Distributed Artificial Intelligence Volume II, pages 119-138. Pitman Publishing London and Morgan Kaufmann : San Mateo, CA.
- Subramaniam, V., Raheja, A. S., et Rama Bhupal Reddy, K., (2005), *Reactive repair tool for job shop*, International Journal of Production Research 43 (1) : 1-23.

- Sumukadas, N. et Sawhney, R. (2004), *Workforce agility through employee involvement*, IIE Transactions on Scheduling & Logistics 36(10): 1011-1021.
- Robinson, B., (2002), *An Integrated Approach to Managing Absence Supports Greater Organizational Productivity*, Employee Benefits Journal, 27 (2):7-11.
- Tekin, E. (2003), *Performance opportunity for workforce agility*, thèse de doctorat, Evanston, Illinois.
- Thompson. G.M., (1995), *Improved implicit optimal modeling of the labor shift scheduling problem*. Management Science, 41(4): 595–607.
- Thompson, Gary (1999). Labor Scheduling, Part 4, *Controlling Workforce Schedules In Real-Time*. Cornell Hotel and Restaurant Administration Quarterly, 40 (3) : 85-96.
- Thompson, Gary (1998). Labor scheduling, part 2, *Knowing how many on-duty employees to schedule*. Cornell H.R.A. Quarterly, 39(6).
- Topaloglu, S. et Ozkarahan, I. (2004), *An Implicit Goal Programming Model For The Tour-Scheduling Problem Considering The Employee Work Preferences*, the Annals of OR Special Issue on Staff Scheduling and Rostering, 128 :135-158.
- Teredesai, T. (1999), *Multi-agent framework for real time scheduling*, thèse de doctorat, Illinois Institute of Technologie, Chicago, Illinois.
- Tranvouez, E. (2001), *IAD et ordonnancement : une approche coopérative du réordonnancement par système multiagent*, Thèse de doctorat, Université D'Aix-marseille III.
- Vairaktarakis, G., et J. Kim Winch, (1999), *Worker cross-training in paced assembly lines*, Manufacturing & Service Operations Management, 1(2) : 112-131
- Van Damme, E. (1995). *Game theory: The next stage*. Economics, the Next Ten Years.
- Van Damme, E. (1999). *Game Theory: The Next Stage?*, in L. A. Gerard-Varet, Alan P.
- Vieira, G.E., Herrmann, J.W., & Lin, E. (2003). *Rescheduling manufacturing systems: a framework of strategies, policies and methods*, Journal of Scheduling, 6 : 39-62.
- Volgenant, A., (2004), *A note on the assignment problem with seniority and job priority constraints*, European Journal of Operational Research, 154(1) : 330-335.
- Von Neumann, J. et Morgenstern, O. (1947). *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Warner, D. M. (1976), *Scheduling Nursing Personnel According to Nursing Preference: A Mathematical Programming Approach*, Operations Research, (24): 842-856.
- Welsh A.J.A. et Powell, M.B.(1967). *An upper bound for the chromatic number of a graph and its application to timetabling problems*, Computer J., 10: 85-87.

- Wooldridge, M. et Jennings, N. (1995). *Intelligent Agents: Theory and Practice*. Knowledge Engineering Review, 10(2), 115-152.
- Wooldridge, M. (1999). *Intelligent Agents*. In G. Weiss (ed.) *Multiagent systems: A modern approach to distributed artificial intelligence*, pp. 27-78, MIT Press.
- Wooldridge, M. (2002), *An Introduction to Multiagent Systems*, Published by John Wiley & Sons (Chichester, England).
- Wright P.M. et G.C. McMahan (1992), *Theoretical Perspectives for Strategic Human Resource Management*, *Journal of Management*, 18(2): 295-320.
- Zilberstein, S. et Russell, S. (1995). *Approximate reasoning using anytime algorithms*. In Natarajan, S., editor, *Imprecise and Approximate Computation*. Kluwer Academic Publishers.
- Zilberstein, S. (1996), *Using anytime algorithms in intelligent systems*. AI Magazine, 17(3):73–83.
- Zhou, L. (1994), *A new bargaining set of an n-person game and endogenous coalition formation*, *Games and Economic Behavior* 6: 512–526.

Annexe

Cette annexe présente l'ensemble des paramètres liés aux qualifications, aux préférences et aux coûts utilisés dans les six problèmes étudiés.

1. les qualifications et les préférences des employés

Employés N°	station 1			station 2			station 3			station 4			station 5			setup	tre	hte
	a11	a12	a13	a12	a22	a23	a31	a32	a33	a41	a42	a43	a51	a52	a55			
1	1(1)	0	0	0	1(0)	0	0	0	1(-1)	0	0	0	0	0	0	0	6	0
2	0	1(0)	0	0	0	1(1)	0	0	0	0	0	0	0	1(-1)	0	0	4	2
3	0	0	1(-1)	1(1)	0	0	0	0	0	0	1(0)	0	0	0	0	0	9	1
4	1(0)	0	0	0	0	0	0	1(1)	0	0	0	0	1(-1)	0	0	0	6	2
5	0	0	0	1(0)	0	0	0	1(1)	0	1(-1)	0	0	0	0	0	0	9	2
6	0	1(0)	0	0	1(1)	0	1(-1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	1(-1)	0	0	1(0)	0	0	0	1(1)	4	1
8	0	0	0	0	1(-1)	0	0	0	1(0)	0	0	0	0	0	1(1)	0	6	1
9	1(-1)	0	0	0	0	0	0	0	0	1(0)	0	0	1(1)	0	0	0	9	2
10	0	1(-1)	0	1(1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1(0)	0	8	1
11	0	1(1)	0	0	0	1(-1)	0	0	0	1(0)	0	0	0	0	0	0	9	2
12	0	0	0	0	0	0	1(-1)	0	0	0	0	0	1(0)	0	0	1(1)	8	2
13	1(1)	1(0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1(-1)	0	0	0	9	1
14	0	0	1(1)	0	1(0)	0	0	1(-1)	0	0	0	0	0	0	0	0	9	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	1(0)	0	0	1(-1)	0	0	1(1)	0	9	2
16	1(1)	0	0	0	0	1(0)	0	0	0	0	0	1(-1)	0	0	0	0	8	1
17	0	0	0	0	0	0	1(0)	0	0	0	1(1)	0	0	1(-1)	0	0	4	1
18	1(0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1(1)	0	0	0	0	1(-1)	4	2
19	0	0	1(0)	0	1(-1)	0	0	0	0	0	0	0	1(1)	0	0	0	6	1
20	0	0	0	0	0	1(-1)	0	0	0	1(1)	0	0	0	0	0	1(0)	6	3
21	0	1(1)	0	0	0	0	0	1(0)	0	0	1(-1)	0	0	0	0	0	9	1
22	0	0	1(-1)	0	0	0	0	0	1(1)	0	0	0	1(0)	0	0	0	6	1
23	0	0	0	1(-1)	0	0	0	0	0	0	1(0)	0	0	1(1)	0	0	9	1
24	0	0	1(-1)	0	1(0)	0	0	1(1)	0	0	0	0	0	0	0	0	6	2
25	0	0	0	1(0)	1(1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1(-1)	8	3
26	0	0	0	0	0	0	1(1)	0	0	0	0	0	1(-1)	1(0)	0	0	9	2
27	0	0	0	0	0	0	0	0	1(-1)	0	1(1)	0	0	0	0	1(0)	8	2
28	1(-1)	0	1(0)	0	1(1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0
29	0	0	0	0	0	1(1)	0	0	0	1(0)	1(-1)	0	0	0	0	0	8	2
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1(1)	0	0	1(-1)	1(0)	8	0
31	1(-1)	0	0	0	1(0)	0	0	0	1(1)	0	0	0	0	0	0	0	6	0
32	0	1(0)	0	0	0	1(-1)	0	0	0	0	0	0	0	1(1)	0	0	4	2
33	0	0	1(1)	1(-1)	0	0	0	0	0	0	1(0)	0	0	0	0	0	9	1
34	1(0)	0	0	0	0	0	0	1(-1)	0	0	0	0	1(1)	0	0	0	6	2
35	0	0	0	1(0)	0	0	0	1(-1)	0	1(1)	0	0	0	0	0	0	9	2
36	0	1(0)	0	0	1(-1)	0	1(1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1
37	0	0	0	0	0	0	0	0	1(1)	0	0	1(0)	0	0	0	1(-1)	4	1
38	0	0	0	0	1(1)	0	0	0	1(0)	0	0	0	0	0	1(-1)	0	6	1

39	1(1)	0	0	0	0	0	0	0	0	1(0)	0	0	1(-1)	0	0	0	9	2
40	0	1(1)	0	1(-1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1(0)	0	8	1
41	0	1(-1)	0	0	0	1(1)	0	0	0	1(0)	0	0	0	0	0	0	9	2
42	0	0	0	0	0	0	1(1)	0	0	0	0	0	1(0)	0	0	1(-1)	8	2
43	1(-1)	1(0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1(1)	0	0	9	1
44	0	0	1(-1)	0	1(0)	0	0	1(1)	0	0	0	0	0	0	0	0	9	1
45	0	0	0	0	0	0	0	0	1(0)	0	0	1(1)	0	0	1(-1)	0	9	2
46	1(-1)	0	0	0	0	1(0)	0	0	0	0	0	1(1)	0	0	0	0	8	1
47	0	0	0	0	0	0	1(0)	0	0	0	1(-1)	0	0	1(1)	0	0	4	1
48	1(0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1(-1)	0	0	0	0	1(1)	4	2
49	0	0	1(0)	0	1(1)	0	0	0	0	0	0	0	1(-1)	0	0	0	6	1
50	0	0	0	0	0	1(1)	0	0	0	1(-1)	0	0	0	0	0	1(0)	6	3
51	0	1(-1)	0	0	0	0	0	1(0)	0	0	1(1)	0	0	0	0	0	9	1
52	0	0	1(1)	0	0	0	0	0	1(-1)	0	0	0	1(0)	0	0	0	6	1
53	0	0	0	1(1)	0	0	0	0	0	0	1(0)	0	0	1(-1)	0	0	9	1
54	0	0	1(1)	0	1(0)	0	0	1(-1)	0	0	0	0	0	0	0	0	6	2
55	0	0	0	1(0)	1(-1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1(1)	8	3
56	0	0	0	0	0	0	1(-1)	0	0	0	0	0	1(1)	1(0)	0	0	9	2
57	0	0	0	0	0	0	0	0	1(1)	0	1(-1)	0	0	0	0	1(0)	8	2
58	1(1)	0	1(0)	0	1(-1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0
59	0	0	0	0	0	1(-1)	0	0	0	1(0)	1(1)	0	0	0	0	0	8	2
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1(-1)	0	0	1(1)	1(0)	8	0

- a_{ij} : activité d'assemblage i sur la station j
- (p) : $p=1$ pour l'activité la moins préférée, 0 dans le cas indifférent et 1 pour l'activité la plus préférée.
- h_{te} : nombre d'heures de travail préféré par l'employé e
- tr_e : nombre de déplacement préféré par l'employé e

2. Liste des employés présents pour chaque problème :

Problèmes	Offre en employés	Employés présents
1	30	Les employés N° 1 à 30
2	30	Les employés N° 1 à 30
3	40	Les employés N° 1 à 40
4	50	Les employés N° 1 à 50
5	50	Les employés N° 1 à 50
6	60	Les employés N° 1 à 50

3. Liste des coûts et des pénalités :

Pour définir les différents coûts et pénalités, nous utilisons la même notation que celle du modèle linéaire (cf. section 6).

	C_e^r	C_{et}^o	C_{et}^a	P_{et}^i	b_{et}^s	C_e^{tr}	C_t^+	C_t^-	P_e^{tr+}	P_e^{tr-}	P_e^{ht+}	P_e^{ht-}	P_{eat}^a
Coûts (\$)	3	0	0	2	-0.1	2	10	10	0.5	0	0.5	0	0; -1; or 1*
*: 1 pour l'activité la moins préférée, 0 indifférent et -1 pour l'activité la plus préférée													