

THESE

présentée

pour obtenir

le titre de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.

SPECIALITE : Systèmes Industriels

par

Agnès LETOUZEY

**Ordonnancement interactif basé sur des indicateurs :
Applications à la gestion de commandes incertaines
et à l'affectation des opérateurs**

Soutenue le 19 décembre 2001 devant le jury composé de :
MM.

G. LACOSTE	Professeur à l'I.N.P. de Toulouse	Président
P. FORTEMPS	Professeur à la Faculté Polytechnique de Mons	Rapporteur
A. HAURAT	Professeur à l'Université de Savoie	Rapporteur
J.P. BOURRIERES	Professeur à l'Université de Bordeaux I	Examineur
L. GENESTE	Professeur à l'E.N.I. de Tarbes	Examineur
B. GRABOT	Professeur à l'E.N.I. de Tarbes	Directeur de thèse
J.C. HOCHON	IXI Toulouse	Examineur

Thèse réalisée au sein de l'équipe Production Automatisée du Laboratoire Génie de Production de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, 47 Avenue d'Azereix, BP 1629, 65016 TARBES CEDEX.

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein de l'équipe Production Automatisée du Laboratoire de Génie de Production de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes. Je tiens donc à remercier tout d'abord M. Jacques Alain PETIT, directeur du L.G.P., et M. Daniel NOYES, responsable de l'équipe P.A. et directeur du L.G.P., pour m'avoir accueillie au sein de leurs équipes.

Je remercie également les personnes qui m'ont encadrée, encouragée et supportée tout au long de ces trois années de thèse. M. Bernard GRABOT, tout d'abord, mon directeur de thèse, pour m'avoir initiée à la recherche en DEA et m'avoir accueillie en thèse par la suite ; sa disponibilité, sa bonne humeur et sa rigueur scientifique m'ont permis de mener ces travaux à leur terme. M. Laurent GENESTE ensuite ; ses précieux conseils, sa patience et la confiance qu'il m'a accordée m'ont accompagnée tout au long de cette étude.

Je tiens également à remercier les personnes qui ont accepté de participer à mon jury de thèse :

M. Germain LACOSTE, directeur de l'E.N.I.T. et Professeur à l'Institut National Polytechnique de Toulouse, pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury et m'avoir accueillie dans cette école,

M. Philippe FORTEMPS, Professeur à la Faculté Polytechnique de Mons, et M. Alain HAURAT, Professeur à l'Université de Savoie, pour avoir accepté de rapporter sur mes travaux de thèse, pour la patience et la pertinence dont ils ont fait preuve à la lecture de ce document et pour avoir fait tout ce chemin pour assister à ma soutenance,

M. Jean-Paul BOURRIERES, Professeur à l'Université de Bordeaux I, et M. Jean-Claude HOCHON, responsable projets au sein de la société IXI, pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse.

J'adresse également mes remerciements à tous les membres du L.G.P., Professeurs, Maîtres de Conférences, doctorants et secrétaires, pour leur patience et leur bonne humeur, qui ont su faire régner dans le laboratoire une atmosphère studieuse et chaleureuse.

Enfin, je tiens à remercier ma famille et mes proches, dont les encouragements et le soutien ont été indispensables à l'aboutissement de mes études.

Sommaire

Table des matières

<i>Sommaire</i>	1
<i>Introduction générale</i>	9
<i>- Chapitre 1 - L'ordonnancement</i>	19
I. INTRODUCTION	21
II. PRODUCTION ET GESTION DE PRODUCTION	21
II.1. Le système de production	21
II.1.1. Définitions.....	21
II.1.2. Décomposition du système de production.....	23
II.2. Le système de décision	24
II.2.1. Définition.....	24
II.2.2. Modélisation du système de décision : la méthode GRAI.....	25
II.2.3. La gestion de production.....	27
III. GÉNÉRALITÉS SUR L'ORDONNANCEMENT	29
III.1. Qu'est-ce que l'ordonnancement?	29
III.1.1. Définition.....	30
III.1.2. Contraintes sur l'ordonnancement.....	30
III.1.3. Objectifs de l'ordonnancement.....	31
III.2. Le problème d'ordonnancement	32
III.2.1. Définition.....	32
III.2.2. Représentation de la solution.....	33
IV. LES DIFFÉRENTES APPROCHES DE RÉOLUTION	33
IV.1. Approches directes	34
IV.1.1. Méthodes de résolution optimales.....	34
IV.1.2. Méthodes de résolution non optimales.....	34
IV.2. Approches itératives	37
IV.2.1. Réparation automatique.....	37

IV.2.2. Intervention humaine.....	39
V. EXEMPLES DE LOGICIELS D'ORDONNANCEMENT INDUSTRIELS.....	42
V.1. Spécificité de la problématique industrielle.....	42
V.2. Quelques logiciels représentatifs.....	43
V.2.1. Sipa - SipaPlus.....	44
V.2.2. Ordo.....	45
V.2.3. Ortems.....	46
V.2.4. Io.....	47
V.2.5. CadPlan.....	47
V.2.6. Bilan.....	48
V.3. Deux problématiques spécifiques.....	48
V.3.1. La flexibilité sur les commandes.....	48
V.3.2. La flexibilité sur les ressources humaines.....	49
VI. CONCLUSION.....	49
<i>- Chapitre 2 - Les indicateurs de performance.....</i>	<i>51</i>
I. INTRODUCTION.....	53
II. QU'EST-CE QU'UN INDICATEUR DE PERFORMANCE ?.....	53
II.1. Définition et propriétés.....	53
II.2. La méthode ECOGRAI.....	54
II.3. Modélisation des indicateurs de performance.....	55
III. AGRÉGATION D'INDICATEURS.....	56
III.1. La décision multicritère.....	56
III.2. Agrégation d'indicateurs élémentaires.....	59
IV. UTILISATION DES INDICATEURS DE PERFORMANCE.....	59
IV.1. Typologies des indicateurs.....	59
IV.2. Quelle utilisation industrielle des indicateurs de performance ?.....	60
V. LE TABLEAU DE BORD.....	63
V.1. Généralités.....	63
V.1.1. Définition et fonctions.....	63
V.1.2. Positionnement des tableaux de bord dans le système de décision.....	64
V.2. Méthodologie de construction.....	64

V.2.1. Principes.....	64
V.2.2. Etude du système à évaluer et de son environnement.....	65
V.2.3. Définition des objectifs.....	65
V.2.4. Recensement des indicateurs.....	66
V.2.5. Choix des indicateurs.....	66
V.2.6. Construction des tableaux de bord.....	66
V.3. Les systèmes d'information orientés décision.....	66
V.3.1. Définitions.....	67
V.3.2. Outils de gestion des données à des fins décisionnelles.....	68
V.3.3. Remarques.....	68
VI. CONCLUSION.....	69
- <i>Chapitre 3 - Propositions d'indicateurs pour l'ordonnement.....</i>	<i>71</i>
I. INTRODUCTION.....	73
II. DÉCISION, ORDONNANCEMENT ET INDICATEURS.....	73
II.1. Processus de prise de décision.....	73
II.2. Processus de prise de décision et indicateurs.....	74
II.3. Ordonnement interactif et indicateurs.....	75
III. TYPES D'INDICATEURS PROPOSÉS.....	76
III.1. Indicateurs de contexte.....	76
III.2. Indicateurs de diagnostic.....	77
III.3. Indicateurs d'action.....	77
III.3.1. Généralités.....	77
III.3.2. Existence des degrés de liberté.....	78
III.3.3. Distributions.....	79
III.3.4. Robustesse des points d'action.....	79
III.4. Indicateurs de performance.....	79
III.5. Tableaux de bord.....	81
IV. INDICATEURS POUR L'ORDONNANCEMENT.....	81
IV.1. Adéquation charge/capacité.....	81
IV.2. Indicateurs.....	82

IV.2.1. Indicateurs de contexte.....	82
IV.2.2. Indicateurs d'action.....	83
IV.2.3. Indicateurs de performance.....	85
V. CONCLUSION.....	87
- <i>Chapitre 4 – Planification de commandes incertaines et évaluation des délais.....</i>	<i>89</i>
I. INTRODUCTION.....	91
II. LOGIQUE FLOUE ET THÉORIE DES POSSIBILITÉS.....	91
II.1. Logique floue.....	92
II.2. Théorie des possibilités.....	93
III. GESTION DE L'INCERTITUDE DES COMMANDES EN ORDONNANCEMENT.....	94
III.1. Problématique.....	94
III.2. La logique floue dans l'ordonnancement.....	94
III.3. Méthode proposée.....	95
III.3.1. Incertitude des ordres de fabrication.....	95
III.3.2. Capacité d'une ressource.....	95
III.3.3. Planification.....	97
III.4. Exemples.....	99
III.4.1. Premier cas.....	99
III.4.2. Deuxième cas.....	101
IV. IMPLÉMENTATION.....	101
IV.1. Présentation succincte de TAPAS.....	101
IV.2. Présentation des résultats de l'implémentation.....	102
V. VALIDATION DE LA MÉTHODE PROPOSÉE.....	103
V.1. Présentation des différents tests réalisés.....	103
V.2. Résultats et analyse.....	107
V.2.1. Conditions.....	107
V.2.2. Résultats.....	108
V.2.3. Bilan de la campagne de tests.....	113
VI. CONCLUSION.....	115

- <i>Chapitre 5 – Indicateurs pour la gestion des opérateurs en ordonnancement</i>	117
I. INTRODUCTION	119
II. PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE	120
II.1. Contraintes légales	120
II.2. Les approches actuelles	121
II.2.1. Modèle de compétence.....	121
II.2.2. Gestion des opérateurs à court terme.....	122
II.3. Besoin identifiés auprès des industriels	124
II.3.1. Contexte et buts de l'enquête.....	125
II.3.2. Résultats.....	126
III. DES INDICATEURS POUR LA GESTION DES OPÉRATEURS EN ORDONNANCEMENT	129
III.1. Spécificité d'un système d'indicateurs pour la gestion des opérateurs	129
III.1.1. Exemple.....	129
III.1.2. Positionnement des indicateurs.....	131
III.1.3. Indicateurs proposés.....	133
III.1.4. Modélisations des compétences et des activités.....	134
III.2. Indicateurs de contexte	136
III.2.1. Indicateur de capacité par opérateur.....	136
III.2.2. Indicateur de capacité par compétence.....	141
III.2.3. Indicateur de charge par compétence.....	142
III.3. Indicateurs d'action	143
III.3.1. Indicateur d'adéquation charge/capacité.....	144
III.3.2. Réalisation de l'adéquation charge/capacité.....	145
III.4. Implémentation	151
IV. CONCLUSION	152
- <i>Chapitre 6 – Application industrielle : le projet ASPIRE</i> . 155	
I. INTRODUCTION	157
II. PRÉSENTATION DU PROJET	158
II.1. Le projet ASPIRE	158

II.1.1. Objectifs du projet.....	158
II.1.2. Partenaires.....	158
II.2. Architecture générale d'ASPIRE.....	160
II.2.1. Module de macro-ordonnancement.....	161
II.2.2. Module de simulation.....	162
II.2.3. Module d'entrepôt de données.....	162
III. MODULE D'ÉVALUATION.....	163
III.1. Présentation du module.....	163
III.2. Implémentation.....	165
III.2.1. Modèles proposés.....	165
III.2.2. Résultats.....	168
IV. APPLICATION DE L'OUTIL ASPIRE.....	169
IV.1. Ordonnancement classique.....	169
IV.2. Ordonnancement sous incertitude.....	172
IV.3. Ordonnancement des ressources humaines et techniques.....	173
IV.4. Synthèse.....	175
V. CONCLUSION.....	175
<i>Conclusion générale.....</i>	<i>177</i>
<i>Annexes.....</i>	<i>185</i>
<i>Bibliographie.....</i>	<i>207</i>

Introduction générale

Introduction générale

Le monde industriel évolue constamment. La pression concurrentielle accrue, le développement du commerce électronique, l'augmentation des échanges de données entre donneurs d'ordres et sous-traitants ou l'accroissement de la flexibilité du travail dû à la loi sur les 35 heures, sont autant de facteurs qui poussent les entreprises à continuellement améliorer leurs méthodes de production. Cette évolution du monde industriel et de son environnement implique toutes les fonctions d'une entreprise dans une perpétuelle remise en cause.

L'ordonnancement : un processus en continue amélioration

La fonction ordonnancement des entreprises manufacturières devant permettre à la fois l'optimisation de l'utilisation des ressources et la réactivité de l'atelier, elle est un des points clés de la rentabilité et est ainsi elle-même en pleine évolution.

Implanté à l'origine dans des logiciels de GPAO lourds, fonctionnant seulement sur des mini-ordinateurs, l'ordonnancement a tout d'abord été principalement géré par des services spécialisés, à dominante informatique. Avec l'arrivée de la micro-informatique, des logiciels d'ordonnancement dédiés sont apparus depuis une quinzaine d'années, plus performants, plus conviviaux et plus facile d'accès que les modules de GPAO qu'ils remplacent. Ces logiciels ont permis de sortir la fonction ordonnancement des services centralisés où elle était cantonnée pour la mettre à disposition des gestionnaires d'atelier. Ceux-ci se sont alors progressivement appropriés les logiciels, leur demandant d'être toujours plus proches de la réalité et plus performants, ce qui implique par exemple la prise en compte de données, contraintes, critères et degrés de liberté de plus en plus nombreux et de plus en plus complexes.

Des ressources particulières, échappant à la logique « une pièce sur une machine », telles que les fours, les tunnels de peinture ou les cellules flexibles, jusque là difficiles à intégrer dans les modèles de données des logiciels d'ordonnancement, doivent maintenant être gérées d'une manière de plus en plus exacte. Les ressources humaines, généralement prises en

compte par l'intermédiaire des calendriers des ressources, doivent être intégrées à l'ordonnement, leur gestion devenant de plus en plus complexe au fur et à mesure de l'application des lois sur les 35 heures et sur l'annualisation du temps de travail.

L'utilisateur souhaite aussi que le logiciel prenne en compte des contraintes de plus en plus nombreuses : contraintes temporelles telles que des délais d'attente minimaux entre tâches (correspondant à une durée de séchage de peinture par exemple) ou des durées fixes entre deux tâches (dans des procédés de traitements chimiques), contraintes de réglage immédiat avant certaines tâches (chauffe de fours ou préparation de bains), contraintes de chevauchement, contraintes de regroupement de lots...

Le gestionnaire d'atelier souhaite optimiser les performances de son ordonnancement par rapport à des critères, dont le nombre et la complexité augmentent. En utilisant les premiers logiciels d'ordonnement, les gestionnaires d'ateliers essayaient d'optimiser un ou deux critères qu'ils jugeaient importants comme par exemple « minimiser les temps de cycle », « minimiser le retard maximal » ou « minimiser le nombre de tâches en retard ». A l'heure actuelle, les entreprises souhaitent que l'ordonnement satisfasse des objectifs diversifiés, nombreux et parfois complexes et contradictoires. De plus en plus, on demande ainsi à l'ordonnement de fournir un compromis entre tous ces objectifs plutôt qu'une optimisation réelle.

L'ordonnement réalisé par le gestionnaire d'atelier doit aussi être plus flexible afin d'être plus réactif. Des degrés de liberté, tels que changer la règle de priorité sur une machine, changer de ressource, changer de gamme ou ajuster les calendriers opérateurs, doivent pouvoir être manipulés par les outils d'ordonnement actuels. Le problème du gestionnaire d'atelier n'est alors pas seulement de pouvoir utiliser un de ces degrés de liberté, mais de savoir lesquels sont disponibles et lesquels sont utiles pour résoudre un problème donné.

Vers un ordonnancement interactif

Comment améliorer le résultat du processus d'ordonnement tout en conservant le caractère générique que doivent avoir des outils industriels ?

Une première approche est de modifier l'outil d'ordonnement lui-même. Il est possible, afin de prendre en compte les spécificités et les contraintes des entreprises, d'étendre les modèles de données, c'est-à-dire d'élargir les capacités de représentation des données (ressources, contraintes...) dans le logiciel pour pouvoir y intégrer des ressources particulières

et les contraintes attachées à certains procédés de fabrication complexes. On peut aussi développer des algorithmes d'ordonnancement multi-critères, qui vont permettre d'optimiser l'ordonnancement par rapport à des critères plus nombreux et variés. Ces deux possibilités d'évolution de l'ordonnancement sortent du cadre de notre étude, car nous privilégions une amélioration de l'utilisation des outils déjà existants et non une amélioration des outils eux-mêmes.

Une deuxième approche consiste à améliorer un ordonnancement produit par un logiciel déjà existant, c'est-à-dire retoucher progressivement l'ordonnancement jusqu'à en obtenir un qui satisfasse mieux les critères de performance retenus (voir Figure 1).

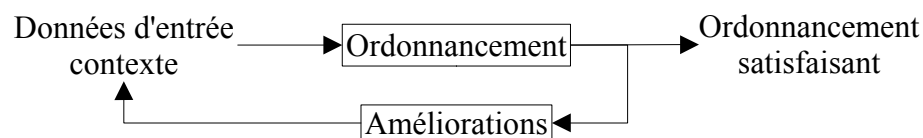


Figure 1 - Boucle d'amélioration de l'ordonnancement

Cette amélioration peut être réalisée de manière automatique, par exemple en intégrant une forme d'expertise dans la boucle. Une telle approche a fait (et fait encore) l'objet de nombreuses recherches, proposant notamment d'intégrer des systèmes experts qui vont choisir les paramètres (ressources, règles de priorité...) conduisant à l'ordonnancement optimum. Cette approche nécessite que le gestionnaire d'atelier et autres experts soient capables de formaliser leurs connaissances sur l'entreprise et l'atelier, ce qui peut se révéler délicat et long. De plus, les connaissances modélisées peuvent restreindre cette approche à un atelier spécifique.

Une deuxième possibilité d'amélioration automatique de l'ordonnancement consiste à utiliser des techniques d'optimisation combinatoire. De nombreuses études sont actuellement en cours sur ce sujet. Basées sur des « méta-heuristiques » telles que les algorithmes génétiques ou le recuit simulé, ces techniques recherchent la combinaison de paramètres conduisant à une solution d'ordonnancement optimale, en testant, de manière intelligente, quelques unes des combinaisons possibles. Cette approche nécessite par contre de réaliser de nombreux ordonnancements qui sont chacun évalués par rapport aux objectifs, ce qui peut s'avérer assez long.

Une troisième approche d'amélioration de l'ordonnancement consiste à ne plus le faire de manière automatique, mais à faire intervenir l'opérateur humain : nous sommes alors dans le cas de l'ordonnancement interactif ou coopératif. Ce type d'approche, très utilisé, le reste de manière empirique et fait l'objet de moins de recherches que les approches décrites dans les

paragraphe précédents. C'est dans ce cadre là que se situent nos travaux. Réaliser un ordonnancement interactif consiste pour nous à fermer la boucle (voir Figure 1) par l'intermédiaire de l'utilisateur du logiciel d'ordonnancement. Cette approche nécessite une bonne communication entre l'utilisateur du logiciel et le logiciel lui-même, afin que l'opérateur humain puisse savoir quand et comment agir. L'amélioration de cette communication passe d'une part par l'amélioration des moyens de communication, c'est-à-dire par des interfaces homme/machine plus performants, et d'autre part par l'amélioration des informations communiquées. Les interfaces des logiciels d'ordonnancement étant de plus en plus évoluées et conviviales, nos travaux s'orientent vers le deuxième point : la nature et la qualité des informations communiquées.

Ordonnancement interactif et indicateurs

La première condition d'implantation de la boucle de retour présentée Figure 1 est d'évaluer les performances de l'ordonnancement par rapport aux objectifs assignés. Il s'agit donc de définir et d'évaluer des indicateurs de performance. A partir de cette utilisation classique, il nous semble intéressant d'étendre cette idée à d'autres types d'indicateurs qui vont permettre de répondre aux autres besoins de l'ordonnancement interactif. Nous proposons donc de définir des indicateurs particuliers dédiés à chaque phase de l'amélioration d'un ordonnancement en définissant les informations à communiquer à l'utilisateur humain. Le schéma de la Figure 2 présente l'implantation d'indicateurs dans un processus d'amélioration d'ordonnancement.

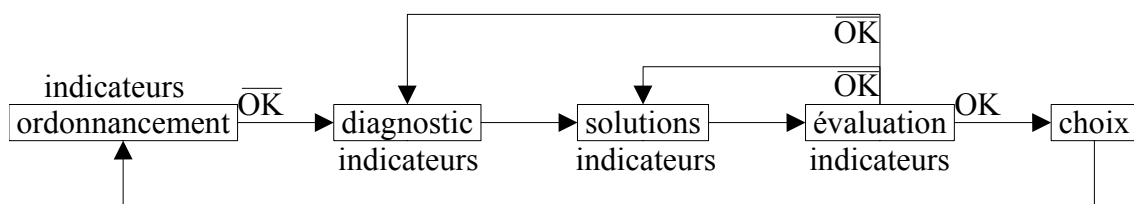


Figure 2 - Ordonnancement et indicateurs

Nous proposons ainsi quatre types d'indicateurs pour permettre à l'utilisateur de réaliser un ordonnancement satisfaisant en suivant ce schéma. Dans un premier temps, des indicateurs de performance classiques vont lui fournir des informations sur la qualité de son ordonnancement par rapport aux objectifs de l'entreprise. En cas de performances non satisfaisantes, l'utilisateur peut faire intervenir des indicateurs de diagnostic pour l'aider à trouver les causes du ou des problèmes constatés. Il formule ensuite plusieurs propositions de

solution, et donc d'amélioration de l'ordonnancement, en se basant sur des indicateurs de contexte et d'action. Les indicateurs de contexte renseignent sur la situation globale de l'atelier au moment de l'ordonnancement, c'est-à-dire sur l'état de l'atelier en termes de commandes, ressources, opérateurs, compétences, stocks... Les indicateurs d'action sont destinés à aider l'utilisateur à distinguer les degrés de liberté dont l'utilisation ne conduira vraisemblablement pas à une amélioration significative des performances de l'ordonnancement, des degrés de liberté efficaces. Lorsque les actions ont été effectuées et un nouvel ordonnancement calculé, les performances de ces solutions sont à leur tour évaluées par des indicateurs de performance afin de choisir la meilleure solution. Ces indicateurs de tous types sont regroupés et visualisés sur des tableaux de bord.

Définir les indicateurs permettant un ordonnancement interactif, c'est définir :

- ce que l'on veut connaître, c'est-à-dire le contenu des indicateurs (sur quels degrés de liberté ils vont porter, quelles performances ils vont mesurer...),
- comment on obtient les informations, c'est-à-dire le mode de calcul des indicateurs et les éventuels traitements spécifiques permettant de les obtenir (indicateurs simples, complexes, statiques, dynamiques, etc.),
- comment les informations sont affichées, c'est-à-dire leur mode de visualisation.

Cette démarche doit permettre au gestionnaire d'atelier de mieux utiliser les possibilités d'un logiciel d'ordonnancement dans l'élaboration d'un planning d'atelier pleinement satisfaisant.

Deux instanciations particulières d'une approche par indicateurs

Nous avons souhaité valider cette approche d'ordonnancement interactif guidée par des indicateurs en l'appliquant à deux problèmes qui nous semblent encore peu traités dans les logiciels d'ordonnancement actuels.

La première problématique concerne l'incertitude entachant les commandes. Le raccourcissement de tous les délais (fabrication, livraison, etc.) et l'optimisation de la chaîne logistique obligent le gestionnaire d'atelier à être capable d'évaluer les délais de fabrication de ses produits alors qu'une partie des commandes est encore incertaine à court terme. Ce problème peut concerner des Petites et Moyennes Entreprises (PME), sous-traitants de grands donneurs d'ordres, dont les commandes sont sujettes à de nombreuses modifications, mais

aussi des entreprises dont les produits sont hautement configurables, etc. Cette incertitude est actuellement uniquement abordée dans les hauts niveaux de la gestion de production (plan commerciaux, prévisions de vente...). Nous nous proposons d'appliquer le cadre générique de l'ordonnancement interactif par des indicateurs au cas particulier de la gestion de l'incertitude des commandes en ordonnancement.

Une autre problématique importante concerne la gestion des ressources humaines à court terme. Les lois sur la réduction et l'aménagement du temps de travail remettent en cause les méthodes traditionnelles de prise en compte des opérateurs et de leurs durées de travail au niveau de l'ordonnancement. Les offres logicielles actuelles ne permettent pas encore de prendre en compte simultanément les compétences des opérateurs et leurs durées de travail annualisées dans un contexte d'ordonnancement d'atelier. Ce contexte devant pourtant être intégré rapidement, nous proposons d'ores et déjà de mettre en œuvre des indicateurs dédiés à la gestion des opérateurs de production en ordonnancement.

Nous appliquons donc notre approche de l'ordonnancement interactif par des indicateurs à ces deux problèmes particuliers. Dans les deux cas, nous spécifions les données utilisées et les degrés de liberté induits dans l'ordonnancement. A partir de ces données et degrés de liberté, nous définissons les indicateurs à mettre en œuvre, accompagnés des modalités de calcul et des modes de traitement spécifiques qui peuvent éventuellement se révéler nécessaires.

Organisation de la thèse

Ce mémoire présente en six chapitres nos travaux sur les indicateurs et les tableaux de bord dans l'ordonnancement interactif.

Le *chapitre 1* propose un panorama rapide de l'ordonnancement. Dans un premier temps, nous le positionnons parmi les différentes fonctions de la gestion de production et présentons son rôle. L'ordonnancement est un problème complexe, dont la résolution a fait l'objet de nombreuses méthodes : les principales sont brièvement présentées. La résolution du problème d'ordonnancement peut aussi être faite de manière itérative, des améliorations étant proposées à l'issue de chaque résolution. Ces améliorations peuvent être réalisées de manière automatique, par des méta-heuristiques ou des techniques d'intelligence artificielle, ou par une intervention humaine. C'est dans cette démarche que nous nous inscrivons, en proposant d'insérer, dans le processus d'amélioration, des tableaux de bord qui vont renseigner

l'utilisateur sur les points faibles de son ordonnancement et sur les possibilités d'amélioration les plus judicieuses. Le fonctionnement et les degrés de liberté de quelques logiciels d'ordonnancement classiques sont décrits.

Le *chapitre 2* est consacré aux indicateurs de performance et aux tableaux de bord. Les définitions classiques des indicateurs de performance sont rappelées. Les différentes techniques d'agrégation d'indicateurs telles que les méthodes de décision multi-critère sont décrites. Ces techniques permettent de construire des indicateurs synthétiques dont la définition est plus complexe, mais dont l'interprétation est souvent plus aisée. L'utilisation des indicateurs de performance est ensuite abordée, du point de vue des différentes typologies utilisées puis dans un contexte industriel. Les tableaux de bord, supports de présentation des indicateurs, sont décrits, en présentant notamment une définition et une description des étapes de construction les plus classiques. Une brève étude des outils permettant de réaliser des tableaux de bord est aussi évoquée.

Le *chapitre 3* présente nos propositions d'indicateurs. Nous identifions quatre types d'indicateurs utiles à l'évaluation et à l'amélioration d'un ordonnancement :

- les indicateurs de contexte pour renseigner sur le contexte d'ordonnancement,
- les indicateurs de diagnostic pour identifier les causes de problèmes courants,
- les indicateurs d'action pour identifier les degrés de liberté les plus pertinents, c'est-à-dire ceux dont l'utilisation est susceptible d'être la plus efficace,
- les indicateurs de performance pour évaluer les performances de l'ordonnancement par rapport aux objectifs de l'entreprise.

Des exemples de mises en œuvre de ces types d'indicateurs sont présentés.

Dans le *chapitre 4* sont proposés des indicateurs permettant l'intégration d'ordres de fabrication (OF) incertains dans l'ordonnancement. Ces indicateurs complexes sont basés sur la logique floue et la théorie des possibilités, dont les principales notions sont rappelées. Un indicateur de contexte, présentant globalement l'incertitude entachant les OF, et un indicateur d'action, présentant la sur-réservation autorisée sur les ressources, sont proposés. Les modalités de calcul de ces indicateurs, mais aussi les modes de traitement et d'utilisation qui en découlent, sont présentés. Ces indicateurs ont été implémentés dans un prototype de logiciel d'ordonnancement, TAPAS. Une campagne de tests, destinée à valider l'utilisation de ces indicateurs et à en définir le domaine d'utilisation le plus intéressant, a été réalisée. Les conditions de mises en œuvre de ces tests sont décrites et les résultats sont présentés et discutés.

Le *chapitre 5* présente des tableaux de bord, incluant des indicateurs complexes et dynamiques, fournissant une aide à la gestion des opérateurs de production au niveau de l'ordonnancement. Les indicateurs proposés permettent de visualiser la disponibilité globale des compétences et des opérateurs : ces indicateurs se déclinent en indicateurs de contexte concernant la « capacité » d'un opérateur (ses durées de travail possibles), la capacité par compétence et la charge par compétence. Les modalités de calcul de ces indicateurs sont présentés. Ces indicateurs peuvent aussi être utilisés en tant qu'indicateurs d'action : les modes de traitement et d'utilisation sont alors décrits.

Le *chapitre 6* présente notre participation au projet ASPIRE (Anticipated SME Production simulation for negotiation support within a customer supplier context), projet Européen CRAFT dont le but est d'aider les PME, sous-traitants de grands donneurs d'ordres, à proposer des délais de fabrication fiables lors de la phase de négociation avec le client. Notre contribution au projet a consisté à appliquer les concepts présentés dans les chapitres précédents en développant un outil permettant l'élaboration de tableaux de bord complexes pour l'ordonnancement. Des exemples de tableaux de bord, réalisés grâce au module « assessment » d'ASPIRE et mettant en œuvre les indicateurs présentés dans les chapitres précédents sont présentés.

- Chapitre 1 - L'ordonnancement

Chapitre 1 – L'ordonnancement

I. INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la gestion de production dans l'entreprise, et principalement à l'ordonnancement. La première partie de ce chapitre vise à situer l'ordonnancement dans le contexte des fonctions de production et de gestion de production. Pour cela, nous rappelons la définition du système de production, ainsi que sa décomposition classique en plusieurs sous-systèmes. Nous étudions ensuite la partie décisionnelle du système de production. Ce sous-système décisionnel peut être lui-même décomposé et modélisé, par exemple à l'aide de méthodes comme GRAI. La gestion de production, indispensable à la bonne marche de tout système de production, est alors abordée. L'ordonnancement, objet principal de notre travail, est le sujet de la deuxième partie de ce chapitre. Nous définissons tout d'abord l'ordonnancement, ses objectifs et ses contraintes, et le re-situons au sein de la gestion de production. En fonction de cette définition, le problème d'ordonnancement est présenté. La troisième partie de ce chapitre est consacrée aux méthodes de résolution du problème d'ordonnancement. Ces méthodes sont classées en deux grands groupes : les méthodes qualifiées de directes, qui résolvent le problème en une seule passe, et les méthodes dites itératives, qui cherchent à améliorer progressivement une solution. Dans la quatrième partie de ce chapitre, les techniques utilisées dans quelques logiciels d'ordonnancement du marché que nous jugeons représentatifs sont présentés et les particularités de l'ordonnancement « industriel » sont soulignées.

II. PRODUCTION ET GESTION DE PRODUCTION

II.1. *Le système de production*

II.1.1. Définitions

Un **système de production** est un ensemble de ressources réalisant une activité de

production. La **production** est la transformation de ressources (machines et matières) conduisant à la création de biens ou de services [Giard 88].

La transformation s'effectue par une succession d'opérations qui utilisent des ressources (machines et opérateurs) et modifient les matières premières ou composants entrant dans le système de production afin de créer les produits finis sortant de ce système et destinés à être consommés par des clients. Les modifications peuvent porter sur la forme du produit, sa structure, son apparence, etc. La transformation subie par les produits leur procure de la valeur ajoutée. Les ressources appartenant au système de production mobilisées pour réaliser l'activité de production peuvent être des machines, des opérateurs, de l'énergie, des informations, des outillages...

Une des fonctions importantes du système de production est la fabrication elle-même du produit fini, mais son bon déroulement nécessite la mise en œuvre de fonctions additionnelles telles que les achats des composants et matières premières, la distribution du produit fini, la gestion de la qualité des composants et du produit ou la maintenance des différentes ressources interviennent aussi de manière importante.

Classer des objets et des systèmes oblige à une réflexion sur leurs invariants, leurs spécificités et donc leurs cas d'usage. La classification est ainsi une étape importante de la compréhension d'un système. Il existe plusieurs typologies des systèmes de production, utilisant des critères divers, comme par exemple :

- le mode de production [Woodward 65] : l'auteur distingue trois types de systèmes de production, en les différenciant par la quantité de produits subissant les mêmes transformations. La production linéaire (ou flow shop) réalise les mêmes transformations dans le même ordre sur tous les produits. Dans la production par lots (ou job shop), l'ordre des transformations est variable et les flux de produits multiples. Lorsque les transformations sont différentes d'un produit à l'autre et les lots éventuels de très faible taille, on est dans le cas d'une production unitaire.
- le mode de déclenchement de la production [Giard 88] : l'auteur retient comme critère de classification la façon dont la fabrication est lancée afin d'obtenir trois types de systèmes de gestion de production. La production par programme se base sur des commandes fermes et des prévisions de vente pour déterminer un programme de production. Lors d'une production à la commande, la fabrication de la quantité commandée est lancée lorsque le client passe sa commande. Le niveau des stocks des différents produits finis détermine « quoi » et « quand » fabriquer lorsque l'entreprise produit pour le stock.

- la complexité et l'incertitude [Gousty et Kieffer 88] : les auteurs proposent de classer les systèmes de production en neuf types en se basant sur leur complexité et leur incertitude. La complexité d'un système est classée en trois catégories, l'incertitude d'un système comprend elle aussi trois niveaux.

A travers ces trois exemples de classification, il est possible de préciser notre étude et d'en restreindre le cadre. Pour le premier critère, nous ne nous intéressons qu'à la production en job shop, car c'est là que les problèmes d'ordonnancement sont les plus nombreux et les plus complexes. Suivant la deuxième classification, nous nous situons dans le cas de production à la commande. C'est en effet le type de production le plus répandu dans les PME. Ces deux critères nous permettent de nous situer par rapport aux différents types de production. Le troisième critère cadre parfaitement un des axes de notre étude. En effet, si la complexité, principalement liée au produit, est un problème en général abordé et traité par les méthodes de gestion de production comme MRP par exemple, l'incertitude, présente dans les systèmes de production au niveau des commandes et des prévisions, est généralement prise en compte de façon globale au moyen de marges ou de stocks tampons par exemple. Au niveau de l'ordonnancement, cette incertitude ne peut plus être gérée globalement, mais nécessite une prise en compte individuelle sur chaque commande. C'est un des points que nous nous proposons d'aborder en développant des indicateurs de performance particuliers.

II.1.2. Décomposition du système de production

Les systèmes de production peuvent être des systèmes très complexes et difficiles à gérer au vu de toutes leurs composantes fonctionnelles (fabrication, achat, distribution, maintenance...). Ils sont donc beaucoup étudiés, et ce depuis longtemps. Plusieurs approches ont été envisagées dans le but de mieux comprendre leur fonctionnement et de mieux les appréhender.

L'application de la théorie des systèmes [Le Moigne 74] [Le Moigne 77] [Melèse 72] aux systèmes de production suggère une décomposition de ces derniers en trois sous-systèmes (Figure 1.1) :

- le système d'information,
- le système de décision,
- le système physique de production.

Le **système de décision** contrôle le système physique de production. Il en coordonne et organise les activités en prenant des décisions basées sur les données transmises par le

système d'information. Le rôle du **système d'information** est de collecter, stocker, traiter et transmettre des informations. Il intervient à l'interface entre les systèmes de décision et de production et à l'intérieur même du système de décision, pour la gestion des informations utilisées lors de prises de décision, et du système physique de production, pour la création et le stockage d'informations de suivi par exemple. L'association des parties des systèmes de décision et d'information concernant uniquement la production constitue le système de gestion de production, évoqué au paragraphe suivant (§ II.2.3). Le **système physique de production** transforme les matières premières ou composants en produits finis. Il est constitué de ressources humaines et physiques. Ses activités sont déclenchées et vérifiées par le système de gestion de production.

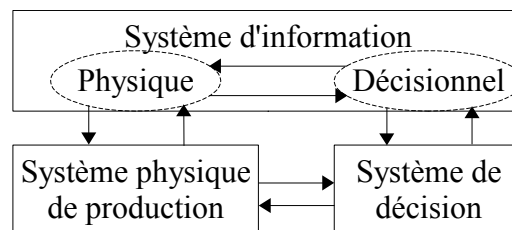


Figure 1.1 – Approche systémique du système de production

La gestion de production étant l'une des fonctions du système de décision, celui-ci nécessite une étude plus précise.

II.2. Le système de décision

II.2.1. Définition

Le système de décision est en particulier en charge des prises de décisions qui contrôlent et organisent le système de production. En raison du grand nombre de décisions à prendre, de la masse importante d'informations nécessaires à ces prises de décision et de l'incertitude ou de l'imprécision régnant sur les données, le système de décision a un rôle complexe. Cette complexité conduit généralement à hiérarchiser les prises de décision, afin de simplifier chacune d'entre elles et de rendre possible la gestion de l'incertitude par la définition d'une hiérarchie de décision « robustes », même si non optimales. L'une des approches de décomposition du système de décision la plus répandue est celle s'inspirant de la typologie des décisions proposée dans [Anthony 65]. Reprise dans [Giard 88] en gestion de production, cette typologie distingue trois niveaux de décision :

- **stratégique** : ce sont les décisions prises à long terme. Elles déterminent la politique

de l'entreprise et conditionnent son avenir. Elles portent essentiellement sur la gestion des ressources durables, afin que celles-ci soient toujours suffisantes pour assurer la pérennité de l'entreprise. Les ressources visées peuvent être des machines, des hommes, des informations ou des données techniques.

- **tactique** : ce sont les décisions prises à moyen terme. Elles assurent la liaison entre le niveau stratégique et le niveau opérationnel, garantissant ainsi la cohérence des actions menées. Ces décisions contrôlent la bonne adéquation des ressources disponibles et des charges engendrées par les commandes ou les prévisions, mais sans modification profonde de la structure et du fonctionnement de l'entreprise.
- **opérationnel** : ce sont les décisions prises à court terme. Elles assurent le lancement des activités et la flexibilité nécessaire à la bonne conduite de la production.

Ces trois catégories de décisions diffèrent non seulement par leur horizon, mais aussi par le niveau de responsabilité des décideurs et par le niveau d'agrégation des informations utilisées. On peut aussi différencier ces trois catégories par l'incertitude régnant sur les données manipulées et en particulier sur les commandes. A un niveau stratégique, les commandes sont gérées essentiellement sous forme de prévisions, obtenues par des calculs statistiques et des études de marchés ; par nature, elles ne sont pas sûres et peuvent être réévaluées à chaque remise en cause des décisions à long terme. Les décisions tactiques sont prises à partir de commandes fermes et de prévisions. Elles sont entachées de moins d'incertitude, mais doivent aussi être régulièrement remises en cause. A un niveau opérationnel, on travaille sur des données fermes en grande majorité, mais l'incertitude ne disparaît pas totalement (commandes urgentes, annulées, etc.), même si elle est rarement prise en compte.

II.2.2. Modélisation du système de décision : la méthode GRAI

Mise au point au laboratoire GRAI à partir des années 70, la **méthode GRAI** a pour but d'analyser et de concevoir des systèmes décisionnels [Doumeingts 84] [Roboam 93]. Un de ses intérêts principaux est de fournir un cadre formel aux notions empiriquement évoquées ci-dessus.

L'horizon d'une décision est la durée sur laquelle le système est engagé par la décision, c'est-à-dire le laps de temps sur lequel on veut prévoir pour s'organiser. Néanmoins, étant donné que d'inévitables perturbations vont éloigner les résultats des objectifs recherchés, l'horizon est divisé en périodes au terme desquelles la décision peut être reconsidérée. La

méthode GRAI est basée sur une décomposition du système de décision suivant deux axes : temporel et fonctionnel. La décomposition temporelle se fait par période de décision décroissante et la décomposition fonctionnelle se fait suivant les différentes fonctions de la gestion de production. En fonction de ces deux axes de décomposition, on obtient une grille GRAI (Figure 1.2).

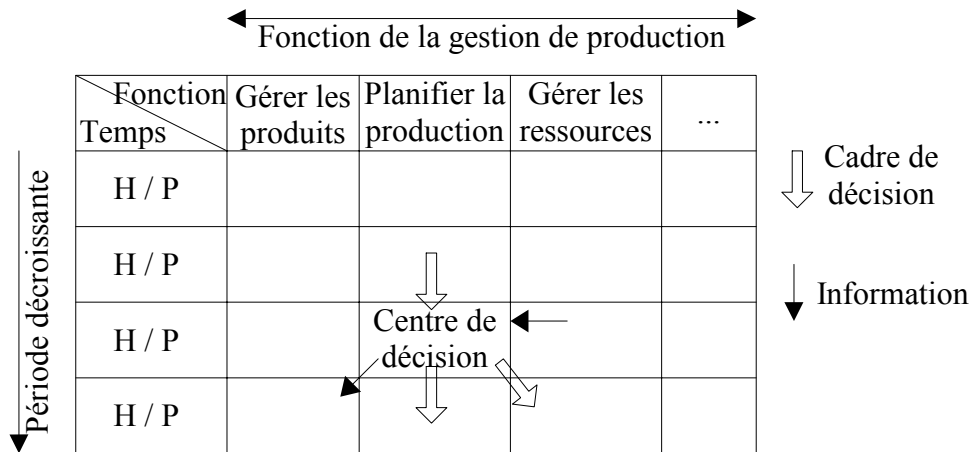


Figure 1.2 - Grille GRAI

Les systèmes de décision sont ainsi décomposés en éléments de base que sont les **centres de décision** (représentés par chaque « case » de la grille). Un centre de décision est un ensemble d'activités de même horizon et même période exécutées suivant les mêmes objectifs [Breuil 84]. Les objectifs d'un centre de décision sont issus du centre de décision hiérarchiquement supérieur et transmis au moyen d'un **cadre de décision**. Le cadre de décision représente ainsi le lien décisionnel d'un centre de décision à l'autre (flèches blanches sur la Figure 1.2). Il contient les informations nécessaires à la prise de décision par le centre, dont principalement :

- les performances ou objectifs à atteindre,
- les variables de décision,
- un ensemble de procédures de mise en oeuvre des variables de décision.

Le centre de décision transmet un cadre de décision au centre immédiatement inférieur de sa fonction, ou éventuellement à des centres de décision correspondant à d'autres fonctions si ceux-ci n'ont pas de centre de décision supérieur. Cela crée donc une hiérarchie pyramidale des centres de décision. On obtient ainsi une décomposition des cadres de décision correspondant à une décomposition de la structure d'objectifs et de l'affectation des moyens.

A chaque objectif sont attachées une ou plusieurs variables de décision, qui font elles aussi partie du cadre de décision. Les variables de décision représentent les points d'action

disponibles pour atteindre les objectifs. Par exemple, si l'objectif est de maximiser le taux d'utilisation des ressources, les variables de décisions correspondantes sont la capacité des machines et la charge ; on peut agir sur l'une ou l'autre pour atteindre l'objectif (augmenter la capacité ou lisser la charge).

Le centre de décision a pour mission d'utiliser les moyens mis à sa disposition pour atteindre les objectifs transmis par le cadre de décision. Les décisions prises sont transmises au centre de décision inférieur ou au système physique de production par le cadre de décision. Les résultats de ces décisions sont évalués par des indicateurs de performance qui sont communiqués au centre de décision afin que celui-ci vérifie la satisfaction des objectifs qui lui sont assignés et envisage éventuellement de nouvelles décisions.

Il ressort de ce modèle du centre de décision que les indicateurs (ce qui est mesuré) sont toujours liés aux objectifs et aux variables de décision. On note aussi que les indicateurs sont toujours utilisés de façon « remontante ». Ils servent à vérifier les résultats des différentes actions sur le système physique de production et à informer les centres de décisions supérieurs des performances du système physique de production. Ils remontent donc l'information du système physique de production à un centre de décision et d'un centre de décision inférieur à un centre de décision supérieur.

La modélisation du système décisionnel par la méthode GRAI conduit à une grille GRAI mettant en évidence les différents centres de décision d'une entreprise. Ce modèle nous semble intéressant, notamment par la structuration des différents liens décisionnels et informationnels qu'il propose. La structure pyramidale des cadres de décision et des objectifs correspond bien à une vision industrielle de décomposition des objectifs. Le modèle du centre de décision, basé sur l'utilisation d'indicateurs pour prendre une décision et sur la transmission des objectifs par le cadre de décision, fournit un cadre de modélisation simple et réaliste. Par rapport à notre cadre d'application, il nous semble toutefois nécessaire d'approfondir la réflexion sur les objectifs et les indicateurs de performance.

Pour cela, nous étudions tout d'abord le premier axe de décomposition d'une grille GRAI, la gestion de production.

II.2.3. La gestion de production

La **gestion de production** a pour objet la recherche d'une organisation efficace dans l'espace et dans le temps de toutes les activités relatives à la production afin d'atteindre les objectifs de l'entreprise [Giard 88]. Comme indiqué précédemment, le système de gestion de

production est composé des parties du système d'information et du système de décision qui concernent la production. La gestion de production correspond à plusieurs fonctions différentes au sein de l'entreprise. On trouve généralement la planification, les approvisionnements, les achats, la gestion des ressources humaines et techniques.

MRP2 (Manufacturing Resource Planning) est une méthode de gestion de production qui permet de prendre en compte la complexité des produits (nomenclatures) et des organisations des industries manufacturières. Elle respecte notamment la forte hiérarchisation des prises de décision dans ces entreprises. Les différentes étapes qui composent MRP2 sont présentées Figure 1.3.

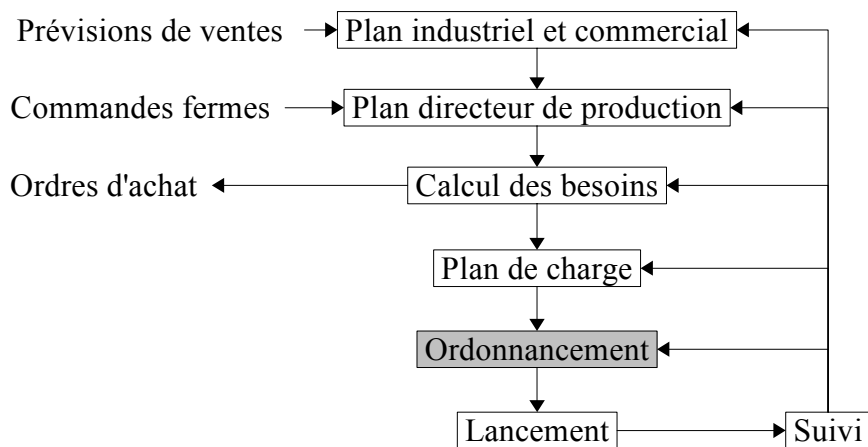


Figure 1.3 - Les fonctions de MRP2

Au sommet de l'enchaînement présenté sur la Figure 1.3, le plan industriel et commercial (PIC) intègre mois par mois et par famille de produits les prévisions de vente des produits et les objectifs de production, sur un horizon assez long, de l'ordre d'une année. Les prévisions commerciales du PIC sont ensuite détaillées sur chaque produit et réévaluées sur un horizon plus court (de l'ordre de quelques mois) dans le plan directeur de production (PDP). Celui-ci recense toutes les commandes fermes et prévisionnelles et en déduit un échéancier des quantités à fabriquer par produit et par période. On détermine à ce niveau là si les capacités globales de l'entreprise en hommes et en machines critiques vont être suffisantes ou s'il est nécessaire d'investir dans de nouveaux matériels ou d'embaucher davantage de personnel. A partir de cet échéancier, le calcul des besoins détermine les quantités de chacun des composants des produits à fabriquer et les dates de fabrication, en se basant sur la nomenclature des produits et les délais de fabrication. A l'issue du calcul des besoins, on dispose des quantités de composants élémentaires à fabriquer (ordres de fabrication) et de matières premières et de composants à acheter (ordres d'achat), accompagnées de leurs dates de besoin. Le jalonnement de ces ordres de fabrication permet de déterminer la charge par

machine et par période. On peut donc vérifier si les commandes sont réalisables ou pas (s'il y a suffisamment de ressources pour assurer la production des commandes), et prendre d'éventuelles mesures correctives telles que des heures supplémentaires pour les opérateurs, la sous-traitance d'une partie du travail ou le lissage de la charge. Lorsque l'adéquation charge/capacité est faite, les opérations sont ordonnancées. L'ordonnancement correspond à l'affectation des opérations sur les ressources (ressources techniques en général, mais de plus en plus on se soucie de l'affectation des ressources humaines). Cette fonction de gestion de production étant l'objet principal de notre étude, elle est détaillée dans la suite de ce chapitre. Pour le lancement, les ordres de fabrication sont transmis à l'atelier pour que les pièces soient fabriquées.

La méthode MRP2 est adaptée à la gestion des organisations complexes car elle permet de décomposer les décisions du niveau stratégique (long terme, PIC et PDP) au niveau opérationnel (court terme, ordonnancement et lancement), en passant par des décisions tactiques (moyen terme, calcul des besoins et plan de charge). Cette décomposition permet de gérer la complexité des données et des décisions. MRP2 permet en outre de faire face, dans une certaine mesure, à l'incertitude des données gérées. La décomposition temporelle des décisions conduit, à long et moyen terme, à utiliser des données globales, par famille, où l'incertitude peut être prise en compte par l'intermédiaire de marges de sécurité, d'outils statistiques, etc. Toutefois, à court terme et notamment au niveau de l'ordonnancement, alors qu'il n'est plus possible de travailler sur des données globales, l'incertitude qui caractérise individuellement ces données est laissée de côté.

La fonction « ordonnancement » étant l'objet principal de notre étude, elle est abordée plus en détail dans la suite du chapitre.

III. GÉNÉRALITÉS SUR L'ORDONNANCEMENT

Le plan de charge permet de vérifier si la charge occasionnée dans l'atelier par les commandes n'est pas supérieure à la capacité des ressources de l'atelier. Dans le cas contraire, des réajustements de charge (lissage) ou de capacité (sous-traitance, heures ou équipes supplémentaires) peuvent être faits. Les données sont transmises à la fonction ordonnancement que nous détaillons dans cette partie.

III.1. Qu'est-ce que l'ordonnancement?

III.1.1. Définition

L'**ordonnancement** est la programmation dans le temps de l'exécution d'une série de tâches (ou activités, opérations) sur un ensemble de ressources physiques (humaines et techniques), en cherchant à optimiser certains critères, financiers ou technologiques, et en respectant les contraintes de fabrication et d'organisation [GOTHA 93] [Esquirol et Lopez 99]. Les ordres de fabrication (OF), suggérés par le calcul des besoins, représentent chacun une requête pour fabriquer une quantité déterminée de pièces pour une date donnée. Ils constituent les données d'entrée de l'ordonnancement et permettent de définir, au moyen des gammes de fabrication, l'ensemble des tâches que la fonction ordonnancement doit planifier. Une tâche est localisée dans le temps par une date de début et une durée ou une date de fin. Elle utilise une ou plusieurs ressources. Elle est dite préemptive si elle peut être interrompue, ou non préemptive si elle ne peut pas être interrompue. En sortie de la fonction ordonnancement, on obtient un planning, ou ordonnancement, qui restitue l'affectation des tâches fournies en entrée à des dates précises pour des durées déterminées sur les différentes ressources. Ce planning cherche à satisfaire des objectifs, en respectant le plus possible des contraintes que nous allons préciser.

La fonction ordonnancement est une fonction court terme, même si elle est parfois utilisée à moyen terme [Esquirol et Lopez 99]. Son horizon et sa période sont donc relativement courts. L'horizon d'un ordonnancement est en général d'une à trois semaines, la période varie de deux ou trois jours à une semaine.

III.1.2. Contraintes sur l'ordonnancement

On peut distinguer trois grandes catégories de contraintes : temporelles, technologiques et de ressources. Le premier type concerne les délais de fabrication imposés. Le deuxième type correspond aux contraintes technologiques, en général décrites dans les gammes de fabrication des produits. On y trouve des contraintes d'enchaînement temporel, mais aussi l'obligation d'utilisation de certaines ressources. Le dernier type de contraintes concerne la limitation de la quantité de ressources de chaque type. Ces contraintes distinguent les différents types de ressources, qui peuvent être disjonctives (elles n'exécutent qu'une seule tâche à la fois), ou cumulatives (elles peuvent exécuter plusieurs tâches en parallèle). Les ressources n'ont pas la même disponibilité et pas la même capacité, celle-ci pouvant être

modulée par la modification des calendriers d'utilisation ou l'emploi de ressources externes. Une ressource peut aussi être consommable, lorsque, après sa libération, elle n'est pas disponible en même quantité. Dans le cas contraire, elle est dite renouvelable.

On peut aussi distinguer les contraintes suivant qu'elles soient strictes ou pas. Les contraintes strictes sont des obligations à respecter alors que les contraintes dites « relâchables » (aussi appelées préférences) peuvent éventuellement n'être pas satisfaites.

III.1.3. Objectifs de l'ordonnancement

Le traitement de l'ordonnancement dans la littérature s'est tout d'abord orienté vers une optimisation monocritère. L'environnement manufacturier évoluant rapidement et la concurrence devenant de plus en plus acharnée, les objectifs des entreprises se sont diversifiés et le processus d'ordonnancement est devenu de plus en plus multicritère. Les critères que doit satisfaire un ordonnancement sont variés. D'une manière générale, on distingue plusieurs classes d'objectifs concernant un ordonnancement [Esquirol et Lopez 99] :

- les objectifs liés au temps : on trouve par exemple la minimisation du temps total d'exécution, du temps moyen d'achèvement, des durées totales de réglage ou des retards par rapport aux dates de livraison,
- les objectifs liés aux ressources : maximiser la charge d'une ressource ou minimiser le nombre de ressources nécessaires pour réaliser un ensemble de tâches sont des objectifs de ce type,
- les objectifs liés au coût : ces objectifs sont généralement de minimiser les coûts de lancement, de production, de stockage, de transport, etc,
- les objectifs liés à une énergie ou un débit.

Les objectifs à satisfaire au niveau de l'ordonnancement sont issus des objectifs globaux de l'entreprises, par décomposition. Cette décomposition conduit à une structure d'objectifs qui permet de gérer les contradictions et les compromis [Farhoodi 90] [Grabot 98]. Un exemple de structure d'objectifs est présenté Figure 1.4.

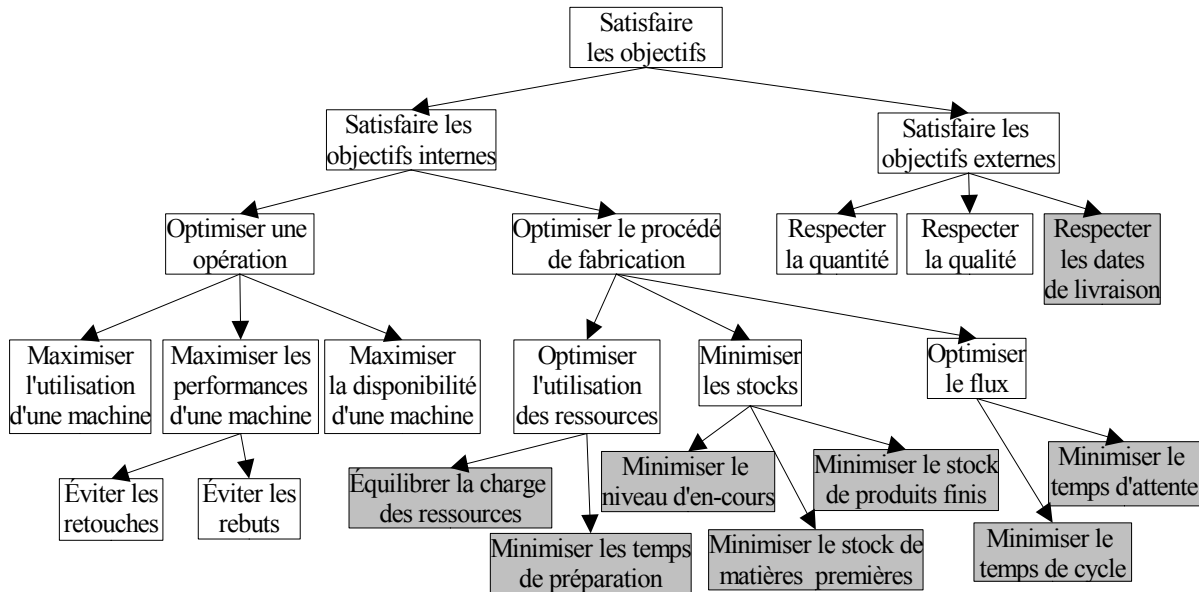


Figure 1.4 – Structure d'objectifs [Grabot 98]

Dans cet exemple de décomposition, les objectifs de haut niveau (stratégiques) sont séparés en objectifs externes, qui quantifient la relation entre l'entreprise et son environnement, et internes, qui évaluent les performances des ressources du système. On ne conserve ici que les objectifs concernant la fonction ordonnancement (grisés sur la Figure 1.4).

Chaque entreprise a ses propres critères, dépendants de sa politique, de son passé, de ses problèmes particuliers... Même si on y retrouve certains points communs, ces objectifs sont trop dépendants de la compagnie, de l'environnement manufacturier ou tout simplement de la personnalité et des habitudes du responsable de la production pour pouvoir être définitivement fixés dans les méthodes de résolution de problèmes d'ordonnancement.

III.2. Le problème d'ordonnancement

III.2.1. Définition

Résoudre un problème d'ordonnancement consiste à trouver une planification des tâches sur les ressources en optimisant les objectifs et en respectant les contraintes. La modélisation du problème dépend fortement des différents paramètres décrits au paragraphe précédent (contraintes, objectifs...). Les problèmes d'ordonnancement sont différenciés suivant le nombre de machines (problèmes à machine unique ou multi-machines) et, si l'on a plusieurs machines, suivant l'ordre de réalisation des tâches [GOTHA 93] [Esquirol et Lopez 99] :

- l'ordre des opérations est fixé et commun à tous les travaux : on est dans le cas d'un « flow shop » ; l'ordonnancement concerne essentiellement l'ordre de lancement des différents OF,
- l'ordre des opérations est fixé mais propre à chaque travail : on est dans le cas d'un « job shop » ; ce problème d'ordonnancement est en général qualifié de n/m/job shop (exécution de n « jobs » sur m machines),
- l'ordre des opérations est indéterminé : on est dans le cas d'un « open shop ».

III.2.2. Représentation de la solution

La représentation la plus courante pour un ordonnancement est le **diagramme de Gantt**. Celui-ci représente une tâche par un segment ou une barre horizontale dont la longueur est proportionnelle à la durée de l'opération. On trouve en général deux types de diagrammes de Gantt : par ordre de fabrication (Figure 1.5(a)) ou par ressource (Figure 1.5(b)).

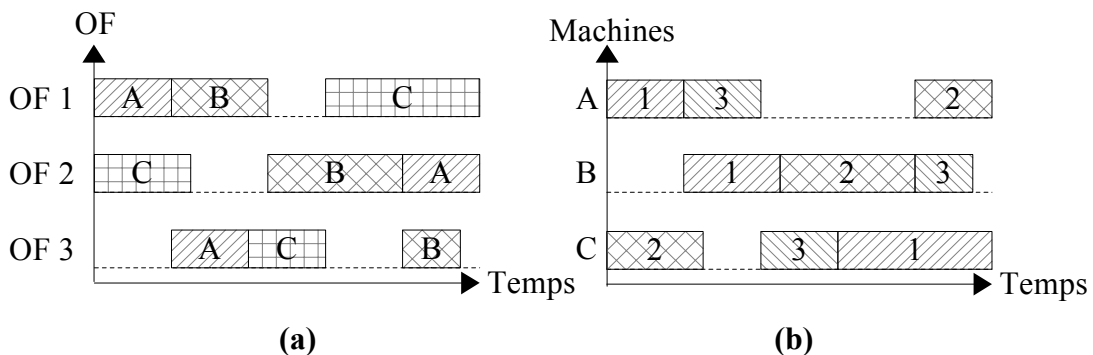


Figure 1.5 – Exemples de diagrammes de Gantt (a) par OF et (b) par ressource

IV. LES DIFFÉRENTES APPROCHES DE RÉOLUTION

On peut distinguer deux grandes familles parmi les approches de résolution d'ordonnancement :

- les approches résolvant le problème en une seule passe, que l'on qualifiera d'approches « directes »,
- les approches, qualifiées « d'itératives », permettant de produire une solution puis de l'améliorer par itérations successives.

IV.1. Approches directes

Ce paragraphe présente quelques méthodes de résolution d'ordonnancement parmi les plus courantes et les plus connues. Comme pour toute activité de décision, on distingue en ordonnancement deux approches fondamentales pour la résolution de problème :

- une approche dite « optimale » consistant à rechercher une décision optimale par rapport à un critère donné, à partir d'hypothèses fortement réductrices qui seules permettent d'établir et de prouver cette optimalité,
- une approche orientée « rationalité limitée » ne cherchant pas à atteindre l'optimalité de la solution et préconise de poser un ensemble d'hypothèses moins réductrices qui vont favoriser la recherche d'une décision satisfaisante [Simon 77].

IV.1.1. Méthodes de résolution optimales

Ces méthodes considèrent le problème d'ordonnancement comme un problème d'optimisation où l'on cherche à satisfaire une fonction objectif, généralement unique. Elles sont décrites dans de nombreux ouvrages traitant des problèmes d'ordonnancement, comme par exemple [GOTHA 93] ou [Esquirol et Lopez 99]. Les méthodes optimales permettent d'avoir des solutions optimisant un seul et unique critère, sous des conditions bien particulières. Ces conditions sont rarement satisfaites dans les problèmes industriels. Les problèmes d'ordonnancement les plus courants sont en général des problèmes NP-complets [Maccarthy et Liu 93] et le temps de résolution par des méthodes optimales augmente de façon exponentielle avec la taille du problème.

IV.1.2. Méthodes de résolution non optimales

IV.1.2.1. Placement des ordres de fabrication

Dans un premier temps, les OF sont classés suivant un critère quelconque (priorité, date de livraison, date de commande...). Une fois cette liste établie, toutes les opérations du premier OF de la liste sont planifiées sur les ressources quand celles-ci sont libres, puis toutes les opérations du deuxième OF... Une fois planifiées, ces tâches ne sont plus remises en cause. Les opérations d'un OF peuvent être placées sur les ressources de deux manières : au plus tôt (les tâches sont planifiées de la première à la dernière dès que possible) ou au plus tard (les tâches sont planifiées en partant de la dernière à la date de livraison et en remontant jusqu'à la première). Des techniques « mixtes » sont aussi possibles. C'est une méthode simple, rapide et

facile à comprendre. Peu consommatrice en temps de calcul, elle a été utilisée par les premiers logiciels d'ordonnancement. Néanmoins, ne permettant aucune optimisation, même partielle ou locale, elle n'est quasiment plus utilisée dans les logiciels d'ordonnancement.

IV.1.2.2. Files d'attente

Le principe est de simuler le fonctionnement de l'atelier. Les opérations sont placées sur les ressources par ordre chronologique. Si, lorsqu'une opération arrive sur une machine, celle-ci n'est pas disponible, la tâche est placée dans une file d'attente. Lorsque la ressource se libère, si la file d'attente comprend plusieurs opérations, on utilise une règle de priorité pour résoudre le conflit. Une règle de priorité est une formule qui associe une valeur à chaque opération d'une file d'attente, calculée en général sur les paramètres de l'opération [Boucon 91]. L'opération de la file qui sera placée sur la machine est celle dont la valeur est la plus faible ou la plus forte. De très nombreuses règles de priorité existent, utilisant des critères variés (voir par exemple [Panwalker et Iskander 77], [Montazeri et Van Wassenhove 90] ou [Holthaus et Rajendran 00] pour un recensement plus ou moins exhaustif des règles de priorité). Un grand nombre d'études ont été faites pour essayer de déterminer les effets de ces règles sur l'ordonnancement et leurs performances globales par rapport à quelques critères. Il ressort essentiellement de toutes ces analyses qu'aucune règle ne surpasse les autres sur tous les objets et dans toutes les configurations d'ateliers [Montazeri et Van Wassenhove 90] [Pierreval et Mebarki 97] [Ferrell et al. 00]. Les effets d'une règle de priorité sur l'ordonnancement sont difficile à prévoir car fortement dépendants de l'atelier.

L'approche par files d'attente est très répandue dans les logiciels d'ordonnancement. Cela est principalement dû au fait que c'est la méthode la plus proche du raisonnement humain face à la résolution d'un problème d'ordonnancement. Elle est très attractive pour les utilisateurs de logiciels d'ordonnancement car ils en comprennent bien le fonctionnement.

IV.1.2.3. Théorie des graphes

Le principe de de cette technique d'ordonnancement repose sur l'utilisation d'un graphe dont les sommets représentent les tâches et dont les arcs modélisent les contraintes entre opérations. Au départ, seules les contraintes liées aux gammes sont représentées. A chaque étape, l'ensemble des opérations est séparé entre les tâches déjà ordonnancées, celles qui peuvent l'être et celles ni ordonnancées ni ordonnançables. On choisit une opération parmi celles ordonnançables ainsi que la ressource sur laquelle elle est affectée. A chaque conflit rencontré, on utilise une règle de résolution pré-définie. Chaque résolution de conflit entraîne

l'apparition de nouvelles contraintes sur le graphe.

IV.1.2.4. Approches par satisfaction de contraintes

Le principe général de ces approches consiste à réduire l'espace dans lequel on recherche la solution en exploitant les contraintes que doit satisfaire cette solution, et à rechercher cette solution dans l'ensemble restreint de solutions admissibles obtenu. Parmi les travaux sur l'utilisation de la satisfaction de contraintes en ordonnancement, on trouve par exemple ceux présentés dans [Erschler 76], ou plus récemment ceux relatés dans [Schwalb et Dechter 97], sur la propagation de contraintes temporelles. [Lopez et al. 92] proposent des méthodes d'ordonnancement qui combinent les contraintes d'utilisation des ressources et les contraintes temporelles. Des systèmes d'ordonnancement tels que ISIS [Fox 83], l'un des premiers ordonnancements dits « intelligents », combinent l'utilisation de propagation de contraintes à celle de systèmes experts afin de minimiser le retard des OF. L'optimisation de l'utilisation des ressources a été ajoutée dans le système suivant OPIS [Ow et Smith 88]. On peut aussi trouver des systèmes faisant intervenir la logique floue afin de relâcher progressivement certaines contraintes [Dubois et Prade 89] [Fargier 94].

Les différentes techniques d'analyse sous contraintes en ordonnancement permettent d'introduire des degrés de liberté dans la résolution du problème d'ordonnancement, en distinguant les contraintes dites « relâchables » (les préférences) des contraintes strictes. L'utilisateur peut ainsi résoudre certains conflits grâce à ces degrés de liberté. Il n'est par contre pas impliqué directement dans le processus de résolution (placement des opérations proprement dit).

IV.1.2.5. Méthodes issues de l'intelligence artificielle

L'intelligence artificielle a fourni de nouvelles approches et tendances en ordonnancement depuis deux décennies, notamment par l'utilisation de réseaux de neurones (voir par exemple [Sabuncuoglu 98] sur l'utilisation des réseaux de neurones en ordonnancement) ou de systèmes experts (voir par exemple [Smith 92] pour un état de l'art des systèmes experts en ordonnancement).

L'utilisation de la logique floue dans l'ordonnancement n'a pas pour but de proposer une nouvelle méthode, mais d'apporter ponctuellement des techniques qui vont permettre d'être plus proche de la réalité. L'incertitude et l'imprécision caractérisant les données d'une entreprise, bien que fréquemment constatées [Gousty et Kieffer 88] [Smith 92], sont rarement prises en compte à court terme. La gestion de cette incertitude et de cette imprécision est plus

souvent faite par le biais de méthodes statistiques, mais l'utilisation de la logique floue [Zadeh 65] et de la théorie de possibilités [Zadeh 78] [Dubois et Prade 87] a connu un succès certain. Elle concerne généralement les aspects suivants :

- la modélisation de critères de performance imprécis [Berrah 97] [Türksen 97],
- la modélisation de l'imprécision des connaissances sur les flux de produits [Grabot et al. 97] [Türksen 97],
- la modélisation de l'imprécision des connaissances sur les méthodes d'amélioration de l'ordonnancement [Bensana et al. 88],
- la modélisation de l'imprécision temporelle (durées des tâches, dates de livraison, ...) [Fargier 97] [Fortemps 97].

L'intelligence artificielle est susceptible d'être d'un grand intérêt pour l'ordonnancement, lui permettant notamment d'être plus proche de la réalité. Les méthodes d'ordonnancement issues de l'intelligence artificielle sont toutefois peu implantées dans l'industrie car elles ne sont pas encore suffisamment matures ni suffisamment transparentes pour l'utilisateur.

IV.2. Approches itératives

Il a été fréquemment constaté dans la littérature ([Farhoodi 90], [Bérard et al. 98], [Grabot et al. 99] ou [Van Bael 99]) qu'un ordonnancement est rarement idéal « du premier coup » et qu'il est généralement nécessaire de procéder à des améliorations successives. On distingue deux approches d'amélioration d'un ordonnancement :

- réparation de la solution par un processus automatique,
- intervention de l'opérateur dans l'amélioration de la solution.

IV.2.1. Réparation automatique

La « réparation automatique » d'un ordonnancement consiste, à partir d'un ordonnancement déjà existant, à obtenir une solution plus ou moins optimale, cette amélioration étant entièrement faite par l'ordinateur. On considère trois approches dans cette automatisation de l'amélioration de l'ordonnancement : l'utilisation de l'intelligence artificielle, les méta-heuristiques et les techniques de choix de la meilleure méthode de résolution.

IV.2.1.1. Intelligence artificielle

L'intelligence artificielle est fréquemment utilisée pour améliorer des ordonnancements

déjà existants. Dans [Bel et al. 88] et [Bensana et al. 88], les auteurs proposent de faire un ordonnancement par satisfaction de contraintes (voir § IV.1.2.4), puis d'améliorer le résultat grâce à un système expert. On peut aussi citer le système OPIS [Ow et Smith 88], qui détermine grâce à un système expert basé sur l'utilisation de tableaux noirs, les ressources goulots et relance un ordonnancement par satisfaction de contraintes en planifiant ces ressources en premier. On trouve dans [Artiba et Aghezzaf 97] la présentation d'un système d'ordonnancement de systèmes complexes comportant un module « base de connaissances » qui, en fonction des problèmes et des performances de l'ordonnancement en cours, remodélise le problème et choisit la méthode ou l'heuristique de résolution la mieux adaptée au modèle. Partant d'un ordonnancement fait par gestion des files d'attente, il est proposé dans [Lereno et al. 01] de capitaliser les résultats successifs de l'ordonnancement pour constituer une base de connaissances qui pourra choisir le réglage des meilleurs paramètres.

IV.2.1.2. Méta-heuristiques

Les méthodes dites « méta-heuristiques » consistent à explorer « intelligemment » l'espace des solutions possibles pour trouver l'optimum ou une solution la plus proche possible. Parmi les méta-heuristiques les plus connues on trouve :

- les méthodes de recherche avec tabous [Glover 89] [Glover 90], appliquées au problèmes d'ordonnancement dans, entre autres, [Hertz et Widmer 94], [Dell'Amico et Trubian 93] ou [Taillard 94]. La recherche avec tabous est alliée à un algorithme génétique dans [Chang et Lo 01] pour améliorer une solution d'ordonnancement par rapport à des objectifs quantitatifs et qualitatifs.
- les algorithmes génétiques ([Holland 75], [Goldberg 89] ou [Davis 91]). Dans [Bérard et al. 97], un ordonnancement obtenu par une simulation à événements discrets est amélioré au moyen d'un algorithme génétique. Dans [Li et al. 00], une approche par algorithmes génétiques est aussi utilisée pour améliorer un ordonnancement multi-objectif. Dans [Ponnambalam et al. 01], un nouvel algorithme génétique est proposé pour améliorer des solutions d'ordonnancement.
- la méthode du recuit simulé [Metropolis et al. 53], qui permet par exemple d'améliorer un ordonnancement obtenu par satisfaction de contraintes [Van Bael 99] ou par la gestion des files d'attente [Ponnambalam et al. 99].

IV.2.1.3. Choix de la meilleure méthode

On peut aussi classer dans cette catégorie les différentes approches qui proposent de

sélectionner automatiquement la meilleure méthode de résolution en fonction des paramètres de l'atelier considéré. On trouve différentes approches de sélection comme les réseaux de neurones [Boukachour et al. 97] ou les systèmes experts [Romanowicz et al. 97]. Dans [Riane et al. 99] est proposée une plate-forme qui évalue et compare les différentes heuristiques de résolution. On peut aussi rappeler [Artiba et Aghezzaf 97] dans lequel le système présenté comporte un module « base de connaissances » qui choisit la méthode ou l'heuristique de résolution la plus adaptée au modèle. Des tentatives de sélection des meilleures règles de priorité en fonction des paramètres de l'atelier ont été faites, par exemple dans [Boucon 91] (ordonnancement job shop), [Pierreval et Mebarki 97] (sélection dynamique), [Grabot et al. 97] (règles floues) ou [Subramaniam et al. 00] (sélection dynamique par Analytic Hierarchy Process [Saaty 80]).

IV.2.1.4. Remarques

En général, ces méthodes d'amélioration automatique de l'ordonnancement, bien que tentant de répondre à un réel besoin, sont peu mises en œuvre dans l'industrie. Leur complexité et leur temps d'exécution les rendent pour l'instant peu attractives pour des logiciels d'ordonnancement commerciaux.

De plus, si les industriels veulent un ordonnancement qui s'adapte à leur spécificité, ils veulent aussi en rester maîtres. Les « automatisations » proposées du processus d'amélioration isolent le gestionnaire d'atelier de son ordonnancement et peuvent ainsi le conduire à le rejeter [Myers 00] [Aldanondo et Cavallé 01].

IV.2.2. Intervention humaine

Il est fréquemment reconnu que la résolution d'un problème d'ordonnancement est fortement dépendante de l'atelier auquel l'ordonnancement s'applique. Cet aspect explique l'échec relatif de toutes les solutions d'amélioration automatique qui ne permet pas de s'adapter aux spécificités de chaque entreprise. [Baek et al. 99] ont notamment constaté que globalement, les choix de l'opérateur humain donnent de meilleurs résultats que les choix de l'ordinateur. La recherche s'est donc tournée vers des solutions permettant d'intégrer la participation de l'utilisateur du logiciel d'ordonnancement, afin que celui-ci puisse guider la résolution en fonction de ses besoins particuliers [Farhoodi 90] [Bérard et al. 98] [Grabot et al. 99]. On distingue en général deux approches de l'intervention humaine dans l'ordonnancement : la coopération et l'interaction.

IV.2.2.1. Ordonnancement coopératif

L'**ordonnancement coopératif** est défini dans [Bérard et al. 98], [Lopez et al. 98] ou [Grabot et al. 99] comme la mise au point conjointe de l'ordonnancement par le logiciel et par le gestionnaire d'atelier (Figure 1.6).

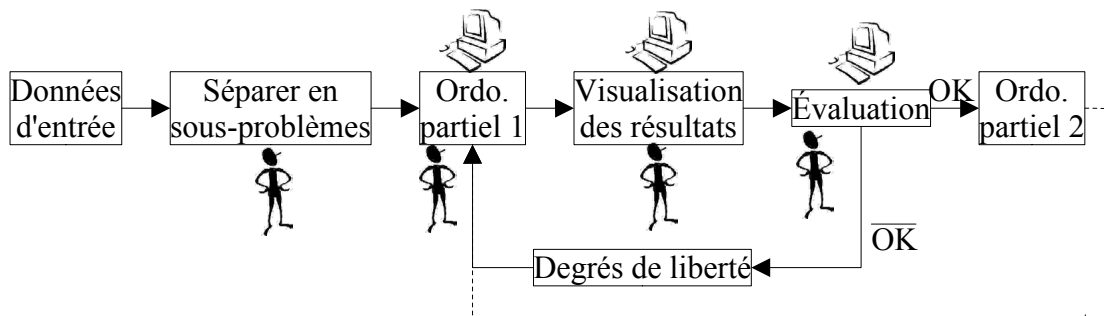


Figure 1.6 - Une approche coopérative de l'ordonnancement [Grabot et al. 99]

La coopération présentée Figure 1.6 présente plusieurs conditions :

- une interface homme-machine très développée et très interactive pour que l'opérateur puisse pleinement participer à l'élaboration de l'ordonnancement,
- une évaluation des résultats qui permet à l'utilisateur du logiciel d'avoir un ordonnancement correspondant réellement à ses besoins,
- une forte implication de l'opérateur dans l'obtention de l'ordonnancement, ce qui permet à l'utilisateur de pouvoir s'approprier les résultats.

Néanmoins, la forte participation de l'utilisateur dans le processus d'obtention d'un ordonnancement nécessite aussi que celui-ci connaisse parfaitement le processus de résolution du logiciel afin de pouvoir participer activement. L'opérateur humain doit aussi être capable de séparer le problème d'ordonnancement en sous-problèmes pour réaliser des ordonnancements partiels.

IV.2.2.2. Ordonnancement interactif

L'**ordonnancement interactif** se définit comme une alternance de décisions de l'opérateur et du logiciel. [Farhoodi 90] propose les étapes présentées Figure 1.7.

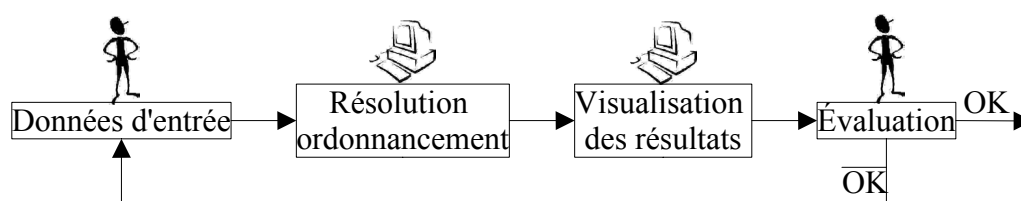


Figure 1.7 - Une approche interactive de l'ordonnancement

L'approche de l'ordonnancement interactif présentée Figure 1.7 fait ressortir l'alternance des décisions humaines (au niveau des données d'entrée de l'ordonnancement et de l'évaluation des résultats) et des décisions du logiciel (au niveau de la résolution du problème d'ordonnancement et de l'affichage des résultats). De plus, une telle approche met en avant l'aspect « évaluation des résultats » de l'ordonnancement qui nous semble être une étape indispensable à une utilisation pertinente des résultats de l'ordonnancement.

On peut néanmoins lui reprocher l'absence de l'aide logicielle au niveau de la boucle de retour. En effet, si l'ordonnancement produit par le logiciel ne convient pas à l'utilisateur, celui-ci va chercher à modifier divers paramètres, règles, données ou degrés de liberté pour obtenir un ordonnancement « meilleur ». Ces modifications, indispensables à l'amélioration de l'ordonnancement, sont difficiles à déterminer sans guide ou informations.

IV.2.2.3. Approche proposée

Nous proposons une amélioration de l'approche interactive en ordonnancement, par une aide à l'identification des problèmes puis au choix des points d'action (Figure 1.8).

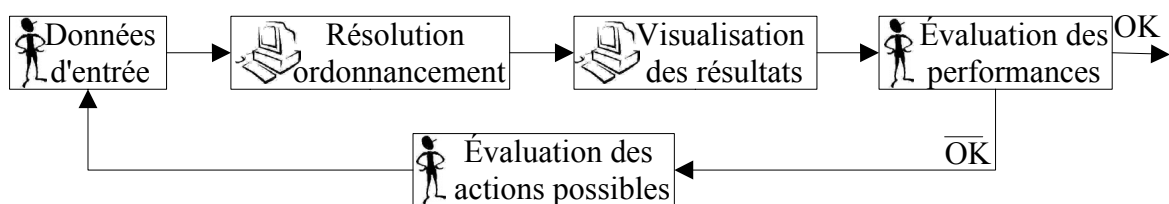


Figure 1.8 - L'évaluation dans l'ordonnancement interactif

Dans cette approche, l'opérateur n'est plus seul pour refermer la boucle, le logiciel lui apporte une aide, sous forme d'évaluation, pour savoir où agir. Cette aide se présente sous la forme de tableaux de bord (voir chapitre 2), comportant des indicateurs (voir chapitre 3) qui vont informer l'utilisateur des différentes possibilités d'amélioration qui s'offrent à lui. L'opérateur humain pourra alors modifier les données d'entrée (paramètres de l'ordonnancement, données techniques...) pour que la résolution par le logiciel aboutisse à un ordonnancement plus satisfaisant. Les différentes données sur lesquelles il peut intervenir dépendent d'une part des spécificités de l'entreprise et de l'atelier géré (expertise de l'utilisateur) et d'autre part des particularités du logiciel d'ordonnancement utilisé.

Cette approche interactive ayant pour ambition de permettre au gestionnaire d'atelier d'améliorer l'ordonnancement produit par son logiciel, la partie suivante propose un survol des logiciels d'ordonnancement dans l'industrie.

V. EXEMPLES DE LOGICIELS D'ORDONNANCEMENT INDUSTRIELS

V.1. *Spécificité de la problématique industrielle*

Malgré la grande variété des méthodes de résolution des problèmes d'ordonnancement mises au point et l'activité de recherche importante dans ce domaine, il est intéressant de constater combien peu de ces techniques ont eu une influence importante sur des produits industriels. En effet, le fossé entre recherche et problématique industrielle est périodiquement souligné dans la littérature (voir par exemple [Smith 92], [Maccarthy et Liu 93], [Ramudhin et Marrier 93] ou [Türksen 97]). Certains problèmes industriels peu traités en recherche sont listés dans [Aldanondo et Cavallé 01].

Cette problématique peut schématiquement être résumée comme suit :

- sauf cas particuliers (recherche d'un ordonnancement cyclique par exemple), un ordonnancement est généré avec une période relativement faible, de l'ordre de la semaine (voir partie III.2.1), voire de la journée en cas d'environnement très perturbé. Dans ce contexte, il n'est pas question de devoir attendre plusieurs dizaines de minutes pour obtenir un ordonnancement « optimal » qui sera de toute façon remis en cause rapidement du fait de l'occurrence d'aléas.
- pour réellement permettre d'organiser le travail, l'ordonnancement doit pouvoir prendre en compte des contraintes technologiques très variées : l'ordonnancement doit être « faisable ». Comme cela est rappelé dans [Aldanondo et Cavallé 01], même des ressources simples et très répandues comme les fours ou les centres d'usinage peuvent être difficile à prendre en compte de manière réaliste par les modèles sous-jacents aux méthodes d'ordonnancement.
- le problème d'ordonnancement est en général de type multi-ressources : à une opération peuvent être associés une ou plusieurs machines, mais aussi des outils, outillages, opérateurs, etc. Cette aspect multi-ressources peut être difficile à gérer dans les méthodes de résolution classiques, et remet en cause la plupart du temps les critères classiques d'optimalité d'un ordonnancement.
- les contraintes de succession entre opérations sont de plus en plus complexes, et si ces contraintes sont rarement prises en compte en recherche parce que semblant trop spécifiques, elles ont nécessité une augmentation considérable du pouvoir de modélisation des logiciels d'ordonnancement (voir par exemple les contraintes gérées par le logiciel Io (société Cesium) décrites dans [Grabot et al. 99]).
- les utilisateurs industriels de l'ordonnancement ne sont en général pas des professionnels de

l'ordonnancement, mais des experts de la gestion d'un atelier donné. Ils maîtrisent parfaitement les contraintes-clefs à respecter pour obtenir un ordonnancement *faisable*, et ont une bonne idée (restant souvent implicite) des critères permettant de définir un *bon* ordonnancement. Par contre, il n'est en général pas dans leurs compétences de paramétrer une méta-heuristique, ou de trouver quel artifice de modélisation leur permettra de mieux décrire leur problème dans un logiciel. Leur bon usage des logiciels implique ainsi souvent que les méthodes de résolution soient relativement intuitives, ou au moins que leur complexité soit la plus cachée possible.

On voit ainsi apparaître une divergence croissante entre des techniques d'ordonnancement très axées « optimisation » traitant de problèmes d'ordonnancement relativement génériques et des logiciels industriels orientés vers une meilleure prise en compte des spécificités technologiques des ateliers ou des process. Comme cela a été introduit dans le paragraphe IV.2.3 (paragraphe sur l'ordonnancement coopératif), cette nécessité d'intégrer des contraintes de plus en plus spécifiques dans des modèles devant rester génériques est une des causes du développement de l'ordonnancement interactif (sinon « coopératif » au sens strict du terme).

Un rapide panorama de logiciels d'ordonnancement courants sur le marché français est effectué dans la partie suivante, en insistant sur les points d'action, généraux ou spécifiques, que proposent ces logiciels afin d'améliorer un ordonnancement. Ce panorama ne vise pas à l'exhaustivité, mais s'attache à des logiciels dont nous avons une connaissance pratique pour la plupart et qui nous ont semblé les plus caractéristiques d'une approche donnée. L'identification des points d'action que nous identifierons nous permettra de mieux cerner les besoins en indicateurs permettant de faciliter leur utilisation par la personne en charge de l'ordonnancement.

V.2. Quelques logiciels représentatifs

V.2.1. Sipa - SipaPlus

Un des précurseurs des logiciels d'ordonnancement « modernes » est certainement le logiciel Sipa (appelé par la suite SipaPlus), de la société Grai-Productique S.A., actuellement GRAI Industries. Ce logiciel est largement basé sur les travaux de thèse de Christian Bérard [Bérard 83] sur le modèle APIS, modèle permettant un ordonnancement coopératif. En effet, comme cela est souligné dans [Bérard et al. 98], l'ordonnancement informatisé était

considéré dans les années 80 comme un calcul complexe dont les hommes de terrain étaient exclus - point de vue qui perdure dans de nombreux travaux de recherche. Le modèle APIS était basé sur un accès rapide aux données, un traitement rapide et une coopération homme-logiciel dans la mise au point progressive de l'ordonnancement au moyen d'un diagramme de Gantt interactif. Pour obtenir une vitesse de traitement élevée, il utilise une technique d'ordonnancement relativement simple de simulation par événements discrets (ou gestion de files d'attente, voir § IV.1.2.2). Seules quelques règles de gestion de files d'attente (priorité, marge,..) peuvent être choisies en version standard : comme cela a été maintes fois souligné (voir par exemple [Boucon 91]), l'effet d'une règle est très dépendant du contexte, et les concepteurs du logiciel trouvaient imprudent de proposer des points d'action que l'utilisateur ne maîtriserait pas.

Dans ce contexte d'ordonnancement coopératif, la qualité des interfaces n'est pas un « plus » mais une condition sine-qua-none à l'implication du gestionnaire d'atelier dans la mise au point de l'ordonnancement. Sur le modèle des interfaces d'Apple MacIntosh™, SipaPlus, bien avant l'apparition de MS-Windows™, proposait ainsi utilisation de la souris, de menus déroulants, de boutons, de diagramme de Gantt interactif etc. sur PC, qui se dégageaient déjà comme la seule opportunité en vue de mettre l'informatique de pilotage d'atelier à portée des utilisateurs finaux.

Même si ces améliorations étaient certainement dans l'air du temps - MS-Windows les ayant banalisées quelques années plus tard - on peut dire que Sipa a d'une certaine manière défini des standards en terme d'ordonnancement d'atelier, standards auxquels les produits arrivant ensuite sur le marché ont dû tenter de se conformer.

SipaPlus a bien sûr considérablement évolué depuis sa sortie, mais on peut toujours le considérer comme fidèle à l'esprit de *mise au point progressive d'un ordonnancement par l'utilisateur final*, avec un parti pris de garder un logiciel relativement simple d'accès pour le gestionnaire d'atelier.

Les principaux points d'action autorisés dans SipaPlus sont ainsi liés aux degrés de liberté suivants :

- degrés de liberté présents dans les données techniques :
 - choix de ressource de remplacement (machine pouvant effectuer une opération),
 - choix d'une opération de remplacement,
 - choix d'une gamme de remplacement.
- degrés de liberté sur les délais des ordres de fabrication :

- avancer/retarder la date de début au plus tôt, avancer / retarder la date de fin au plus tard.
- degrés de liberté liés à la gestion de la capacité :
 - ajuster les calendriers, augmenter le nombre d'équipes...
 - externaliser une partie de la charge et/ou certaines phases.
- degrés de liberté sur le placement des tâches :
 - positionnement manuel d'une ou de plusieurs tâches.
- degrés de liberté portant sur la méthode d'ordonnancement :
 - choix de la règle de gestion des files d'attente,
 - lorsqu'une règle utilisant la notion de "priorité" est utilisée : augmenter/diminuer la priorité d'un ou de plusieurs OF.
- relâcher / appliquer des contraintes entre phases.

Dans SipaPlus, les contraintes applicables sont principalement des chevauchements et des contraintes de synchronisation entre début et fin d'opérations successives (synchronisation des débuts, des fins, de fin d'opération avec le début d'une autre). Relâcher ou appliquer des contraintes peut participer à l'obtention d'un meilleur ordonnancement.

V.2.2. Ordo

Le logiciel Ordo (développé initialement par le Cabinet Villaumié, maintenant dénommé OrdoSoftware et diffusé par EBC Informatique) est issu de travaux menés au LAAS sur l'analyse sous contraintes ([Erschler 76], voir § IV.1.2.4) puis sur l'utilisation de cette technique de résolution en vue de créer des familles d'ordonnancement compatibles avec les contraintes à satisfaire [LeGall 89] [LeGall et Roubellat 92]. Ces familles d'ordonnancement sont définies par des plages de temps à l'intérieur desquelles un certain nombre d'opérations peuvent se dérouler (opérations permutable). Ces opérations *permutables* sont donc attachées à la méthode d'ordonnancement utilisée, et pas aux données techniques comme dans le cas d'opérations d'une gamme pouvant s'effectuer dans un ordre quelconque, aussi dénommées couramment « opérations permutable ».

Le choix final de la séquence d'opérations peut ainsi être retardé jusqu'à l'exécution de l'ordonnancement pour permettre une réaction aux aléas [Billaut et Roubellat 96]. Un système expert a aussi été proposé dans le logiciel Opal, dérivant de la même technique [Bel et al. 88] [Bensana et al. 88], visant à ordonner les opérations permutable en fonction de l'application de connaissances directement issues du terrain et visant à satisfaire des objectifs

opérationnels spécifiques.

Avec cette approche, de nouveaux degrés de liberté apparaissent, par rapport à la taille des groupes d'opérations permutable : plus ces groupes sont importants, plus les possibilités de réaction sont grandes, mais plus les en-cours sont importants. En effet, l'opération suivante d'un OF appartenant à un groupe ne pourra débuter qu'une fois que toutes les opérations du groupe auront été achevées, sous peine de remettre en cause la constitution du groupe suivant.

V.2.3. Ortems

Le logiciel Ortems est issu des travaux de thèse de Y. Al Kazzaz [Al Kazzaz 89]. L'originalité de cette approche est de se baser sur la théorie des graphes (voir § IV.1.2.3). Les données d'ordonnancement sont en effet analysées et modélisées sous forme d'un graphe de précédences complexe servant de base à la résolution du problème. La visualisation (partielle) du graphe est alors un support intéressant d'interactivité avec l'utilisateur en vue de mieux comprendre le réseau de contraintes mis en jeu, et l'intérêt de l'ajout / retrait de contraintes.

L'utilisation des ressources est gérée par des files d'attente, et Ortems permet d'aller très loin dans la personnalisation des règles : une liste de règles à appliquer successivement sur une « population » d'OF peut en effet être créée. La « largeur » de la sélection effectuée par chaque règle peut être paramétrée et les règles agissent ainsi comme une succession de filtres permettant au terme de la procédure de sélectionner l'OF qui passera d'abord sur la machine.

Cette technique, aussi utilisée par des logiciels comme Orchestral (Sinfor Process) dans les années 90 ou GPS (Missler Informatique) apparaît toutefois comme assez difficile à maîtriser si de nombreuses règles sont utilisées. Comme nous l'avons déjà souligné, le résultat de l'application d'une règle est déjà fortement dépendant du contexte ; l'application de n règles successives est d'autant plus complexe. Des travaux sont en cours dans la société Ortems en vue de l'utilisation de méta-heuristiques (voir § IV.2.2) pour améliorer un ordonnancement en utilisant ces paramètres. La démarche participe à la fois de l'amélioration automatique (de nombreux ordonnancements sont générés et évalués) et de l'ordonnancement coopératif (dans le choix des règles considérées pour une utilisation donnée).

V.2.4. Io

Io (société Cesium) est un logiciel ayant fait le choix de l'ordonnancement coopératif au moyen d'une technique relativement simple (gestion de files d'attente), avec toutefois trois particularités fortes [Grabot et al. 99] :

- possibilité de définir des contraintes complexes entre opérations, pouvant se combiner pour définir un cadre de modélisation très puissant,
- visualisations très diverses d'un ordonnancement, afin de permettre un meilleur diagnostic de l'ordonnancement de la part de l'utilisateur (Gantt machines, Gantt OF, visualisation « charge », etc.),
- possibilité de bâtir un ordonnancement de manière complètement interactive, au moyen d'un ordonnancement « non-régénératif ». Un OF (ou un ensemble d'OF) peut en effet être ordonnancé seul, les autres OF étant ensuite placés automatiquement par gestion des files d'attente. Cette technique, qui participe du placement d'ordres de fabrication (voir § IV.1.2.1) et de la simulation (voir § IV.1.2.2), permet un parfait contrôle du résultat, soit pour bâtir le premier ordonnancement, soit pour retoucher une première solution (déplanification d'un groupe d'ordres de fabrication, puis replanification manuelle pour arriver à un résultat parfaitement maîtrisé).

Un tel ordonnancement « manuel » est aussi permis par le logiciel Vega (développé par Cybernetix, puis Unilink) ou le logiciel Préactor (Ouroumoff), ce dernier permettant aussi à l'utilisateur de définir des règles spécifiques de gestion de files d'attente.

V.2.5. CadPlan

Le logiciel CadPlan, de la société Access Commerce, utilise lui aussi une technique de gestion de files d'attentes. Une de ses originalités réside toutefois dans la richesse du modèle des données techniques qu'il utilise : comme dans le prototype de recherche Flexplan [Flexplan 92] développé au cours du projet ESPRIT 2457, une gamme peut en effet être définie comme un réseau et non plus seulement comme une séquence (même si cette séquence peut présenter dans la plupart des logiciels des opérations de remplacement). Lors d'un ordonnancement, la gamme active est ainsi visualisée comme un chemin dans le graphe décrivant la gamme-réseau, ce qui permet à l'utilisateur de tester d'autres « chemins » en vue d'améliorer un ordonnancement existant, ou de réagir à des aléas (pannes machines, absences opérateurs...).

V.2.6. Bilan

Comme nous l'avons vu, aux points d'action inhérents à tout problème d'ordonnancement rapidement listés dans le paragraphe V.2.1 viennent s'ajouter de nouveaux

points d'action, typiques de techniques très pragmatiques utilisées par certains produits du marché. Dans tous les cas, les éditeurs de logiciels ont conscience que ces degrés de liberté supplémentaires ont un cadre d'application, ou un domaine d'efficacité donné. Les indicateurs que nous souhaitons mettre en place visent à permettre de mieux identifier si une situation donnée appartient à ce domaine d'efficacité, afin de faciliter la mise au point de l'ordonnancement. Les divers points d'action que nous venons d'évoquer vont donc sous-tendre notre réflexion générale sur les indicateurs permettant de mieux choisir une action au cours d'une procédure d'ordonnancement interactif.

V.3. Deux problématiques spécifiques

A l'heure actuelle, les structures de production sont en pleine évolution, notamment du fait de l'apparition de nouveaux types de flexibilité. Cet accroissement et cet élargissement de la flexibilité portent essentiellement sur deux points : les ressources humaines et les commandes.

V.3.1. La flexibilité sur les commandes

Le développement de techniques de communication de plus en plus évoluées et rapides a créé une forme de vente plus flexible. En effet, les réseaux de communication ont permis l'émergence du commerce électronique, conduisant à des passations de commandes plus rapides et plus aisées, mais aussi moins certaines. Les PME, généralement sous-traitants de grands donneurs d'ordre, sont aussi de plus en plus souvent au cœur de la chaîne logistique (Supply Chain) et doivent être en mesure de répondre le plus rapidement possible à des commandes qui ne sont pas toujours entièrement sûres. Ainsi, les gestionnaires d'atelier doivent gérer une charge en partie incertaine et imprécise, et à partir de cela, être capables de faire un ordonnancement prévisionnel et d'en extraire une évaluation des délais de fabrication, afin de finaliser les commandes en cours.

Nous avons déjà évoqué le fait que l'incertitude entachant les données utilisées par la gestion de production est peu prise en compte au niveau de l'ordonnancement. La logique floue a fait peu à peu son apparition pour traiter l'imprécision et l'incertitude (voir paragraphe IV.1.2.5), mais son utilisation reste relativement marginale et ne prend pas en compte le problème spécifique de l'incertitude des commandes.

V.3.2. La flexibilité sur les ressources humaines

Le deuxième type de flexibilité en pleine évolution actuellement est lié aux opérateurs de production. En effet, les différentes lois sur l'aménagement et la réduction du temps de travail (loi de Robien en 1996 sur l'annualisation du temps de travail et loi Aubry en 1998 sur les 35 heures) mettent en lumière de nouvelles possibilités de flexibilité sur les durées de travail et les compétences des ressources humaines. Jusqu'alors fréquemment limitée au long terme où l'adéquation compétences présentes / compétences nécessaires se fait principalement par des formations des employés, des embauches de personnels qualifiés ou l'externalisation de certains types de travaux, la gestion des ressources humaines est maintenant considérée à court terme. La loi sur la réduction du temps de travail poussant les entreprises à s'organiser sur ce point, de nombreuses discussions sont en cours. En effet, le passage aux 35 heures de travail hebdomadaire fait perdre de la productivité aux compagnies et elles tentent de regagner cette productivité en accroissant la flexibilité due aux opérateurs, généralement en instaurant un régime d'annualisation du temps de travail (beaucoup d'accords « 35 heures » conclus proposent d'annualiser la durée de travail en la réduisant). Quel que soit l'accord passé, les entreprises doivent maintenant envisager une adéquation compétences disponibles / compétences requises autant à long qu'à court terme et veiller à prendre en compte la disponibilité des ressources humaines autant que techniques au niveau de l'ordonnancement. Une telle gestion des opérateurs, et d'autant plus s'ils sont annualisés, nécessite une aide logicielle encore rare, bien que des produits commencent à attaquer le marché, en général en utilisant des outils de propagation de contraintes comme les outils ILOG. Des réponses à cette problématique commencent à faire leur apparition, notamment dans les travaux de L. Franchini [Franchini 00] et H. Kane [Kane et al. 00] [Kane et Baptiste 01].

VI. CONCLUSION

Ce premier chapitre a permis de présenter la fonction de gestion de production au cœur de notre étude : l'ordonnancement. Cette présentation a débuté par la définition du système de production et sa décomposition en trois sous-systèmes. La partie décisionnelle a été plus précisément abordée, notamment à travers la méthode GRAI et les différentes fonctions de gestion de production. La deuxième partie était consacrée à la définition de l'ordonnancement lui-même, avant une revue des principales approches de résolution. Nous avons distingué deux types d'approches : les démarches directes qui résolvent le problème d'ordonnancement

en une seule itération et les démarches itératives qui cherchent une solution satisfaisante par améliorations successives. C'est dans cette deuxième classe que nous avons placé notre approche d'un ordonnancement interactif qui va guider le gestionnaire d'atelier sur les modifications à apporter pour améliorer l'ordonnancement. La dernière partie du chapitre était consacrée à un bref panorama de logiciels d'ordonnancement industriels typiques.

Afin de mieux cerner les différents outils et techniques qui vont être utilisés pour réaliser un ordonnancement interactif, le chapitre suivant est consacré à l'étude des indicateurs de performance.

- *Chapitre 2 - Les indicateurs de
performance*

Chapitre 2 – Les indicateurs de performance

I. INTRODUCTION

Ce chapitre traite des différents éléments que l'on se propose d'utiliser afin de réaliser une aide à l'ordonnancement. Nous effectuons un état de l'art et une analyse des différents travaux et outils existants se rapportant à notre approche interactive de l'ordonnancement. La première partie de ce chapitre est consacrée à l'étude des indicateurs de performance. Dans un premier temps, nous définissons les indicateurs de performance, puis nous abordons leur modélisation. Les techniques d'agrégation d'indicateurs de performance sont abordées dans la deuxième partie de ce chapitre, que cette agrégation corresponde à la définition d'un indicateur unique à partir de tous les autres ou à la synthèse d'une ou plusieurs mesures en un indicateur plus facilement interprétable. Dans la troisième partie du chapitre, les indicateurs de performance sont classés suivant des critères divers afin de faire ressortir leur spécificités. Les utilisations industrielles des indicateurs sont ensuite décrites. Les indicateurs de performance étant les composants principaux des tableaux de bord, un panorama général sur ces derniers est présenté dans la quatrième partie de ce chapitre. Nous abordons finalement les différents concepts informatiques qui décrivent les systèmes permettant la gestion et la visualisation de données à des fins décisionnelles, en présentant notamment les outils d'analyse que ces systèmes proposent.

II. QU'EST-CE QU'UN INDICATEUR DE PERFORMANCE ?

II.1. Définition et propriétés

De nombreuses définitions des indicateurs de performance ont été données. La plus couramment admise de nos jours en France est celle donnée par l'Association Française de Gestion Industrielle dans [AFGI 92] :

« Un **indicateur de performance** est une donnée quantifiée qui mesure l'efficacité et/ou l'efficience de tout ou partie d'un processus ou d'un système

(réel ou simulé), par rapport à une norme, un plan ou un objectif, déterminé et accepté dans le cadre d'une stratégie d'entreprise. »

Cette définition met en avant plusieurs aspects importants de l'indicateur de performance. La première notion mise en relief est l'aspect quantifié d'un indicateur [Le Dain et Ndao 97] [Berrah 97] [Bitton 90]. C'est en effet avant tout une *mesure*. Elle n'est pas nécessairement directe et sous-entend généralement une recherche d'information à des niveaux plus ou moins élevés du système évalué. Une seconde notion sous-jacente de l'indicateur de performance éclairée par cette définition est le rapport à l'*objectif* [Berrah 97] [Bitton 90]. Cet aspect de l'indicateur est considéré comme fondamental, car l'évaluation se fait toujours par comparaison à une référence. En effet, le but principal d'une évaluation des performances d'un système est de mesurer l'écart entre les performances réelles et les performances souhaitées, et de juger le caractère plus ou moins acceptable de cet écart [Le Dain et Ndao 97]. Plusieurs autres notions transparaissent dans la définition de l'AFGI. Outre l'aspect performance, qui est contenu directement dans l'appellation de l'indicateur et est implicitement lié à la mesure et à l'objectif, il apparaît aussi que l'indicateur est nécessairement lié à l'*action* qu'il est susceptible d'induire [Le Dain et Ndao 97] [Cerutti et Gattino 92].

L'indicateur est ainsi caractérisé par un objectif, une mesure d'efficacité et des variables d'action [Berrah et Haurat 97]. L'objectif représente l'état espéré, la mesure l'état réel et la variable d'action l'un des leviers sur lesquels on peut agir en fonction de l'écart entre l'objectif et la mesure [Berrah et al. 00].

II.2. La méthode ECOGRAI

Nous avons vu au chapitre précédent qu'un centre de décision de la méthode GRAI est susceptible d'utiliser des indicateurs de performance. Cet aspect a été précisé par l'extension de GRAI : ECOGRAI. Exposée dans [Bitton 90], la méthode ECOGRAI se base sur le triplet **{objectif, mesure, variable}** afin de concevoir et d'implanter dans tous les centres de décision un système d'indicateurs de performance axés sur l'évaluation économique et cohérents avec l'arborescence des objectifs.

Les trois aspects fondamentaux de l'indicateur de performance participent activement au bon déroulement des actions menées par le centre de décision. L'objectif, provenant d'un niveau de décision supérieur, doit être atteint par le système conduit par le centre de décision. Pour cela, il dispose de points d'action (ou leviers, variables, degrés de liberté) sur le système

de production sur lesquels il agit en fonction de l'état et des performances du système rapportés par la mesure effectuée par l'indicateur. Les mesures sont faites uniquement après la prise de décision. Les indicateurs de performance ne sont utilisés que pour permettre de vérifier les résultats de la décision, c'est-à-dire pour s'assurer que la variable de décision choisie conduit aux résultats escomptés, puis pour déterminer l'état initial en vue d'une nouvelle décision.

Les différents concepts de la méthode GRAI tels que le centre de décision, le cadre de décision et son contenu, la hiérarchie pyramidale des objectifs ou l'utilisation d'indicateurs de performance comme outil d'aide à la décision, nous semblent tout à fait concorder avec notre problématique. Ce cadre général peut être enrichi, notamment au niveau de l'ordonnement.

II.3. Modélisation des indicateurs de performance

On trouve dans [Berrah 97] et [Berrah et al. 95] une proposition de modélisation de l'indicateur de performance. Le modèle intègre en trois facettes les différentes étapes de calcul de la performance (Figure 2.1) :

- la facette *objectif* concernant la formalisation de l'objectif : spécification du domaine d'analyse (univers du discours, qualitatif ou quantitatif) puis détermination de la valeur à atteindre,
- la facette *évaluation* concernant la mesure : acquisition puis évaluation par rapport à l'objectif,
- la facette *appréciation* concernant l'interprétation de la mesure par l'utilisateur : vérification de la validité de la mesure (conditions de la mesure) et remise en cause de l'objectif, en fonction des connaissances et de l'expertise de l'utilisateur.

Ce modèle n'est pas compatible avec la définition de l'indicateur de performance donnée au paragraphe précédent, dans la mesure où il propose d'intégrer l'évaluation de données qualitatives, alors que l'indicateur a été défini comme étant une donnée quantifiée. Cet aspect qualitatif, que l'on retrouve également au niveau de l'objectif associé, est un point intéressant des indicateurs, quoique très discuté. Bien que souvent ignoré par la recherche, il est très présent dans l'industrie où il est parfois difficile de formuler précisément l'objectif à atteindre. Ce modèle met ainsi en lumière un aspect important des indicateurs de performance. En outre, tout comme la méthode GRAI, il permet une remise en cause de l'objectif associé à l'indicateur, ce qui est une étape importante pour une bonne exploitation des indicateurs de performance.

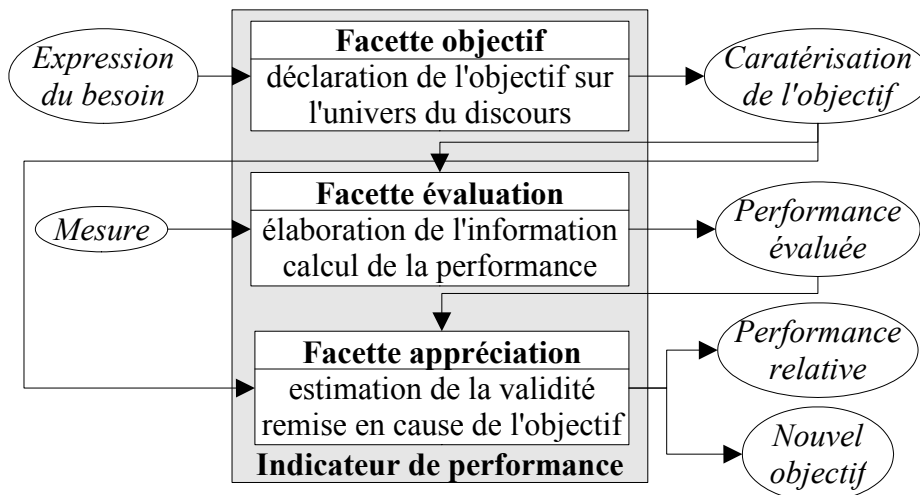


Figure 2.1 – Modèle d'indicateur de performance [Berrah et al. 95]

Les indicateurs de performance étant définis, caractérisés et modélisés, notre étude se consacre maintenant aux possibilités d'agrégation de ces indicateurs.

III. AGRÉGATION D'INDICATEURS

Ce paragraphe présente plusieurs techniques d'agrégation d'indicateurs qui peuvent correspondre à des méthodes d'analyse multicritère, à l'application d'un même indicateur sur des objets différents ou à la synthèse de plusieurs critères en un seul.

III.1. La décision multicritère

L'analyse multicritère consiste à choisir entre plusieurs solutions et en fonction de plusieurs critères celle qui semble la meilleure. Elle regroupe un ensemble de méthodes permettant d'agréger plusieurs critères d'évaluation afin de sélectionner une ou plusieurs actions [Sassine 98]. L'analyse multicritère a donc pour but d'aider à choisir entre plusieurs solutions ou plusieurs décisions possibles, suivant plusieurs critères, parfois contradictoires, en supposant d'éventuels compromis entre ces derniers.

Les spécialistes distinguent quatre approches d'analyse multicritère [Roy 85] :

- La programmation mathématique à objectifs multiples [Zeleny 82] : une action est représentée par un ensemble de variables réelles. L'ensemble des solutions possibles est défini par des contraintes linéaires. La solution choisie doit satisfaire les critères (numériques). Il existe trois approches de résolution : la recherche de solutions efficaces, la programmation des buts et la recherche du meilleur compromis.

- La théorie de l'utilité multiattribut [Zeleny 82] : extension de la théorie classique de l'utilité, cette méthode représente les préférences d'un individu au moyen d'une fonction d'utilité qui agrège plusieurs critères. La meilleure solution est celle maximisant cette fonction d'utilité.
- L'approche de surclassement de synthèse [Roy 68] : cette approche est la base de la méthode ELECTRE et de toute l'école française de décision multicritère. La relation de surclassement définit qu'une action en surclasse une autre s'il existe suffisamment de critères sur lesquels elle est mieux classée, et si les écarts sur les autres critères ne sont pas trop importants.
- L'approche de la désagrégation des préférences [Jacquet-Lagrèze et Siskos 83] : le but de la méthode est de pouvoir évaluer chaque action dans son ensemble, sans décomposition par critère. A chaque critère est associée une fonction d'utilité, la fonction d'utilité additive permet de faire une évaluation globale de l'action. Les alternatives évaluées appartiennent à un ensemble de référence.

A ces quatre approches on peut ajouter une approche issue des sciences politiques, sociales et économiques : la méthodologie AHP (Analytic Hierarchy Process) [Saaty 80]. Après avoir décomposé le problème en une structure hiérarchique, la méthode propose de comparer des paires d'alternatives par critère. A partir de ces comparaisons, on détermine les poids des critères et une agrégation permet d'obtenir une évaluation globale de chaque action possible.

Il est aussi possible de considérer l'approche de Pareto optimalité. Une solution est dite Pareto optimale si la valeur de n'importe quelle fonction objectif la caractérisant ne peut être améliorée sans dégrader au moins une des autres fonctions objectif [Chankong et Haimes 83]. La comparaison de deux solutions Pareto optimales est laissée à l'appréciation du décideur lui-même.

La décision multicritère comprend aussi la méthode la plus simple et la plus naturelle : la moyenne pondérée [Pomerol et Barba-Romero 93]. A chaque solution possible, on attribue une évaluation S définie par :

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} n \text{ est le nombre de critères,} \\ w_i \text{ est le poids du critère } i, \\ C_i \text{ est la valeur du critère } i \text{ pour la solution évaluée.} \end{array}$$

La meilleure solution est celle obtenant la plus forte (ou la plus faible) évaluation.

Toutes ces méthodes ont pour but de faciliter la détermination des différents poids à attribuer à chaque critère et la comparaison de toutes les solutions pour tous les critères. Elles

sont très utiles lorsqu'on a beaucoup de critères ou beaucoup de solutions possibles, lorsque les critères sont contradictoires ou dépendants. Mais le principal obstacle à leur utilisation reste la difficulté à déterminer l'importance de chaque critère par rapport aux autres.

La logique floue [Zadeh 65] a permis d'élargir la portée de la décision multicritère en la rapprochant davantage du raisonnement humain. Le concept d'objectifs ou contraintes flous introduit par [Bellman et Zadeh 70] dans le domaine de la décision multicritère a ouvert une voie totalement nouvelle pour des techniques de résolution de problèmes à critères multiples.

De nombreuses méthodologies ont vu le jour depuis (voir par exemple [Ribeiro 96] pour une revue complète), comme par exemple OWA (Ordered Weighted Average) [Yager 88]. L'auteur propose de :

1. Classer les critères à agréger par ordre décroissant.

Par exemple, le vecteur de critères $C = \{c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n\} = \{0.7, 1, 0.5, 0.6, 0.8\}$ pour la solution considérée, devient $C' = \{1, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5\} = \{c'_1, c'_2, \dots, c'_i, \dots, c'_n\}$.

2. Déterminer le vecteur représentant les poids : $W = \{w_1, \dots, w_i, \dots, w_n\}$ avec $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

3. Multiplier les deux vecteurs obtenus : $OWA(c_i, \dots, c_n) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot c'_i$

Trois cas classiques émergent aux limites :

- si $W = \{1, 0, \dots, 0\}$, l'opérateur OWA équivaut à l'opérateur maximum.
- Si $W = \{0, \dots, 0, 1\}$, on choisit cette fois-ci l'opérateur minimum.
- Si $W = \{1/n, \dots, 1/n\}$, on fait une moyenne arithmétique simple.

La particularité la plus intéressante des opérateurs OWA est qu'on n'attribue plus les poids à chaque critère, mais à un rang dans le vecteur ordonné des critères.

[Liang et Wang 91] proposent l'utilisation de la logique floue pour simplifier la définition des objectifs et la détermination des poids des critères. Ils proposent ainsi d'utiliser des variables linguistiques floues pour définir les objectifs non-quantitatifs (subjectifs) ainsi que les poids de tous les critères. Chaque alternative est « notée » par la moyenne pondérée des différents critères. Cette méthode permet de prendre en compte l'avis de plusieurs décideurs puisque la méthode propose en outre d'agréger les opinions (poids et valeurs des critères) de plusieurs personnes. Le principal avantage est bien entendu la possibilité d'appréhender des données non-quantitatives, tant au niveau des critères que des poids de ces critères, pouvant tous être définis par des variables linguistiques.

III.2. Agrégation d'indicateurs élémentaires

L'agrégation d'indicateurs élémentaires peut correspondre à deux notions :

- appliquer à plusieurs objets différents un même indicateur et dégager de cette application une information globale comme la moyenne des valeurs, le minimum... Cela permet d'obtenir des indicateurs du type « retard moyen des OF ».
- appliquer différents indicateurs élémentaires sur les mêmes objets et synthétiser ces informations en une seule donnée propre à ces objets. Cela permet par exemple de connaître le retard d'un OF par rapport à son temps de cycle. C'est ce type d'agrégation qui est utilisé par les entreprise dans [AIT 94].

Il est bien entendu possible de croiser ces deux types d'agrégation, en appliquant à plusieurs objets la synthèse de plusieurs indicateurs élémentaires ou en synthétisant plusieurs indicateurs appliqués à plusieurs objets. On peut ainsi obtenir par exemple le retard minimum des OF par rapport à leur temps de cycle ou calculer le retard moyen par priorité...

Les indicateurs de performances, qu'ils soient élémentaires ou agrégés, sont des outils d'aide à la décision importants et répandus dans l'industrie.

IV. UTILISATION DES INDICATEURS DE PERFORMANCE

IV.1. Typologies des indicateurs

Les indicateurs de performance sont beaucoup étudiés du fait d'une importante utilisation industrielle, conduisant ainsi à un grand nombre de propositions de typologies. Le Tableau 2.1 résume quelques unes des typologies parmi les plus courantes.

Tableau 2.1 – Les différentes typologies des indicateurs de performances

Critère de classification	Indicateurs	Auteurs
Niveau hiérarchique décisionnel	<ul style="list-style-type: none">– stratégiques pour des résultats financiers,– tactiques pour la compétitivité de l'entreprise,– opérationnels pour la productivité de l'entreprise,	[Greif 89] [Jacot et Micaelli 96] [Berrah et Haurat 99]

Critère de classification	Indicateurs	Auteurs
Position par rapport à l'action	<ul style="list-style-type: none"> - de résultats ou de succès pour vérifier des performances du système, - de processus pour suivre l'évolution du système, 	<p>[Berrah 97] [Berrah et Haurat 99]</p>
Logique des objectifs	<ul style="list-style-type: none"> - de progrès pour suivre l'amélioration du système, - de maîtrise pour maintenir les performances du système, 	<p>[Berrah 97] [Berrah et Haurat 99]</p>
Pouvoir de décision de l'utilisateur	<ul style="list-style-type: none"> - de reporting pour rendre au compte à la hiérarchie supérieure, - de pilotage pour une utilisation par l'utilisateur uniquement, 	<p>[Berrah 97] [Berrah et Haurat 99]</p>
Nombre de variables d'action	<ul style="list-style-type: none"> - simples si une seule variable d'action est associée, - complexes s'ils comportent plusieurs variables d'action, 	<p>[Berrah 97] [Berrah et Haurat 99]</p>
Avenir	<ul style="list-style-type: none"> - immédiats pour suivre l'évolution du système, - de création de potentiel si les actions engendrées vont augmenter les performances à long terme, 	<p>[Savall et Zardet 89]</p>
Provenance des mesures	<ul style="list-style-type: none"> - à mesures endogènes, uniquement internes au système évalué - à mesures exogènes, sur l'environnement du système. 	<p>[Zülch et al. 94]</p>

Tous ces types d'indicateurs de performance mettent en lumière les multiples utilisations qui peuvent en être faites. Il est bien évident qu'un même indicateur peut appartenir à plusieurs classes à la fois, suivant les critères choisis. Par exemple, un indicateur de pilotage est en général un indicateur de processus, et les mesures effectuées pour le calculer sont en général endogènes. Déterminer les différentes classes auxquelles un indicateur appartient est un élément important. En effet, un indicateur est spécifié par ses trois facettes définies précédemment, mais cette description est interne à l'indicateur, et ne suffit pas à son exploitation. Des spécificités apparaissent suivant le type d'indicateur, et il est important de disposer de ces informations afin de pouvoir exploiter correctement l'indicateur construit [Berrah 97].

IV.2. Quelle utilisation industrielle des indicateurs de performance ?

Les indicateurs de performance sont des outils relativement répandus dans l'industrie.

De nombreuses études ont été menées afin de mieux connaître l'état de l'évaluation des performances dans le monde industriel et d'identifier les besoins réels et les principaux problèmes des entreprises dans ce domaine. L'une d'entre elles, menée il y a une quinzaine d'années aux Etats-Unis, avait conclu à un fort taux d'insatisfaction : près de 60% des compagnies interrogées se révélaient mécontentes de leur système d'évaluation des performances, qui n'était plus adapté à l'environnement industriel [Howell et Soucy 87]. Ce constat d'insatisfaction est toujours fréquemment rencontré, comme en témoignent d'autres études plus récentes.

Dans [Laakso et Karjalainen 94], les auteurs, répondant à la pression de l'industrie sur le gouvernement, ont enquêté sur l'état de l'évaluation des performances et sur les améliorations possibles et souhaitées dans le monde industriel finlandais. Leur étude leur a permis de constater un décalage important entre les domaines où une amélioration des performances serait utile et les différentes zones proposées pour appliquer des indicateurs de performance. Ils ont par exemple noté une forte demande d'augmentation de la satisfaction des clients, mais aucun indicateur ne permettant de la mesurer ou même de s'enquérir de leur besoin. Un autre point important est apparu lors de leur enquête : ils ont en effet constaté que la plupart des indicateurs demandés ou utilisés par les industriels concernaient les résultats et non les causes des problèmes.

On trouve dans [Gelders et al. 94] une étude effectuée au sein d'une trentaine d'entreprises belges et s'articulant autour de trois points : la stratégie de la compagnie, les mesures de performances dans l'entreprise et les projets d'améliorations de la production. De leur enquête, il apparaît que les objectifs stratégiques des entreprises sont très orientés sur la qualité, du produit principalement, mais aussi du service. On note aussi que les indicateurs de performance traditionnels, essentiellement axés sur la mesure des coûts et l'atteinte d'objectifs stratégiques, ne sont plus adaptés aux entreprises, qui souhaitent pouvoir évaluer leurs performances à tous les niveaux hiérarchiques et de plusieurs façons. Cette étude des indicateurs a fait apparaître les points suivants :

- les indicateurs internes au système de production concernent plutôt des mesures de stocks (en-cours, matières premières...), de qualité et de temps de livraison. Alors que la qualité, objectif majeur, se trouve mesurée, les indicateurs liés au temps (retard, délais...) sont plutôt absents,
- le seul indicateur cohérent avec la stratégie de l'entreprise qui soit utilisé dans l'atelier concerne la qualité.

L'élément le plus important de cette enquête semble être le manque de cohérence entre

les objectifs de l'entreprise, les différents indicateurs de performance mis en place et les projets d'améliorations en cours ou planifiés.

Le consortium AIT (Advanced Information Technology in design and manufacturing) dans le cadre du projet européen ESPRIT 7704, a effectué un état de l'art sur l'évaluation des performances dans les cinq compagnies partenaires du projet [AIT 94]. Le consortium distingue deux types d'indicateurs utilisés dans les entreprises :

- les indicateurs ex-ante mesurent la cohérence des décisions prises avec les objectifs globaux de la compagnie (indicateurs de reporting dans la classification de [Berrah 97]),
- les indicateurs ex-post vérifient et contrôlent la cohérence des activités avec les objectifs de production (indicateurs de pilotage dans la classification de [Berrah 97]).

Les auteurs ont constaté que, quel que soit le type d'indicateurs utilisé, on trouve systématiquement une organisation hiérarchique des indicateurs sous forme d'arbres, ces arbres réalisant essentiellement une agrégation additive des indicateurs les composant. Cette agrégation permet de synthétiser de plus en plus les informations au fur et à mesure que l'on s'élève dans la hiérarchie de l'entreprise.

Trois grands domaines d'indicateurs sont identifiés : les indicateurs de qualité, les indicateurs du processus de fabrication et les indicateurs économiques. Le deuxième domaine est, pour nous, le plus intéressant, puisqu'il s'intéresse au processus de fabrication lui-même, et tout particulièrement à son organisation. Les entreprises partenaires du projet utilisent des indicateurs afin de connaître l'efficacité des opérateurs, c'est-à-dire leur rendement par rapport aux heures travaillées, aux pauses, au chômage technique... Le rapport [AIT 94] traite aussi des performances de l'ordonnancement, notamment au niveau du temps de cycle et du retard des OF, ainsi que du taux d'utilisation des machines. Cette utilisation des indicateurs de performance au niveau de l'ordonnancement a pour buts d'optimiser l'utilisation des ressources et la planification de la capacité, d'augmenter la réactivité sur les pannes, de maîtriser l'en-cours et d'améliorer la flexibilité du système de production. Il a également été constaté que, afin de mieux maîtriser ces objectifs, l'utilisateur intervient régulièrement sur l'ordonnancement.

L'aspect hiérarchisation des objectifs (et des indicateurs) constaté par le consortium AIT met en lumière la différenciation faite entre les indicateurs dits « élémentaires », c'est-à-dire utilisant des données brutes et de bas niveau, et les indicateurs dits « relatifs » (agrégés ou synthétiques), combinant différentes informations pour les rendre plus aisément interprétables. L'agrégation des indicateurs est donc un élément important de la construction d'un tableau de

bord.

Les indicateurs de performance de tous types, élémentaires ou agrégés, sont en général représentés sur tableaux de bord, objets du paragraphe suivant.

V. LE TABLEAU DE BORD

V.1. Généralités

V.1.1. Définition et fonctions

Un **tableau de bord** est un instrument de synthèse et de visualisation des indicateurs nécessaires à l'évaluation de la situation considérée, suggérant des actions possibles, correctrices ou non [Fernandez 00] [Cerutti et Gattino 92]. Un tableau de bord est construit et organisé par la personne en charge de la conduite d'un système pour l'aider à atteindre les objectifs du système qu'il contrôle [Savall et Zardet 89], le système pouvant correspondre à une unité de pilotage quelconque, un processus, un projet, une fonction, un produit... Les mesures effectuées à l'aide des différents indicateurs présents sur le tableau de bord permettent à l'utilisateur d'évaluer la sortie du système qu'il pilote afin de prendre des décisions. Ces décisions peuvent conduire à des actions diverses : actions correctrices, pas d'action, améliorations, innovations...

Les principales fonctions d'un tableau de bord sont [Selmer 99] :

- synthétiser les informations propres à l'utilisateur du tableau de bord,
- évaluer les performances (de l'entreprise, de la cellule considérée, d'un produit, de l'utilisateur lui-même...),
- proposer des actions en fonction des performances.

Le tableau de bord permet l'évaluation des différents indicateurs qui le composent et son utilisateur peut ainsi connaître en partie l'état du système qu'il gère. C'est en fonction de cette connaissance que l'utilisateur peut prendre des décisions et agir sur le système ou non. Un tableau de bord étant un outil d'aide à la décision pour son utilisateur, une réactualisation régulière est souhaitable afin de rendre compte des effets des actions entreprises [Chartier-Kastler 97]. La réactualisation du tableau de bord se fait généralement à chaque période si la décision est périodique ou plus fréquemment si des décisions doivent être prises à l'apparition d'un événement (aléas, dérive...).

V.1.2. Positionnement des tableaux de bord dans le système de décision

Nous avons vu précédemment que le système décisionnel qui commande le système de production peut être découpé hiérarchiquement en plusieurs niveaux, suivant l'horizon (ou la période dans la méthode GRAI) des décisions prises : niveaux stratégique pour le long terme, tactique pour le moyen terme et opérationnel pour le court terme. Les tableaux de bord réalisant une aide à la décision peuvent être eux aussi déclinés suivant ces niveaux de décision [Berrah 97] :

- tableaux de bord stratégiques : ils donnent une vision globale des résultats de l'entreprise, en exprimant des indicateurs tels que la trésorerie, les variations de stocks... avec une période assez importante.
- tableaux de bord tactiques : ils mesurent principalement la performance des activités des processus ou des produits étudiés.
- tableaux de bord opérationnels : ils participent au pilotage à court terme des activités. Les indicateurs qui les constituent induisent des actions immédiates.

Quel que soit le niveau décisionnel considéré, le tableau de bord correspondant devrait être adapté aux différentes décisions qui y sont prises : il relève d'un centre de décision au sens GRAI (voir chapitre 1 § II.2.2). Ainsi, les indicateurs d'un tableau de bord stratégique fournissent des informations destinées à une utilisation à long terme, alors qu'au niveau tactique, les données mesurées ont une influence à moyen terme. Au niveau opérationnel, les différents indicateurs conduisent à des actions à court terme, voire immédiates. C'est à ce niveau que se situent les tableaux de bord de notre étude, l'ordonnancement étant un fonction à court terme, de faible période.

V.2. Méthodologie de construction

V.2.1. Principes

Un tableau de bord est un outil personnel, c'est-à-dire qu'il devrait être construit par le responsable du système à évaluer en fonction des besoins de ce système et des différentes informations dont il a besoin pour prendre des décisions (son cadre de décision). La littérature propose plusieurs méthodes de construction de tableaux de bord, d'où ressortent quelques étapes essentielles :

- étudier le système à évaluer, le modéliser,
- définir les objectifs assignés au système,

- recenser tous les indicateurs correspondant aux objectifs précédemment définis,
- choisir les indicateurs les plus pertinents et les éventuelles agrégations,
- construire le tableau de bord.

V.2.2. Etude du système à évaluer et de son environnement

Cette première phase consiste à déterminer précisément le système sur lequel va porter l'évaluation, ses frontières exactes. On définit clairement ce qui appartient au système et à son environnement, d'où viennent et quels sont les objectifs à remplir, sur quoi agit le système... Cette première phase correspond dans la méthode ECOGRAI à une phase de modélisation du système sous forme de grille GRAI.

Notre étude portant sur l'utilisation des tableaux de bord en tant qu'outil d'aide à l'ordonnancement, le système sur lequel va porter l'évaluation n'est pas simplement le système de production. Il s'agit de l'ordonnancement lui-même et des éléments de l'atelier qu'il contrôle et qu'il organise. Son environnement est constitué des services de l'entreprise qui ont une influence sur l'ordonnancement, comme par exemple le service commercial qui lui transmet les commandes des clients avec plus ou moins de précision ou le service achats qui négocie les délais d'approvisionnement en composants.

L'étape suivante de la construction d'un tableau de bord est la détermination des différents objectifs assignés au système évalué.

V.2.3. Définition des objectifs

Les objectifs sont déterminés en fonction de la stratégie globale de l'entreprise, par décomposition. Le niveau hiérarchique supérieur transmet au concepteur du tableau de bord les objectifs qu'il doit décomposer en sous-objectifs plus détaillés.

La définition des différents objectifs assignés à un ordonnancement peut se révéler une opération délicate. Il faut en effet veiller à identifier des objectifs propres à l'ordonnancement lui-même et non fixer des performances dépendant uniquement du système de production. Par exemple, un objectif que peut atteindre un ordonnancement est de maximiser le taux d'utilisation des différentes ressources sur lesquelles il planifie des tâches. Cet objectif s'applique à des objets contrôlés par le système évalué (l'ordonnancement). A l'inverse, un objectif tel que minimiser le taux de rebut, s'il s'applique aux mêmes objets, n'est pas de la responsabilité de l'ordonnancement.

Après avoir déterminé les objectifs assignés au système évalué, il faut alors les convertir

en indicateurs de performance.

V.2.4. Recensement des indicateurs

La phase suivante de la construction d'un tableau de bord est de recenser, en fonction des objectifs définis précédemment, les différents indicateurs de performance susceptibles de figurer sur le tableau de bord. L'objectif est ce que l'on veut atteindre et l'indicateur est la mesure à effectuer pour pouvoir constater l'écart entre l'état souhaité et l'état réel. Dans la méthode ECOGRAI, cette phase est complétée par une étape de détermination des variables de décision à associer aux différents indicateurs.

On obtient une liste d'indicateurs susceptibles de figurer sur le tableau de bord, qu'il faut trier pour ne conserver que les plus pertinents.

V.2.5. Choix des indicateurs

L'étape suivante de la construction d'un tableau de bord est le tri des indicateurs :

- on sélectionne ceux que l'on souhaite porter sur le tableau de bord,
- on élimine les redondances,
- on décide de certaines agrégations.

La méthode ECOGRAI propose pour cette phase là de former les triplets {objectifs, indicateurs de performance, variables de décision} et de vérifier la cohérence entre ces trois éléments.

V.2.6. Construction des tableaux de bord

Lorsque tous les indicateurs qui vont composer le ou les tableaux de bord sont choisis, il faut construire le tableau de bord, c'est-à-dire déterminer de quelle manière vont être représentés les différents indicateurs, puis organiser visuellement le tableau de bord.

Pour construire des tableaux de bord, différents outils d'analyse de données existent.

V.3. Les systèmes d'information orientés décision

Des outils et des techniques permettant d'extraire et de mettre en forme des données à des fins décisionnelles sont présentés ici, afin de pouvoir appréhender les outils d'analyse de données qu'ils proposent.

V.3.1. Définitions

Ces outils et ces techniques sont issus des sciences informatiques, c'est pourquoi le vocabulaire employé dans ce contexte est souvent différent des appellations usuelles en productique. Un **système décisionnel** est ici un système d'information dédié aux applications décisionnelles [Teste 00]. Ce terme ne désigne donc pas ici la même notion que les systèmes de décision étudiés au chapitre 1. Il sera néanmoins conservé dans cette partie.

Ces systèmes sont composés de quatre éléments essentiels : les sources de données, l'entrepôt de données, les magasins de données et les outils d'analyse [Teste 00]. La Figure 2.2 montre l'architecture de ces systèmes décisionnels et l'enchaînement de leurs composants.

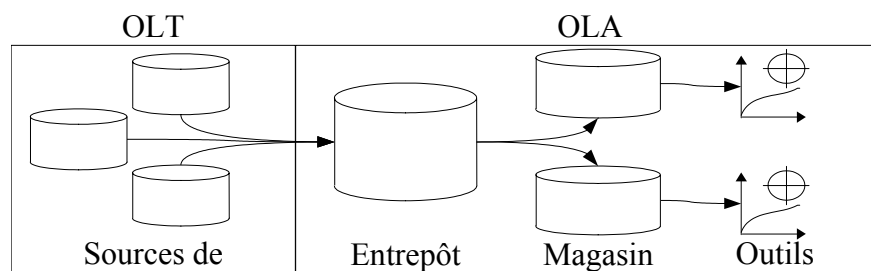


Figure 2.2 – Architecture des systèmes décisionnels

Les sources de données sont nombreuses, variées, distribuées et autonomes. Elles peuvent être internes ou externes à l'entreprise. L'entrepôt de données (ou « data warehouse ») est le lieu de stockage central des informations utiles aux décideurs, qui regroupe les données provenant des différentes sources de manière à les homogénéiser et à pouvoir les réutiliser. Les magasins de données (ou « data mart ») sont des extraits des entrepôts dépendant du sujet traité par le décideur. Les données y sont organisées d'une façon particulière, appelée modélisation multidimensionnelle, qui facilite le raisonnement du décideur (voir par exemple [Teste 00]). Les outils d'analyse permettent de manipuler les données suivant les besoins des décideurs qui les visualisent au travers d'interfaces interactives.

Ces différents éléments font partie de deux processus différents :

- le processus transactionnel en ligne OLTP (On-Line Transactional Processing) qui gère les données dans les sources de données. Les utilisateurs sont nombreux et ont accès par ces processus à peu d'informations, directement dans les sources de données.
- le processus analytique en ligne OLAP (On-Line Analytical Processing) qui permet d'analyser les données. Les décideurs y ont recours pour avoir accès à toutes sortes d'informations dans des bases variées.

En fin de chaîne des systèmes décisionnels, on trouve les outils d'analyse des données ; c'est là que se placent les tableaux de bord.

V.3.2. Outils de gestion des données à des fins décisionnelles

On trouve de nombreux outils qui permettent de construire facilement des requêtes SQL et des analyses multidimensionnelles. On peut citer parmi les outils les plus utilisés : Business Objects [Business Objects 01], PowerPlay [Cognos 01] ou Crystal Analysis [Crystal 01]. Ils sont tous trois basés sur le principe d'extraction d'une base multidimensionnelle ou d'un cube à partir d'une ou plusieurs bases de données relationnelles. L'extraction des données se fait simplement par un glisser-déposer qui crée automatiquement les requêtes. Ces outils proposent aussi des fonctionnalités de visualisation et de manipulation des données très conviviales et interactives. Il faut noter que ce sont uniquement des logiciels d'analyse des données et qu'ils ne permettent absolument pas de créer des entrepôts ou des magasins de données.

Quelques logiciels offrent de construire des entrepôts ou des magasins de données, comme par exemple Oracle Express Server, Microsoft SQL Server 7, MicroStrategy DSS Server, ... Ils proposent en général une analyse dimensionnelle et l'accès à un grand nombre de sources de données de tous types (relationnelles, fichiers, ...). Ils présentent toutefois des limites comme la difficulté de définition du schéma du cube de l'analyse multidimensionnelle ou l'absence de différenciation entre entrepôts et magasins de données [Teste 00].

V.3.3. Remarques

Les outils étudiés semblent largement disproportionnés par rapport au volume de données manipulées dans le cadre d'un ordonnancement, ou même globalement dans une PME. La réalisation d'un entrepôt de données peut sembler inutile lorsque la quantité d'informations disponible dans l'entreprise reste raisonnable, c'est-à-dire lorsque l'utilisateur (dans notre cas le gestionnaire d'atelier) parvient à gérer ces données sans une assistance informatique aussi poussée. Les PME ne disposant pas non plus d'une multitude de services différents, ayant chacun leur source de données, les outils de concentration des données ne sont pas nécessairement intéressants. Dans le cadre de notre étude sur des tableaux de bord aidant à évaluer et améliorer des ordonnancements, il ne nous semble pas utile de construire un système décisionnel important, dans la mesure où les informations d'un ordonnancement sont rapidement accessibles, puisque stockées dans une base de données locale.

VI. CONCLUSION

Nous envisageons dans notre approche de l'ordonnancement interactif (voir chapitre 1, § IV.2.3), d'aider à la réalisation d'un ordonnancement le plus satisfaisant possible en utilisant notamment des tableaux de bord. Ces tableaux de bord ont pour but de guider la personne en charge de l'ordonnancement vers une solution correcte, grâce aux informations données par les différents indicateurs composant le tableau de bord. Au cours de ce chapitre, nous avons passé en revue les différents concepts, techniques et outils nécessaires à notre approche de l'ordonnancement interactif. Nous avons dans un premier temps présenté les indicateurs de performance : définition, modélisation, classifications, utilisations dans l'industrie et techniques d'agrégation possibles. Ces indicateurs sont en général visualisés sur des tableaux de bord que nous avons ensuite définis. Une méthode de construction de tableaux de bord est présentée, avant de terminer ce chapitre par une brève revue des outils spécialisés dans l'extraction et la présentation de données à des fins décisionnelles.

Nous proposerons dans le chapitre suivant une nouvelle classification et une nouvelle définition des indicateurs afin de les positionner comme une véritable aide à l'ordonnancement. Ces types d'indicateurs seront adaptés au processus décisionnel qui conduit à accepter ou rejeter un ordonnancement, ce processus étant préalablement rappelé. Des indicateurs spécifiques, répondant aux besoins des personnes réalisant les ordonnancements, seront finalement présentés.

*- Chapitre 3 - Propositions
d'indicateurs pour l'ordonnancement*

Chapitre 3 – Propositions d'indicateurs pour l'ordonnancement

I. INTRODUCTION

Comme nous l'avons vu au chapitre 1, les outils d'ordonnancement s'adaptent peu aux spécificités de chaque atelier et, lorsqu'ils tentent d'impliquer l'utilisateur dans le processus de résolution, ils fournissent rarement une aide pour cela. Des approches coopératives et interactives permettent au gestionnaire d'atelier de mieux maîtriser l'ordonnancement, mais elles nécessitent de sa part une bonne connaissance de la méthode de résolution employée. Nous proposons une approche d'ordonnancement interactif qui utilise des indicateurs et des tableaux de bord (étudiés au chapitre 2), dans le but de permettre à l'utilisateur d'améliorer plus rapidement et plus facilement son ordonnancement. Dans un premier temps, nous allons présenter les différents types d'indicateurs utiles pour un ordonnancement interactif, en les positionnant dans le processus de prise de décision et dans le processus d'ordonnancement. Les fonctionnalités, les caractéristiques et les composantes des types d'indicateurs sont ensuite détaillées dans la deuxième partie de ce chapitre. La troisième partie présente un panorama des mises en œuvre possibles des différents types d'indicateurs proposés, en précisant notamment deux modes de traitement particuliers sur la gestion de l'incertitude des commandes et la gestion des opérateurs de production.

II. DÉCISION, ORDONNANCEMENT ET INDICATEURS

II.1. *Processus de prise de décision*

La réalisation d'un ordonnancement, et plus particulièrement dans le cas d'un ordonnancement interactif, fait appel à une succession de prises de décision, chacune de ces décisions pouvant être composée de plusieurs étapes.

Un modèle de processus de prise de décision, basé sur celui de H.A. Simon ([Simon

77]), est présenté Figure 3.1.

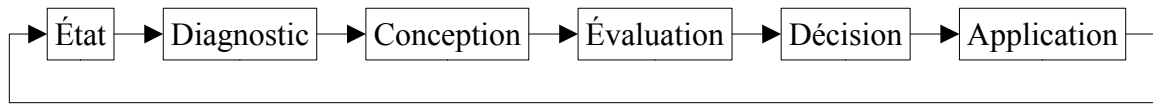


Figure 3.1 – Le processus décisionnel

La première étape consiste à observer le système et à détecter d'éventuels problèmes ou dysfonctionnements (déclenchement de la décision). Une fois le besoin en décision détecté, on cherche à déterminer quelles sont les causes du problème. La phase suivante du processus est la recherche d'un ensemble de solutions possibles. Ces propositions d'actions sont ensuite évaluées en fonction de critères divers afin de déterminer quelles vont être les décisions mises en œuvre lors de la dernière étape. Le processus boucle alors sur la première phase, afin de déterminer si l'application des actions choisies donne satisfaction, si de nouveaux problèmes sont apparus ou si les anciens problèmes ne sont toujours pas résolus.

II.2. Processus de prise de décision et indicateurs

Les décisions d'ordonnancement peuvent être déclinées selon le processus précédemment décrit. En raison du caractère particulier de l'ordonnancement, une assistance est nécessaire afin de guider l'utilisateur dans ce processus. Cette aide passe, selon nous, par l'utilisation de différents types d'indicateurs qui vont apporter les informations utiles à chaque phase de la prise de décision. Ces indicateurs sont présentés sur la Figure 3.2.

Lors de la phase de détection de problème, les indicateurs de performance renseignent sur d'éventuels dysfonctionnements, des divergences par rapport aux objectifs, etc. Les indicateurs de contexte donnent des informations générales sur le contexte de décision, l'état général du système. Les indicateurs de diagnostic aident à identifier les causes d'un problème. Lors de la phase de conception des actions à entreprendre, des indicateurs d'action renseignent le décideur sur des informations spécifiques liées à certains types d'actions envisagées afin de le guider vers les décisions les plus adéquates. Pour évaluer l'impact des différentes actions possibles, le décideur dispose à nouveau des indicateurs de performance. Ces différents types d'indicateurs seront détaillés dans la suite du chapitre.

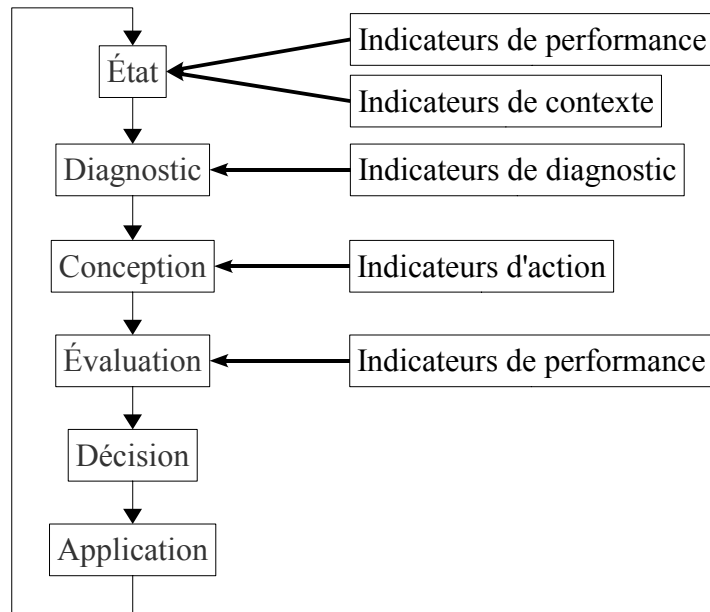


Figure 3.2 - Indicateurs d'aide à la décision

II.3. Ordonnancement interactif et indicateurs

Dans l'approche interactive proposée au chapitre 1 § IV.2.3, le logiciel d'ordonnancement et son utilisateur interviennent en alternance dans la résolution pour aboutir ensemble à une solution la plus satisfaisante possible par rapport aux objectifs fixés par les centres de décisions supérieurs de l'entreprise. Selon nous, le logiciel doit aider l'utilisateur dans ses décisions et ses actions grâce à la visualisation de différents indicateurs sur des tableaux de bord. La place de ces indicateurs dans l'ordonnancement interactif est présentée Figure 3.3. La boucle de retour présentée ici est légèrement différente de celle proposée dans la Figure 1.8, dans le chapitre 1. En effet, l'identification précise des indicateurs utiles à un ordonnancement interactif nous a conduit à différencier les indicateurs utilisés lors d'un premier ordonnancement (indicateurs de contexte et d'action, décrivant les données d'entrée) de ceux intervenant dans la boucle de retour (tous les indicateurs).

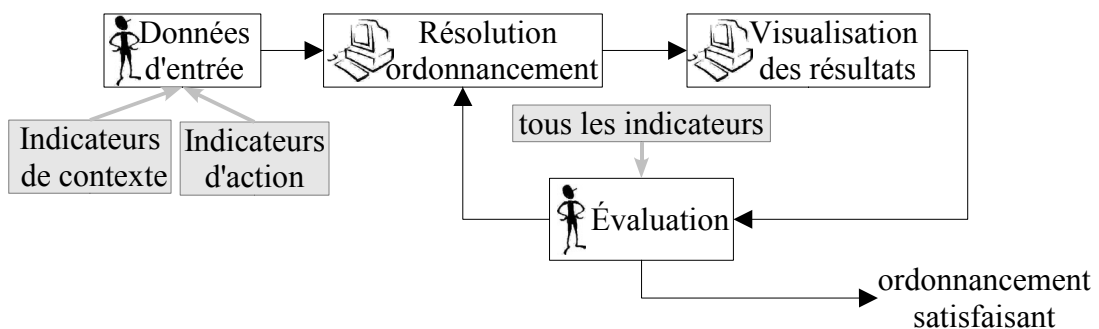


Figure 3.3 – Les indicateurs dans l'ordonnancement interactif

L'évaluation proposée en sortie du processus d'ordonnancement reproduit tout le processus de décision décrit précédemment : l'évaluation des performances de l'ordonnancement obtenu et, si celles-ci sont insuffisantes, le diagnostic, la recherche de solutions et l'évaluation de ces solutions. Ces étapes sont bien entendu accompagnées des indicateurs correspondants. En début d'ordonnancement, c'est-à-dire avant les boucles successives d'amélioration, le gestionnaire d'atelier peut utiliser des indicateurs de contexte et d'action pour ne pas avoir de solution trop mauvaise au départ.

Les rôles et les spécificités des types d'indicateurs proposés sont détaillés dans la partie suivante.

III. TYPES D'INDICATEURS PROPOSÉS

III.1. Indicateurs de contexte

Les **indicateurs de contexte** permettent de faire un constat global sur l'état du système. Ils ne sont associés à aucun objectif et ne mesurent donc pas d'écart et de performance, de dysfonctionnement ou d'éloignement des objectifs. Ils n'engendrent pas d'action particulière. Lors d'un ordonnancement périodique par exemple, il peut être intéressant de connaître l'état global de l'atelier en terme de taux d'occupation et de niveaux de stocks, sans pour autant souhaiter augmenter ou diminuer ceux-ci. Il peut aussi être utile d'avoir des renseignements sur les temps de livraison des fournisseurs même si l'on n'a pas d'influence dessus.

Un indicateur de contexte comprend simplement une *mesure*, une information quantitative ou qualitative. Dans [Berrah 97], l'auteur recense cinq expressions de l'information :

- une expression numérique, certaine et précise que l'on mesure directement,
- une expression numérique incertaine et précise que l'on peut traiter par une approche probabiliste,
- une expression certaine et imprécise que l'on peut gérer par des calculs d'erreurs,
- une expression incertaine et imprécise qui peut être traitée grâce à la théorie des possibilités [Zadeh 78],
- une expression linguistique qui pourra être mesurée grâce à des variables linguistiques [Zadeh 75].

Les indicateurs de contexte, dans le cadre d'un ordonnancement, sont généralement

basés sur des données provenant de la base de données de l'ordonnancement. Ces données seront donc en général numériques, précises et certaines. Néanmoins, comme nous l'avons évoqué lors du chapitre 2, certaines méthodes de résolution d'ordonnancement permettent de prendre en compte des données imprécises, notamment grâce à l'utilisation de la logique floue.

III.2. Indicateurs de diagnostic

Si le processus d'ordonnancement est déclenché par la détection d'un problème, il faut en déterminer les causes. Les **indicateurs de diagnostic** ont pour but de mieux cerner le problème, d'identifier ses causes et d'éliminer certaines possibilités de résolution inefficaces. Ces indicateurs concernent essentiellement les processus de décision déclenchés sur événement. Ils peuvent néanmoins être utilisés par le décideur lors d'ordonnements périodiques pour prévenir des dysfonctionnements ou des dérives récurrents.

On peut avoir différentes approches pour identifier les causes d'un problème :

- visualisation de toutes les données relatives à l'objet sur lequel est apparu le problème. Par exemple, si l'on détecte un fort niveau d'en-cours dans une cellule de fabrication, on s'intéresse aux taux d'occupation des machines de la cellule, aux taux de pannes, aux temps d'usinage, etc.
- utilisation d'outils plus complexes, orientés diagnostic, tels que des diagrammes d'Ishikawa, des analyses AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité, normes AFNOR 60-510 et CEI 812-1985), des systèmes experts...

La mise en œuvre d'un système d'aide au diagnostic utilisant des méthodes assez complexes, n'est pas l'objet de notre travail. Les indicateurs de diagnostic ont simplement pour but de renseigner le gestionnaire d'atelier sur les causes principales des problèmes courants en ordonnancement, et non de faire une analyse complète de toutes les causes d'un problème.

III.3. Indicateurs d'action

III.3.1. Généralités

Dans un processus de prise de décision, l'étape suivante consiste à déterminer, en fonction du problème identifié et de ses causes (ou du constat effectué sur le système dans le cas d'une décision périodique), les différentes possibilités de résolution ou d'action qui se présentent. Pour différencier les actions envisageables de celles qui semblent moins

pertinentes ou pour donner des pistes au décideur vers les solutions satisfaisantes, nous proposons d'utiliser des « **indicateurs d'action** ».

Ces indicateurs permettent de visualiser des informations, plus ou moins agrégées et mises en forme, qui vont renseigner le décideur sur la pertinence des points d'action possibles. Ils doivent permettre en effet de discriminer les actions totalement impossibles à mettre en œuvre, les actions qui n'auront pas d'effet significatif sur le système et les actions envisageables. Il revient ensuite au gestionnaire d'atelier de décider, en fonction des indications données, des actions qui vont réellement pouvoir augmenter les performances de l'ordonnement. Pour être capable de déterminer, par rapport aux données visualisées, si les performances vont être améliorées, l'utilisateur dispose de sa propre expertise, acquise par sa gestion quotidienne de l'atelier et au fur et à mesure de ses élaborations d'ordonnements.

Un indicateur d'action est plus qu'une simple mesure, il est lié à l'action qu'il peut engendrer. Il est donc composé de :

- une *mesure* (l'indicateur lui-même),
- une *action* (utilisation du degré de liberté qu'il évalue).

La mesure peut avoir une des cinq expressions identifiées au paragraphe III.1 ; l'action est liée au degré de liberté dont la pertinence de l'utilisation est évaluée. Ces deux composantes doivent être impérativement définies avant toute utilisation d'un indicateur d'action (il faut savoir sur quoi on envisage d'agir avant de savoir si cette action sera concluante). La nature de ces deux composantes entraîne plusieurs catégories d'indicateurs d'action possibles.

III.3.2. Existence des degrés de liberté

Pour résoudre un problème ou améliorer les performances de l'ordonnement, l'utilisateur peut disposer de différents points d'action parmi ceux évoqués au chapitre 1, § V. Ces points d'action sont liés à des degrés de liberté, comme des ressources alternatives, des gammes de remplacement, etc. Il est aussi possible que le degré de liberté correspondant à un point d'action n'existe pas (absence de phase de remplacement, sous-traitant surchargé...). Il est dans ce cas intéressant de pouvoir visualiser l'existence du degré de liberté par un simple indicateur d'action binaire.

On peut aussi s'intéresser à la visualisation de l'état d'un degré de liberté par rapport à l'ensemble de l'atelier, comme par exemple le pourcentage de phases possédant une phase de remplacement ou le pourcentage d'OF possédant une gamme alternative. Par exemple, le

gestionnaire d'atelier peut souhaiter savoir s'il sera possible, en cas de surcharge de certaines ressources, de délester ces machines par des ressources de remplacement. Dans ce cas, il pourra regarder le pourcentage de ressources disposant de ressources de remplacement.

III.3.3. Distributions

Le gestionnaire d'atelier peut aussi souhaiter connaître la répartition des OF ou des ressources par rapport à certains critères. Par exemple, s'il envisage d'utiliser une règle de gestion de conflit sur la priorité des OF ou de jouer sur la priorité des OF pour réguler le flux de pièces sur certaines ressources critiques, il est important pour lui de connaître la répartition des OF par priorité. En effet, s'il souhaite augmenter la priorité d'un OF pour que celui-ci ait moins d'attente devant les machines, son action n'aura un effet significatif que s'il est en compétition avec des OF ayant une priorité plus faible.

III.3.4. Robustesse des points d'action

Si les degrés de liberté existent et si leur utilisation semble intéressante, le gestionnaire d'atelier peut souhaiter savoir si les actions qu'il compte entreprendre vont être robustes ou non, c'est-à-dire si les solutions envisagées ne sont pas trop sensibles aux problèmes. En effet, si plusieurs degrés de liberté sont envisageables, il peut souhaiter savoir quel est celui qui aboutira à une solution d'ordonnancement robuste et peu sensible aux aléas de production telles que les pannes et les rebuts. De tels indicateurs vont donc surtout servir à « départager » plusieurs actions envisagées.

Par exemple, après un ordonnancement par gestion des files d'attente, un OF se trouve très en retard. Pour diminuer ce retard, le gestionnaire d'atelier, après avoir visualisé plusieurs indicateurs d'action sur les degrés de liberté relatifs à cet OF et aux ressources qu'il mobilise, hésite entre deux actions pouvant aboutir à une amélioration significative : augmenter la priorité de l'OF ou utiliser une gamme alternative. Connaître la fiabilité des ressources concernées par les deux gammes peut l'aider à décider quelle action entreprendre, en lui indiquant la solution qui ne risque pas d'être rapidement remise en question.

III.4. Indicateurs de performance

Les indicateurs qui permettent de juger un ordonnancement en fonction des objectifs de l'entreprise sont les **indicateurs de performance**. Tels qu'ils ont été définis au chapitre

précédent, ils ont pour fonction principale de mesurer l'état du système afin de l'apprécier par rapport aux objectifs assignés à ce système. Ils mettent en évidence les écarts par rapport à ces objectifs et signalent ainsi les écarts de performance du système évalué. Les objectifs sont obtenus par décomposition des objectifs globaux de l'entreprise (voir chapitres 1 § III.1.3 et 2 § V.2.3).

A l'instar des indicateurs de performance étudiés au chapitre 2, les indicateurs de performance spécifiques à l'ordonnement ont trois composantes :

- l'*objectif* dont ils vérifient la satisfaction,
- la *mesure* qu'ils effectuent,
- les *indicateurs d'action* qui vont guider vers des possibilités d'amélioration de la satisfaction de l'objectif.

Le lien entre les actions envisagées et les performances attendues en ordonnement est complexe et dépendant de l'atelier traité [Boucon 91]. Pour identifier le lien entre les objectifs et les possibilités d'action, le gestionnaire d'atelier dispose de quatre approches :

- faire des tests exhaustifs ou des plans d'expériences à chaque fois qu'une baisse de performances intervient. Cette approche conduit, à très long terme, à choisir les actions les plus performantes, mais elle demande un temps considérable chaque fois que les tests sont nécessaires, temps dont la personne en charge de l'ordonnement dispose rarement.
- constituer une base de connaissances, qui permettra peu à peu au logiciel de « conseiller » son utilisateur sur les indicateurs d'action à visualiser. Cette approche a déjà été envisagée, et est actuellement en cours d'étude (voir par exemple [Lereno et al. 01]).
- utiliser un algorithme d'ordonnement adaptatif qui va se modifier pour prendre en compte les spécificités de l'entreprise. Cette approche nécessitant de modifier la méthode de résolution, elle sort du cadre de l'ordonnement interactif proposé.
- procéder par tâtonnements, l'utilisateur identifiant peu à peu quelles actions sont en rapport avec quelles performances. Cette approche, basée sur l'expertise du gestionnaire d'atelier, va permettre à ce dernier de déterminer lui-même quels indicateurs d'action sont liés à quels indicateurs de performance, et ainsi de constituer lui-même ses triplets $\{\textit{objectif}, \textit{mesure}, \textit{action}\}$.

Cette dernière approche nous semble être la plus cohérente par rapport au type d'interactivité proposée, puisque les phases d'évaluation et de modification des données d'entrée, bien que secondées par l'ordinateur, sont des décisions de l'opérateur humain.

III.5. Tableaux de bord

Les tableaux de bord qui vont permettre de visualiser les indicateurs qui les composent peuvent eux aussi se décliner suivant les différents types d'indicateurs définis. On peut ainsi trouver des tableaux de bord :

- de contexte, qui vont renseigner sur le contexte d'ordonnancement,
- de diagnostic, qui vont aider à trouver les causes de problèmes,
- d'action, qui vont guider l'utilisateur vers les décisions les plus pertinentes,
- de performance qui vont évaluer la satisfaction des objectifs de l'entreprise.

Une fois acquise la maîtrise des outils (indicateurs, tableaux de bord, logiciel d'ordonnancement) et et une fois constitués les triplets {objectif, indicateur, actions}, l'utilisateur pourra aussi créer des tableaux de bord par performance, c'est-à-dire constitués d'un indicateur de performance et des indicateurs d'action qui lui sont liés.

IV. INDICATEURS POUR L'ORDONNANCEMENT

Dans la partie précédente, nous avons présenté les types d'indicateurs qui nous permettent de mettre en œuvre un ordonnancement interactif. Le présent paragraphe propose des exemples et des mises en application de ces indicateurs sur deux cas très particuliers demandant des traitements complexes. On dépasse ici le cadre étroit de la définition d'un indicateur pour proposer des outils de modélisation et de visualisation de degrés de liberté peu ou mal utilisés.

IV.1. Adéquation charge/capacité

Les types d'indicateurs présentés dans la partie précédente peuvent être utilisés pour améliorer l'ordonnancement, mais aussi en amont de celui-ci, pour préparer et réaliser l'adéquation charge/capacité nécessaire, comme présenté Figure 3.4.

Cette adéquation, effectuée au niveau du plan de charge et réajustée au niveau de l'ordonnancement, est basée sur la charge engendrée par les commandes et sur la capacité due aux différentes ressources. La charge et la capacité peuvent être évaluées et visualisées grâce à des indicateurs de contexte. Les indicateurs d'action peuvent aider à réaliser l'adéquation, et les indicateurs de performance évaluer les résultats.

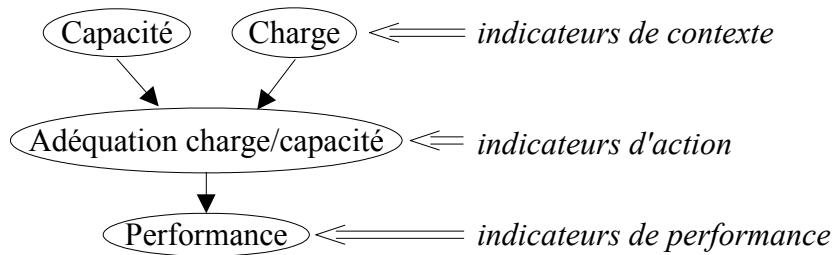


Figure 3.4 – Les indicateurs dans l'adéquation charge/capacité

On note que cette utilisation des indicateurs met en lumière un besoin ressenti par les industriels de pouvoir visualiser la capacité dont ils disposent, en ressources humaines et techniques. En effet, si la performance est largement évaluée et étudiée, la charge fréquemment calculée et visualisée et les résultats de l'adéquation charge/capacité souvent visualisés, la capacité l'est moins, alors qu'elle peut recouvrir une réalité complexe. Deux aspects seront traités :

- la capacité « floue » d'une ressource, due à la présence d'OF incertains,
- la capacité en compétences critiques, liée à la gestion court terme des opérateurs.

IV.2. Indicateurs

IV.2.1. Indicateurs de contexte

Ce type d'indicateurs est le premier mis à disposition du gestionnaire d'atelier lorsqu'il entreprend de faire un ordonnancement. Les indicateurs de contexte ont pour but de rendre compte du contexte général dans lequel l'ordonnancement est réalisé.

Les informations visualisées peuvent concerner l'état des stocks de matières premières, de composants ou d'outils, mais aussi la charge :

- nombre d'OF actuellement planifiés,
- nombre d'opérations planifiées, en cours d'exécution,
- quantité d'opérations externalisées,
- charge globale de l'atelier.

Elles peuvent aussi se reporter à la capacité :

- nombre d'opérateurs présents, absents, en vacances, malades,
- compétences disponibles, en sous-effectifs,
- nombre de machines dans l'atelier, défaillantes,
- capacité globale de l'atelier.

Ces indicateurs de contexte servent à se faire une idée générale sur l'atelier sur lequel va porter l'ordonnancement, et donc à envisager les principaux obstacles qui pourraient se présenter. Les indicateurs de contexte concernant la charge peuvent aussi être utilisés pour visualiser la charge avant de réaliser l'adéquation charge/capacité et d'identifier les goulots éventuels. De même, les indicateurs de contexte concernant la capacité permettent de visualiser celle-ci en terme de ressources humaines et techniques.

IV.2.2. Indicateurs d'action

Suivant les points d'action évoqués au chapitre 1 § V.2, on peut envisager quelques exemples d'indicateurs d'action génériques. La liste présentée dans le Tableau 3.1 contient quelques exemples d'indicateurs d'action possibles sur des points d'action génériques.

Tableau 3.1 – Exemples d'indicateurs d'action

Actions	Indicateurs d'action
Choisir les ressources	<ul style="list-style-type: none"> – Nombre de ressources possibles, – Taux d'occupation de chacune, – Fiabilité des ressources.
Choisir une opération de remplacement	<ul style="list-style-type: none"> – Existence de l'opération de remplacement, – Durée opératoire de la nouvelle opération / durée opératoire de l'ancienne opération, <i>Indicateurs du choix des ressources.</i>
Choisir une séquence d'opérations de remplacement	<ul style="list-style-type: none"> – Existence d'une séquence de remplacement, – Somme des durées opératoires de la nouvelle séquence / somme des durées opératoires de l'ancienne séquence, <i>Indicateurs du choix des ressources.</i>
Choisir une gamme de remplacement	<ul style="list-style-type: none"> – Existence d'une gamme de remplacement, – Somme des durées opératoires de la nouvelle gamme / somme des durées opératoires de l'ancienne gamme, <i>Indicateurs du choix des ressources.</i>
Retarder un OF	<ul style="list-style-type: none"> – Priorité de l'OF, – Charge induite par l'OF, – Marge de l'OF.
Fractionner un OF	<ul style="list-style-type: none"> – Priorité de l'OF, – Charge induite par l'OF.
Externaliser	<ul style="list-style-type: none"> – Existence du sous-traitant, – Fiabilité du sous-traitant, – Délais de livraison du sous-traitant, – Qualité du travail du sous-traitant, – Coût du sous-traitant.
Changer la règle de priorité	<i>Voir Tableau 3.2.</i>

Actions	Indicateurs d'action
Augmenter ou diminuer la priorité d'un ou plusieurs OF	<ul style="list-style-type: none"> - Répartition des priorités, - Répartition du retard par priorité, - Priorités / tranche de retard.
Positionner une ou plusieurs tâches manuellement	<ul style="list-style-type: none"> - Marge de l'OF.
Ajuster les calendriers	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilités légales pour les opérateurs ayant la/les qualification(s) critique(s), - Taux de surcharge actuel des opérateurs ayant la/les qualification(s) critique(s), - Nombre d'ouvriers ayant la/les qualification(s) critique(s).
Augmenter le nombre d'équipes	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilités légales, - Taux de surcharge actuel.
Sur-réserver les ressources	<ul style="list-style-type: none"> - Répartition de l'incertitude sur les commandes, - Niveau global d'incertitude, - Fiabilité des ressources à sur-réserver.

On trouve dans ces exemples des indicateurs portant sur l'existence des degrés de liberté (existence des gammes, des opérations ou des ressources de remplacement), sur la robustesse des points d'action (fiabilité des ressources de remplacement et des sous-traitants) ou sur la répartition des priorités, du retard...

On note dans ce tableau la présence de trois points d'action particuliers concernant l'ajustement des calendriers des ressources, l'augmentation du nombre d'équipes et la sur-réservation des ressources. Ces points d'action, liés à la gestion à court terme de l'incertitude des commandes et des opérateurs de production, seront détaillés dans les chapitres 4 et 5.

Chaque logiciel et chaque méthode a ses propres spécificités. Par exemple, pour un logiciel basé sur la gestion de files d'attente, on peut envisager les indicateurs présentés dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 – Exemples d'indicateurs d'action liés à quelques règles de priorité

Actions (règles de priorité)	Indicateurs d'action
SPT, LPT	<ul style="list-style-type: none"> - Dispersion des durées,
Marge	<ul style="list-style-type: none"> - Dispersion des marges,
Priorité	<ul style="list-style-type: none"> - Dispersion des priorités,
Priorité puis marge	<ul style="list-style-type: none"> - Répartition des marges par priorité,
Nombre d'opérations restantes	<ul style="list-style-type: none"> - Dispersion des nombres d'opérations restantes,
Durée opératoire restante	<ul style="list-style-type: none"> - Dispersion des durées opératoires restantes.

Connaître la dispersion des durées, des marges, des priorités, etc. permet de prévoir si

l'utilisation d'une règle de priorité aura un effet sensible ou pas. Par exemple, si le gestionnaire d'atelier souhaite utiliser une règle comme SPT (Shortest Processing Time ou temps opératoire minimum) ou LPT (Longest Processing Time ou temps opératoire maximum) et si toutes les tâches à planifier ont une durée du même ordre, l'application de la règle équivaudra sensiblement à un tirage aléatoire. Plus généralement, une règle de priorité est basée sur une caractéristique des OF ou des tâches composant la file d'attente, et il est souhaitable d'évaluer le caractère discriminant de cette caractéristique par rapport aux autres OF.

IV.2.3. Indicateurs de performance

Tout comme les objectifs de l'ordonnancement présentés au chapitre 1 § III.1.3, on peut classer les indicateurs de performance qui leur sont liés en quatre catégories :

- les indicateurs temporels,
- les indicateurs liés aux ressources,
- les indicateurs de coût,
- les autres : indicateurs liés aux opérateurs, à l'incertitude...

Quelques exemples d'indicateurs de performance parmi les plus courants sont présentés dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3 - Exemples d'indicateurs de performance

Classe	Indicateurs de performance
Indicateurs temporels	<ul style="list-style-type: none"> - Retard moyen ou maximal des OF, - Retard des OF par priorité, - Durée opératoire par OF, moyenne, relatif¹, - Temps de cycle par OF, moyen, relatif¹, - Durée opératoire / temps de cycle par OF, moyen, relatif¹, - Retard / temps de cycle par OF, moyen, relatif¹, - Temps de réglage par OF, moyen, relatif¹, - Temps de réglage / temps de cycle par OF, moyen, relatif¹,
Indicateurs sur les ressources	<ul style="list-style-type: none"> - Taux d'occupation par ressource, moyen, - En-cours, - Nombre de ressources utilisées par OF, - Somme des temps de réglage par ressource,
Indicateurs financiers	<ul style="list-style-type: none"> - Surcoût en heures supplémentaires, - Surcoût en sous-traitance, - Coût de stockage,

¹ Le terme relatif fait référence à une évaluation relative d'un indicateur, par exemple « durée opératoire d'un OF / somme des durées opératoires de tous les OF ».

Classe	Indicateurs de performance
Indicateurs sur les opérateurs	<ul style="list-style-type: none">- Volume d'heures supplémentaires,- Taux d'utilisation d'une compétence critique,
Indicateurs sur l'incertitude	<ul style="list-style-type: none">- Nombre de ressources sur-réservées,- Retard des OF certains / retards des OF incertains.

Les indicateurs liés à la gestion des opérateurs et à la gestion de l'incertitude seront détaillés dans les chapitres 4 et 5.

On trouve dans [Archimède et al. 97] des propositions d'indicateurs structurels de stabilité de l'ordonnancement (écarts entre le nouvel ordonnancement et le précédent). Les auteurs proposent de mesurer cette stabilité par rapport à trois axes :

- temporel : écarts de durée des opérations ou décalage dans le temps,
- spatial : différences d'affectation opération/machine,
- séquentiel : permutation d'opérations.

Ces indicateurs permettent de s'assurer que le nouvel ordonnancement ne va pas engendrer trop de changements dans l'atelier.

La robustesse d'un ordonnancement peut se mesurer par sa capacité à faire face aux aléas de production tels que les pannes, les absences, les ruptures de stocks... Des indicateurs de robustesse peuvent donc porter sur la fiabilité des ressources engagées (techniques, humaines ou externes) ou sur les possibilités de réaction face aux problèmes :

- fiabilité globale des ressources utilisées,
- nombre de ressources de remplacement
- taux d'absentéisme des opérateurs,
- taux d'utilisation des ressources critiques et de remplacement,
- fiabilité des sous-traitants,
- fiabilité des fournisseurs,
- nombre de sous-traitants disponibles,
- nombre de fournisseurs de remplacement,
- volume des marges prévues dans l'ordonnancement,
- nombre de degrés de liberté existants.

V. CONCLUSION

Dans notre approche de l'ordonnancement interactif, l'opérateur humain, lors de prises de décision l'impliquant, bénéficie d'une aide pour qu'il puisse, au moyen de son logiciel d'ordonnancement, aboutir aux résultats les plus satisfaisants possibles. Cette aide se présente sous la forme d'indicateurs, visualisés sur des tableaux de bord, qui vont seconder le gestionnaire d'atelier dans les différentes phases d'un ordonnancement.

Dans la première partie du chapitre, nous avons brièvement présenté les types d'indicateurs proposés, en les positionnant par rapport au processus de prise de décision dans un premier temps et par rapport aux différentes phases de l'approche d'ordonnancement interactif proposée au chapitre 1. Dans la deuxième partie du chapitre, nous avons plus précisément décrit les quatre types d'indicateurs envisagés :

- indicateurs de contexte pour renseigner sur le contexte d'ordonnancement,
- indicateurs de diagnostic pour identifier les causes d'un problème,
- indicateurs d'action pour déterminer les actions susceptibles d'être les plus efficaces,
- indicateurs de performance pour évaluer les performance de l'ordonnancement.

La troisième partie du chapitre a présenté un panorama de quelques applications de ces indicateurs.

Nous avons évoqué au chapitre 1 deux problématiques émergentes concernant la prise en compte en ordonnancement de l'incertitude des commandes d'une part et des opérateurs de production d'autre part. Nous nous proposons d'appliquer le cadre générique de l'ordonnancement interactif basé sur des indicateurs à ces deux cas particuliers. La gestion de l'incertitude des commandes au niveau de l'ordonnancement sera davantage détaillée au chapitre suivant. Celui-ci sera consacré d'une part à la description d'une méthode de prise en compte de cette incertitude et d'autre part à la validation de cette méthode par différents tests. Le problème de la gestion des opérateurs, de leurs compétences et de leurs temps de travail sera abordé au chapitre 5.

*- Chapitre 4 – Planification de
commandes incertaines et évaluation
des délais*

Chapitre 4 – Planification de commandes incertaines et évaluation des délais

I. INTRODUCTION

Dans le chapitre 1, nous avons évoqué l'évolution des structures productives, et notamment l'apparition de nouveaux types de flexibilité concernant les commandes et les opérateurs de production. Il est nécessaire de diminuer les délais de livraison, même si cela implique une prise de risques par l'intégration rapide de commandes non sûres. Le gestionnaire d'atelier doit pouvoir réaliser un ordonnancement prévisionnel et en déduire des propositions de dates de livraison pour les commandes planifiées, alors qu'une partie d'entre elles est encore en cours de négociation. Le présent chapitre est consacré à l'application de notre approche de l'ordonnancement interactif par des indicateurs à la problématique particulière de la prise en compte de l'incertitude pouvant entacher les commandes dans l'ordonnancement. Cette prise en compte permet d'évaluer des dates de fin de fabrication de ces commandes incertaines.

Dans la première partie du chapitre, nous proposons un bref rappel des principales notions de logique floue et de la théorie des possibilités, théories à la base des indicateurs définis. Notre approche, suggérée sous une première forme dans [Geneste et al. 00], est reprise et améliorée dans la deuxième partie du chapitre où, après avoir caractérisé l'incertitude des commandes et modélisé les capacités floues des ressources, nous abordons les modalités de planification. L'implémentation de cette méthode dans un prototype de logiciel d'ordonnancement (TAPAS) est décrite dans la troisième partie. Le chapitre se termine sur la description et l'analyse des différents tests effectués pour valider et maîtriser cette méthode.

II. LOGIQUE FLOUE ET THÉORIE DES POSSIBILITÉS

Nous présentons ici brièvement les principaux concepts de la logique floue et de la théorie des possibilités (voir notamment [Zadeh 65], [Zadeh 78], [Dubois et Prade 87])

ou [Bouchon-Meunier 93] pour des informations plus complètes).

II.1. Logique floue

Introduite par L.A. Zadeh dans [Zadeh 65], la notion de **sous-ensemble flou** permet la représentation mathématique de connaissances, de données ou d'informations, vagues, imprécises, incomplètes ou incertaines.

Un sous-ensemble flou est un sous-ensemble dont les éléments n'ont pas une appartenance binaire (0 ou 1), mais comportent des transitions graduelles de l'appartenance totale (1) à la non appartenance (0). Étant donné un ensemble de référence X , un sous-ensemble flou A de X est défini par sa fonction d'appartenance μ_A de X dans $[0,1]$:

$$\begin{aligned} \mu_A : X &\longrightarrow [0,1] \\ x \in X &\longrightarrow \mu_A(x) \end{aligned}$$

μ_A est la fonction d'appartenance du sous-ensemble flou A , $\mu_A(x)$ est le degré d'appartenance de x au sous-ensemble flou A .

Un sous-ensemble flou est caractérisé par son *noyau*, son *support* et sa *hauteur*. Le noyau d'un sous-ensemble flou A est l'ensemble des éléments de X qui appartiennent totalement à A , soit $\text{noy}(A) = \{x \in X / \mu_A(x) = 1\}$. Le support d'un sous-ensemble flou A est l'ensemble des éléments de X qui appartiennent au moins un peu à A , soit $\text{supp}(A) = \{x \in X / \mu_A(x) \neq 0\}$. La hauteur d'un sous-ensemble flou A est le plus fort degré avec lequel les éléments de X appartiennent à A , soit $h(A) = \sup_{x \in X} \mu_A(x)$.

Les quantités floues sont des sous-ensembles flous normalisés (de hauteur 1), c'est-à-dire des sous-ensembles flous dont un élément au moins (la valeur modale) a une appartenance totale. On distingue, parmi les quantités floues, les intervalles flous (intervalles aux limites imprécises, généralement représentés par des trapèzes notés (a, b, c, d) (voir Figure 4.1(a))) et les nombres flous (intervalles flous ayant une valeur modale unique, généralement représentés par des triangles notés (a, b, c) (voir Figure 4.1(b))).

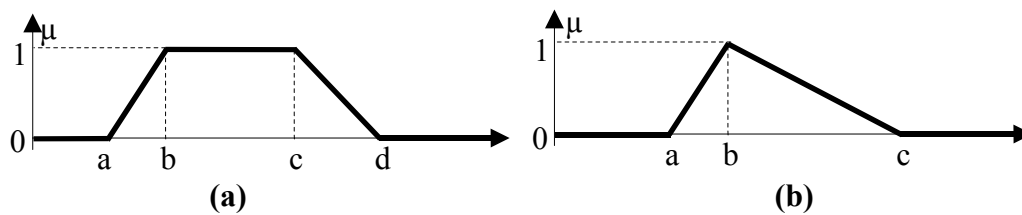


Figure 4.1 - (a) intervalle flou (b) nombre flou

L'intervalle flou représenté Figure 4.1(a) a pour noyau [b,c] et pour support [a,d]. Le nombre flou représenté Figure 4.1(b) a pour valeur modale b et pour support [a,c].

II.2. Théorie des possibilités

La **théorie des possibilités** a été introduite dans [Zadeh 78] pour permettre de raisonner sur des connaissances imprécises en introduisant un moyen de prendre en compte l'incertitude de ces connaissances. La mesure de *possibilité* Π d'un événement défini sur un ensemble de référence X est une valeur, comprise entre 0 et 1, évaluant à quel point cet événement est possible. La mesure de *nécessité* N d'un événement défini sur X est une valeur, comprise entre 0 et 1, quantifiant jusqu'à quel point l'événement est certain. Avant d'être nécessaire, un événement doit être complètement possible.

Etant donné un ensemble de référence X , la fonction d'appartenance μ_A du sous-ensemble A peut être vue comme la distribution de possibilités π , c'est-à-dire que, si t est le degré d'appartenance de x à A , t peut être interprété comme le degré de possibilité pour que X soit égal à x . Etant donnée cette distribution de possibilités, la possibilité et la nécessité d'un événement flou A sont :

$$\Pi(A) = \sup_{x \in A} \min \{ \mu_A(x), \pi(x) \} \quad (4.1)$$

$$N(A) = \inf_{x \in A} \max \{ \mu_A(x), 1 - \pi(x) \} \quad (4.2)$$

Exemple :

On représente la capacité d'une ressource par le sous-ensemble en noir sur la Figure 4.2 et la charge par la distribution de possibilités en gris sur la Figure 4.2.

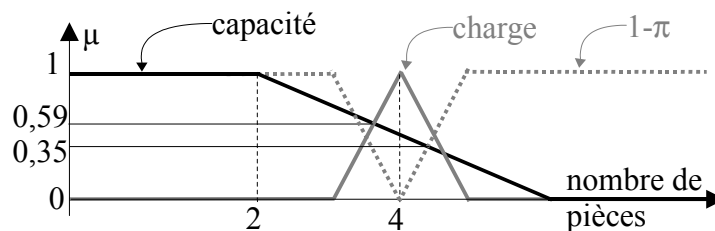


Figure 4.2 - Ensemble flou représentant la capacité et distribution des possibilités représentant la charge

La possibilité et la nécessité que la charge soit égale à la capacité sont :

- $\Pi(\text{charge} = \text{capacité}) = 0,59$,
- $N(\text{charge} = \text{capacité}) = 0,35$.

III. GESTION DE L'INCERTITUDE DES COMMANDES EN ORDONNANCEMENT

III.1. Problématique

L'ordonnancement (voir chapitre 1) a pour but d'organiser la production à court terme. Il planifie des tâches sur des ressources pour assurer la fabrication et la livraison des commandes en temps et en heure. Dans cette planification, la date de livraison est en général une donnée d'entrée du problème. Pourtant, lorsque les commandes sont en cours de négociation, cette date n'est pas encore déterminée et il est alors intéressant de pouvoir faire un ordonnancement prévisionnel, intégrant ces commandes encore incertaines, à partir duquel on peut évaluer le délai de fabrication des produits en fonction de la charge de l'atelier. La principale difficulté dans la réalisation de cet ordonnancement et l'évaluation du délai de fabrication, est de prendre en compte toutes les commandes susceptibles d'occuper l'atelier, alors qu'une partie d'entre elles est encore en cours de négociation.

III.2. La logique floue dans l'ordonnancement

La logique floue et la théorie des possibilités ont été fréquemment mises à contribution en ordonnancement pour permettre de modéliser différents aspects de l'imprécision et de l'incertitude. Ces contributions concernent en général :

- la modélisation de critères de performance imprécis [Berrah 97] [Türksen 97],
- la modélisation de l'imprécision des connaissances pour la gestion des flux [Grabot et al. 97] [Türksen 97],
- la modélisation de l'imprécision des connaissances pour améliorer l'ordonnancement [Bensana et al. 88],
- la modélisation de durées ou de dates imprécises [Fargier 97] [Fortemps 97].

Dans ces travaux, l'incertitude a parfois été évoquée, mais elle se rapporte en général à la possibilité d'événements imprévus ou à la possibilité pour une donnée d'être en dehors des limites imprécises prévues. L'incertitude sur l'occurrence des commandes n'est donc pas traitée, de même que la problématique évoquée ci-dessus, c'est-à-dire l'évaluation des délais de fabrication.

III.3. Méthode proposée

Afin de prendre en compte, au niveau de l'ordonnancement, de l'incertitude qui peut entacher certaines commandes, nous proposons des indicateurs et leurs modes d'utilisation éventuels, suggérés sous une première forme dans [Geneste et al. 00] et basés sur la théorie des possibilités. Pour intégrer cette prise en compte, l'ordonnancement doit être fait chronologiquement et sans remise en cause des tâches déjà planifiées.

III.3.1. Incertitude des ordres de fabrication

Nous proposons de modéliser l'incertitude de l'occurrence d'une commande sur les OF correspondants par un degré de possibilité et un degré de nécessité, comme définis ci-dessus. Ces degrés seront attribués par le gestionnaire d'atelier ou par le commercial en relation avec le client, en fonction de leur connaissance du client et de l'état des négociations. A chaque OF sont ainsi associées sa nécessité N et sa possibilité Π . Pour un ordre de fabrication A , ayant un degré de possibilité $\Pi(A)$ et un degré de nécessité $N(A)$, on a :

- si $N(A) = 1$ et $\Pi(A) = 1$, la certitude sur la confirmation de l'OF est totale,
- si $N(A) > 0$ et $\Pi(A) = 1$, l'occurrence de l'OF est plutôt sûre,
- si $N(A) = 0$ et $\Pi(A) = 1$, l'incertitude sur l'occurrence de l'OF est totale,
- si $N(A) = 0$ et $\Pi(A) > 0$, l'annulation de l'OF est plutôt sûre,
- si $N(A) = 0$ et $\Pi(A) = 0$, la certitude sur l'annulation de l'OF est totale.

L'ensemble des OF à ordonnancer est donc caractérisé par les degrés de possibilité et de nécessité de chacun des OF (Π et N valant 1 pour une grande partie des OF). Ces degrés constituent ainsi un indicateur de contexte permettant de connaître le niveau global d'incertitude entachant les OF à ordonnancer.

III.3.2. Capacité d'une ressource

Pour pouvoir planifier ces OF plus ou moins certains sur les différentes ressources, nous proposons de sur-réserver ces ressources, c'est-à-dire d'affecter plusieurs tâches en même temps, en considérant que certaines d'entre elles seront annulées et qu'ainsi l'ordonnancement sera faisable. Pour que cette sur-réservation reste dans des limites acceptables et conduise à des résultats utilisables, il était proposé dans [Geneste et al. 00] de modéliser la capacité par un indicateur constitué de deux ensembles flous de charge possible acceptable et de charge

nécessaire acceptable (Figure 4.3).

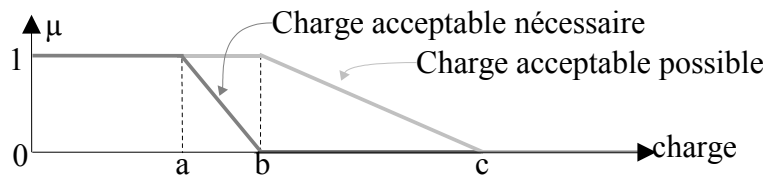


Figure 4.3 - Capacité floue d'une ressource

On voit sur la Figure 4.3 que tant que la charge acceptable nécessaire est différente de 0, la charge acceptable possible vaut 1. Celle-ci ne décroît que lorsque la charge acceptable est égale à 0.

Cette représentation de la capacité d'une ressource présente l'inconvénient de modéliser une seule donnée (la capacité) par deux ensembles flous. Nous avons proposé dans [Letouzey et al. 01] de représenter la capacité d'une ressource par un seuil flou de charge acceptable. Ce seuil flou \check{S} représente la limite au delà de laquelle la charge est totalement inacceptable. Les deux sous-ensembles flous et le nombre flou \check{S} sont liés par les équations suivantes :

$$\Pi(C \leq \check{S}) = \sup\{\check{S}(\text{charge}) : \text{charge} \geq C\} \quad (4.3)$$

$$N(C \leq \check{S}) = \inf\{1 - \check{S}(\text{charge}) : \text{charge} \leq C\} \quad (4.4)$$

où C représente une charge quelconque.

La Figure 4.4 représente les deux ensembles flous et le seuil flou \check{S} de charge acceptable.

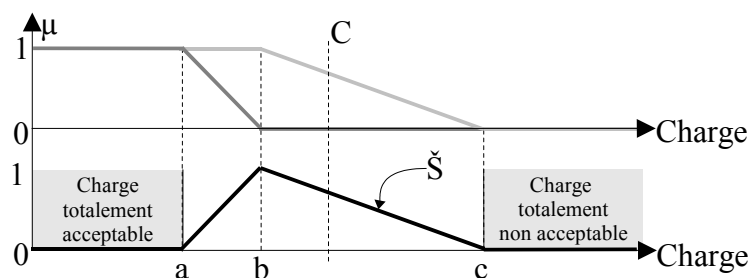


Figure 4.4 – Seuil flou \check{S} sur la capacité d'une ressource

b représente la valeur modale du seuil, a et c les valeurs inférieure et supérieure du support. Toute charge supérieure à c est totalement inacceptable, toute charge inférieure à a est totalement acceptable.

Ce seuil flou constitue un indicateur d'action pour améliorer la qualité des prévisions des délais de fabrication. Il montre en effet la possibilité de sur-réservation des ressources et permet ainsi au gestionnaire d'atelier de régler cette sur-réservation en fonction des résultats obtenus.

III.3.3. Planification

La décision de planification des différentes tâches sur les différentes ressources se déroule en plusieurs étapes. Dans un premier temps, il faut caractériser les opérations planifiées sur la ressource considérée à un instant donné. Ensuite, on détermine les différentes combinaisons possibles de ces opérations en fonction de leur incertitude. Enfin, on évalue les charges respectives des combinaisons pour les comparer au seuil \check{S} de charge acceptable.

III.3.3.1. Opérations

On souhaite planifier une opération à un instant t sur une ressource R . Si la ressource est libre, la tâche est affectée à t sur R ; si d'autres tâches sont déjà en place, on envisage de sur-réserver la ressource, c'est-à-dire de lui affecter plus de charge qu'elle n'a de capacité. On se place dans ce second cas : on veut planifier O_n alors que $(n-1)$ opérations sont déjà affectées à t sur R (Figure 4.5).

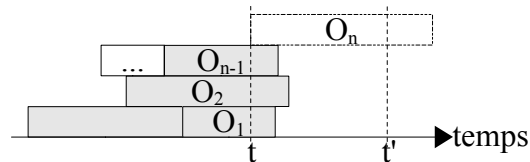


Figure 4.5 – Opérations à planifier simultanément sur une ressource R

Les opérations O_1 à O_{n-1} ont été préalablement planifiées, éventuellement par sur-réservation, et ne seront pas remises en cause. On sait en outre qu'à l'instant t' , compris entre t et $(t + \text{durée de } O_n)$, il n'y a pas d'autres opérations candidates ou déjà planifiées car on fait un ordonnancement chronologique. Les tâches sont caractérisées par leurs degrés de possibilité $\Pi(O_i)$ et de nécessité $N(O_i)$ hérités des OF auxquels elles appartiennent, et par la charge C_i qu'elles engendrent sur R .

Les possibilité et nécessité de l'occurrence de toutes les tâches sont données par :

$$\Pi(O_1 \wedge O_2 \wedge \dots \wedge O_{n-1} \wedge O_n) = \min_{i=\{0, 1, \dots, n\}} (\Pi(O_i)) \quad (4.5)$$

$$N(O_1 \wedge O_2 \wedge \dots \wedge O_{n-1} \wedge O_n) = \min_{i=\{0, 1, \dots, n\}} (N(O_i)) \quad (4.6)$$

Nous avons choisi d'utiliser l'opérateur « min » car on considère que la certitude de l'occurrence de l'ensemble d'événements liés par un opérateur ET équivaut à la certitude de l'occurrence du moins certain d'entre eux.

La charge C engendrée par ces n opérations est la somme des charges engendrées par chacune d'entre elles.

III.3.3.2. Comparaison charge/capacité

Il faut ensuite comparer la charge C avec le seuil flou \check{S} de la ressource. Pour cela, on détermine la possibilité $\Pi_{\check{S}}$ et la nécessité $N_{\check{S}}$ que la charge C soit inférieure au seuil flou \check{S} (voir Figure 4.6).

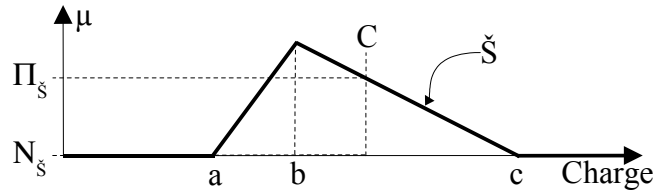


Figure 4.6 – Comparaison de la charge C au seuil flou \check{S}

Nous avons choisi comme condition pour que l'opération O_n soit planifiée à t sur R que $\Pi_{\check{S}}$ et $N_{\check{S}}$ soient supérieures à la possibilité et la nécessité de l'occurrence de l'ensemble des opérations. Cette condition est exprimée par les équations suivantes :

$$\Pi(O_1 \wedge O_2 \wedge \dots \wedge O_{n-1} \wedge O_n) \leq \Pi_{\check{S}}(C_{O_1 \wedge O_2 \wedge \dots \wedge O_{n-1} \wedge O_n}) \quad (4.7)$$

$$N(O_1 \wedge O_2 \wedge \dots \wedge O_{n-1} \wedge O_n) \leq N_{\check{S}}(C_{O_1 \wedge O_2 \wedge \dots \wedge O_{n-1} \wedge O_n}) \quad (4.8)$$

III.3.3.3. Combinaisons des opérations

L'utilisation de l'opérateur min pour déterminer la possibilité et la nécessité de l'occurrence d'une combinaison d'opérations est naturelle car il est généralement utilisé pour apprécier la possibilité et la nécessité d'un ensemble d'événements liés entre eux par un opérateur ET (\wedge). Néanmoins, cet opérateur min a comme inconvénient de pouvoir mener à des situations contradictoires. En effet, si l'on prend un ensemble d'événements dont l'un d'entre eux a des degrés de possibilité et de nécessité très faibles, la possibilité et la nécessité de l'occurrence de cet ensemble vont être faibles. Si l'on enlève de l'ensemble cet événement peu probable, les possibilité et nécessité du nouvel ensemble vont être supérieures à celles de l'ensemble précédent qui contenait plus d'événements. Cette situation peut se retrouver au niveau des combinaisons d'opérations à planifier sur la ressource. On peut en effet obtenir des possibilité et nécessité d'occurrence de toutes les opérations inférieures aux possibilité et nécessité d'occurrence d'une partie des tâches. C'est pour cela qu'il faut considérer toutes les combinaisons de tâches possibles pour décider de la planification de O_n :

- $O_1 \wedge O_2 \wedge \dots \wedge O_{n-1} \wedge O_n \rightarrow$ occurrence de toutes les opérations (cas déjà traité),
- $\neg O_1 \wedge O_2 \wedge \dots \wedge O_{n-1} \wedge O_n \rightarrow$ occurrence de toutes les opérations, sauf O_1 ,
- $O_1 \wedge \neg O_2 \wedge \dots \wedge \neg O_{n-1} \wedge O_n \rightarrow$ occurrence de O_1 et O_n uniquement,

- $\neg O_1 \wedge \neg O_2 \wedge \dots \wedge O_{n-1} \wedge O_n \rightarrow$ occurrence de toutes les opérations, sauf O_1 et O_2 ,
- etc.

Le processus est ensuite similaire au processus pour la première combinaison. Les degrés de possibilité et de nécessité d'occurrence d'une combinaison d'opérations sont :

$$\Pi(\text{combinaison}) = \min_{i=\{0, 1, \dots, n\}} \begin{cases} \Pi(O_i) \text{ si } O_i \\ 1 - N(O_i) \text{ si } \neg O_i \end{cases} \quad (4.9)$$

$$N(\text{combinaison}) = \min_{i=\{0, 1, \dots, n\}} \begin{cases} N(O_i) \text{ si } O_i \\ 1 - \Pi(O_i) \text{ si } \neg O_i \end{cases} \quad (4.10)$$

La charge d'une combinaison est :

$$C_{\text{combinaison}} = \sum_{i=1}^n C_i * \begin{cases} 1 \text{ si } O_i \\ 0 \text{ si } \neg O_i \end{cases} \quad (4.11)$$

Il faut ensuite comparer chacune de ces charges au seuil flou \check{S} et en déduire les possibilités et nécessités que ces charges soient inférieures au seuil.

III.3.3.4. Décision de planification

Enfin, pour déterminer si on peut planifier l'opération O_n sur la ressource R à l'instant t , nous avons choisi comme condition empirique, mais semblant de bon sens, de vérifier si les degrés de possibilité $\Pi(\text{combinaison})$ et de nécessité $N(\text{combinaison})$ de chaque combinaison des opérations sont bien inférieurs aux degrés de possibilité $\Pi_{\check{S}}(C_{\text{combinaison}})$ et de nécessité $N_{\check{S}}(C_{\text{combinaison}})$ correspondant à la charge qu'elles engendrent :

$$\begin{aligned} \text{Si, pour toutes les combinaisons,} & \quad \Pi(\text{combinaison}) \leq \Pi_{\check{S}}(C_{\text{combinaison}}) \\ \text{et} & \quad N(\text{combinaison}) \leq N_{\check{S}}(C_{\text{combinaison}}) \end{aligned}$$

alors on planifie O_n sur R à l'instant t ,
sinon, O_n sera planifiée plus tard.

III.4. Exemples

III.4.1. Premier cas

Sur une des ressources de l'atelier, on a deux opérations planifiées O_1 et O_2 et une opération candidate O_3 , décrites par :

- O_1 , de possibilité $\Pi(O_1) = 1$, de nécessité $N(O_1) = 0,5$ et de charge $C_1 = 1$ pièce,
- O_2 , de possibilité $\Pi(O_2) = 0,8$, de nécessité $N(O_2) = 0$ et de charge $C_2 = 2$ pièces,
- O_3 , de possibilité $\Pi(O_3) = 1$, de nécessité $N(O_3) = 0,2$ et de charge $C_3 = 1$ pièce.

La ressource R est caractérisée par un seuil flou $\check{S} = (3, 4, 7)$.

On considère les combinaisons suivantes :

$$O_1 \wedge O_2 \wedge O_3 \quad \neg O_1 \wedge O_2 \wedge O_3 \quad \neg O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3 \quad O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3.$$

On applique les formules (4.5) et (4.6) à la première combinaison :

$$\begin{aligned} \Pi(O_1 \wedge O_2 \wedge O_3) &= \min(\Pi(O_1), \Pi(O_2), \Pi(O_3)) = \min(1, 0.8, 1) = 0.8, \\ N(O_1 \wedge O_2 \wedge O_3) &= \min(N(O_1), N(O_2), N(O_3)) = \min(0.5, 0, 0.2) = 0, \end{aligned}$$

La charge est : $C_{O_1 \wedge O_2 \wedge O_3} = C_1 + C_2 + C_3 = 1 + 2 + 1 = 4$ pièces,

Les degrés de possibilité et de nécessité que la charge soit inférieure au seuil \check{S} sont :

$$\Pi_{\check{S}}(C_{O_1 \wedge O_2 \wedge O_3}) = \Pi_{\check{S}}(4) = 1 \text{ et } N_{\check{S}}(C_{O_1 \wedge O_2 \wedge O_3}) = N_{\check{S}}(4) = 0.$$

On obtient donc : $\Pi(O_1 \wedge O_2 \wedge O_3) = 0,8 \leq \Pi_{\check{S}}(C_{O_1 \wedge O_2 \wedge O_3}) = 1,$

$$N(O_1 \wedge O_2 \wedge O_3) = 0 \leq N_{\check{S}}(C_{O_1 \wedge O_2 \wedge O_3}) = 0.$$

La condition étant respectée pour la première combinaison, on étudie la seconde combinaison $\neg O_1 \wedge O_2 \wedge O_3$.

$$\Pi(\neg O_1 \wedge O_2 \wedge O_3) = \min(1-0.5, 0.8, 1) = 0,5 \text{ et } N(\neg O_1 \wedge O_2 \wedge O_3) = \min(1-1, 0, 0.2) = 0.$$

Pour $C_{\neg O_1 \wedge O_2 \wedge O_3} = 3$ pièces, on a $\Pi_{\check{S}}(C_{\neg O_1 \wedge O_2 \wedge O_3}) = 1$ et $N_{\check{S}}(C_{\neg O_1 \wedge O_2 \wedge O_3}) = 1.$

$$\Pi(\neg O_1 \wedge O_2 \wedge O_3) = 0,5 \leq \Pi_{\check{S}}(C_{\neg O_1 \wedge O_2 \wedge O_3}) = 1 \text{ et } N(\neg O_1 \wedge O_2 \wedge O_3) = 0 \leq N_{\check{S}}(C_{\neg O_1 \wedge O_2 \wedge O_3}) = 1.$$

La condition est respectée, on étudie la troisième combinaison $\neg O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3$.

$$\Pi(\neg O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3) = \min(1-0.5, 1-0, 1) = 0,5 \text{ et } N(\neg O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3) = \min(1-1, 1-0.8, 0.2) = 0.$$

Pour $C_{\neg O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3} = 1$ pièce, on a $\Pi_{\check{S}}(C_{\neg O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3}) = 1$ et $N_{\check{S}}(C_{\neg O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3}) = 1.$

$$\Pi(\neg O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3) = 0,5 \leq \Pi_{\check{S}}(C_{\neg O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3}) = 1$$

$$N(\neg O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3) = 0 \leq N_{\check{S}}(C_{\neg O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3}) = 1.$$

La condition étant respectée, on étudie la dernière combinaison $O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3$.

$$\Pi(O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3) = \min(1, 1-0, 1) = 1 \text{ et } N(O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3) = \min(0.5, 1-0.8, 0.2) = 0,2.$$

Pour $C_{O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3} = 2$ pièces, on a $\Pi_{\check{S}}(C_{O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3}) = 1$ et $N_{\check{S}}(C_{O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3}) = 1.$

$$\Pi(O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3) = 1 \leq \Pi_{\check{S}}(C_{O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3}) = 1 \text{ et } N(O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3) = 0,2 \leq N_{\check{S}}(C_{O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3}) = 1.$$

La condition étant respectée pour toute les combinaisons, on planifie O_3 à l'instant t sur la ressource R.

III.4.2. Deuxième cas

On souhaite planifier sur la ressource R, dont la capacité est $\check{S} = (5, 6, 9)$, une tâche O_3 alors que O_1 et O_2 sont déjà planifiées, mais cette fois-ci les caractéristiques des tâches sont :

- $\Pi(O_1) = 1$, $N(O_1) = 0,5$ et $C_1 = 4$ pièces,
- $\Pi(O_2) = 0,2$, $N(O_2) = 0$ et $C_2 = 1$ pièce,
- $\Pi(O_3) = 1$, $N(O_3) = 0,2$ et $C_3 = 2$ pièces.

On considère les combinaisons suivantes :

$$O_1 \wedge O_2 \wedge O_3 \qquad O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3 \qquad \neg O_1 \wedge O_2 \wedge O_3 \qquad \neg O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3.$$

Ce qui donne pour la première combinaison :

$$\Pi(O_1 \wedge O_2 \wedge O_3) = \min(1, 0,2, 1) = 0,2 \text{ et } N(O_1 \wedge O_2 \wedge O_3) = \min(0,5, 0, 0,2) = 0.$$

Avec $C_{O_1 \wedge O_2 \wedge O_3} = 7$ pièces, on obtient $\Pi_{\check{S}}(C_{O_1 \wedge O_2 \wedge O_3}) = 0,7$ et $N_{\check{S}}(C_{O_1 \wedge O_2 \wedge O_3}) = 0$.

$$\Pi(O_1 \wedge O_2 \wedge O_3) = 0,2 \leq \Pi_{\check{S}}(C_{O_1 \wedge O_2 \wedge O_3}) = 0,7 \text{ et } N(O_1 \wedge O_2 \wedge O_3) = 0 \leq N_{\check{S}}(C_{O_1 \wedge O_2 \wedge O_3}) = 0.$$

On passe donc à la deuxième combinaison :

$$\Pi(O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3) = \min(1, 1-0, 1) = 1 \text{ et } N(O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3) = \min(0,5, 1-0,2, 0,2) = 0,2.$$

Pour $C_{O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3} = 6$ pièces, on a $\Pi_{\check{S}}(C_{O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3}) = 1$ et $N_{\check{S}}(C_{O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3}) = 0$.

$$\Pi(O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3) = 1 \leq \Pi_{\check{S}}(C_{O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3}) = 1 \text{ et } N(O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3) = 0,2 \geq N_{\check{S}}(C_{O_1 \wedge \neg O_2 \wedge O_3}) = 0.$$

La condition n'est pas respectée pour cette deuxième combinaison, alors qu'elle l'était pour la première. O_3 ne sera donc pas planifiée à t sur R.

Cette méthode de gestion de l'incertitude des commandes a été mise en œuvre dans un logiciel d'ordonnancement appelé TAPAS.

IV. IMPLÉMENTATION

IV.1. Présentation succincte de TAPAS

TAPAS (The Almost Perfect Approach to Scheduling) est un projet réalisé au sein du LGP (Laboratoire de Génie de Production) de l'ENIT, dans le cadre de la communauté de travail des Pyrénées, cofinancé par la région Midi-Pyrénées et le gouvernement Basque, en partenariat avec l'Ecole Supérieure d'Informatique de San Sebastian (ESII) et la société Fatronik. L'objectif du projet était de développer un ensemble de composants logiciels

réutilisables permettant de construire un système de pilotage de cellule flexible par assemblage et adaptation de ces composants. Le rôle du LGP dans le projet était de développer un environnement de conception et de développement de logiciels d'ordonnancement. Les principales particularités de TAPAS sont présentées dans [Moutarlier et al. 00]. TAPAS propose entre autres :

- la prise en compte de gammes, d'opérations ou de séquences de remplacement,
- la possibilité de représenter une gamme comme un réseau de tâches,
- la possibilité de grouper les ressources (machines, palettes ou transporteurs) pour permettre un ordonnancement multi-ressource ou pour représenter des groupes de ressources alternatives (en projet),
- la représentation de tâches à ordonnancer sous forme de réseaux de tâches,
- la possibilité de choisir la méthode de résolution d'ordonnancement et d'en implémenter de nouvelles.

Un premier moteur d'ordonnancement basé sur la gestion des files d'attente a été mis en place. Plusieurs fonctionnalités ont été ajoutées dans TAPAS, notamment pour la prise en compte de l'imprécision de durées opératoires ou de temps de réglages.

IV.2. Présentation des résultats de l'implémentation

Les modifications nécessaires à la gestion de l'incertitude ont été réalisées dans TAPAS.

Les modifications concernent :

- l'ajout d'un seuil flou pour décrire la capacité des ressources,
- l'ajout des degrés de possibilité et de nécessité à chaque OF,
- la modification de la technique de résolution des conflits.

Pour représenter la sur-réservation effectuée sur les ressources, la charge représentée par une tâche est proportionnelle à l'épaisseur de la barre qui représente cette opération sur le diagramme de Gantt. Ainsi, s'il n'y a pas de sur-réservation sur la ressource, les barres ont la hauteur maximale, alors que si deux tâches sur-réservent la ressource, chaque barre aura pour hauteur la moitié de la hauteur maximale (voir Figure 4.7).

La Figure 4.7 montre trois cas de diagrammes de Gantt que l'on peut obtenir :

- le premier diagramme (Figure 4.7(a)) est classique, il n'y a pas de sur-réservation,
- le deuxième diagramme (Figure 4.7(b)) montre une sur-réservation des ressources M1 et M3, chacune ayant au plus deux tâches planifiées en même temps,

- le troisième diagramme (Figure 4.7(c)) présente une sur-réservation de toutes les ressources, M1 ayant au plus quatre tâches planifiées simultanément (forte sur-réservation), M2 deux tâches et M3 trois tâches.

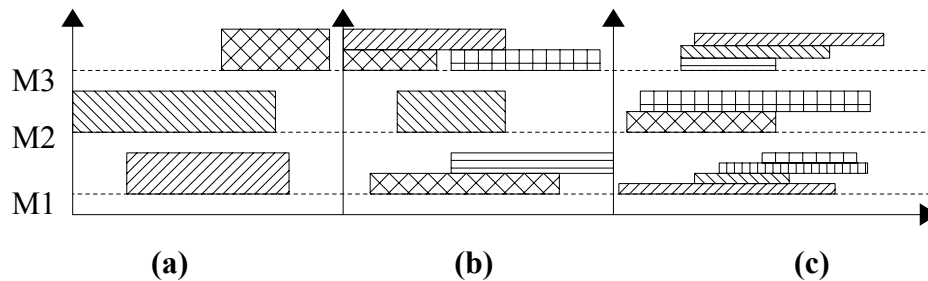


Figure 4.7 - Diagramme de Gantt (a) sans sur-réservation, (b) avec sur-réservation sur les machines M1 et M3, (c) avec sur-réservation sur toutes les machines

La méthode de gestion de l'incertitude des commandes au niveau de l'ordonnancement étant mise en œuvre, nous nous proposons d'effectuer différents tests afin de la valider.

V. VALIDATION DE LA MÉTHODE PROPOSÉE

Outre la validation de la méthode, c'est-à-dire la vérification que les résultats obtenus sont effectivement utilisables et réalistes, nous souhaitons effectuer différents tests pour pouvoir parfaitement maîtriser les différents paramètres de la méthode.

V.1. Présentation des différents tests réalisés

Notre but est de faire des test qui vont nous permettre de :

- valider la méthode, c'est-à-dire voir si les dates de fin obtenues sont réalistes et utilisables,
- cerner le domaine « utile » de la méthode par rapport à la répartition de l'incertitude entachant les OF ou au seuil flou.

Pour cela, nous souhaitons comparer les dates de fin obtenues par un ordonnancement sous incertitude à des dates de fin obtenues par des ordonnancements dits « classiques », c'est-à-dire sans sur-réservation et basés sur des OF fermes. Nous choisissons de faire des simulations d'ordonnements classiques et de comparer les résultats à ceux d'un ordonnancement sous incertitude. Nous avons donc mis au point un simulateur (voir Figure 4.8) qui va permettre de réaliser ces tests suivant le schéma suivant :

1. choix des paramètres de l'atelier,
2. détermination aléatoire des possibilité et nécessité des OF,
3. choix des paramètres de sur-réservation,
4. ordonnancement sous incertitude et stockage des dates de fin des OF,
5. détermination aléatoire des confirmation ou annulation des OF,
6. ordonnancement classique et stockage de dates de fin,
7. répétition des points 5 et 6,
8. calcul des indicateurs,
9. retour au point 3 pour changer les paramètres de sur-réservation.

Ce simulateur nous permet d'une part d'effectuer l'ordonnancement sous incertitude et les ordonnancements classiques et d'en comparer les résultats, et d'autre part de simuler des ateliers réels en déterminant aléatoirement les paramètres définissant ces ateliers.

Le point 1 correspond à la définition de paramètres tels que le nombre de machines, le nombre de pièces différentes fabriquées, le nombre de phases par gamme, les temps opératoires, les temps de réglages, etc (partie en haut à gauche de la Figure 4.8). Ces paramètres nous permettent de faire des tests dans des configurations d'atelier différentes, et donc de s'assurer de la validité de la méthode proposée dans des environnements variés.

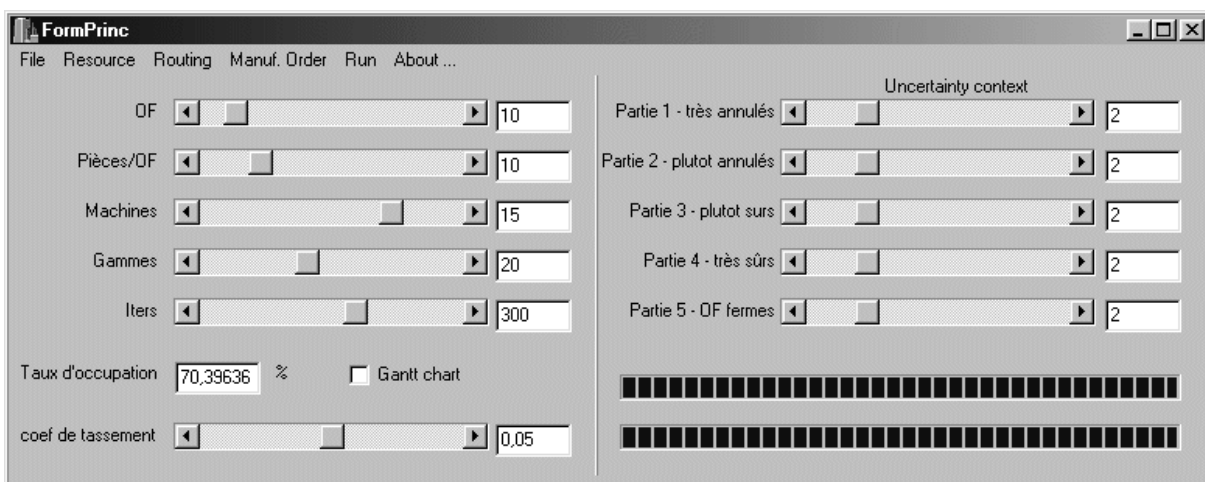


Figure 4.8 - Fenêtre de paramétrage du simulateur d'ordonnancement

Le point 2 consiste à déterminer l'incertitude de chaque OF. En fonctionnement normal, les possibilité et nécessité caractérisant l'incertitude sur l'occurrence de l'OF sont déterminées par le gestionnaire d'atelier ou un commercial, en fonction de l'avancement des négociations et de leur confiance dans le client. Notre application nous permet de simuler cette phase en :

- choisissant la répartition des OF dans les domaines d'incertitude (voir Figure 4.9) :

chaque zone présente une plus ou moins grande incertitude (dans la zone 1, les OF sont quasiment certains d'être annulés, dans la zone 2, ils penchent plutôt vers l'annulation, dans la zone 3 vers la confirmation, dans la zone 4, ils sont quasiment certains d'être confirmés et dans la zone 5, ce sont des commandes fermes) et le nombre d'OF appartenant à chaque domaine est réglable (partie en haut à droite sur la Figure 4.8),

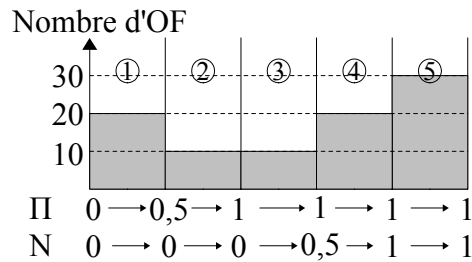


Figure 4.9 - Répartition des OF dans les domaines d'incertitude

- déterminant aléatoirement les possibilité et nécessité de chaque OF dans les limites imposées par le domaine auquel appartient l'OF.

Cela nous permet donc d'envisager plusieurs configurations possibles en contrôlant l'incertitude entachant les OF.

Le point 3 consiste à déterminer le seuil flou des ressources $\check{S} = (a, b, c)$. Ce seuil flou est caractérisé par les trois paramètres a, b et c (voir paragraphe III.3.2). a est fixe et égal à 1 (les machines sont supposées traiter une pièce à la fois). b et c sont des entiers naturels et sont réglables. Nous pourrions donc contrôler la sur-réservation autorisée sur les machines. Nous souhaitons en effet pouvoir cerner le domaine d'utilisation utile de notre méthode, c'est-à-dire pour quelles répartition d'incertitude et quel seuil flou les résultats sont les plus intéressants.

Le point 4 consiste à réaliser un ordonnancement sous incertitude à partir des données déterminées lors des étapes précédentes. Le but de cet ordonnancement sous incertitude étant de proposer des délais de fabrication pour des OF en cours de négociation, les dates de fin des OF ordonnancés sont retenues. Ces dates de fin prévisionnelles sont appelées D_i .

Nous souhaitons lors de ces tests, vérifier que les dates de fin envisagées lors de l'ordonnancement sous incertitude sont correctes et utilisables. Pour cela on effectue un ordonnancement sous incertitude puis un ordonnancement classique à partir des mêmes données, les OF étant cette fois-ci des OF fermes. Le point 5 consiste à déterminer l'annulation ou la confirmation des OF qui vont être ordonnancés au point 6. Nous avons choisi de déterminer la confirmation d'un OF de la façon suivante :

- on choisit un nombre aléatoire d entre 0 et 1,

- on calcule pour l'OF $\frac{\Pi+N}{2}$,
- si $d \leq \frac{\Pi+N}{2}$, l'OF est confirmé, sinon il est annulé.

Le point 6 correspond donc à un ordonnancement classique, basé sur des OF fermes. Les dates de fin, qualifiées de réelles, sont sauvegardées sous l'appellation D_r . Elles vont être comparées aux dates de fin prévisionnelles sauvegardées au point 4.

Afin d'obtenir des résultats statistiquement significatifs, nous choisissons de faire au point 7, 300 ordonnancements basés sur des OF fermes et de comparer chacun d'entre eux à l'ordonnancement sous incertitude au point 8. Cette comparaison va donc porter sur la différence entre les dates de fin prévisionnelles, obtenues par un ordonnancement sous incertitude, et les dates de fin dites réelles. Pour faire cette comparaison, nous avons choisi deux indicateurs de retard :

- le retard relatif qui est calculé par $rel_lat = \max(0, (D_r - D_i))$,
- le retard absolu qui est calculé par $abs_lat = |D_r - D_i|$,

Pour mieux interpréter ces deux indicateurs, nous définissons deux indicateurs relatifs mettant en œuvre les retards relatif et absolu par rapport aux temps de cycle des OF :

- le pourcentage d'OF ayant un retard relatif de x % de leur temps de cycle, x prenant pour valeurs 0 (OF en avance), 0-10, 10-20, 20-30, ..., 100 et plus,
- le pourcentage d'OF qui sont :
 - en avance de x % de leur temps de cycle, x ayant pour valeurs 0-10, 10-20, 20-30, 30 et plus,
 - en retard de x % de leur temps de cycle, x ayant pour valeurs 0-10, 10-20, 20-30, 30 et plus.

Le point 9 consiste à refaire ces différentes étapes pour des paramètres de sur-réservation b et c différents.

Ce schéma général est adapté en fonction des tests effectués. Ces tests ont pour but de valider la méthode proposée et de cerner le domaine d'utilisation intéressant. Pour cela, nous réalisons trois types de tests :

- évaluation de l'influence des paramètres b et c sur la qualité des prévisions de dates de fins. Ces premiers tests ont aussi pour but d'identifier les configurations conduisant à trop ou trop peu de sur-réservation et donc à des délais de fabrication irréels.
- évaluation de l'influence de la répartition des OF dans les domaines d'incertitude sur la

qualité des prévisions de dates de fin. Nous souhaitons ainsi identifier quelle répartition donne les résultats les plus réalistes.

– évaluation de la qualité des prévisions lorsqu'une partie des OF est ferme.

V.2. Résultats et analyse

V.2.1. Conditions

Les tests sont mis en œuvre avec les données d'entrée du Tableau 4.1.

Tableau 4.1 – Paramètres d'entrée des tests

Paramètres	Valeurs
Nombre de machines	15
Nombre de gammes	20
Nombre d'activités par gamme	Aléatoire uniforme entre 5 et 10
Temps de réglage par activité	Aléatoire uniforme entre 1 et 10
Temps opératoire	Aléatoire uniforme entre 5 et 10
Nombre d'OF	80
Nombre de pièces par OF	Aléatoire uniforme entre 10 et 50
b (valeur modale du seuil)	De 1 à 3
c (limite supérieure du seuil)	De b à 6

Les valeurs prises par b et c conduisent à 15 seuils différents, donc à 15 ordonnancements sous incertitude.

V.2.2. Résultats

V.2.2.1. Influence du seuil flou

Ce premier test a pour but d'étudier l'influence du seuil flou de capacité des ressources sur la qualité des prévisions de dates de fin. Les OF ont une répartition uniforme de l'incertitude, c'est-à-dire que les quatre premières classes de la Figure 4.9 contiennent chacune 20 OF, le dernier domaine étant vide. A l'issue de cette première simulation, on constate qu'en moyenne plus de 40 % des OF ont été confirmés alors que les autres étaient annulés. Les résultats obtenus après simulation des ordonnancements classiques sont présentés Figure 4.10.

On remarque sur la Figure 4.10(a), que lorsque les paramètres (b,c) sont faibles, et donc lorsqu'on autorise peu ou pas de sur-réservation, très peu d'OF sont en retard (plus de 80%

sont à l'heure ou en avance par rapport aux prévisions faites). Cela est logique étant donné que lorsqu'on fait peu de sur-réservation, l'ordonnancement prévisionnel obtenu est très proche d'un ordonnancement classique, et lorsque les OF « réels » sont planifiés, la charge est beaucoup diminuée (on a un taux de 60% d'annulation). On note pour ces couples (b,c) sur la Figure 4.10(b) que près de la moitié des OF (45%) sont en avance par rapport aux dates de fin prévues. Lorsque les paramètres de sur-réservation sont faibles et que l'ordonnancement sous incertitude se rapproche d'un ordonnancement classique, les prévisions de dates de fin des OF sont donc plutôt mauvaises.

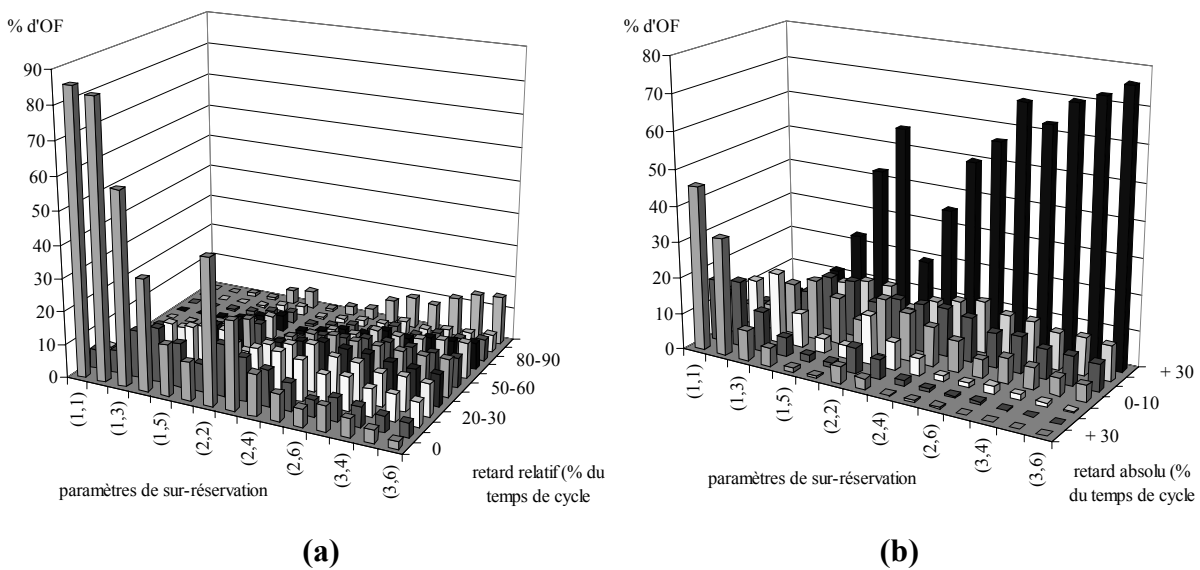


Figure 4.10 - Retards (a) relatif et (b) absolu des OF confirmés

Lorsque les paramètres (b,c) sont assez élevés, c'est-à-dire lorsqu'on autorise beaucoup de sur-réservation, on note sur la Figure 4.10(a) que très peu d'OF sont à l'heure ou en avance, et sur la Figure 4.10 (b) que plus de 75% des OF ont un retard supérieur à 30% de leur temps de cycle.

Les paramètres conduisant aux meilleurs résultats, c'est-à-dire aux meilleures prévisions, sont des paramètres « moyens », vers le milieu des graphiques. Les couples (1,3), (1,4), (2,2) et (2,3) semblent conduire à des résultats relativement satisfaisants :

- pour (b,c) = (1,3), on note que 33.6% des dates de fin des OF ont été prévues avec une précision de $\pm 10\%$, ce taux montant jusqu'à 62.9% pour une précision de $\pm 20\%$,
- pour (b,c) = (1,4), 30.1% des OF ont été prévus avec une précision de $\pm 10\%$ et 55,1% avec une précision de $\pm 20\%$,
- pour (b,c) = (2,2), on trouve 33.9% des OF ayant une date de fin prévue avec une précision de $\pm 10\%$ et 60.6% avec une précision de $\pm 20\%$,

– pour $(b,c) = (2,3)$, on obtient 23.8% des OF dans une fourchette de $\pm 10\%$ et 44.7% dans une fourchette de $\pm 20\%$.

Les résultats les plus satisfaisants sont donc obtenus pour $(1,3)$ et $(2,2)$. Nous avons déjà noté que pour des valeurs de b et de c faibles les prévisions étaient peu concluantes, ce qui semble être le cas pour le couple $(1,3)$ où les dates de fin prévisionnelles sont généralement assez éloignées de celles obtenues pour des OF fermes (39% des OF ont une avance de plus de 10% de leur temps de cycle par rapport aux dates de fin d'un ordonnancement basé sur des OF fermes). Le couple $(2,2)$ conduit donc aux résultats les plus satisfaisants, c'est-à-dire aux prévisions les plus réalistes. Néanmoins, des simulations réalisées avec des données d'entrée (configuration d'atelier) légèrement différentes peuvent aboutir à privilégier des couples légèrement différents. Il apparaît donc que le choix d'un couple de paramètres est dépendant de l'atelier considéré et des préférences du gestionnaire d'atelier qui peut prendre de plus ou moins grands risques. Il est néanmoins possible de cerner les couples utilisables, les résultats les plus réalistes étant obtenus pour des couples vers le milieu du graphique, compris entre $(1,4)$ et $(2,4)$.

V.2.2.2. Influence de la répartition de l'incertitude

Ce deuxième test a pour but d'étudier l'influence de la répartition des OF dans les domaines d'incertitude sur la qualité de l'ordonnancement et des prévisions de dates de fin. Les OF ordonnancés sont tous incertains, à des degrés divers, ce qui est un cas purement théorique, notre but étant d'étudier la qualité des prévisions, c'est-à-dire quel type de répartition semble aboutir à des résultats utilisables. Les tests sont effectués pour un couple $(b,c) = (2,2)$ et pour 7 répartitions différentes (voir Figure 4.11).

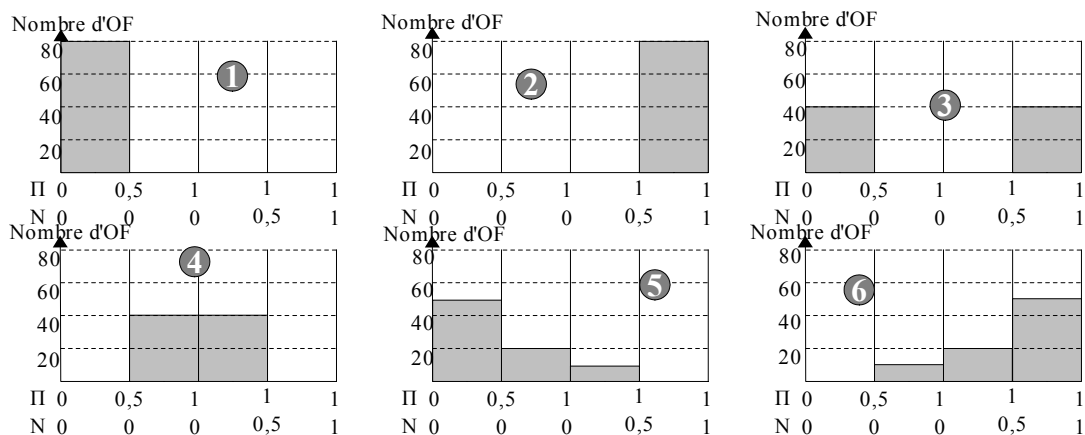


Figure 4.11 - Répartitions des OF dans les domaines d'incertitude

Les distributions 1 et 2 sont des cas aux limites, tous les OF étant plutôt certains d'être

annulés dans la distribution 1 et d'être confirmés dans la distribution 2. La moitié des OF de la distribution 3 a une forte tendance à être confirmée alors que l'autre moitié a une forte tendance à être annulée. Dans la distribution 4, les OF sont incertains, la moitié d'entre eux tendant à être annulée et l'autre moitié confirmée. Dans la distribution 5, les OF sont majoritairement plutôt sûrs d'être annulés, mais une partie penche vers l'annulation et une autre (plus faible) vers la confirmation. La distribution 6 est exactement l'inverse. La distribution 7, non représentée sur la Figure 4.11, correspond à la distribution du paragraphe précédent (répartition uniforme de 20 OF dans chaque domaine). Les taux de confirmation des OF pour chaque distribution étudiée sont présentés dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2 - Taux de confirmation moyen de chaque distribution

numéro de configuration	1	2	3	4	5	6	7
taux de confirmation	6,8%	69,9%	46,1%	42,7%	21,1%	61,5%	40,7%

Ces résultats sont conformes aux degrés d'incertitude (de possibilité et de nécessité) attribués aléatoirement aux OF. En effet, pour la configuration 1, on est plutôt certain que les OF seront annulés, et on obtient un taux de confirmation très faible (inférieur à 7%), et pour la configuration 2 où l'on est plutôt sûrs que les OF seront confirmés, le taux atteint presque les 70%. Dans les distributions 3 et 4, on trouve autant d'OF susceptibles d'être annulés que d'OF susceptibles d'être confirmés (la certitude de cette annulation ou confirmation étant plus forte pour la configuration 3 que pour la 4) et les taux de confirmation sont tous deux proches des 50%. Les taux de confirmation des distributions 5 et 6, plutôt faible pour la configuration 5 et élevé pour la 6, sont eux aussi logiques.

On remarque toutefois que le processus de confirmation des OF semble aboutir à plus d'annulation que de confirmation, quelle que soit la configuration choisie. Par exemple, pour des répartitions symétriques comme les configurations 1 et 2, les taux de confirmation ne sont pas symétriques et montrent une légère préférence pour l'annulation. De même, pour une répartition uniforme, le taux de confirmation n'est que de 40.7%, alors que l'on attendait 50%.

Les retards absolus des OF fermes par rapport aux OF incertains pour chacune des répartitions et pour $(b,c) = (2,2)$ sont présentés Tableau 4.3 et Figure 4.12.

Tableau 4.3 – Quantités d'OF dont les dates de fin prévues ont une précision de $\pm 10\%$ et $\pm 20\%$ de leurs temps de cycle

configuration	1	2	3	4	5	6	7
précision de $\pm 10\%$	42,3%	51,3%	21%	29,2%	33,1%	45,5%	33,9%
précision de $\pm 20\%$	69,4%	80%	36,2%	53,5%	55,5%	74,8%	60,6%

Les distributions 2 et 6 fournissent les résultats les plus satisfaisants, c'est-à-dire le plus grand nombre d'OF dont les dates de fin ont été correctement prévues. Ces prévisions sont en effet pour 75 et 80% d'entre elles dans une fourchette d'erreur de $\pm 20\%$ de leur temps de cycle. De plus, ces deux configurations aboutissent peu à des OF fermes très en retard. Cela est principalement dû au fait qu'elles ont toutes deux beaucoup d'OF dont la confirmation est assez certaine. On note toutefois que pour les configurations inverses comportant beaucoup d'OF dont l'annulation est plutôt certaine (les distributions 1 et 5), les résultats sont moins bons. Pour la distribution 4, celle comportant le plus d'incertitude, les résultats sont assez uniformes, c'est-à-dire que le nombre d'OF dans chaque tranche de retard est plutôt régulier. Les dates de fin ont été prévues à plus de 50% avec une précision de $\pm 20\%$ de leur temps de cycle.

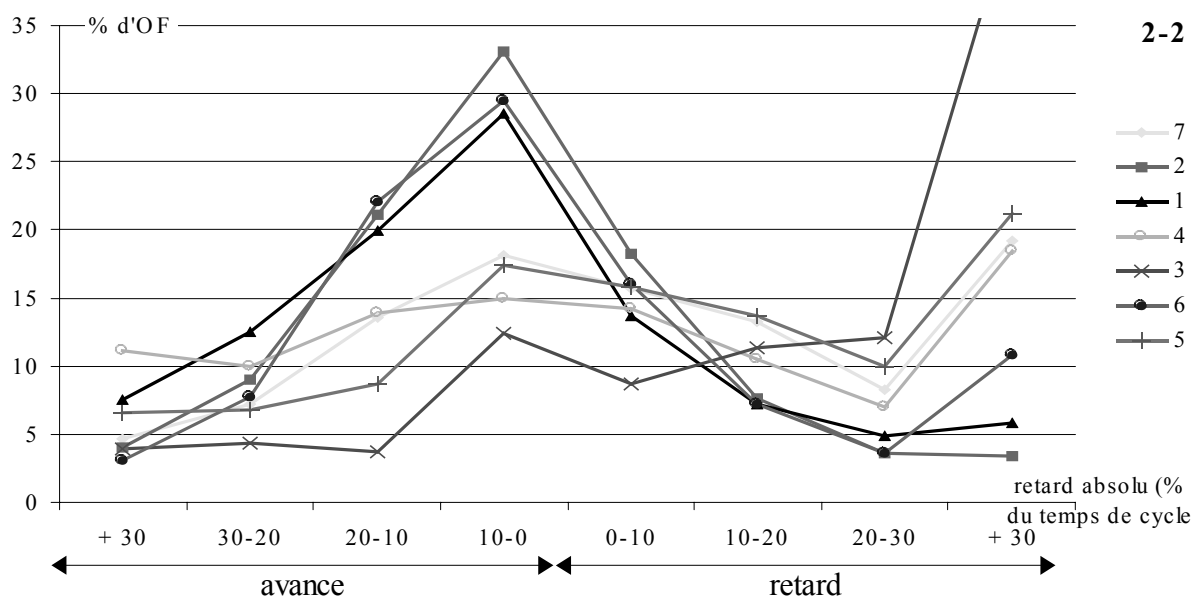


Figure 4.12 – Retard absolu pour différentes distributions d'incertitude

V.2.2.3. Ajout de commandes sûres

Les tests précédents ont été réalisés en prenant pour hypothèse que tous les OF à ordonnancer étaient incertains à des degrés divers. Pourtant, lorsque le gestionnaire d'atelier effectue un ordonnancement prévisionnel, une part importante des commandes est ferme. Nous avons donc pris en compte ces commandes fermes en affectant des OF dans le cinquième domaine d'incertitude (sur la Figure 4.9, cela correspond à la zone où Π et N valent 1). Cette cinquième zone comprend 40 OF, soit la moitié, l'autre moitié étant uniformément répartie entre les quatre autres zones d'incertitude.

Lorsque le gestionnaire d'atelier doit prévoir la date de fin d'un OF alors qu'une partie

seulement des commandes est ferme, il dispose de deux approches pour faire un ordonnancement prévisionnel par des méthodes classiques :

- considérer toutes les commandes comme fermes et toutes les planifier,
- ne prendre en compte que les commandes fermes.

Les résultats des trois ordonnancements prévisionnels (sous incertitude qualifié de « flou », basé uniquement sur les commandes fermes et considérant toutes les commandes comme fermes) avec pour paramètres (b,c) le couple (2,2), sont présentés Figure 4.13.

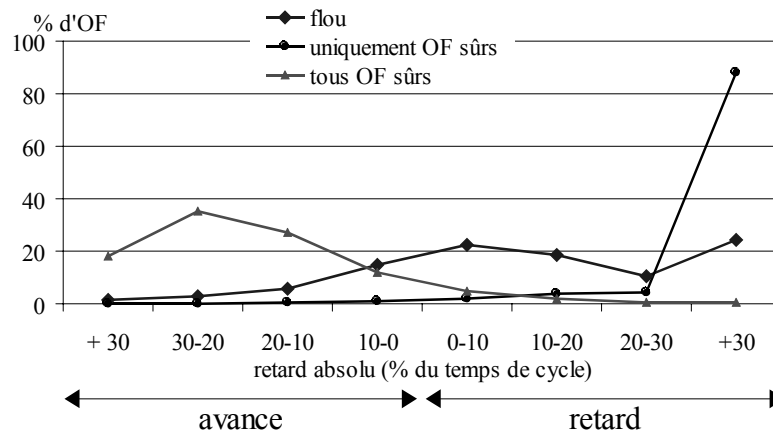


Figure 4.13 – Comparaison ordonnancements classiques et sous incertitude

L'ordonnancement basé sur toutes les commandes conduit logiquement à avoir des dates de fin largement surestimées, l'atelier « réel » étant nettement en sous charge par rapport à ce qui a été planifié. 92% des OF sont en avance, dont 80% de plus de 10% de leur temps de cycle. Moins de 3% des OF ont un retard significatif. L'ordonnancement prenant en compte uniquement les OF fermes aboutit, tout aussi logiquement, à avoir des dates de fin très nettement sous-estimées. En effet, seulement 3% des OF sont dans une fourchette de $\pm 10\%$ de leur temps de cycle, et plus de 98% des OF sont en retard, dont 88% de plus de 30% de leur temps de cycle. L'ordonnancement sous incertitude permet d'obtenir des résultats plus satisfaisants. 36% des dates de fin prévues ont une précision de $\pm 10\%$ de leur temps de cycle et seulement 10% des OF ont une avance significative par rapport aux prévisions. Il faut tout de même noter que beaucoup d'OF sont en retard, dont 25% de plus de 30% de leur temps de cycle.

L'ordonnancement sous incertitude aboutit donc à des résultats corrects. Considérer tous les OF comme fermes, bien que moins risqué, conduit à des dates prévisionnelles plutôt éloignées de la réalité. Ignorer les commandes qui ne sont pas encore conclues fait prendre beaucoup de risques pour donner des prévisions très mauvaises. Néanmoins, pour des distributions d'OF très marquées à droite ou à gauche, c'est-à-dire pour des OF majoritairement

sûrs d'être annulés ou confirmés, ces deux approches sont envisageables (méthode considérant tous les OF comme fermes pour des configurations tendant en majorité pour la confirmation et méthode ne prenant en compte que les OF fermes pour les distributions tendant vers l'annulation).

V.2.3. Bilan de la campagne de tests

Le test évaluant l'influence des OF certains sur la qualité de l'ordonnancement prédictif met en évidence l'intérêt de la méthode proposée. En effet, les deux approches par des ordonnancements classiques proposent des dates de fin largement sous et surestimées. Notre gestion de l'incertitude permet donc d'obtenir un ordonnancement prévisionnel réaliste, tout en prenant des risques raisonnables.

Le second test nous a permis d'évaluer l'influence de la répartition des OF dans les domaines d'incertitude sur la qualité de l'ordonnancement prévisionnel. Détaillée simplement pour le couple (2,2), l'analyse des résultats pour d'autres couples conduit aux mêmes conclusions. Il apparaît que, logiquement, les configurations où la plupart des OF sont plutôt sûrs d'être annulés ou confirmés (les configurations 1, 2 et 6) aboutissent à des prévisions assez bonnes des dates de fin, et donc à un ordonnancement prévisionnel assez fiable. Les distributions plus « éparses », comme les configurations 3 et 7 conduisent systématiquement à un retard important de l'ordonnancement réel par rapport au prévisionnel. La configuration 4 qui contient les OF les plus incertains, engendre des prévisions plutôt moyennes, avec une partie des OF dans une fourchette de prévisions correctes, mais aussi une part importante très en retard. Les distributions 5 et 6, bien que symétriques, aboutissent à des résultats totalement différents. Alors que les prévisions de la configuration 6 sont plutôt bonnes, les prévisions obtenues pour la répartition 5 sont très nettement sous-estimées par rapport aux résultats des ordonnancements réels. Ces distributions, bien qu'apparaissant dans nos tests comme des paramètres, sont, dans la réalité, des données d'entrée qui peuvent être évaluées par des indicateurs de contexte.

Le test évaluant l'influence des paramètres de sur-réservation sur la qualité des prévisions nous a permis de constater que :

- choisir le « meilleur » seuil flou de capacité dépend des données de l'atelier, mais aussi des risques que souhaite prendre le gestionnaire d'atelier
- ce seuil flou est aussi un indicateur sur la prise de risque, en autorisant plus ou moins de sur-réservation sur les ressources.

Cette première série de tests nous a permis de cerner le domaine dans lequel cet indicateur de sur-réservation et la méthode qui lui est attachée nous semblent utilisables. En effet, le premier test sur l'influence du seuil flou nous permet de noter que les prévisions de délais de fabrication les plus réalistes sont en général faites pour des seuils flous « moyens », c'est-à-dire dont les paramètres (b,c) varient de (1,4) à (2,4). Le deuxième test sur l'influence de la distribution des OF dans les domaines d'incertitude nous permet aussi de vérifier que la méthode proposée aboutit à des résultats satisfaisants pour des répartitions uniformes et où règne beaucoup d'incertitude (configurations 4 et 7). Il est bien évident que plus on se rapproche des cas aux limites et plus les prévisions sont bonnes. Mais le troisième test nous montre que dans ces cas là, la prise en compte de l'incertitude n'est pas intéressante.

Il ressort aussi de cette série de tests que le processus de confirmation et d'annulation des commandes nous permettant de simuler l'utilisation du système au cours du temps n'est pas parfait. Nous avons en effet constaté que, alors que les OF devraient avoir globalement autant tendance à être annulés qu'à être confirmés, nous avons une plus forte proportion d'annulation que de confirmation. Nous ne pensons pas que cette tendance remette en cause les résultats déjà obtenus, mais il serait néanmoins intéressant de refaire ces tests avec un processus de confirmation différent.

La série de tests effectuée n'est qu'un début et différentes perspectives de développement et de validation de cet indicateur de sur-réservation et de son traitement s'offrent à nous. Tout d'abord, pour vérifier la robustesse et la validité de nos premières constatations, ces tests devraient être répétés pour des configurations d'atelier différentes. Nous envisageons aussi de faire des tests plus réalistes en faisant varier l'incertitude des commandes avec le temps. Plus la date de début d'un OF se rapproche, plus on est sûr en règle générale de son annulation ou de sa confirmation. Un ordonnancement comporte donc en premier les OF certains à court terme, les OF devenant de plus en plus incertains jusqu'à un certain point au delà duquel tous les OF sont incertains.

VI. CONCLUSION

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté l'application de l'approche, décrite dans le chapitre 3, de l'ordonnancement interactif basé sur des indicateurs, au cas particulier de la prise en compte de commandes incertaines dans l'ordonnancement. Plusieurs indicateurs ont été définis, dont un indicateur d'action précis ainsi que son mode de traitement. Cet indicateur

de sur-réservation des ressources permet la prise en compte individuelle de l'incertitude des commandes au niveau de l'ordonnancement. La méthode d'utilisation de cet indicateur se base sur la théorie des possibilités pour caractériser l'incertitude de l'occurrence des commandes directement sur les OF et la logique floue pour modéliser le seuil de capacité des ressources (l'indicateur de sur-réservation). Notre but est de permettre au gestionnaire d'atelier de faire un ordonnancement prévisionnel alors même qu'une partie des commandes est encore en cours de négociation et de tirer de cet ordonnancement des propositions de délais de fabrication pour ces commandes non fermes.

Après avoir brièvement rappelé les principales notions de la théorie des sous-ensembles flous et de la théorie des possibilités, nous avons présenté l'indicateur de sur-réservation des ressources et son mode de traitement. Cet indicateur de sur-réservation est un seuil flou, représenté par un nombre flou (a,b,c) , caractérisant la capacité des ressources. L'implémentation de cette méthode dans un logiciel d'ordonnancement appelé TAPAS a été abordée dans la troisième partie du chapitre. Nous avons ensuite présenté les premiers résultats obtenus de la série de tests destinés à valider cette technique de gestion de l'incertitude en ordonnancement. Cette série de tests portait sur l'évaluation de la qualité des prévisions des délais de fabrication en fonction des paramètres de sur-réservation, de la répartition des OF dans les domaines d'incertitude et de la quantité d'OF certains et a abouti à des résultats encourageants.

Le chapitre suivant sera consacré à la deuxième problématique abordée à la fin du chapitre 1. Nous allons présenter l'application de l'ordonnancement interactif par des indicateurs à la gestion des opérateurs de production à court terme et définir les indicateurs nécessaires, ainsi que leurs éventuels modes de traitement.

*- Chapitre 5 – Indicateurs pour la
gestion des opérateurs en
ordonnancement*

Chapitre 5 – Indicateurs pour la gestion des opérateurs en ordonnancement

I. INTRODUCTION

Notre proposition d'un ordonnancement interactif facilité par des tableaux de bord et des indicateurs a été tout d'abord appliquée à la problématique de l'ordonnancement de commandes incertaines. Nous allons maintenant l'appliquer au problème de la gestion à court terme des opérateurs, de leurs compétences et de leurs temps de travail.

Ce chapitre est consacré à la présentation d'un ensemble d'indicateurs permettant de mieux prendre en compte les ressources humaines au niveau de l'ordonnancement, dans un contexte actuellement en pleine mutation. Nous présentons dans un premier temps le cadre du problème en rappelant les contraintes récentes imposées par les lois sur l'aménagement et la réduction du temps de travail, les lois de Robien et Aubry. Des discussions avec des éditeurs de logiciels d'ordonnancement français, ainsi qu'une enquête nous ont permis de mieux cerner certains des besoins des industriels en ce qui concerne la gestion des opérateurs à court terme. Les points suivants, ressortant de cette enquête, nous ont conforté dans notre approche :

- l'ordonnancement des opérateurs ne doit pas être automatique mais interactif,
- cette interactivité passe par des visualisations des capacités en opérateurs et en compétences.

Une étude des différentes approches de la gestion de ressources humaines à court terme nous permet de constater que les réponses proposées dans les travaux universitaires ou par les éditeurs de logiciels ne correspondent que partiellement aux besoins exprimés par les industriels. Nous proposons donc de mettre en application le cadre générique de l'ordonnancement interactif défini au chapitre 3, sur la problématique spécifique de la gestion des opérateurs. Les modalités de calcul de trois indicateurs (indicateur de capacité par opérateur, indicateur de capacité par compétence et indicateur de charge par compétence) sont présentées, ainsi que les traitements spécifiques de ces indicateurs dans l'ordonnancement.

II. PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

Les nouvelles contraintes imposées par la loi Aubry sur la réduction du temps de travail obligent les entreprises à mieux gérer leurs employés, notamment au niveau de leurs compétences et de leurs temps de travail. Nous décrivons ici ces contraintes imposées par loi, et les approches actuelles de la gestion des opérateurs de production. Une enquête, réalisée auprès de quelques industriels et qui nous a permis de mieux cerner les besoins, est présentée.

II.1. Contraintes légales

Les deux lois sur l'aménagement (loi de Robien en 1996) et la réduction (loi Aubry en 1998) du temps de travail définissent les contraintes et les limites des nouvelles règles de gestion des ressources humaines dans les entreprises et cadrent donc, en particulier, le processus d'ordonnancement des tâches de fabrication.

Le Code du Travail définit l'annualisation du temps de travail comme « la répartition sur tout ou partie de l'année de la durée annuelle de travail, assortie d'une réduction du temps de travail ». La durée moyenne hebdomadaire de travail doit être équivalente à 80% de la durée hebdomadaire légale. La loi Aubry définissant cette durée à 35 heures, la durée moyenne hebdomadaire d'un ouvrier annualisé doit être de 28 heures. Cette annualisation ne peut se faire sans certaines limites et contraintes, notamment au niveau de la durée maximale de travail hebdomadaire. Cette durée doit être au plus de :

- 48 heures (60 heures par dérogation),
- 44 heures sans heures supplémentaires,
- 46 heures en moyenne sur 12 semaines.

La durée maximale quotidienne de travail est fixée à 10 heures. Les heures supplémentaires autorisées ne doivent pas dépasser 10% de la durée de travail annuelle, sauf en cas de convention collective spécifique où elles peuvent aller jusqu'à un tiers de la durée annuelle. L'opérateur annualisé doit être prévenu de ses horaires de travail de 3 à 7 jours à l'avance (délai de prévenance), suivant accord collectif.

La loi Aubry apporte quelques compléments sur les interruptions de travail, en précisant notamment que :

- une pause d'au moins 20 minutes est obligatoire pour toute durée de travail quotidienne supérieure ou égale à 6 heures,
- une seule pause est autorisée par jour,

- cette pause ne doit pas excéder 2 heures.

Cette loi imposant aux entreprises de diminuer la durée de travail de leurs employés, beaucoup de compagnies ont préféré, en négociant les accords collectifs de réduction du temps de travail, passer un accord d'annualisation du temps de travail pour regagner en flexibilité ce qu'elles perdaient en temps.

Comme on peut le constater, l'annualisation du temps de travail rend encore plus complexe la gestion et l'affectation des opérateurs en ordonnancement. Nous avons donc étudié les réponses proposées par les logiciels commerciaux et les travaux de recherche en cours. Nous présentons la synthèse de cette étude dans la section suivante.

II.2. Les approches actuelles

Nous rappelons la définition de la notion de compétence, indissociable de la prise en compte des opérateurs en ordonnancement avant de détailler les approches proposées pour la gestion de l'annualisation du temps de travail et pour la gestion des opérateurs en ordonnancement.

II.2.1. Modèle de compétence

Le concept de **compétence** englobe les notions de niveau de compétence, de rémunération et de responsabilité d'une personne, auxquelles il ajoute une composante dite « générique » qui s'attache à définir les qualités et la personnalité de l'individu. Une compétence est ainsi composée de [Le Boterf 98] [Harzallah 00] :

- savoir, qui correspond aux connaissances sur le domaine considéré,
- savoir-faire, qui correspond à l'expérience acquise dans ce domaine,
- savoir-être, qui comprend un aspect social (capacité d'intégration, volonté d'engagement...) et un aspect cognitif (capacité à résoudre les problèmes).

La Figure 5.1 présente un modèle entité-relation de la notion de compétence.

Ce modèle met en valeur les trois composantes d'une compétence : le savoir, le savoir-faire et le savoir-être. Une compétence comporte au moins un savoir théorique, mais peut aussi comporter d'autres savoirs, des savoir-faire et des savoir-être. Une compétence est possédée par aucun, un ou plusieurs individus pour accomplir aucune, une ou plusieurs missions. Elle peut être relative à aucun, un ou plusieurs produits, processus, activités, ressources, etc.

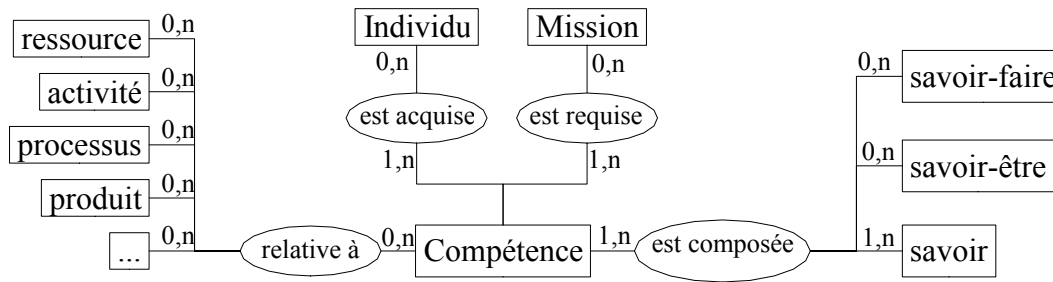


Figure 5.1 - Modèle entité-relation du concept de compétence

La notion de compétence a été souvent étudiée dans ses aspects relatifs au long terme (voir par exemple [Le Boterf 94] et [Le Boterf 98]), à la modélisation des compétences (voir par exemple [Harzallah 00] et [Harzallah et Vernadat 01]) ou aux réseaux de compétences (ou filières métiers, voir par exemple [Boucher 99] et [Boucher 00]).

Une étude des différentes approches logicielles proposées par les éditeurs et la recherche permettant de gérer les opérateurs de production, leurs temps de travail et leurs compétences, est présentée ici. Les approches étudiées ne concernent que la planification des opérateurs, et non la gestion des ressources humaines à long terme, cette dernière n'étant pas l'objet de nos travaux.

II.2.2. Gestion des opérateurs à court terme

II.2.2.1. Outils de planification du personnel

Les logiciels de planification du personnel (appelés « Staff scheduling software » ou « Workforce scheduling software ») concernent la gestion du personnel dans les sociétés de services ou à fort potentiel humain (comme les sociétés de grande distribution ou les hôpitaux par exemple). Nous pouvons citer par exemple des produits comme Temposoft [Temposoft 01], eSchedule [eSchedule 01], Flextime [Flextime 01] ou ESP [ESP 01]. Ces logiciels sont destinés à la construction de plannings de travail assurant la disponibilité d'un certain panel de compétences sur des créneaux horaires donnés. Ils permettent donc de gérer les durées de travail et les affectations des équipes et des personnels. Certains de ces logiciels réalisent aussi une affectation des opérateurs par poste afin d'assurer la continuité de la présence d'un employé sur les postes. Une partie d'entre eux prennent en compte l'annualisation du temps de travail dans les horaires de travail possibles. Les horaires et les affectations proposés tiennent compte des compétences des opérateurs.

Pour pouvoir gérer les opérateurs de production au niveau de l'ordonnancement, il faut aussi pouvoir planifier des séquences de tâches, issues des gammes de fabrication, utilisant

des ressources techniques (machines, outils...) pour absorber une charge donnée par le carnet de commandes. Cela n'est pas possible dans ces logiciels qui n'offrent pas de cadre de modélisation des données techniques et ne réalisent pas d'ordonnancement à proprement parler.

II.2.2.2. Gestion des opérateurs en ordonnancement

Des études visant à mieux intégrer les compétences des opérateurs dans l'ordonnancement ont été menées récemment. L. Franchini propose dans [Franchini 00] de modéliser les compétences globales de l'entreprise (identification des principales compétences requises par la production) et d'évaluer les compétences locales (hiérarchiser les compétences acquises par les opérateurs). On peut ensuite déterminer précisément les besoins en compétences (définir l'effectif nécessaire par qualification par rapport à une charge donnée) et affecter les opérateurs. Cette approche, implémentée dans un prototype du logiciel d'ordonnancement IOTM, considère que l'ordonnancement des tâches sur les ressources techniques est une donnée d'entrée du problème de planification des opérateurs (la prise en compte des ressources techniques est prioritaire celle des ressources humaines).

On trouve aussi des approches qui suggèrent d'ordonnancer simultanément les ressources humaines et techniques. Par exemple, on trouve dans [Pichot et Baptiste 01] une proposition de planification parallèle des tâches et des opérateurs. L'ordonnancement se fait en deux temps :

- affecter un ensemble de tâches aux opérateurs,
- ordonnancer les tâches sur les machines.

Il faut toutefois noter que cette approche, provenant du cas particulier d'une entreprise d'injection plastique, ne prend en compte que les compétences des régleurs et ne planifie pas les opérateurs « classiques ».

Parmi les logiciels d'ordonnancement, la prise en compte des opérateurs est généralement abordée grâce à l'ordonnancement multi-ressource. Des logiciels comme SipaPlus ou Ortems (voir chapitre 1, § V.2) proposent d'associer à chaque machine une liste d'opérateurs qualifiés. Lors de l'ordonnancement, le premier opérateur disponible est affecté. Cela ne permet qu'une gestion locale de l'opérateur, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de gestion globale de son temps de travail, ni de son affectation (pas de suivi de l'opérateur pour veiller à ce qu'il ait un travail régulier). On ne trouve pas d'analyse de la charge en terme de compétence.

Certaines approches plus orientées vers les hauts niveaux de la gestion de production

proposent de réaliser une adéquation charge/capacité d'un point de vue main d'œuvre. Par exemple, dans [Kane et al. 00], ou [Kane et Baptiste 01], les auteurs proposent un modèle permettant d'ajuster la capacité en opérateurs à la charge prévue en comparant les coûts de deux solutions possibles (faire faire des heures supplémentaires ou engager de la main d'œuvre intérimaire). On trouve dans [Erol et Dupont 00] un modèle qui permet d'intégrer la flexibilité liée aux ressources humaines dans le plan industriel et commercial et dans le plan directeur de production. Des modèles et algorithmes permettant d'équilibrer la charge et la capacité en opérateurs grâce aux degrés de liberté offerts par l'annualisation du temps de travail sont proposés dans [Hung 99] et [Vila et Marçola 01]. Toutes ces approches ne prennent pas en compte la notion de compétence, ne tiennent pas compte de l'annualisation du temps de travail et ne font pas d'affectation des opérateurs sur les ressources techniques. Ils sortent donc du cadre de notre étude.

II.2.2.3. Synthèse

Si la gestion des opérateurs est un sujet d'actualité, centre d'intérêt de bien de projets de recherche, elle reste faiblement implantée dans des logiciels commerciaux [Lansard et Devillard 01]. Ainsi, si l'annualisation du temps de travail est prise en compte dans des logiciels de planification du personnel destinés à des sociétés de services, elle l'est encore peu dans des logiciels de gestion de production ou d'ordonnancement. Le concept de compétence des opérateurs, bien que largement reconnu, reste géré à long terme, en termes de formation et de recrutement, au niveau des services de Ressources Humaines des entreprises. Ainsi, les trois points qui nous semblent cruciaux dans la gestion des opérateurs (prise en compte des compétences des opérateurs, annualisation de leur temps de travail et affectation sur les ressources) ne sont jamais présents simultanément dans approches étudiées.

Après de nombreux échanges avec des éditeurs de logiciels d'ordonnancement français, nous avons constaté qu'il ne se dessinait pas encore de consensus sur la manière de gérer les opérateurs en ordonnancement. Nous avons donc décidé de procéder à une enquête afin d'avoir le point de vue des industriels sur la question.

II.3. Besoin identifiés auprès des industriels

Cette enquête a été réalisée en 1999 auprès de quelques industriels avec lesquels nous sommes fréquemment en contact. Le contexte et les résultats de cette enquête sont détaillés dans les parties suivantes.

II.3.1. Contexte et buts de l'enquête

Notre but à travers cette enquête n'était pas de faire une étude exhaustive et représentative de l'ensemble du monde industriel, mais de collecter un échantillon d'opinions, afin de discerner les grandes directions permettant d'aborder le problème de l'affectation court terme des opérateurs. Le questionnaire a été envoyé à une trentaine d'entreprises ; dix-neuf questionnaires ont été retournés dont seulement quinze complets. Dans les quatre questionnaires incomplets, la partie concernant la gestion des opérateurs proprement dite était omise par manque d'intérêt pour le sujet. La taille et le type d'activités des entreprises consultées sont très variés. On trouve onze PME/PMI et sept entreprises appartenant à des grands groupes. Les secteurs d'activités concernés sont les suivants :

- aéronautique (2 compagnies),
- agro-alimentaire (2 compagnies),
- pharmaceutique (2 compagnies),
- armement (1 compagnie),
- matériel électrique (4 compagnies),
- pièces mécaniques (4 compagnies),
- chaudronnerie (1 compagnie),
- semi-conducteurs (2 compagnies),
- distribution (1 compagnie).

La première partie du questionnaire est consacrée à l'ordonnancement classique. Nous nous intéressons tout d'abord aux outils utilisés pour ordonnancer (s'il y a outil), et à la satisfaction qu'ils procurent, afin de savoir si les logiciels actuels correspondent aux besoins de nos interlocuteurs. Il nous a aussi paru intéressant de vérifier si les entreprises estimaient présenter des spécificités par rapport à la problématique classique de l'ordonnancement.

La deuxième partie du questionnaire est orientée vers la gestion des opérateurs. Nous souhaitons connaître, dans un premier temps, l'importance et l'utilité de cette gestion pour les entreprises, puis toutes les particularités et les orientations envisagées par les industriels. Les questions portent sur :

- la stratégie d'affectation à envisager (au même niveau ou après l'affectation des machines),
- le type de prise en compte des capacités :
 - individuelle par opérateur,

- par équipe, une équipe possédant plusieurs compétences. Une affectation fine à l'intérieur de l'équipe sur l'horizon planifié ne serait dans ce cas pas nécessaire.
- par compétence. On gère l'adéquation charge/capacité, puis on planifie les opérateurs pour avoir les meilleures compétences possibles.
- l'entité à laquelle l'opérateur est affecté :
 - une période de temps : fonctionnement dans lequel on désire s'assurer que les qualifications principales sont présentes à tout moment du fonctionnement de l'atelier, sans affectation fine (ce fonctionnement se rapproche du « Staff Scheduling » décrit dans la partie II.2.2.1),
 - un groupe de ressources : les opérateurs sont affectés à un groupe de ressources non équivalentes (par exemple, une ligne ou un atelier),
 - un type de ressource : la qualification correspond à une compétence générale sur un type de ressource.
 - une phase : un opérateur est affecté à un type de phase, toutes ressources confondues. Ce type d'affectation est par exemple représentatif des phases de contrôle.
 - une sous-phase : ce type d'affectation permet de gérer les opérations de réglage ou de contrôle.
 - un ensemble de phases ou un ordre de fabrication : l'opérateur est responsable d'un ensemble de phases, sur un ordre de fabrication donné.
- l'importance du régleur (la compétence d'un régleur sort du cadre classique « une compétence sur un type de ressource », il nous a donc semblé intéressant de vérifier si ce cas présente un intérêt réellement significatif),
- le niveau de qualification (influence sur l'affectation et sur la durée de réalisation d'une tâche),
- les principaux objectifs d'une gestion des opérateurs.

La dernière partie du questionnaire aborde le problème de l'annualisation de la durée de travail, son utilité et sa place dans un logiciel d'ordonnancement. Nous cherchons aussi à savoir si les outils présents actuellement sur le marché répondent aux besoins des industriels.

Le questionnaire complet est présenté en annexe A.

II.3.2. Résultats

Les outils d'ordonnancement sont soit des modules de logiciels de gestion de production (47%), soit des logiciels d'ordonnancement dédiés (40%). Certaines entreprises font un ordonnancement manuel (40%), seul ou en complément de l'outil informatique. Une grande partie des utilisateurs n'est pas satisfaite (40% d'insatisfaction en moyenne, tous outils confondus). Les raisons de cette insatisfaction sont assez variées, mais on peut faire ressortir deux points importants :

- le manque de visualisation et d'ergonomie graphique (surtout dans les logiciels de gestion de production),
- le manque de possibilité de synthétiser ou de détailler les informations relatives aux entités manipulées (machines, produits, équipes, ordres de fabrication...).

69% des industriels pensent avoir des besoins spécifiques en ordonnancement. Ces spécificités sont liées à des règles de gestion de ressources particulières (69%) ou à des particularités du processus de fabrication (62%). Pour 46% d'entre eux, ces spécificités sont liées à un problème de contraintes de disponibilité des compétences.

79% des entreprises interrogées trouvent la gestion des opérateurs utile ou indispensable en ordonnancement. Les entreprises qui jugent la gestion des opérateurs inutile ont une organisation par équipes constituées d'opérateurs polyvalents affectées à des îlots de fabrication, comme des groupes autonomes par exemple. Ces îlots reçoivent un plan de production global et n'ont pas d'ordonnancement précis.

Un autre point encourageant apparaît dans les réponses à la dernière partie du questionnaire, où seulement 7% des industriels interrogés trouvent que la prise en compte de l'annualisation du temps de travail dans un logiciel d'ordonnancement est inutile. Ces réponses sont assez intéressantes, puisque très peu des entreprises interrogées étaient déjà annualisées à l'époque de l'enquête. On note aussi qu'ils ne sont que 22% à trouver la prise en compte de l'annualisation suffisante dans les logiciels actuels.

Les différentes orientations que pourrait prendre la gestion des opérateurs ne sont pas toujours clairement définies par les réponses obtenues. Le problème de la relation affectation opérateur/affectation ressource n'est pas résolu. Un point de divergence important entre les éditeurs de logiciels est de savoir si les opérateurs doivent être affectés après l'ordonnancement des machines ou bien si les opérateurs et les machines doivent être traités au même niveau. On obtient, en réponse au questionnaire, 60% pour une affectation des opérateurs comme une conséquence de la planification des machines, et 40% pour une

affectation des opérateurs à gérer au même niveau que celle des machines. On peut regretter l'absence d'une troisième possibilité proposant de gérer les opérateurs avant d'ordonnancer les machines.

Le problème évoqué ensuite est celui de la visualisation de la capacité disponible relative aux opérateurs. Les visualisations souhaitées sont :

- la capacité par type de compétence (73%),
- la capacité par équipe (53%),
- la capacité globale, tous opérateurs confondus (33%),
- la capacité par opérateur (13%).

Nous souhaitons ensuite définir l'entité à laquelle l'opérateur doit être affecté. Elle peut être un groupe de ressources équivalentes (67%) ou non équivalentes (53%). Les autres possibilités d'affectation - à une ressource précise (13%), à un type de phase (7%) ou à un lot de pièces (0%) - ont peu d'intérêt pour les industriels. La notion de qualification de régleur est jugée inutile à 40%, ce qui nous replace dans le cadre classique « une compétence sur un type de ressource ». A l'inverse, il est très important pour les industriels de prendre en compte la qualification d'un opérateur pour déterminer son affectation (aucune entreprise ne trouve cette notion inutile). Le lien entre la compétence de l'opérateur et la durée opératoire demandait lui aussi à être éclairci. Dans tous les logiciels actuels, cette durée est fixe, mais pour les entreprises, le niveau de qualification de l'opérateur a parfois (47%) ou toujours (27%) une influence sur la durée de réalisation d'une tâche, ce qui pose un problème dans le cadre d'un ordonnancement « classique ».

Les objectifs recherchés par les entreprises dans la gestion des opérateurs sont assez variés. Les principaux objectifs sont de connaître la capacité globale en opérateurs, et la capacité par type de compétence opérateur. Les industriels préfèrent visualiser le potentiel de leur atelier, plutôt que prendre des décisions à un niveau opérationnel, les objectifs correspondants (affecter un opérateur présentant la meilleure qualification à une tâche, connaître les affectations individuelles des opérateurs ou maximiser la charge des opérateurs), s'ils sont eux aussi jugés importants, étant fréquemment moins bien classés. Les industriels sont ainsi intéressés par une visualisation avant l'ordonnancement, ce qui est relativement rare, les applications actuelles se focalisant plus volontiers sur l'évaluation des performances, après l'ordonnancement.

La dernière partie du questionnaire concerne les obstacles rencontrés par les entreprises pour avoir une gestion des opérateurs plus efficace. Les problèmes principaux ressortent des réponses :

- le manque d'outil informatique (40%),
- la difficulté à formaliser la stratégie d'affectation (33%).

Les résultats complets sont présentés en annexe B.

Certains besoins exprimés par les industriels restent sans réponse dans les approches étudiées au paragraphe II.2, en particulier au niveau de la visualisation des ressources existantes. Notre approche de l'ordonnancement interactif, basée sur l'utilisation de tableaux de bord et d'indicateurs, semble pouvoir offrir une réponse appropriée à ces besoins.

III. DES INDICATEURS POUR LA GESTION DES OPÉRATEURS EN ORDONNANCEMENT

III.1. Spécificité d'un système d'indicateurs pour la gestion des opérateurs

Comme nous l'avons vu précédemment, les logiciels d'ordonnancement actuellement sur le marché n'abordent pas encore le problème de l'affectation du personnel dans un contexte d'annualisation. Cela ne saurait toutefois tarder, aussi proposons nous les indicateurs adaptés à un ordonnancement interactif dans ce contexte. Cette approche a été présentée, sous une première forme, dans [Grabot et Letouzey 00]. A titre de validation, nous proposons une spécification et une implantation de certains des traitements qui pourraient permettre l'intégration de ces données. Afin de mieux l'appréhender, la démarche proposée est tout d'abord globalement présentée à travers un exemple.

III.1.1. Exemple

Considérons les opérateurs, leurs compétences, leurs niveaux de compétence (entre parenthèses) et leurs horaires dans le passé (les opérateurs sont annualisés) présentés dans le Tableau 5.1.

Tableau 5.1 – Profils des opérateurs de l'atelier

opérateur	compétences	moy. passée	sem. dernière
Dupond	contrôle (3), fraisage (1) et réglage fraiseuse (2), tournage (1) et réglage tour (2)	30	42
Durant	contrôle (1), tournage (2), rectification (1)	26	38
Leroi	fraisage (1) et réglage fraiseuse (1), C.U. ² (2) et réglage C.U. (2)	35	40
Martin	fraisage (2), tournage (2), perçage (1)	27	33
Moine	contrôle (1), tournage (3) et réglage tour (2)	30	45
Vannier	tournage (1) et réglage tour (3), rectification (2) et réglage rectifieuse (2)	28	40
Vacher	fraisage (2), C.U. (1), perçage (2) et réglage perceuse (1)	25	40

On va dans un premier temps chercher à connaître le potentiel global de l'atelier en termes de compétences et d'opérateurs. Les premières informations visualisées sont donc que l'on dispose de :

- 7 opérateurs dans l'atelier,
- 11 compétences,
- 5 opérateurs en tournage dont deux de niveau 1,
- etc.

On s'assure ainsi qu'il n'y a aucune compétence non disponible, qu'il y a suffisamment d'opérateurs présents...

Une fois que le gestionnaire d'atelier s'est assuré que la capacité globale de son atelier est suffisante, il va vérifier plus localement si la disponibilité en compétence est elle aussi suffisante. Il va ainsi vouloir déterminer la capacité de chaque compétence. Il détermine par exemple la capacité en tournage en additionnant les temps de travail de tous les opérateurs qualifiés en tournage, soit Dupond, Durant, Martin, Moine et Vannier. Les opérateurs étant sous le régime de l'annualisation, leurs durées de travail sont variables d'une semaine à l'autre et dépendent des temps de travail déjà effectués. Le gestionnaire d'atelier est alors confronté au problème de déterminer les durées de travail futures de ces cinq opérateurs pour pouvoir calculer la capacité en tournage.

Il va donc falloir, en fonction des horaires passés présentés dans le tableau, déterminer quels sont les horaires futurs possibles pour chacun des opérateurs. L'opérateur Leroi par

²C.U. signifie Centre d'Usinage

exemple, a travaillé en moyenne 35 heures par semaine depuis le début de l'année. Pour respecter les contraintes évoquées au paragraphe II.1, il va devoir nettement diminuer ses temps de travail dans le futur. Mais comme il est le seul à être qualifié en réglage C.U. (il possède une compétence critique), ses durées de travail vont être fortement dépendantes de la charge du C.U. (on peut vouloir conserver sa compétence disponible plus tard, la garder régulièrement disponible, ou en avoir immédiatement besoin). Déterminer la « capacité » d'un opérateur est donc relativement délicat, et il est utile de pouvoir visualiser toutes les durées de travail possibles. A partir des temps de travail, le gestionnaire d'atelier peut calculer la capacité de chaque compétence. Il est alors confronté à un second problème. Certains opérateurs ayant plusieurs compétences (ils sont polyvalents), comment calculer la capacité de chacune de leurs compétences? Par exemple, l'opérateur Leroi est qualifié en fraisage, en C.U., en réglage C.U. et en réglage fraiseuse. Il ne peut cependant être présent sur tous les postes tout le temps. La visualisation de la capacité par compétence doit donc tenir compte de cette polyvalence.

Ayant une évaluation de la capacité de chaque compétence, le gestionnaire d'atelier souhaite alors s'assurer que cette capacité va être suffisante pour faire face à la charge. Il doit donc pouvoir déterminer la charge par compétence. Disposant de la charge et de la capacité pour chaque compétence, le gestionnaire d'atelier peut les comparer et s'assurer qu'il dispose de suffisamment d'opérateurs, suffisamment qualifiés.

La démarche présentée dans cet exemple est détaillée et formalisée dans les paragraphes suivants.

III.1.2. Positionnement des indicateurs

Les points les plus importants ressortant du questionnaire sont que :

- une gestion des opérateurs entièrement automatisée n'est pas souhaitée,
- la visualisation des capacités globales en compétences ou opérateurs est essentielle.

Notre approche par des indicateurs devrait permettre à l'utilisateur du logiciel d'ordonnancement de réaliser lui-même les affectations des opérateurs tout en lui fournissant les visualisations dont il a besoin. Il nous semble raisonnable de penser que la gestion des opérateurs intervienne en amont de l'ordonnancement, afin de préparer celui-ci en termes de compétences et de durées de travail des opérateurs. En effet, les industriels ne souhaitant pas que le logiciel d'ordonnancement fasse une affectation des opérateurs entièrement automatisée, la notion de « plan de charge par compétence » peut constituer un élément de

réponse au problème. En outre, l'horizon d'un plan de charge, plus long que celui d'un ordonnancement, est plus adapté à la gestion du temps de travail d'un opérateur annualisé.

La gestion des opérateurs donc intervenir en parallèle du plan de charge pour réaliser un plan de charge par compétence (voir Figure 5.2).

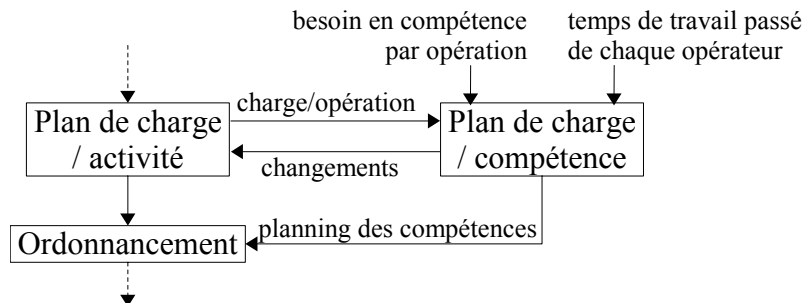


Figure 5.2 - Position de la gestion des compétences par rapport à l'ordonnancement

A l'instar du plan de charge classique qui prévoit la charge et ajuste la capacité des ressources techniques pour que la production puisse être réalisée, le plan de charge par compétence permet de prévoir la charge par compétence et d'ajuster la capacité correspondante sur un horizon plus important que l'ordonnancement, ce qui permet une meilleure optimisation globale. La réalisation de cette adéquation charge/capacité par compétence peut être faite par le gestionnaire d'atelier en lissant la charge, ou bien ajustant la capacité à la charge en suivant les étapes suivantes :

- visualisation de la capacité globale de l'atelier en compétences et en opérateurs,
- visualisation de la charge par compétence,
- réalisation de l'adéquation entre la charge et la capacité.

La première étape nécessite plusieurs indicateurs :

- un premier indicateur va renseigner sur le potentiel de l'atelier en nombre d'opérateurs présents et en nombre de compétences disponibles dans l'atelier. Cet indicateur permet de se faire une idée générale de l'atelier par rapport aux opérateurs.
- un deuxième indicateur va renseigner sur la disponibilité des opérateurs, c'est-à-dire sur leur présence et leurs horaires de travail possibles. Cet indicateur se révèle très complexe dans le cas d'un opérateur annualisé. En effet, si l'opérateur considéré a beaucoup travaillé en début d'année, il devra travailler peu à la fin de l'année. En conséquence, il faut le traiter comme une ressource « consommable », dans le sens où sa « capacité » future (ses durées de travail futures) dépend de son « utilisation » passée. L'indicateur devra donc tenir compte du passé de l'opérateur et se projeter dans l'avenir en fonction de ce passé.
- un troisième indicateur va renseigner sur la disponibilité de chaque compétence, c'est-à-dire

sur le nombre d'opérateurs possédant chaque compétence, leur polyvalence, leur temps de travail, etc.

La deuxième étape nécessite un indicateur permettant de visualiser la charge par compétence.

La troisième étape consiste à réaliser l'équilibre entre la charge exprimée par cet indicateur et la capacité visualisée à l'étape précédente.

III.1.3. Indicateurs proposés

Les trois étapes évoquées ci-dessus (visualisation de la capacité, de la charge puis adéquation entre les deux) nécessitent la mise en œuvre de plusieurs indicateurs. Ces indicateurs ont pour but d'aider à visualiser la capacité et la charge. Dans la démarche présentée dans la section III.1.1 et généralisée dans la partie III.1.2, nous avons remarqué qu'il était tout d'abord nécessaire de visualiser la capacité globale de l'atelier en termes de compétences et d'opérateurs, puis de visualiser les capacités des opérateurs d'une part et des compétences d'autre part. Enfin, il faut visualiser la charge par compétence. Cela nous conduit donc à quatre indicateurs :

- indicateur de potentiel de l'atelier (nombre de compétences et d'opérateurs),
- indicateur de capacité par opérateur,
- indicateur de capacité par compétence,
- indicateur de charge par compétence.

Ces quatre indicateurs sont positionnés dans l'architecture présentée Figure 5.3.

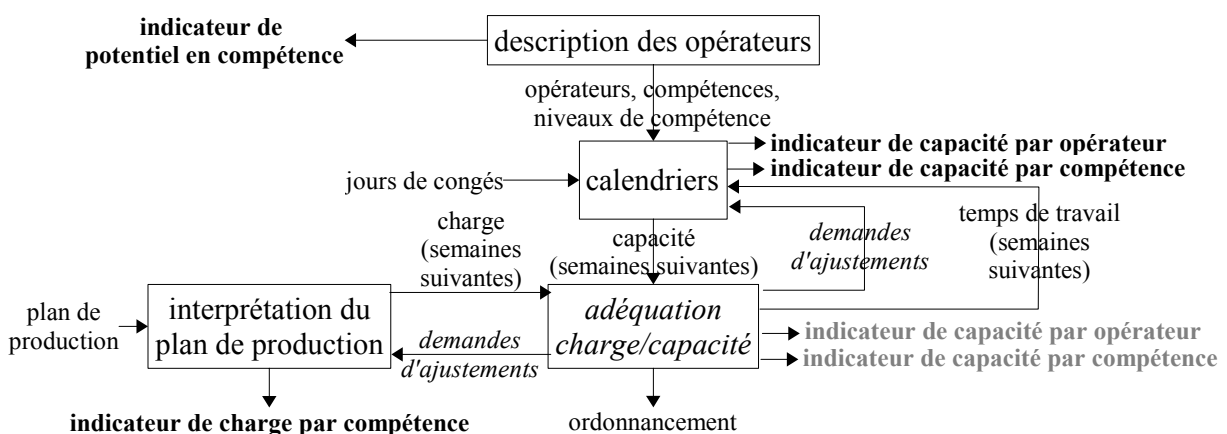


Figure 5.3 – Un système d'indicateurs pour la gestion des opérateurs

La visualisation du potentiel de l'atelier se fait par l'intermédiaire d'un indicateur, appelé « indicateur de potentiel en compétence », qui renseigne sur les compétences et niveaux de

compétence des opérateurs disponibles. Le deuxième indicateur envisagé concerne les horaires de travail d'un opérateur. Cet indicateur est qualifié « d'indicateur de capacité par opérateur » ; il va renseigner sur les possibilités d'horaires et de durées de travail futurs d'un opérateur en fonction de ses horaires et durées passés et de ses compétences. Un indicateur évalue la capacité par compétence en fonction des opérateurs possédant cette compétence et de leurs durées de travail. La charge est évaluée par l'indicateur de charge par compétence.

Ces quatre indicateurs peuvent être considérés comme des indicateurs de contexte lorsqu'ils sont utilisés en amont de l'ordonnancement, pour renseigner sur l'état global des compétences avant d'affecter les opérateurs. Les trois indicateurs de capacité et de charge peuvent aussi être utilisés en tant qu'indicateurs d'action, renseignant sur les possibilités d'actions pour réaliser l'adéquation charge/capacité et sur les degrés de liberté existant au niveau des opérateurs (durées de travail, polyvalence...). Les modalités de calcul de ces indicateurs seront présentées dans la partie III.2 et les actions possibles seront décrites dans la section III.3.

Les indicateurs proposés peuvent, en tant qu'indicateurs d'action, être aussi utilisés pour améliorer l'ordonnancement, en renseignant le gestionnaire d'atelier sur les degrés de liberté liés à la flexibilité des horaires des opérateurs et à leur polyvalence.

III.1.4. Modélisations des compétences et des activités

La mise en œuvre des indicateurs proposés dans le paragraphe précédent nécessite la définition de modèles de données spécifiques, afin de prendre en compte les compétences d'un opérateur, ses horaires ou les compétences nécessaires à la réalisation d'une gamme de fabrication. Les modèles proposés sont représentés à l'aide de notations orientées objet, utilisant la syntaxe OMT [Rumbaugh 96]. Ce formalisme nous semble particulièrement adapté à la modélisation d'un opérateur et de ses compétences car il permet de représenter des agrégations et des généralisations.

La définition des trois premiers indicateurs décrits (indicateurs de profil opérateur, de capacité par opérateur et de capacité par compétence) relève des caractéristiques de l'opérateur, ses compétences et niveaux de compétences, ainsi que son emploi du temps, c'est-à-dire ses temps de travail passés. Ce modèle doit donc permettre de lier un opérateur à ses horaires pour calculer l'indicateur de capacité par opérateur, à ses compétences pour calculer l'indicateur de potentiel en compétence (nombre de compétences et d'opérateurs disponibles) et aux deux pour calculer l'indicateur de capacité par compétence. Le modèle mis au point est

présenté Figure 5.4.

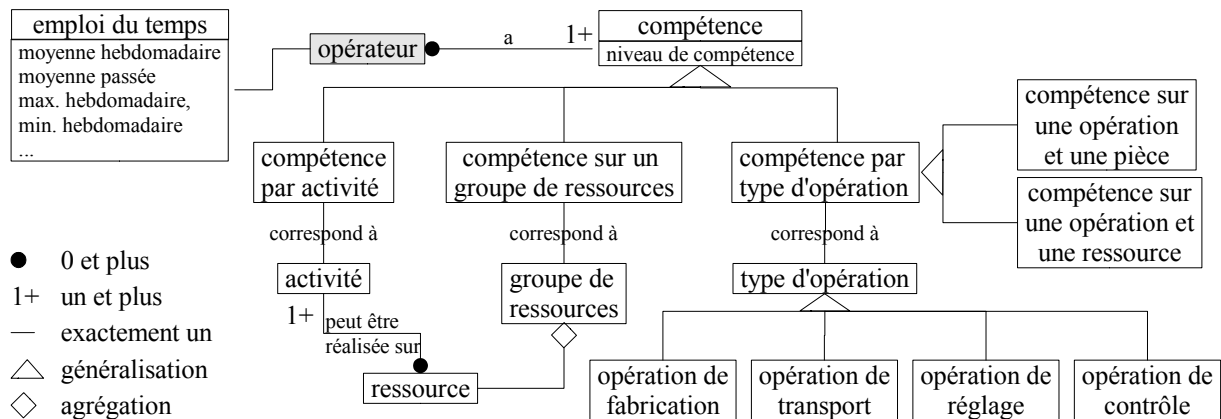


Figure 5.4 - Modèle d'un opérateur et de ses compétences

Un opérateur peut être polyvalent s'il a plusieurs compétences ou non polyvalent s'il n'en a qu'une. Il peut être plus ou moins compétent, et possède donc un niveau de compétence suivant sa plus ou moins grande aptitude à réaliser le type d'activité considéré. Une compétence peut être possédée par plusieurs opérateurs. La compétence peut être considérée de plusieurs points de vue : par activité, sur un groupe de ressources ou sur un type d'opération. Une activité, comme le fraisage ou le tournage, peut être réalisée sur plusieurs ressources. Par exemple, un fraisage peut être réalisé sur une fraiseuse ou un centre d'usinage. La compétence associée à un groupe de ressources (la taille et la composition du groupe étant quelconques) permet de ne pas faire d'affectation précise des opérateurs, mais simplement de les affecter à un atelier ou à une cellule. Une compétence peut aussi être associée à un type d'opération comme la fabrication, le réglage, le contrôle, la manutention... Cette compétence sur une opération peut même être restreinte à un seul type de pièce ou un seul type de ressource (compétence pour le contrôle de la pièce X, compétence pour le réglage du tour Y). Ces deux dernières possibilités ont toutefois semblé peu intéressantes dans les réponses à notre enquête.

Le dernier indicateur (charge par compétence) peut être calculé très simplement si le concept d'activité est utilisé (le modèle de la Figure 5.4 est alors suffisant). En effet, chaque ressource mentionnée dans la gamme correspond à une activité, chaque activité correspond à une compétence. L'indicateur de charge par compétence se définit alors très simplement par rapport à la charge par activité. Dans le cas contraire, le modèle des gammes doit être adapté afin de pouvoir calculer l'indicateur. Le modèle objet est présenté Figure 5.5.

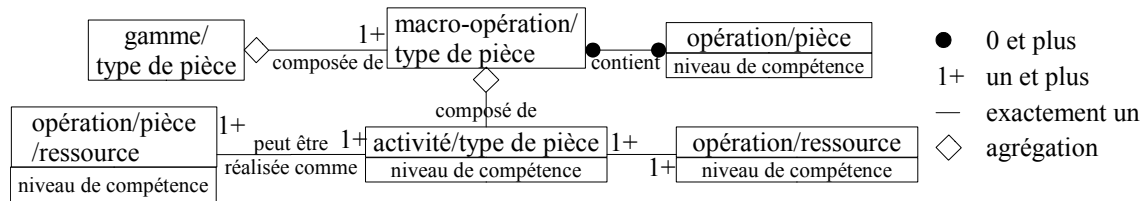


Figure 5.5 - Modèle d'une gamme

Une gamme correspondant à un certain type de pièce est composée d'une ou plusieurs macro-opérations. Chaque macro-opération peut être composée soit d'une activité, soit d'opérations élémentaires (si le concept d'activité n'est pas utilisé). Une activité peut être soit une opération affectée à une ressource, sans différenciation suivant le type de pièce (par exemple, un transport sur un chariot), soit une opération spécifique à une pièce affectée à une ressource. Pour chaque opération ou activité, un niveau de compétence minimal de l'opérateur peut être spécifié.

Les modèles proposés ci-dessus permettent de représenter les données de façon à pouvoir calculer les différents indicateurs décrits dans le paragraphe suivant.

III.2. Indicateurs de contexte

Le premier indicateur de contexte considéré au paragraphe III.1.3 (Figure 5.3) présente :

- l'opérateur,
- ses compétences,
- ses niveaux de compétence.

Cet indicateur peut être agrégé en un indicateur synthétique présentant :

- le nombre d'opérateurs présents dans l'atelier,
- le nombre de compétences disponibles,
- le niveau de compétence moyen global ou par compétence.

Il permet simplement de se faire une idée générale sur les compétences des opérateurs présents dans l'atelier.

Trois autres indicateurs ont été identifiés : un indicateur de capacité par opérateur, un indicateur de capacité par compétence et un indicateur de charge par compétence.

III.2.1. Indicateur de capacité par opérateur

Nous avons vu que, lorsque le temps de travail d'un opérateur est annualisé, celui-ci peut être considéré comme une ressource « consommable », dans la mesure où sa capacité

future dépend de sa charge passée. Il est donc important de visualiser la capacité à venir de chaque opérateur, afin que le gestionnaire d'atelier sache précisément de quelles ressources humaines il dispose. L'indicateur de capacité par opérateur comporte donc une partie « passé », présentant l'évolution de sa durée de travail depuis le début de l'année, incluant sa durée de travail de la semaine passée, et une partie « simulation du futur », dépendant du passé et de la façon dont l'annualisation est gérée. La partie « passé » ne servant qu'à définir la partie « futur », elle sera la plus simple et concise possible. On préfère donc prendre la moyenne des durées de travail passées que l'évolution des temps de travail dans son ensemble, ce qui simplifie le calcul et la représentation de l'indicateur.

III.2.1.1. Définition générale de l'indicateur de capacité par opérateur

Un opérateur dont le temps de travail est réduit et annualisé doit faire en moyenne 28 heures par semaine. Si, sur le début de l'année, il a fait en moyenne plus de 28 heures par semaine, il doit compenser cet excès sur le reste de l'année. A l'inverse, s'il est en sous-charge, il doit compenser ce manque. Pour une question de confort de l'opérateur, les transitions d'une semaine à l'autre ne doivent pas être trop brutales. Nous avons fait l'hypothèse qu'une différence de 20% d'une semaine à l'autre est acceptable.

La durée de travail d'un opérateur pour la prochaine période est $\pm 20\%$ de sa durée de travail actuelle. Mais que se va-t-il se passer s'il augmente sa durée de travail alors qu'il est déjà en excès? Et à l'inverse, quelles seront les conséquences d'une forte réduction de son temps de travail sur la disponibilité de ses compétences? L'indicateur de capacité par opérateur doit donc présenter les durées de travail futures possibles de l'opérateur, tout en présentant leurs conséquences sur les semaines à venir.

Nous définissons ainsi l'indicateur de capacité par compétence en précisant les extrêmes de l'enveloppe de $\pm 20\%$ autorisée et en incluant une composante visant pour l'opérateur un régime stable, c'est-à-dire des horaires les plus réguliers possibles. Pour un opérateur dont la moyenne hebdomadaire passée est supérieure à 28 heures (en excès), les trois possibilités sont alors de :

- faire décroître régulièrement ses durées de travail jusqu'à atteindre un régime stable,
- l'utiliser au maximum dans les périodes qui suivent pour faire face à une forte charge pour l'une de ses compétences (critique) (limite supérieure de l'enveloppe),
- l'utiliser le moins possible pour garder disponible plus tard une de ses compétences qui pourrait devenir critique (limite inférieure de l'enveloppe).

On utilise les notations présentées Tableau 5.2.

Tableau 5.2 - Notations utilisées

Notation	Signification
Sp	Nombre de semaines passées
Sr	Nombre de semaines restantes
St	Nombre de semaines travaillées par an, soit 48 semaines
Tsp	Durée de travail de la semaine passée
Tp	Durée de travail hebdomadaire moyenne passée
Tr	Durée de travail hebdomadaire moyenne restante
Tm	Durée de travail moyenne annuelle, soit 28 heures
Tmax	Durée de travail hebdomadaire maximale légale, soit 48 heures
Tmin	Durée de travail hebdomadaire minimale, que l'on fixe à 15 heures

On a : $Sp + Sr = St = 48$ semaines,

$$\frac{(Tr * Sr + Tp * Sp)}{St} = Tm \text{ soit } Tr * Sr + Tp * Sp = 1344 \text{ heures.}$$

III.2.1.2. Première possibilité : atteindre un régime stable

La première possibilité, faire décroître régulièrement la durée de travail jusqu'à atteindre un régime stable, est présentée Figure 5.6.

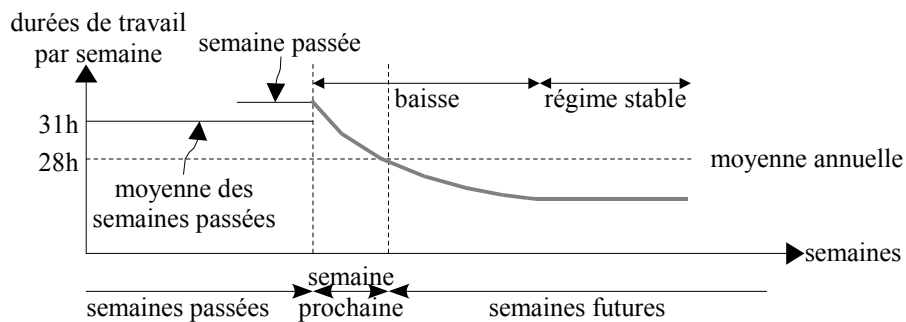


Figure 5.6 – Indicateur de capacité par opérateur, régime stable

Elle peut être exprimée par l'équation suivante :

$$\sum_{i=1}^m (Tsp * 0,8^i) + (Sr - m) * 0,8^m * Tsp = Tr * Sr = 1344 - Tp * Sp \quad (5.1)$$

\leftarrow baisse \rightarrow \leftarrow régime stable \rightarrow

La première partie du membre gauche de l'équation (5.1) $(\sum_{i=1}^m (Tsp * 0,8^i))$ représente la baisse régulière de 20% de la durée de travail durant m périodes. La deuxième partie $((Sr - m) * 0,8^m * Tsp)$ représente le régime stable et le membre de droite $(Tr * Sr = 1344 - Tp * Sp)$ la

moyenne annuelle de 28 heures par semaine. Cette équation reste valide à condition que la durée de travail minimale prévue ne soit pas inférieure à T_{min} , soit $0,8^i * T_{sp} \geq 15$ heures. m peut être déterminé de façon empirique, puis vérifié par l'équation (5.1).

III.2.1.3. Deuxième possibilité : maximiser la capacité à court terme

Dans le cas précédent, on estimait les durées de travail futures de l'opérateur dans le cas où celles-ci allaient être régulières. Les deux cas suivants sont les deux cas extrêmes, évaluant les durées de travail futures maximales et minimales. On étudie ici la possibilité de disposer immédiatement d'une capacité maximale.

Pour obtenir une capacité immédiatement maximale alors que la durée hebdomadaire moyenne passée est déjà supérieure à 28 heures, il va falloir rapidement faire décroître la durée de travail pour atteindre la moyenne annuelle légale. La Figure 5.7 présente l'indicateur de capacité par opérateur dans ce cas là.

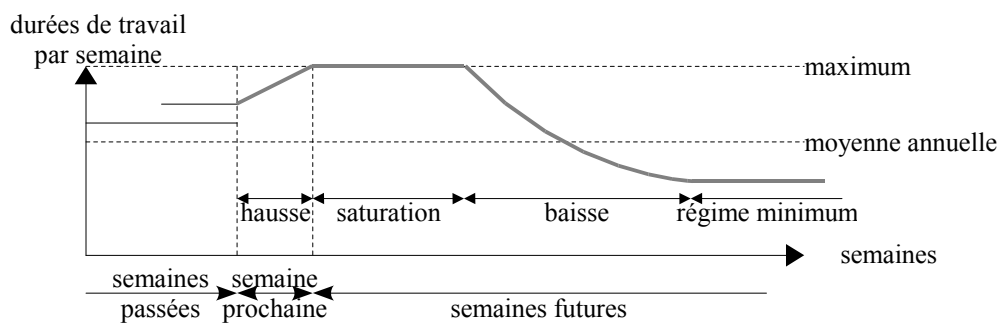


Figure 5.7 – Indicateur de capacité par opérateur, maximum immédiat

La durée de travail doit donc augmenter de 20% par période jusqu'à atteindre la saturation (48 heures). L'atteinte de ce maximum est exprimée par :

$$T_{sp} * 1,2^s > T_{max} \text{ soit } s > \frac{\ln\left(\frac{T_{max}}{T_{sp}}\right)}{\ln(1,2)} \quad (5.2)$$

L'équation (5.2) nous permet de calculer s , le nombre de périodes nécessaires pour atteindre la saturation. Une fois ce maximum atteint, la moyenne $T'p$ des temps de travail passés est alors de :

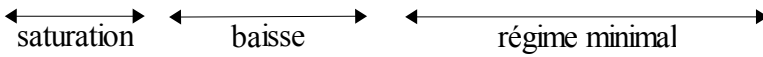
$$T'p = \frac{S_p * T_p + \sum_{i=1}^m (T_{sp} * 1,2^i)}{S_p + s} \quad (5.3)$$

Ce qui nous donne la moyenne $T'r$ pour les $(S_r - s)$ semaines restantes :

$$T'r = \frac{1344 - T'p * (Sp + s)}{Sr - s} \quad (5.4)$$

Cette saturation est ensuite conservée durant m' périodes, puis on décroît durant m périodes pour se stabiliser au minimum et atteindre une moyenne annuelle de 28 heures :

$$m' * Tmax + \sum_{i=1}^m (Tmax * 0,8^i) + (Sr - s - m' - m) * Tmax * 0,8^m = T'r * (Sr - s) \quad (5.5)$$



m et m' peuvent être déterminés de manière empirique et vérifiés par l'équation (5.5). La durée de travail étant obligatoirement comprise entre $Tmax$ et $Tmin$, m ne peut être supérieur à 5 (il faut 5 semaines pour décroître de 48 heures à 15 heures).

La dernière stratégie consiste à faire décroître la durée de travail le plus possible, puis à l'augmenter pour conserver une moyenne hebdomadaire de 28 heures par an. Les équations sont alors relativement similaires à celles de la deuxième stratégie. Ces trois raisonnements peuvent aussi être adaptés lorsque l'opérateur considéré est en sous charge sur le début de l'année.

III.2.1.4. Indicateur complet

La Figure 5.8 montre un exemple d'indicateur de capacité par opérateur (pour l'opérateur Moine). Nous sommes en fin de semaine 32. M. Moine a travaillé en moyenne 30 heures par semaine sur les 32 premières semaines de l'année. Il a travaillé 45 heures la semaine passée. L'indicateur donne les possibilités de durées de travail pour la semaine 33 et les suivantes.

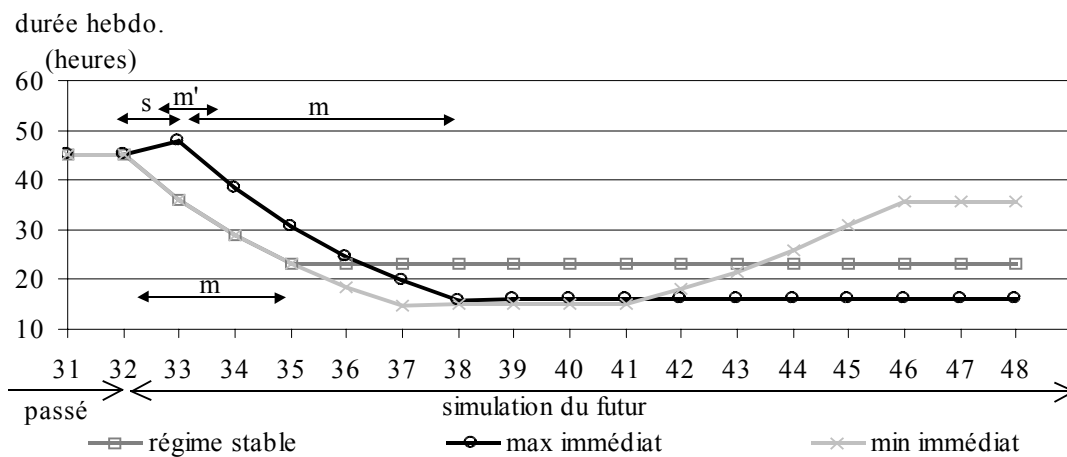


Figure 5.8 – Indicateur de capacité de l'opérateur Moine

La courbe dont les points sont représentés par des carrés représente le régime stable, celle dont les points sont représentés par des cercles les durées de travail rapidement

maximales et celles dont les points sont représentés par des croix les durées de travail immédiatement minimales. Le gestionnaire d'atelier visualise ainsi les capacités minimales, maximales et moyennes de l'opérateur pendant les périodes suivantes.

III.2.2. Indicateur de capacité par compétence

Un des besoins importants évoqués par les industriels dans les réponses au questionnaire (voir § II.3) est la possibilité de visualiser la capacité globale en opérateurs (ce qui est fait par les deux indicateurs présentés précédemment) et par compétence. Nous proposons à cet effet la définition d'un indicateur de capacité par compétence. La capacité d'une compétence est la somme des capacités de chaque opérateur possédant cette compétence. Par exemple, si quatre opérateurs sont qualifiés pour le contrôle, la capacité de la compétence contrôle sera la somme des durées de travail des quatre opérateurs. Plusieurs problèmes se posent toutefois pour effectuer cette somme. Le premier est que les durées de travail réelles des opérateurs ne sont pas encore déterminées, on ne dispose que de l'indicateur présenté au paragraphe précédent. Le deuxième problème, déjà évoqué dans la partie III.1.1, est que la plupart des opérateurs sont polyvalents (il possèdent plusieurs compétences). Ainsi, quelle que soit leur durée de travail, celle-ci pourra être comptée plusieurs fois, ce qui risque de conduire à une surestimation de la capacité globale de l'atelier.

Ce deuxième problème peut être résolu assez simplement en partageant équitablement la capacité d'un opérateur entre ses compétences et en différenciant la participation de chaque opérateur dans la capacité associée à une compétence. Prenons par exemple deux opérateurs polyvalents, Dupond, et Martin, tous deux qualifiés en tournage et en fraisage et un opérateur non polyvalent, Durant, qualifié en tournage (voir exemple du § II.1.1). Pour calculer l'indicateur de capacité en tournage, on additionnera le temps de travail de Durant en entier, la moitié de celui de Dupond et la moitié de celui de Martin, et leurs participations dans la capacité totale de tournage seront différenciées (voir Figure 5.9). Cela revient toutefois à faire des préaffectations, ce qui n'est pas souhaité par les industriels interrogés. Il faudra donc pouvoir réviser ce partage, et l'évaluation de la capacité qui en découle, en fonction de la charge et des désirs des opérateurs.

Le premier problème à résoudre est de déterminer la capacité (durée de travail) à prendre en compte pour chaque opérateur, alors que celle-ci n'est pas encore fixée. La solution la plus simple consiste à prendre pour chacun des opérateurs la durée envisagée pour un régime stable, car cela permet de garder une marge de sécurité lorsque les temps de travail

seront fixés.

En répondant au questionnaire, les industriels ont estimé qu'il y a plusieurs niveaux de compétence, c'est-à-dire qu'un opérateur peut être plus ou moins compétent. Par exemple, un opérateur peut être excellent, très bon, bon ou suffisant dans une compétence. Ils ont de plus insisté sur le fait que le niveau de compétence des opérateurs influe sur la durée des tâches qu'ils effectuent. L'indicateur de capacité par compétence doit donc pouvoir aussi indiquer la capacité par niveau de compétence.

La Figure 5.9 présente deux exemples d'indicateurs de capacité par compétence, pour les compétences de tournage et de fraisage. Les chiffres entre parenthèses indiquent le niveau de compétence de l'opérateur.

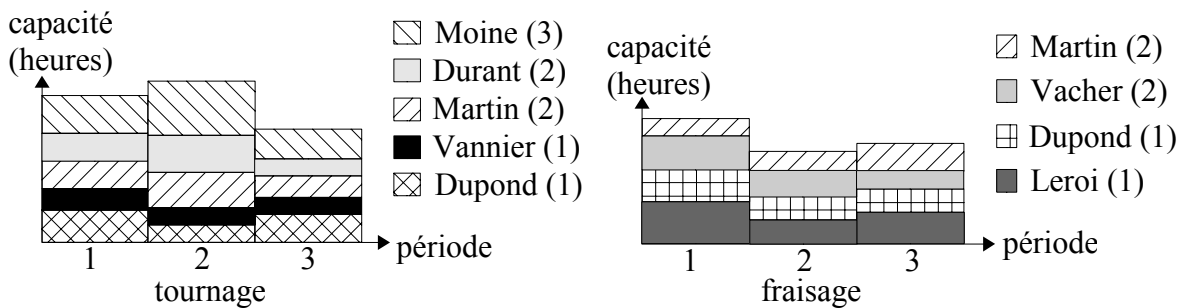


Figure 5.9 – Indicateurs de capacité des compétences de tournage et de fraisage

Cet indicateur permet ainsi d'évaluer la capacité globale de l'atelier par compétence, pour chaque période. On peut aussi différencier les niveaux de qualification. En effet, le niveau 1 de compétence en tournage est représenté par les opérateurs Dupond et Vannier, et de compétence en fraisage par les opérateurs Dupond et Leroi. Cet indicateur permet d'identifier les opérateurs critiques (ceux qui ont peu de compétences ou un très bon niveau dans une compétence rare) et les compétences critiques (celles qu'ont peu d'opérateurs ou que les opérateurs ont avec un faible niveau).

Des modes de visualisation plus performants, permettant de faire des préaffectations des opérateurs dans certaines de leurs compétences par exemple, doivent être définis.

III.2.3. Indicateur de charge par compétence

La démarche présentée dans les paragraphes III.1.1 et III.1.2 propose de visualiser dans un premier temps les capacités globales, par opérateur et par compétence, puis de visualiser la charge par compétence. Nous avons différencié deux approches pour le calcul de l'indicateur de charge par compétence :

- le calcul par l'utilisation du modèle de gamme présenté Figure 5.5,

- le calcul à partir du plan de charge réalisé sur les machines.

La première approche nécessite de modifier le modèle de données techniques du logiciel. La deuxième approche possible consiste à déduire du plan de charge classique réalisé sur les machines un plan de charge par compétence. Nous distinguons plusieurs possibilités de plans de charge qui conduisent à des calculs de charge par compétence différents :

- le plan de charge est construit par activité. Dans ces cas là, les compétences étant elles-mêmes définies sur la notion d'activité, la charge par compétence est égale à la charge par activité et il n'y a pas de calculs à effectuer,
- le plan de charge est construit par machine ou groupe de machines identiques. Le modèle de la Figure 5.4 nous permet de lier chaque ressource à chaque compétence. On note sur ce modèle qu'une seule ressource peut correspondre à plusieurs activités. On doit alors remonter au plan de charge pour déterminer quelles sont les activités concernées.
- le plan de charge est construit par groupe de ressources différentes. La charge par compétence est alors difficilement identifiable. On peut soit remonter au plan de charge et on est alors dans une situation connue, soit déterminer les activités concernées par ce groupe de ressources et diviser la charge équitablement entre les activités. Par exemple, si le groupe comprend deux tours, une rectifieuse cylindrique et une perceuse, et que la charge est de 29 heures, la charge de tournage est de $29/2 = 14,5$ heures, celle de rectification de $29/4 = 7,25$ heures et celle de perçage de 7,25 heures. On peut ensuite affecter à ce groupe de ressources un groupe d'opérateurs dont les compétences vont couvrir les besoins prévus.

III.3. Indicateurs d'action

Les indicateurs de capacité par compétence, de capacité par opérateur et de charge par compétence sont des indicateurs de contexte lorsque le gestionnaire d'atelier les utilise pour connaître l'état global de son atelier en termes de compétence et d'opérateurs. Ils peuvent aussi être utilisés en tant qu'indicateurs d'action lorsqu'ils sont à la base de l'affectation des opérateurs et de la détermination de leurs durées de travail. Sur la Figure 5.3, les actions sont signalées en italique et les indicateurs d'action en gris. Le calcul de ces indicateurs d'action est identique à celui décrite pour les indicateurs de contexte. Par contre, la représentation est différente. Utilisés en tant qu'indicateur d'action, les deux indicateurs de capacité (par opérateur et par compétence) se doivent d'être interactifs et permettre la mise en application des décisions qu'ils aident à prendre. Par exemple, si l'activité de tournage est en surcharge, le gestionnaire d'atelier va visualiser l'indicateur de capacité de tournage (présenté Figure 5.9), et

décider d'affecter l'opérateur Dupond uniquement en tournage. Cette affectation doit pouvoir être réalisée par l'intermédiaire de l'indicateur visualisé. Les indicateurs doivent aussi être dynamiques, c'est-à-dire que dès qu'une décision est prise, les indicateurs doivent être actualisés. Par exemple, lorsque l'opérateur Dupond est affecté entièrement en tournage, il doit disparaître de ses autres compétences.

Il faut aussi définir un indicateur plus synthétique permettant de comparer la charge et la capacité. Les actions correspondant à ces indicateurs (affectation des opérateurs, ajustement des calendriers...) n'étant pas définies dans les logiciels d'ordonnancement, nous précisons ici les traitements nécessaires à leur utilisation.

III.3.1. Indicateur d'adéquation charge/capacité

Pour comparer la charge et la capacité par compétence, on définit un indicateur supplémentaire synthétisant les données des indicateurs de charge par compétence (§ III.2.3) et de capacité par compétence (§ III.2.2). Cet indicateur d'adéquation charge/capacité est obtenu en faisant la différence (charge-capacité). Le Tableau 5.3 présente un exemple de calcul et de comparaison de la charge et de la capacité sur une période donnée, pour 7 opérateurs réunissant 11 compétences. Dans cet exemple, aucun opérateur n'est affecté et les durées de travail ne sont pas encore fixées.

Tableau 5.3 - Comparaison charge/capacité

	Dupond	Durant	Lero i	Marti n	Moine	Vannier	Vacher	capa- cité	charge	adéqua- tion
contrôle	7	15			12			34	53,58	-19,58
fraisage	7		8	13			11	39	19,67	19,33
tournage	7	15		13	12	10		57	23,58	33,42
C.U.			8				11	19	33,58	-14,58
rectif.		15				10		25	33,33	-8,33
perçage				13			11	24	30,42	-6,42
régl. fraise	7		8					15	9,67	5,33
régl. tour	7				12	10		29	11,92	17,08
régl. C.U.			8					8	11,75	-3,75
régl. rectif.						10		10	13,17	-3,17
régl. perc.							11	11	10,92	0,08
temps	35	45	32	39	36	40	44	271	251,59	19,41

Les durées de travail moyennes des opérateurs sont données dans la dernière ligne du Tableau 5.3. Dans un premier temps, elles sont équitablement partagées sur chacune des compétences. En additionnant les capacités dues à chaque opérateur, on obtient la capacité moyenne pour chacune des compétences.

On compare tout d'abord la capacité globale en compétence (271 heures) à la charge globale (251,59 heures). La capacité étant légèrement supérieure à la charge (moins de 10%), nous ne modifions pas les temps de travail des opérateurs. En cas de différence significative, la stratégie adoptée pour le calcul de la capacité des opérateurs (ici régime stable) pourrait être changée (maximum immédiat en cas de surcharge importante et minimum immédiat en cas de sous charge importante). L'indicateur d'adéquation charge/capacité est calculé dans la dernière colonne du Tableau 5.3 et visualisé Figure 5.10.

On voit sur la Figure 5.10 que les activités de fraisage, tournage, réglage de fraiseuse et réglage de tour sont sur-capacitaires, c'est-à-dire qu'on a en moyenne plus d'opérateurs qualifiés pour ces activités que nécessaire. A l'inverse, les activités d'utilisation du C.U., de rectification, de perçage, de contrôle, de réglage du C.U. et de réglage de rectifieuse sont en surcharge, c'est-à-dire que l'on a pas suffisamment d'opérateurs qualifiés pour ces activités et disponibles sur la période considérée. La charge et la capacité de l'activité de réglage de perceuse sont équilibrées.

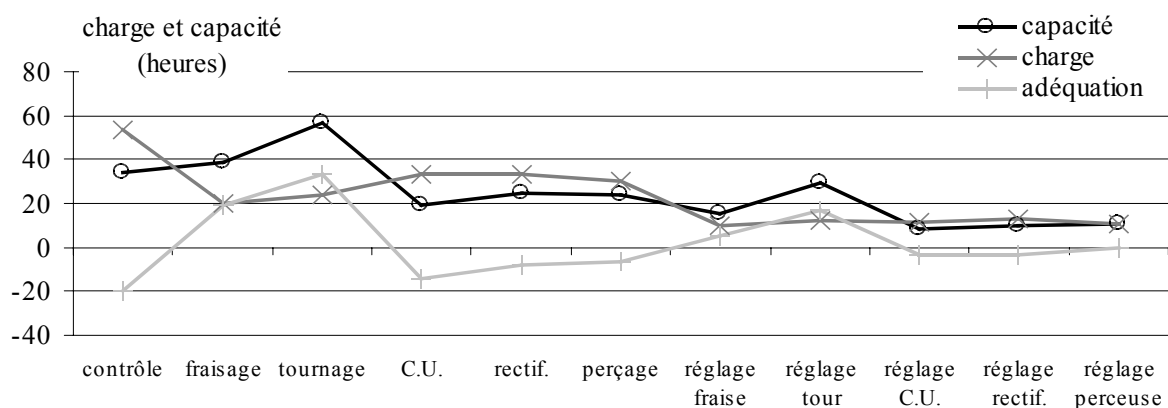


Figure 5.10 – Indicateur d'adéquation charge/capacité

III.3.2. Réalisation de l'adéquation charge/capacité

Diverses méthodes de résolution ont été envisagées pour réaliser l'équilibre entre les besoins en compétences et la disponibilité des opérateurs possédant ces compétences.

III.3.2.1. Adéquation charge/capacité optimale : l'algorithme du Simplexe

Pour chaque opérateur, les contraintes présentées dans le Tableau 5.3 peuvent s'exprimer sous la forme d'un système d'inéquations. On a par exemple pour l'opérateur Durant :

$$\text{contrôle_Durant} + \text{tournage_Durant} + \text{rectification_Durant} \leq 38 * 1,2 \quad (5.6)$$

$$\text{contrôle_Durant} + \text{tournage_Durant} + \text{rectification_Durant} \geq 38 * 0,8 \quad (5.7)$$

De même, pour chaque compétence, les contraintes du Tableau 5.3 s'expriment par une inéquation, soit pour la compétence de contrôle :

$$\text{contrôle_Dupond} + \text{contrôle_Durant} + \text{contrôle_Moine} \geq 53,58 \text{ heures} \quad (5.8)$$

Les inégalités (5.6) et (5.7) expriment le fait que la durée de travail d'un opérateur pour la semaine suivante doit rester dans les limites de $\pm 20\%$ de son temps de travail actuel. L'inégalité (5.8) exprime le fait que, pour chaque compétence, la somme des capacités dues à chaque opérateur doit être supérieure ou égale à la charge. La Figure 5.11 présente l'intégralité des contraintes du problème.

```

contrôle_Dupond+fraisage_Dupond+tournage_Dupond+réglage_fraise_Dupond+réglage_tour_Dupond≤48
contrôle_Dupond+fraisage_Dupond+tournage_Dupond+réglage_fraise_Dupond+réglage_tour_Dupond≥34
contrôle_Durant+tournage_Durant+rectification_Durant≤46
contrôle_Durant+tournage_Durant+rectification_Durant≥30
fraisage_Leroi+cu_Leroi+réglage_fraise_Leroi+réglage_cu_Leroi≤48
fraisage_Leroi+cu_Leroi+réglage_fraise_Leroi+réglage_cu_Leroi≥32
fraisage_Martin+tournage_Martin+perçage_Martin≤40
fraisage_Martin+tournage_Martin+perçage_Martin≥26
contrôle_Moine+tournage_Moine+réglage_tour_Moine≤48
contrôle_Moine+tournage_Moine+réglage_tour_Moine≥36
tournage_Vannier+rectification_Vannier+réglage_tour_Vannier+réglage_rectifieuse_Vannier≤48
tournage_Vannier+rectification_Vannier+réglage_tour_Vannier+réglage_rectifieuse_Vannier≥32
fraisage_Vacher+cu_Vacher+perçage_Vacher+réglage_perceuse_Vacher≤48
fraisage_Vacher+cu_Vacher+perçage_Vacher+réglage_perceuse_Vacher≥32
contrôle_Dupond+contrôle_Durant+contrôle_Moine≥53,58
fraisage_Dupond+fraisage_Leroi+fraisage_Martin+fraisage_Vacher≥19,67
tournage_Dupond+tournage_Durant+tournage_Moine+tournage_Martin+tournage_Vannier≥23,58
cu_Leroi+cu_Vacher≥33,58
rectification_Durant+rectification_Vannier≥33,33
perçage_Martin+perçage_Vacher≥30,42
réglage_fraise_Dupond+réglage_fraise_Leroi≥9,67
réglage_tour_Dupond+réglage_tour_Moine+réglage_tour_Vannier≥11,92
réglage_cu_Leroi≥11,75
réglage_rectifieuse_Vannier≥13,17
réglage_perceuse_Vacher≥10,92
    
```

Figure 5.11 - Contraintes du problème d'adéquation charge/capacité

Nous pouvons constater qu'en ajoutant une fonction objectif à ces contraintes, nous nous trouvons en présence d'un programme linéaire pouvant être résolu par l'algorithme du Simplexe. Nous pouvons par exemple choisir comme objectif de minimiser la somme des durées de travail. La fonction objectif à minimiser est alors la suivante :

$$\text{contrôle_Durant+tournage_Durant+rectification_Durant+contrôle_Dupond+...} \quad (5.9)$$

En appliquant l'algorithme du Simplexe à ce problème, nous obtenons la solution présentée dans le Tableau 5.4.

Tableau 5.4 - Solution obtenue par l'application de l'algorithme du Simplexe

	Dupond	Durant	Leroi	Martin	Moine	Vannier	Vacher	capa.	charge	adéq.
contrôle	5,32	12,26			36			53,58	53,58	0
fraisage	16,34		0	0			3,33	19,67	19,67	0
tournage	4,75	0		0	0	18,83		23,58	23,58	0
C.U.			20,25				13,33	33,58	33,58	0
rectif.		33,33				0		33,33	33,33	0
perçage				26			4,42	30,42	30,42	0
régl. fraise	9,67		0					9,67	9,67	0
régl. tour	11,92				0	0		11,92	11,92	0
régl. C.U.			11,75					11,75	11,75	0
régl. rectif.						13,17		13,17	13,17	0
régl. perc.							10,92	10,92	10,92	0
temps	48	45,59	32	26	36	32	32	251,59	251,59	0

Nous constatons que la résolution du problème par l'algorithme du Simplexe aboutit à une solution optimale, mais enlève au gestionnaire d'atelier tout contrôle sur l'affectation des opérateurs, ce qui ne se prête pas à notre approche interactive.

III.3.2.2. Adéquation charge/capacité interactive : un algorithme empirique

Afin de permettre une démarche d'équilibrage charge/capacité plus interactive, nous proposons un algorithme simple qui consiste à partir du Tableau 5.3 pour réaliser des « transferts de capacité » de la compétence la plus sur-capacitaire (compétence A) vers la compétence la plus surchargée (compétence B), pour les opérateurs ayant les deux compétences. L'implémentation de cet algorithme en Visual Basic, sous MS Access est présenté dans l'annexe C. Cet algorithme est illustré sur l'exemple du Tableau 5.3.

Nous allons transférer la capacité de la compétence tournage vers la compétence contrôle. Trois opérateurs sont concernés (Dupond, Durant et Moine). Nous choisissons de les considérer dans cet ordre. Nous allons donc transférer les 7 heures de tournage de l'opérateur Dupond vers le contrôle, qui a alors une capacité de 41 heures et est encore en surcharge. Si

on ne trouve pas d'opérateur ayant les deux compétences, on choisit le premier opérateur de la compétence B, et on effectue un transfert de capacité de sa compétence la plus sur-capacitaire vers la compétence B. Si tous les opérateurs ayant la compétence B n'ont pas de compétence en sous charge, on va utiliser une compétence de transition. Pour cela, on cherche l'opérateur qui a la plus grande part dans la capacité de la compétence A et l'opérateur qui a la plus petite part dans la capacité de la compétence B. Leur compétence commune sera la compétence de transition (compétence C). Le transfert va donc se faire de la compétence A vers la compétence C, puis de C vers B. Le Tableau 5.5 présente les résultats des transferts de capacité.

Tableau 5.5 - Comparaison charge/capacité après transferts de capacité

	Dupond	Durant	Leroi	Martin	Moine	Vannier	Vacher	capa.	charge	adéq.
contrôle	14	30			12			56	53,58	2,42
fraisage	7		0	13			0	20	19,67	0,33
tournage	0	0		2	17	5		24	23,58	0,42
C.U.			16				22	38	33,58	4,42
rectif.		15				20		35	33,33	1,67
perçage				24			11	35	30,42	4,58
régl. fraise	7		3					10	9,67	0,33
régl. tour	7				7	0		14	11,92	2,08
régl. C.U.			13					13	11,75	1,25
régl. rectif.						15		15	13,17	1,83
régl. perc.							11	11	10,92	0,08
temps	35	45	32	39	36	40	44	271	251,59	19,41

Des transferts directs ont été réalisés (de tournage vers contrôle pour les opérateurs Dupond et Durant par exemple). Pour compenser la surcharge de réglage C.U., nous avons utilisé l'opérateur Leroi. Celui-ci ne possédant pas la compétence la plus sur-capacitaire à ce moment là, le transfert a été fait de « réglage fraiseuse » vers « réglage C.U. ». Pour la surcharge de « réglage rectifieuse », l'opérateur Vannier ne possédait aucune compétence sur-capacitaire. Nous avons donc utilisé le tournage comme compétence de transition. Un transfert de capacité a été effectué pour l'opérateur Moine, de « réglage tour » vers le tournage, créant une sur-capacité en tournage, puis un second transfert de cette sur-capacité de tournage vers « réglage rectifieuse », pour l'opérateur Vannier.

Des réajustements peuvent être réalisés manuellement. Ils peuvent viser à ne pas trop

diversifier les activités des opérateurs, pour éviter des pertes de temps en changement de postes. Il est aussi préférable d'éviter des affectations trop courtes qui peuvent entraîner des pertes de temps et de qualité. On peut également souhaiter conserver une certaine marge sur chacune des compétences, pour pouvoir faire face aux durées de travail réelles des opérateurs. Les réajustements peuvent aussi consister à tenir compte du nombre de ressources disponibles pour réaliser l'activité. En effet, si on ne possède qu'un seul tour, il est inutile d'affecter les cinq opérateurs en tournage. Il est possible de réappliquer l'algorithme sur le tableau après avoir procédé à quelques modifications manuelles. La Figure 5.12 présente l'indicateur d'adéquation charge/capacité à l'issue de ces réajustements.

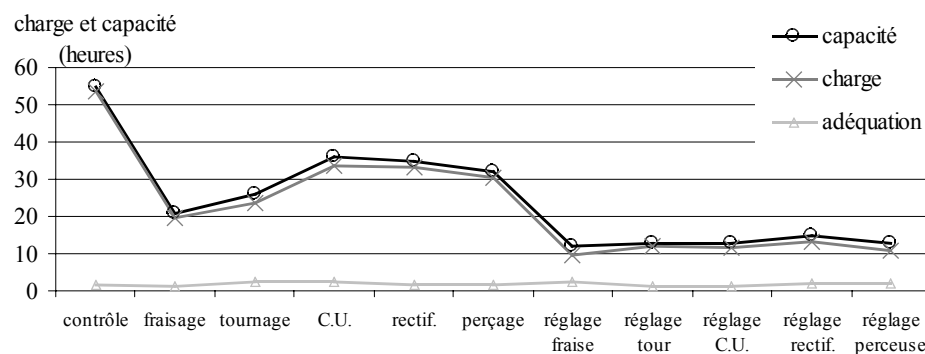


Figure 5.12 – Indicateur d'adéquation charge/capacité après transferts

Il n'y a plus de compétence en surcharge et la différence entre charge et capacité est relativement constante. Les transferts de capacité conduisent ainsi à des préférences d'utilisation des opérateurs suivant certaines de leurs compétences, qui vont permettre de faire face à la demande.

Le principal avantage de cette approche empirique de l'adéquation charge/capacité est qu'elle s'inscrit pleinement dans notre démarche d'un ordonnancement interactif. Elle permet une utilisation progressive de la polyvalence des opérateurs, en laissant totalement le contrôle au gestionnaire d'atelier pour l'ordonnancement final. Néanmoins, il reste délicat de prévoir les résultats, dans la mesure où il suffit de changer l'ordre des opérateurs dans le tableau pour obtenir des résultats totalement différents. Il est aussi relativement fréquent de tomber dans une impasse et de devoir remettre en cause les choix de départ.

III.3.2.3. Adéquation charge/capacité interactive et proche de l'optimum : la propagation de contraintes

Nous avons donc considéré une troisième démarche, par propagation de contraintes. Les contraintes et les variables sont identiques à celles du programme linéaire présenté ci-dessus.

Une expérimentation sous ILOG Solver a été réalisée (voir Figure 5.13, les données programmées étant issues d'un problème voisin). Cette propagation peut ne pas donner lieu à l'instanciation d'une solution, mais peut permettre de « cadrer » des solutions admissibles, ce qui nous a semblé intéressant par rapport à notre approche.

```

// Posting the constraint
m.add(drillBer+millBer+sDrillBer+sMillBer==1.0);
m.add(contDan+contDan==1.0);
m.add(drillAgn+lathAgn+centAgn+grindAgn+millAgn==1.0);
m.add(lathLau+millLau+sLathLau==1.0);
m.add(grindPhil+contPhil+sDrillPhil+sLathPhil+sCentPhil+sGrindPhil+sMillPhil==1.0);
m.add(lathJos+grindJos+millJos==1.0);
m.add(drillXav+lathXav+millXav+contXav==1.0);
m.add(sDrillThi+sLathThi+sCentThi+sGrindThi+sMillThi==1.0);

m.add(drillBer+drillAgn+drillXav>=0.35);
m.add(lathAgn+lathLau+lathJos+lathXav>=0.42);
m.add(contDan+centAgn>=0.6);
m.add(grindAgn+grindPhil+grindJos+grindXav>=0.5);
m.add(millBer+millAgn+millLau+millJos+millXav>=0.7);
m.add(contDan+contPhil+contJos+contXav>=0.8);
m.add(sDrillBer+sDrillAgn+sDrillXav+sLathLau+sLathJos+sLathXav+sCentPhil+sCentJos+sCentXav+sGrindPhil+sGrindJos+sGrindXav+sMillPhil+sMillJos+sMillXav>=0.9);
m.add(drillBer==0.35);
m.add(lathAgn==0.42);
m.add(contDan==0.6);
m.add(grindAgn==0.5);
m.add(millBer==0.7);
m.add(contDan==0.8);
m.add(sDrillBer==0.35);
m.add(sLathLau==0.42);
m.add(sLathJos==0.42);
m.add(sLathXav==0.42);
m.add(sCentPhil==0.8);
m.add(sCentJos==0.8);
m.add(sCentXav==0.8);
m.add(sGrindPhil==0.5);
m.add(sGrindJos==0.5);
m.add(sGrindXav==0.5);
m.add(sMillPhil==0.7);
m.add(sMillJos==0.7);
m.add(sMillXav==0.7);
m.add(sDrillThi==0.35);
m.add(sLathThi==0.42);
m.add(sCentThi==0.8);
m.add(sGrindThi==0.5);
m.add(sMillThi==0.7);

// permet de fixer une variable
m.add(lcInstantiate(sDrillBer));
m.add(lcInstantiate(sLathLau));
m.add(lcInstantiate(sLathJos));
m.add(lcInstantiate(sLathXav));
m.add(lcInstantiate(sCentPhil));
m.add(lcInstantiate(sCentJos));
m.add(lcInstantiate(sCentXav));
m.add(lcInstantiate(sGrindPhil));
m.add(lcInstantiate(sGrindJos));
m.add(lcInstantiate(sGrindXav));
m.add(lcInstantiate(sMillPhil));
m.add(lcInstantiate(sMillJos));
m.add(lcInstantiate(sMillXav));
m.add(lcInstantiate(sDrillThi));
m.add(lcInstantiate(sLathThi));
m.add(lcInstantiate(sCentThi));
m.add(lcInstantiate(sGrindThi));
m.add(lcInstantiate(sMillThi));

duration: equation - Win
0 warning(s)

```

Figure 5.13 - Exemple d'adéquation charge/capacité réalisée sous ILOG Solver

Les contraintes sont présentées dans la fenêtre en arrière plan et les résultats dans la fenêtre au premier plan. On peut voir sur la Figure 5.13 que la propagation de contraintes aboutit à des propositions d'intervalles. On obtient par exemple que l'opérateur Daniel doit être affecté sur le C.U. pour une durée comprise entre 0 et 0,09 fois son temps de travail (exprimée sur la Figure 5.13 par centDan[0..0.9]). L'utilisation de la propagation de contraintes permet donc au gestionnaire d'atelier de conserver des degrés de liberté au niveau des affectations et des durées de travail des opérateurs. De plus, il garde le contrôle sur l'affectation précise des opérateurs. Il peut aussi tenir compte des désirs des opérateurs (choix des jours de congés, demande d'une durée déterminée...) en relâchant, durcissant ou ajoutant certaines contraintes. Il est aussi possible de demander au système d'instancier une, plusieurs ou toutes les variables et obtenir ainsi une affectation précise des opérateurs dans leurs compétences. Cette approche semble donc permettre une certaine interactivité, tout en limitant les retours en arrière. Elle offre de plus l'avantage de pouvoir prendre en compte le niveau de compétence des opérateurs en ajoutant de nouvelles contraintes.

Les différents indicateurs proposés ont été mis en œuvre dans une maquette réalisée sous MS Access, afin de valider leur intérêt pratique.

III.4. Implémentation

Ce prototype expérimental a été réalisé sous MS Access, les algorithmes étant développés en Basic (sous Visual Basic). Cette maquette permet d'instancier les modèles de données proposés dans la partie III.1.4 (voir Figure 5.4 pour le modèle de compétence et Figure 5.5 pour le modèle de gamme), et ainsi de décrire les opérateurs par leurs compétences et leur niveaux de compétence. Il est aussi possible dans le prototype réalisé de visualiser les différents indicateurs évoqués précédemment (indicateur de capacité par opérateur, de capacité par compétence et de charge par compétence).

La Figure 5.14 présente deux fenêtres de ce prototype.

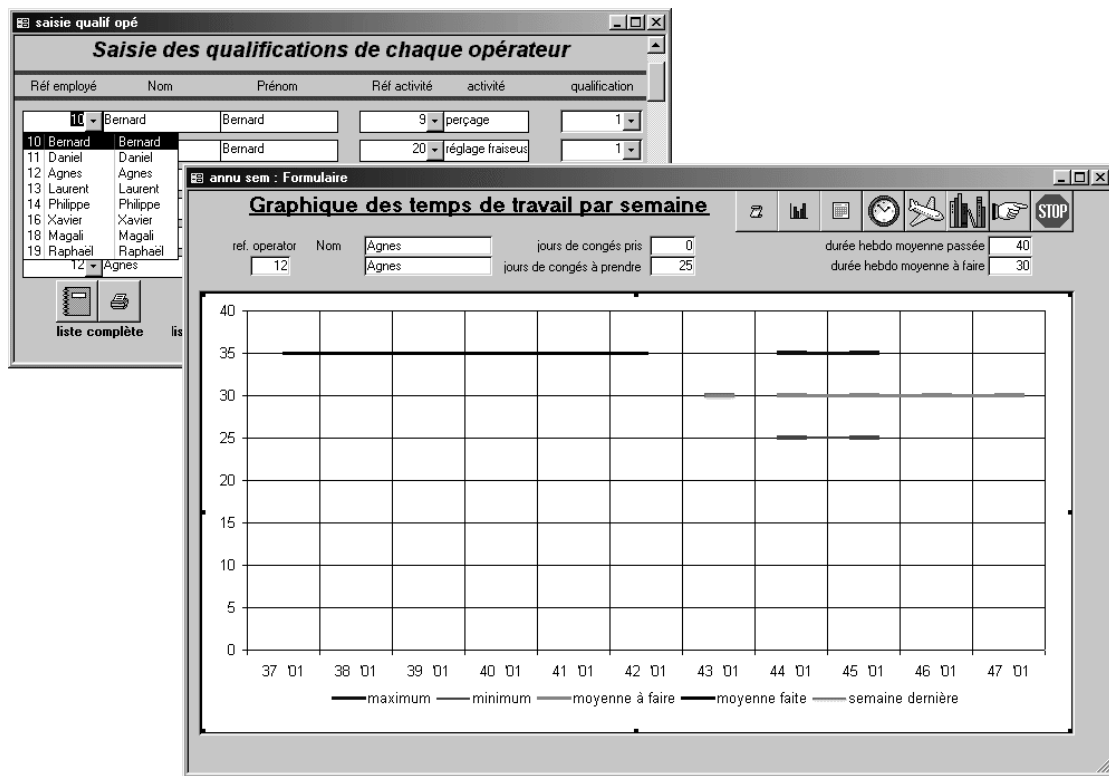


Figure 5.14 – Saisie des compétences des opérateurs et indicateur de capacité par opérateur dans MS Access

La fenêtre en arrière plan permet de saisir les compétences et niveaux de compétence des opérateurs. La fenêtre au premier plan permet de visualiser l'indicateur de capacité par opérateur.

L'algorithme de recherche d'une adéquation entre la charge et la capacité par compétence présenté dans la partie précédente a été implanté dans la maquette. Le programme Visual Basic correspondant est présenté en annexe C. La Figure 5.15 présente la matrice opérateurs/compétences (matrice correspondant au Tableau 5.3) à l'issue de l'application de

l'algorithme.

Nom de Famille	Son	contrôle	CU	fraisage	perçage	rectifica	réglage Cl	réglage fr	réglage p	réglage r	réglage ti	tourna
Dupond	0	1		0				0			0	0
Durant	0	0,333333				0,66667						0
Leroi	0,6		0,25	0,25			0,25	0,25				
Martin	0			0,254359	0,051282							0,3333
Moine	0	0,040513									0,055641	0
Vacher	0,03		0		0,728718				0,25			0,0213
Vannier	0					0,18795					0	0,25
somme	26	1,373846	1,15385	0,504359	0,78	0,85462	0,5620513	0,25	0,25	0,361026	0,305641	0,6046
charge		53,58	33,58	19,67	30,42	33,33	11,75	9,67	10,92	13,17	11,92	23,58
opé nécessaires		1,373846	0,86103	0,504359	0,78	0,85462	0,301282	0,247949	0,28	0,337692	0,305641	0,6046
différence	0,5		0,29282		0	0	0,2607692	0,002051	-0,03	0,023333		0
*												

Figure 5.15 – Transferts de capacité dans MS Access

Cette maquette nous a permis de valider notre approche de la gestion des opérateurs. L'implémentation de l'algorithme d'adéquation charge/capacité a mis en lumière sa principale lacune, qui est de fréquemment conduire à des impasses. Les différents indicateurs mis en œuvre semble convenir aux besoins des industriels. Ce prototype a toutefois souligné l'importance des visualisations dynamiques et interactives, difficilement réalisables sous MS Access. Une visualisation est dite dynamique lorsque elle est automatiquement réévaluée à chaque modification ou prise de décision. Cela correspond pour nous à recalculer les indicateurs dès qu'un opérateur est affecté, qu'un jour de congé est pris, etc. La visualisation est interactive si elle permet d'agir sur les objets qu'elle évalués. Par exemple, lorsqu'on visualise l'indicateur de capacité de l'opérateur Durant, cela nous permet de décider de sa durée de travail, de ses jours de congés, etc. Il est alors intéressant de pouvoir saisir les décisions prises directement sur la visualisation de l'indicateur de capacité. Ces aspects de dynamique et d'interactivité des indicateurs, délicats à mettre en œuvre, sont indispensables à une utilisation industrielle des indicateurs comme aide à la planification des opérateurs.

IV. CONCLUSION

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté une application de l'ordonnancement interactif basé sur des indicateurs présenté dans le chapitre 3 au cas particulier de la gestion des opérateurs, de leurs compétences et de leurs durées de travail à court terme, ce qui nous a permis de valider l'intérêt de cette approche. Dans un premier temps, nous avons rappelé les contraintes imposées par les lois Aubry et de Robien sur la réduction et l'aménagement du temps de travail. Une enquête ayant été réalisée auprès de quelques industriels pour connaître

leurs besoins sur la gestion des opérateurs en ordonnancement, les principaux résultats sont exposés. Une étude des approches portant sur la prise en compte des compétences et de l'annualisation du temps de travail est ensuite présentée. Ces approches tiennent compte des nouvelles contraintes légales, mais ne répondent pas encore aux besoins exprimés par les industriels. Nous avons donc présenté notre conception des indicateurs destinés à la gestion des opérateurs. Quatre indicateurs ont été proposés. Ces indicateurs étant des indicateurs de contexte complexes, leurs modalités de calculs ont été précisées. Leur utilisation en tant qu'indicateurs d'action a été aussi envisagée, les actions correspondantes étant explicitées.

Même si certains aspects de la gestion des opérateurs n'ont pas été abordés ou approfondis, comme l'affectation des opérateurs en fonction du niveau de qualification, l'affectation d'un opérateur sur des machines semi-automatisées (qui ne nécessitent pas continuellement la présence de l'opérateur), la d'opérateurs travaillant à temps partiel, etc., nous pensons que cette nouvelle application valide notre approche utilisant des indicateurs pour réaliser un ordonnancement interactif, tout en répondant à certains des besoins exprimés dans l'enquête.

Le prochain chapitre décrit un outil logiciel permettant d'implémenter les indicateurs présentés dans un cadre industriel : il s'agit du module d'évaluation développé au sein du projet européen ASPIRE. Ce module est en effet destiné à réaliser des tableaux de bord permettant de mettre en œuvre les différents indicateurs présentés dans le chapitre 3.

*- Chapitre 6 – Application
industrielle : le projet ASPIRE*

Chapitre 6 – Application industrielle : le projet ASPIRE

I. INTRODUCTION

Ce dernier chapitre est consacré à la présentation du projet Européen ASPIRE, projet CRAFT qui nous a permis d'implémenter un certain nombre d'idées et de concepts exposés dans ce mémoire. Notre rôle dans le projet a en effet été de développer un module « Assessment » destiné à permettre l'évaluation de plusieurs ordonnancements pour les classer, et aux différentes applications de ce module d'évaluation.

La première partie de ce chapitre présente le cadre général du projet ASPIRE, notamment ses objectifs, les partenaires (industriels et chercheurs) et leurs fonctions, ainsi que les quatre modules composant le système ASPIRE : macro-ordonnement, simulation, entrepôt de données et évaluation. Dans la deuxième partie, nous décrivons plus précisément le principe de fonctionnement du module d'évaluation, sa modélisation et son implémentation. Enfin, trois exemples d'application de ce module aux problématiques abordées dans les chapitres précédents sont présentés. Nous décrivons ainsi un tableau de bord réalisé sur un ordonnancement classique, un tableau de bord consacré à la prise en compte de l'incertitude des commandes et un tableau de bord dédié à la gestion des opérateurs de production.

Les différents tableaux de bord présentés, s'ils nous permettent de valider et d'implémenter notre approche générique d'un ordonnancement interactif basé sur des indicateurs, ne permettent pas de valider les deux approches particulières sur la prise en compte de commandes incertaines et la gestion des opérateurs. En effet, le tableau de bord consacré à un ordonnancement classique est réalisé sur un outil commercial et présente ainsi une validation industrielle de notre approche, alors que les tableaux de bord suivants sont construits sur des données fictives, ces deux approches n'ayant pas trouvé de suite et de concrétisation dans des projets industriels.

II. PRÉSENTATION DU PROJET

II.1. Le projet ASPIRE

II.1.1. Objectifs du projet

ASPIRE (Anticipated SME Production simulation for negotiation support within a customer/supplier context) est un projet CRAFT Européen (n°BES2-5474), qui s'est déroulé du 1^{er} Novembre 1998 au 1^{er} Novembre 2000 (réunion de clôture du projet 24 Avril 2001). Un projet CRAFT est caractérisé par :

- le consortium est composé de PME et de centres de recherche,
- le but principal du projet est de développer un outil répondant aux besoins des PME,
- à l'issue du projet, l'outil développé par les centres de recherche appartient aux PME.

Le consortium ASPIRE a réuni cinq PME et quatre organismes de recherche. Le principal but de ce projet est de développer un outil anticipant le plan de production de l'entreprise et permettant ainsi à l'utilisateur de prévoir des délais de fabrication fiables dans un contexte de négociation donneurs d'ordres/sous-traitants. Cet objectif peut être réalisé par un outil d'aide à la décision fournissant :

- un délai de fabrication prévisionnel pour une commande,
- des scénarios de production liés aux différents degrés de liberté de l'ordonnancement,
- la possibilité de renforcer la confiance accordée à ces scénarios par une simulation,
- l'évaluation de ces scénarios afin de les classer en fonction de la satisfaction des objectifs de production.

II.1.2. Partenaires

II.1.2.1. Partenaires industriels

Le consortium ASPIRE réunit cinq PME : De Nadaï (France), Ebay (Espagne), Krammer (Autriche), MAP (France) et Textinap (France). Ces cinq PME sont propriétaires de l'outil ASPIRE, produit par les partenaires de recherche.

L'entreprise De Nadaï, basée à proximité d'Agen, est un fabricant de pièces mécaniques de précision. Elle emploie 25 personnes et a un chiffre d'affaires de 1,7 M€. Ses principaux

clients sont des fabricants et concepteurs de machines telles que des machines de découpe de tissus, de conditionnement de fruits ou des ascenseurs.

Ebay est une PME espagnole fabriquant des broches en acier rapide pour usinage intérieur et extérieur, essentiellement destinées à l'industrie automobile. Basée au Pays Basque Espagnol, elle emploie 43 personnes pour un chiffre d'affaires de 3,7 M€.

Krammer est une entreprise autrichienne basée à Linz, spécialisée dans l'impression : impression off-set, scannage, construction de page électronique, gestion des données pour catalogues, etc. Elle emploie 250 personnes et son chiffre d'affaires est de 16 M€.

MAP (Mécanique Aéronautique Pyrénéenne) est basée dans la région Paloise. C'est une entreprise de mécanique et de chaudronnerie employant plus de 100 personnes. Elle réalise un chiffre d'affaires de 5,5 M€. Les principaux clients de MAP sont de grandes compagnies de l'aéronautique et de l'armement.

La société Textinap est un fabricant de fibres tissées. Basée à Limoges, elle emploie 20 personnes pour un chiffre d'affaires de 3 M€. Ses principaux clients sont des fabricants d'automobiles et de meubles et des entreprises de construction.

Parmi ces PME, seule MAP possède un logiciel de gestion de production (Hélios) et un logiciel d'ordonnancement (IO). Le rôle des PME au sein du consortium a été de définir leurs besoins en matière de macro-ordonnancement et leurs spécificités, puis de tester et valider les outils ASPIRE développés par les partenaires développeurs.

II.1.2.2. Partenaires de recherche

Le consortium ASPIRE réunit aussi quatre organismes de recherche, dont deux organismes publics (BIBA, Allemagne, et ENIT, France) et deux fournisseurs de technologies de l'information (Robotiker, Espagne, et IXI, France).

BIBA (Bremen Institute for Industrial Technology and Applied Work Science) est une organisation de recherche, affiliée à l'Université de Brème, employant 140 personnes dont 50 chercheurs. Ses domaines de recherche sont :

- les technologies de production et d'automatisation,
- la planification, la fabrication et la conception assistées par ordinateur,
- la gestion des ressources humaines,
- la production sous conditions exceptionnelles,
- le transfert et la gestion des technologies.

IXI (Ingénierie Concourante et Systèmes d'Information) est une société de conseil à

l'industrie employant 130 consultants et ingénieurs. Les métiers d'IXI sont structurés autour de trois familles d'activités :

- l'analyse de systèmes et de process,
- le management de projets, l'assistance à maîtrise d'ouvrage ou à maîtrise d'œuvre,
- le conseil en organisation et en systèmes d'information.

Par ailleurs, IXI est dotée d'un centre de compétences en technologies de l'information. Les principaux clients d'IXI sont issus de secteurs industriels tels que l'automobile, la défense, le nucléaire, les télécommunications, l'aéronautique...

Robotiker est une fondation privée située près de Bilbao. Ses objectifs sont de développer des techniques et des méthodes afin d'améliorer la compétitivité des entreprises. Ses compétences s'exercent dans les domaines de :

- la gestion de production,
- les systèmes d'information,
- les systèmes de télécommunication,
- l'ingénierie,
- la conception de produits...

II.2. Architecture générale d'ASPIRE

ASPIRE est divisé en quatre fonctions principales, la mise au point et le développement chaque module étant dévolu à chaque partenaire développeur. Les quatre modules d'ASPIRE sont (voir Figure 6.1) :

- l'ordonnancement ou macro-ordonnancement, sous la responsabilité de Robotiker,
- la simulation, réalisée par BIBA,
- la capitalisation et l'entrepôt de données, effectués par IXI,
- l'évaluation, qui constitue notre participation au projet.

Le module d'entrepôt de données permet de centraliser toutes les informations utiles au fonctionnement des trois autres modules. Ces informations concernent l'entreprise et l'atelier de fabrication (description de l'atelier et des produits, OF, ...), la définition de la simulation et la définition des tableaux de bord d'évaluation. Le module de macro-ordonnancement utilise toutes les informations relatives à l'atelier pour réaliser un macro-ordonnancement et renvoyer ce macro-ordonnancement dans l'entrepôt de données. Le module de simulation estime la robustesse de l'ordonnancement, identifie les goulots, etc. à partir des scénarios de production

et des ordonnancements produits. Le module d'évaluation permet l'évaluation des résultats de l'ordonnement ou de la simulation, en termes de performances, mais aussi en termes d'améliorations possibles.

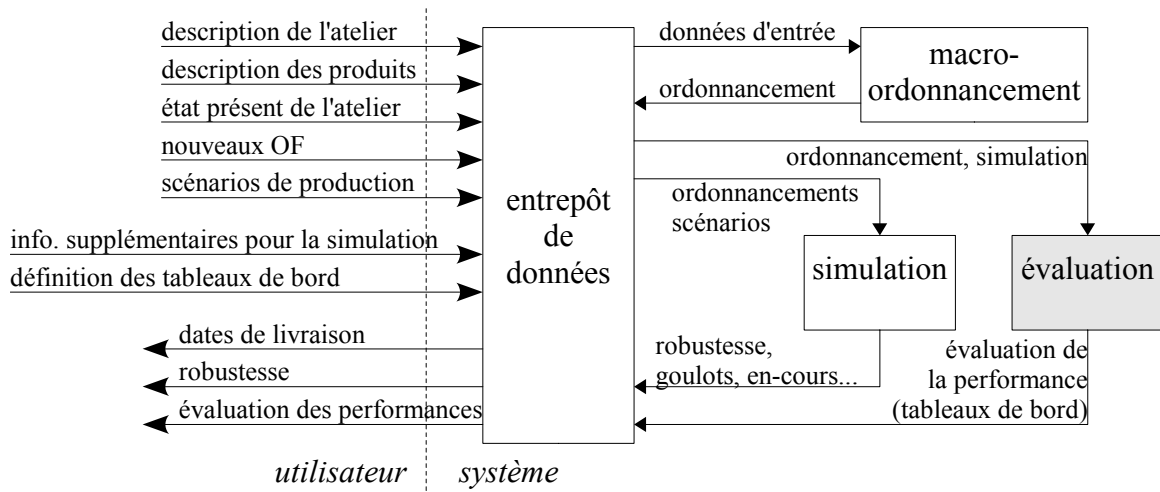


Figure 6.1 - Architecture générale d'ASPIRE

II.2.1. Module de macro-ordonnement

Le module de macro-ordonnement, réalisé par Robotiker, est un logiciel d'ordonnement expérimental appelé Proa XXI. Son rôle dans le système ASPIRE est de suggérer des dates de livraison réalistes pour les commandes en cours de négociation en réalisant un ordonnancement prenant en compte :

- des gammes et des macro-gammes pour les OF dont les gammes précises ne sont pas encore connues,
- des OF « grossiers », c'est-à-dire des OF dont le produit commandé ou la quantité à produire ne sont pas encore précisément définis.

Les degrés de liberté suivants sont présents dans Proa XXI :

- possibilité de changer la priorité des OF,
- choix dans les ressources humaines et techniques,
- gammes alternatives,
- modification des calendriers opérateurs,
- possibilité d'externalisation d'une partie de la production.

Les combinaisons des choix parmi ces degrés de liberté permettent de définir des scénarios de production. Les ordonnancements produits pour chacun de ces scénarios sont transmis au module de simulation pour tester leur robustesse.

II.2.2. Module de simulation

Le module de simulation de l'outil ASPIRE est développé par BIBA. Il permet de vérifier la robustesse de l'ordonnancement produit face aux aléas de production, et ainsi de vérifier la fiabilité des dates de livraison estimées. Les aléas de production concernent :

- l'imprécision des durées opératoires, due aux ressources,
- l'imprécision des durées opératoires, due au niveau de compétence des opérateurs,
- les pannes,
- les absences des opérateurs.

A partir de ces données, le module de simulation évalue statistiquement les risques de ne pas tenir les délais de fabrication estimés.

Toutes les informations utilisées et produites par les modules de simulation, de macro-ordonnancement et d'évaluation sont gérées par le module de dépôt des données.

II.2.3. Module d'entrepôt de données

Le module d'entrepôt de données du système ASPIRE est mis au point par IXI. Il a pour buts de :

- stocker toutes les données relatives au processus de production,
- stocker toutes les données relatives aux modules de macro-ordonnancement, simulation et évaluation,
- fournir à ces modules les données dont ils ont besoin et celles sur lesquelles ils agissent.

Les données gérées sont de trois types : statiques, dynamiques et archivées. Les données statiques concernent le processus de production, l'entreprise et l'atelier. Les données dynamiques sont les données sur lesquelles agissent les autres modules d'ASPIRE. Les données archivées sont les données qui ne sont plus utilisées.

Les différents ordonnancements produits par le module de macro-ordonnancement sont stockés dans le module de dépôt des données. Leur robustesse est évaluée par le module de simulation et leurs performances par le module d'évaluation.

III. MODULE D'ÉVALUATION

III.1. Présentation du module

Le module d'évaluation d'ASPIRE est destiné à permettre l'évaluation de plusieurs ordonnancements par rapport à des critères variés afin de les comparer et de les classer. Le but de ce module est donc de réaliser des tableaux de bord applicables à plusieurs ordonnancements.

Le module doit donc pouvoir permettre de définir des indicateurs spécifiques à chaque entreprise et de construire des tableaux de bord adaptés aux besoins de l'entreprise. Pour cela, la démarche suivante est proposée :

- définition d'un indicateur,
- définition d'un contexte,
- définition d'un mode de visualisation,
- définition d'un tableau de bord,
- utilisation d'un tableau de bord sur plusieurs ordonnancements.

Le module d'évaluation d'ASPIRE est ainsi séparé en cinq sous-modules, suivant l'architecture proposée Figure 6.2 :

- le sous-module « indicateur »,
- le sous-module « contexte »,
- le sous-module « évaluation »,
- le sous-module « visualisation et mode de visualisation »,
- le sous-module « tableau de bord ».

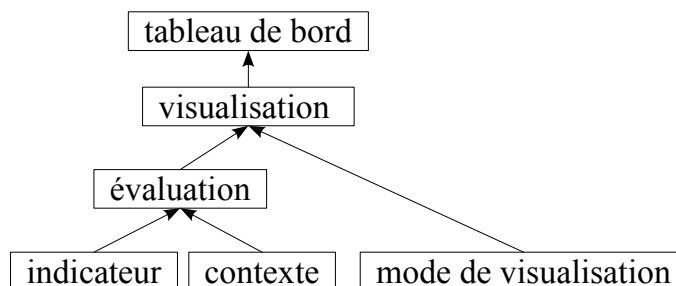


Figure 6.2 - Architecture du module d'évaluation

Le sous-module « indicateur » permet de définir le mode de calcul d'un indicateur. Trois types d'indicateurs sont proposés :

- les indicateurs élémentaires, ou indicateurs-table, dont les données proviennent

directement de la base de données,

- les indicateurs agrégés, qui permettent d'agréger en un seul indicateur synthétique, l'application d'un même indicateur à plusieurs objets (par exemple, la moyenne du retard des OF),
- les indicateurs combinés, ou indicateurs-indicateurs, qui permettent d'agréger entre eux plusieurs indicateurs, élémentaires, agrégés ou combinés.

Le sous-module « contexte » permet de définir les objets sur lesquels seront appliqués les indicateurs. Par exemple, si on définit un indicateur évaluant le retard de chaque OF par l'équation « date de livraison – date de fin », on peut calculer le retard de tous les OF, d'un groupe d'OF particuliers ou de quelques OF significatifs. Les OF choisis pour le calcul de l'indicateur de retard constituent le contexte d'application de l'indicateur. Ce contexte peut être défini par un filtre (OF dont la priorité est supérieure à 5) ou par un choix manuel.

Le sous-module « évaluation » permet d'associer un contexte et un indicateur, c'est-à-dire d'appliquer l'indicateur sur les objets filtrés. Le contexte par défaut contient tous les objets (si on ne choisit pas un filtre spécifique, on calculera le retard de tous les OF).

Le sous-module « visualisation » permet de définir le mode de visualisation (choix du mode de représentation et de tous les paramètres de visualisation) et de l'associer à une évaluation. La visualisation ainsi définie (association d'une évaluation et d'un mode de visualisation) peut être appliquée à plusieurs ordonnancements différents.

Le sous-module « tableau de bord » permet de créer des tableaux de bord. Après avoir choisi quelles visualisations (évaluation+mode de visualisation) placer sur le tableau de bord, on détermine la taille et la position de chacune. Les tableaux de bord ainsi créés sont applicables à plusieurs ordonnancements différents. On peut ainsi comparer et classer ces ordonnancements.

Trois niveaux d'utilisation du module d'évaluation sont envisagés :

- au premier niveau, l'utilisateur crée ses propres tableaux de bord à partir d'indicateurs classiques prédéfinis,
- au deuxième niveau, l'utilisateur peut définir ses propres indicateurs par l'intermédiaire d'une interface et mettre au point ses tableaux de bord,
- au troisième niveau, l'utilisateur définit ses indicateurs au moyen de requêtes SQL complexes et crée ses tableaux de bord à partir de ces indicateurs ou d'indicateurs prédéfinis.

III.2. Implémentation

III.2.1. Modèles proposés

III.2.1.1. Modèle général

La Figure 6.3 présente le modèle de classe UML [Muller 98] du module d'évaluation. Le formalisme UML a été choisi par les membres du consortium ASPIRE pour représenter les modèles des différents modules.

Ce modèle met en œuvre les cinq sous-modules présentés précédemment.

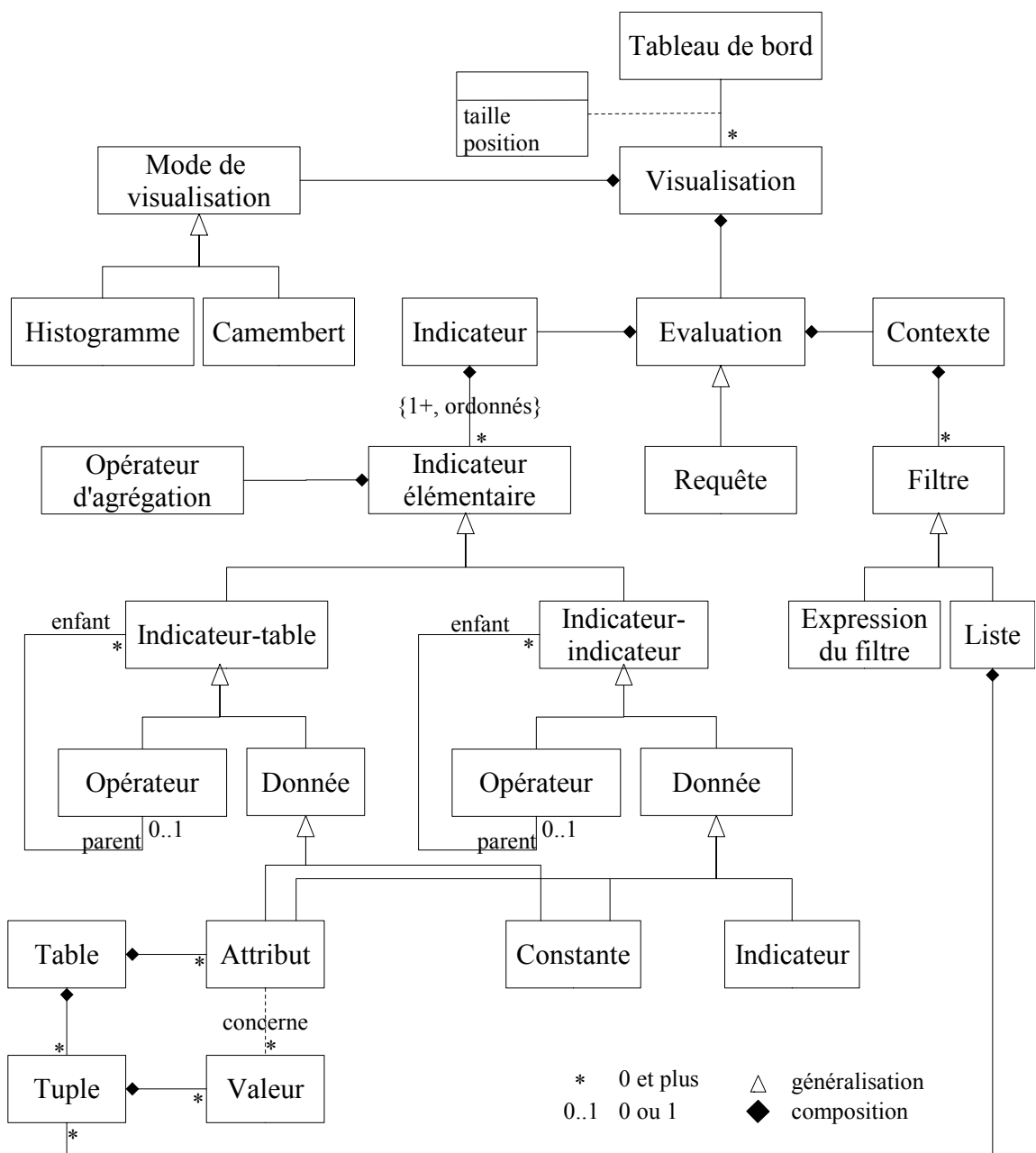


Figure 6.3 - Diagramme de classe UML du module d'évaluation

La classe TABLEAU DE BORD associe plusieurs objets VISUALISATION avec leur taille et leur position. Ces visualisations sont composées d'un objet ÉVALUATION et d'un objet MODE DE VISUALISATION. Chaque type de visualisation (classes HISTOGRAMME, CAMEMBERT, etc.) est dérivé du mode de visualisation. La classe EVALUATION peut être l'association d'un objet CONTEXTE et d'un objet INDICATEUR. Le contexte est obtenu par choix direct (classe LISTE) ou par une expression filtrant les données (classe EXPRESSION). Une évaluation peut aussi être la généralisation de la classe REQUETE. Une instantiation de la classe requête est une requête SQL, généralement une requête sélection, effectuée dans le dépôt de données.

La classe INDICATEUR est composée d'un ou plusieurs objets INDICATEUR ELEMENTAIRE, liés entre eux par un objet OPERATEUR D'AGREGATION permettant d'agréger ces indicateurs élémentaires en un seul indicateur plus synthétique (par exemple somme ou moyenne). La classe INDICATEUR ELEMENTAIRE est la généralisation des classes INDICATEUR-TABLE et INDICATEUR-INDICATEUR.

L'instanciation de la classe INDICATEUR-TABLE permet de définir un indicateur calculé sur les données (classe DONNEE), constantes (classe CONSTANTE) ou issues du dépôt de données, liées entre elles par des opérateurs arithmétiques (classe OPERATEUR). Les données issues de la base de données sont représentées par les quatre classes TABLE, ATTRIBUT, TUPLE et VALEUR. La classe TABLE représente une table du dépôt de données, les différents champs composant chaque table étant représentés par des instantiations de la classe ATTRIBUT (une table contient aucun, un ou plusieurs champs). Les données contenues dans une table sont des enregistrements, représentés par la classe TUPLE. Un enregistrement est composé de plusieurs valeurs, chaque valeur correspondant à un champ.

L'instanciation de la classe INDICATEUR-INDICATEUR permet de définir un indicateur composé d'opérateurs arithmétiques et de données, une donnée pouvant correspondre à une constante, une donnée de la base de données ou à un autre indicateur (instance de la classe générale INDICATEUR définie précédemment). On peut par exemple définir un retard relatif en divisant le retard de chaque OF par son temps de cycle. L'indicateur retard relatif est l'agrégation, par l'opérateur de division de l'indicateur de retard et de l'indicateur de temps de cycle.

III.2.1.2. Instanciation des indicateurs

Le module d'évaluation comporte trois niveaux d'utilisation. Au premier niveau,

l'utilisateur fait l'évaluation d'indicateurs prédéterminés, généralement définis sous forme de requêtes SQL. Au troisième niveau, l'utilisateur crée lui-même ses requêtes SQL. La classe INDICATEUR est donc utilisée uniquement au niveau intermédiaire, pour définir des indicateurs complexes par l'intermédiaire d'une interface graphique.

Les structures des classes INDICATEUR-TABLE et INDICATEUR-INDICATEUR étant relativement similaires, elles sont instanciées de la même manière, sous forme d'arbres dont les nœuds sont des opérateurs arithmétiques et les feuilles sont des données (valeurs de la base de données, constantes, résultats d'autres indicateurs).

Considérons comme exemple l'indicateur de retard. C'est un indicateur-table, puisqu'il est calculé directement à partir des données de la base de données. Son équation est :

$$\text{retard} = \text{date_de_livraison} - \text{date_de_fin_planifiée} \quad (6.1)$$

L'équation (6.1) est représentée par l'arbre de la Figure 6.4.

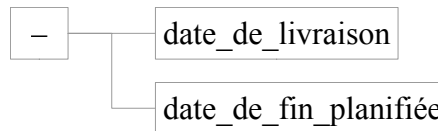


Figure 6.4 - Arbre de l'indicateur de retard

Les données (date_de_livraison et date_de_fin_planifiée) sont représentées par les feuilles et les opérateurs arithmétiques (-) par les nœuds. Cet indicateur va donc nous donner toutes les différences (positives ou négatives) entre la date de livraison souhaitée par le client et la date de livraison programmée par l'ordonnancement. Cet indicateur prend ainsi en compte autant les OF en avance que les OF en retard. Nous allons donc définir un deuxième indicateur, qui va ne tenir compte que des OF en retard. Deux choix s'offrent à nous :

- définir un contexte qui va éliminer les OF en avance des objets sur lesquels on applique l'indicateur de retard,
- définir un indicateur-indicateur qui va annuler l'avance des OF à partir de l'indicateur de retard.

Cette deuxième possibilité nous conduit à définir un indicateur de retard réel. C'est un indicateur-indicateur qui se définit à partir de l'indicateur de retard de la façon suivante :

$$\text{Si retard} > 0 \quad \text{alors retard réel} = 0 \quad \text{sinon retard réel} = \text{retard} \quad (6.2)$$

Ce qui se représente par l'arbre de la Figure 6.5.

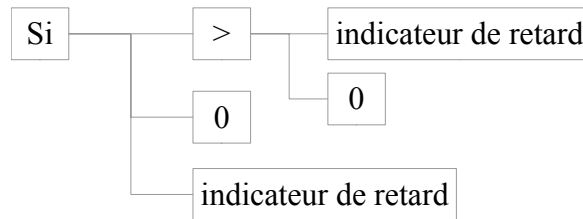


Figure 6.5 - Arbre de l'indicateur de retard réel

Le premier nœud enfant du nœud SI représente la condition à vérifier (indicateur de retard > 0), la deuxième feuille le résultat si la condition est vérifiée (0) et la dernière feuille le résultat si la condition n'est pas vérifiée (indicateur de retard).

La première possibilité consiste à définir un filtre, qui va éliminer du contexte d'application de l'indicateur tous les OF en avance. La condition à vérifier pour que les OF soient dans le contexte est :

$$\text{date_de_livraison} < \text{date_de_fin_planifiée} \quad (6.3)$$

L'expression (6.2) qui va filtrer les objets est elle aussi saisie sous forme d'arbre.

III.2.2. Résultats

Le module d'évaluation a été développé en langage orienté objet C++, et utilise la technologie ODBC (Open Data Base Connectivity) de Microsoft pour accéder au dépôt de données. L'utilisation d'un mécanisme ODBC a pour but de permettre l'implantation de tableaux de bord sur des bases de données de tous types. Un ordonnancement interactif peut ainsi être réalisé à partir de n'importe quel type de logiciel d'ordonnancement, du moment qu'un pilote ODBC correspondant à sa base de données existe et fonctionne correctement.

La Figure 6.6 présente une fenêtre du module d'évaluation développé dans le cadre du projet ASPIRE.

La fenêtre proposée permet de saisir les arbres correspondants aux différents indicateurs, ici les indicateurs-table. L'arbre présenté sur la Figure 6.6 est celui de l'indicateur de retard décrit dans la partie précédente.

Afin de pouvoir accéder à tout type de base de données, sans perturber le fonctionnement des logiciels utilisant ces bases, nous avons choisi d'implanter séparément les données à évaluer (l'ordonnancement) et les données servant à faire l'évaluation (la définition des tableaux de bord).

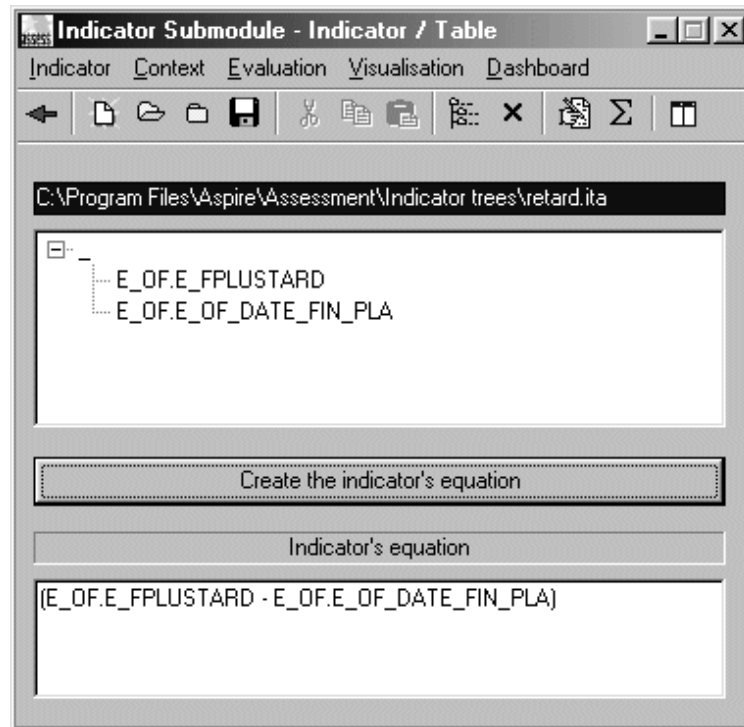


Figure 6.6 - Définition d'un indicateur-table sous forme d'arbre

IV. APPLICATION DE L'OUTIL ASPIRE

Notre approche d'un ordonnancement interactif basé sur l'utilisation d'indicateurs, présentée dans le chapitre 3, a été appliquée à deux problématiques particulières concernant la prise en compte de l'incertitude des commandes et la planification des opérateurs de production, dans les chapitres 4 et 5.

Des instanciations de tableaux de bord correspondants à ces trois cas (ordonnancement interactif classique, ordonnancement sous incertitude et ordonnancement des ressources humaines) sont proposées ici.

IV.1. Ordonnancement classique

Le module d'évaluation développé dans le cadre du projet ASPIRE avait pour principal objectif de mettre en œuvre les différents types d'indicateurs présentés dans le chapitre 3. Ce module est donc le plus paramétrable possible, afin de pouvoir être adapté à tout logiciel d'ordonnancement. Nous avons ainsi choisi, comme exemple d'application à un outil d'ordonnancement classique, de réaliser des tableaux de bord sur le logiciel d'ordonnancement Ortems, leader du marché Européen.

L'ordonnancement est réalisé à partir d'une base de données exemple, fournie avec le logiciel. L'exemple est le suivant :

- l'atelier contient six îlots : contrôle, emballage, fraisage (3 fraiseuses), rectification, tour CN (tour à commande numérique) et tour.
- l'ordonnancement comprend 23 OF, concernant quatre articles dont les gammes comprennent cinq phases, les quantités à fabriquer variant de 10 à 55 articles par OF.

Nous avons mis en œuvre un tableau de bord dédié au retard des OF. Ce tableau de bord contient cinq indicateurs :

- un indicateur de performance : l'indicateur de retard, permettant de visualiser le retard des OF par rapport à leur date de livraison, et ainsi d'évaluer si l'ordonnancement est satisfaisant de ce point vue,
- deux indicateurs de diagnostic pour chercher la cause de ce retard :
 - le taux d'occupation des ressources de l'atelier,
 - le « rendement » des OF, c'est-à-dire la somme des durées opératoires de toutes les tâches sur le temps de cycle de l'OF,
- deux indicateurs d'action, destinés à choisir la règle de priorité :
 - la dispersion des marges des OF,
 - la dispersion des durées des tâches.

Le tableau de bord correspondant est présenté Figure 6.7 : l'indicateur de performance est au centre, les indicateurs de diagnostic en haut et les indicateurs d'action en bas.

Sur le tableau de bord de la Figure 6.7, l'indicateur de performance au centre nous informe que les performances de l'ordonnancement, du point de vue du retard, sont mauvaises, puisque tous les OF sont en retard, de 10 jours à deux mois, dont un OF de près de 6 mois. Le premier indicateur de diagnostic nous permet de constater que le problème vient probablement du tour CN qui a un taux d'occupation de 100%. De plus, le faible taux d'occupation du tour classique nous laisse supposer qu'il peut parfaitement être utilisé en tant que ressource de remplacement sur certaines tâches impliquant le tour CN. Le deuxième indicateur de diagnostic confirme le fait que les OF ont beaucoup d'attente devant les machines, puisque seuls 5 d'entre eux ont un rendement supérieur à 80%.

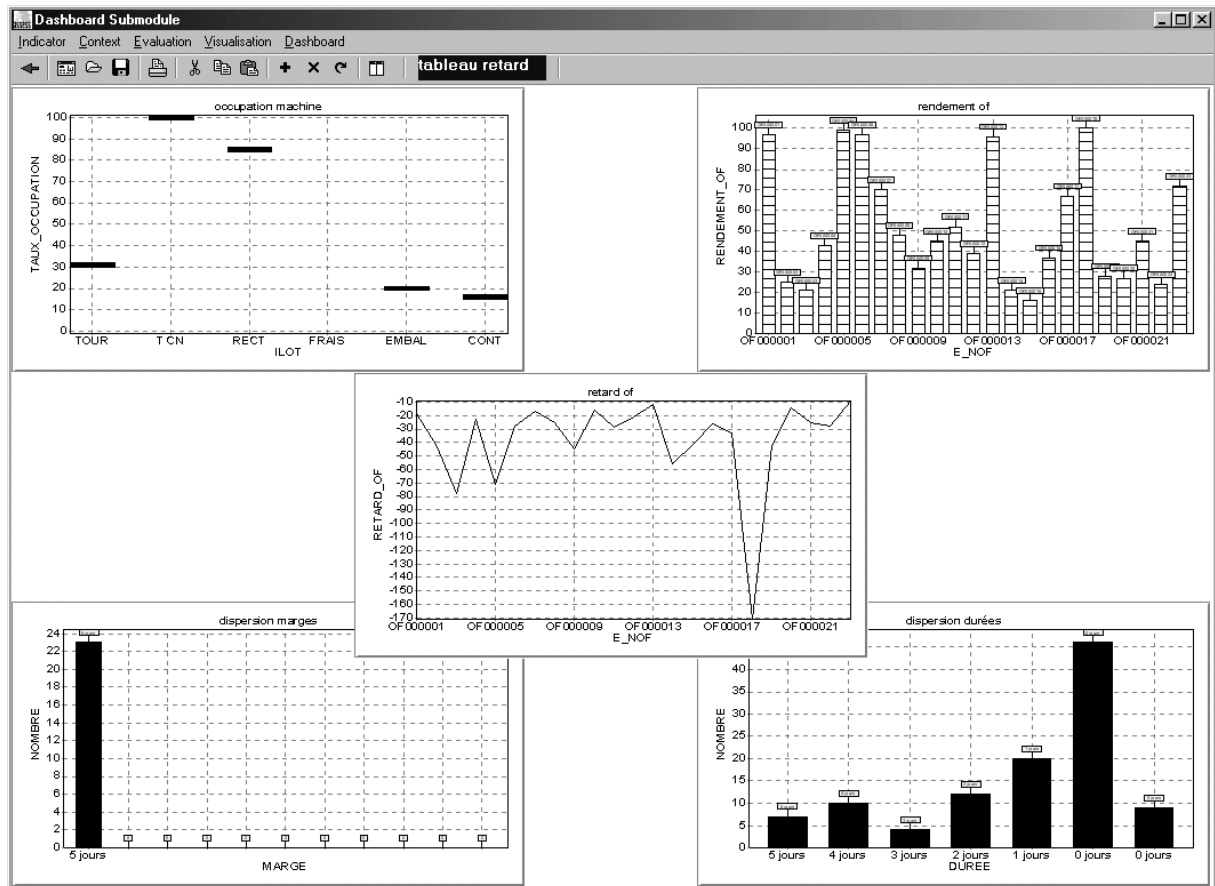


Figure 6.7 - Tableau de bord orienté retard

Les deux indicateurs d'action sont destinés à guider vers le choix de la règle de priorité la plus « efficace ». Il apparaît, d'après l'indicateur sur la dispersion des marges, qu'une règle de priorité sur la marge des OF n'aurait aucun intérêt, tous les OF ayant une marge de 5 jours. Le deuxième indicateur d'action nous informe que la majorité des tâches (près de la moitié) ont une durée comprise entre 0,5 et une journée, ce qui rend l'utilisation d'une règle comme SPT (Shortest Processing Time ou temps opératoire minimum) ou LPT (Longest Processing Time ou temps opératoire maximum) assez aléatoire.

Après évaluation de ce premier tableau de bord, il apparaît donc que les performances de l'ordonnancement en terme de retard sont plutôt mauvaises et que le problème vient d'une surcharge de l'atelier, précisément au niveau du tour CN. De plus, les règles de priorité envisagées semblent ne pas pouvoir conduire à une amélioration significative des performances de l'ordonnancement. Le gestionnaire d'atelier devra donc, au vu de ce tableau de bord, utiliser d'avantage le tour classique pour décharger le tour CN. Il envisagera aussi de faire évoluer son tableau de bord pour qu'il corresponde aux actions possibles et significatives.

IV.2. Ordonnancement sous incertitude

Ces tableaux de bord étant adaptables à tous logiciels d'ordonnancement, ils le sont aussi à des cas particuliers comme celui traité au chapitre 4 concernant la prise en compte dans l'ordonnancement de l'incertitude des commandes.

L'ordonnancement comprend 66 OF, dont les degrés de possibilité et de nécessité ont été déterminés aléatoirement, et six postes (contrôle, emballage, fraisage, rectification, tour CN et tour), dont trois avec un seuil de capacité flou (fraisage, tournage et rectification). Nous avons réalisé un tableau de bord qui comprend quatre indicateurs :

- un indicateur de contexte : la répartition des OF dans les cinq domaines d'incertitude définis dans le chapitre 4, en fonction de leurs degrés de possibilité et de nécessité,
- trois indicateurs d'action : les seuils des trois ressources comportant un seuil de capacité flou.

Le tableau de bord obtenu est présenté Figure 6.8. L'indicateur de contexte est à gauche, les trois indicateurs d'action à droite.

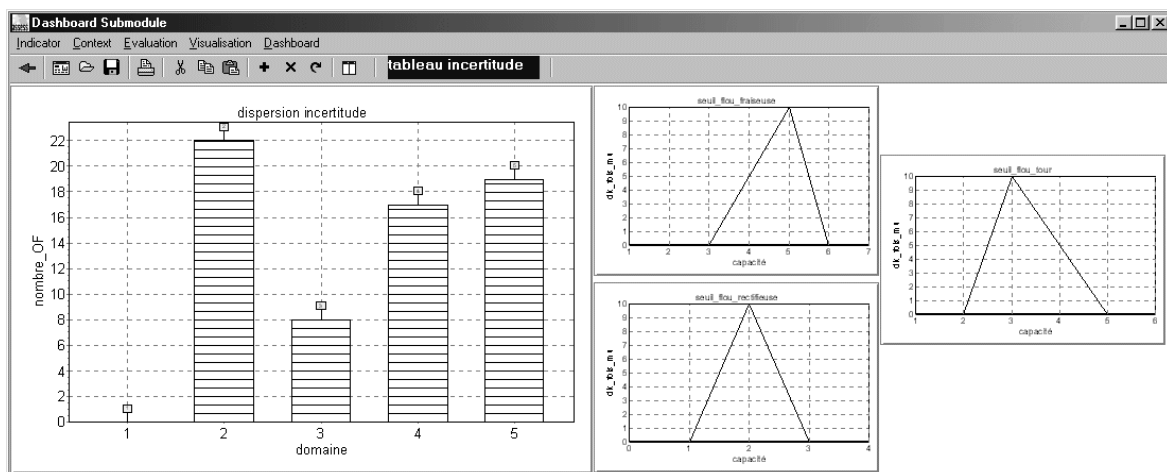


Figure 6.8 - Tableau de bord d'un ordonnancement sous incertitude

Ce tableau de bord est uniquement consacré à la prise en compte de l'incertitude dans l'ordonnancement. Les indicateurs présents sont donc ceux présentés dans le chapitre 4.

L'indicateur de contexte, représentant la répartition des OF dans les cinq domaines d'incertitude, nous permet de constater que seulement 29% des OF (19 sur 66) sont certains. Les OF à ordonnancer sont donc majoritairement peu sûrs. Près de la moitié des OF incertains appartient à la zone 2, c'est-à-dire que leur nécessité est nulle et leur possibilité comprise entre 0,5 et 1.

Seules trois ressources sur six ont un seuil de capacité flou. Ces trois seuils flous sont

présentés dans la partie droite du tableau de bord de la Figure 6.8. Nous remarquons que :

- l'îlot de fraisage a une capacité stricte de trois pièces et peut accepter jusqu'à trois pièces de plus en sur-réservation (soit le double de sa capacité stricte),
- l'îlot de tournage a une capacité stricte de deux pièces et peut en accepter jusqu'à cinq en sur-réservation (la capacité est donc multipliée par 2,5 en sur-réservation),
- l'îlot de rectification a une capacité stricte de une pièce et peut sur-réservé jusqu'à deux pièces supplémentaires (capacité triplée).

Les ressources concernées ont donc un seuil flou qui permet de tolérer une quantité relativement importante de sur-réservation, ce qui correspond à la répartition des OF dans les domaines d'incertitude où la majorité est incertaine.

IV.3. Ordonnement des ressources humaines et techniques

Le dernier cas d'application considéré concerne la gestion des opérateurs à court terme. Nous avons ainsi réalisé un tableau de bord consacré à l'ordonnement des ressources humaines, mettant en œuvre les indicateurs présentés dans chapitre 5. On considère onze compétences : contrôle, fraisage, tournage, CU, rectification, perçage, réglage fraiseuse, réglage tour, réglage rectifieuse, réglage CU et réglage perceuse. Le tableau de bord comprend quatre indicateurs :

- un indicateur de performance : indicateur d'adéquation charge/capacité en compétence,
- deux indicateurs d'action :
 - un indicateur de capacité par compétence, concernant la compétence de fraisage car c'est la compétence critique de l'atelier,
 - un indicateur de capacité par opérateur, concernant l'opérateur Dupond, car il possède le meilleur niveau en fraisage,
- un indicateur de contexte : l'indicateur de charge par compétence, concernant le fraisage.

Le tableau de bord, évalué avant la recherche de l'équilibre entre charge et capacité, est présenté Figure 6.9. L'indicateur de performance est placé en haut à gauche, l'indicateur de capacité par opérateur en haut à droite, l'indicateur de capacité par compétence en bas à gauche et l'indicateur de contexte en bas à droite.

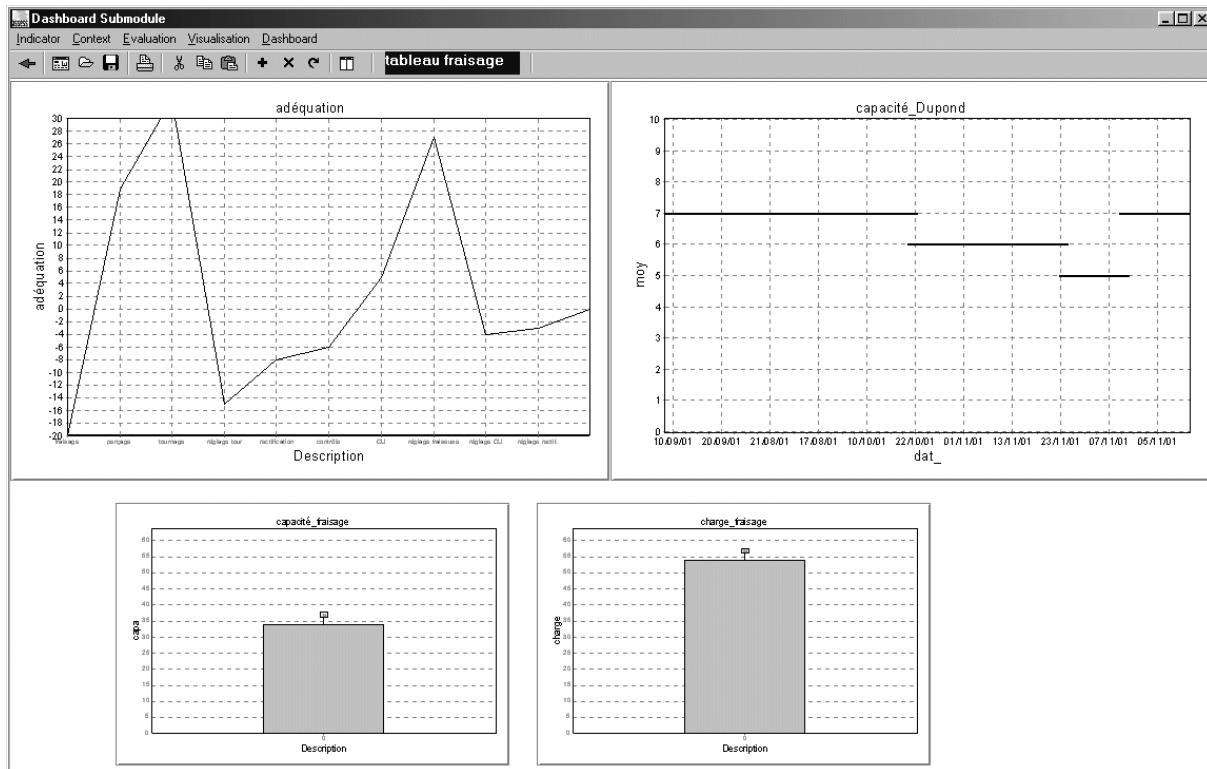


Figure 6.9 - Tableau de bord d'un ordonnancement des opérateurs

L'indicateur de performance en haut à gauche évalue la différence entre la charge par compétence et la capacité disponible. Nous pouvons noter que six compétences sont en surcharge et quatre sont sur-capacitaires. La compétence la plus surchargée est celle de fraisage, avec une différence de 20 heures. C'est une compétence critique et le tableau de bord est conçu pour aider à réaliser l'équilibre entre la charge et la capacité de cette compétence. C'est pourquoi on trouve aussi sur ce tableau de bord deux indicateurs d'action destinés à guider le gestionnaire d'atelier sur les actions les plus aptes à conduire à l'adéquation charge/capacité en fraisage. L'indicateur de capacité en fraisage nous indique que l'on dispose d'une capacité « moyenne », c'est-à-dire obtenue en prenant les capacités moyennes possibles des opérateurs qualifiés en fraisage, de 34 heures. Cet indicateur est à comparer avec l'indicateur de contexte qui indique que la charge de fraisage est de 53,58 heures. Le deuxième indicateur d'action proposé est l'indicateur de capacité par opérateur pour l'opérateur Dupond, cet opérateur possédant le plus haut niveau de compétence en fraisage. Cet indicateur renseigne le gestionnaire d'atelier sur les différentes durées de travail possibles de M. Dupond, afin qu'il puisse choisir la durée permettant de couvrir la charge en fraisage.

Plusieurs compétences étant en surcharge, il faut rechercher un équilibre entre la charge et la capacité de ces compétences. Pour cela, on applique l'algorithme proposé dans le chapitre précédent, en procédant à quelques ajustements manuels. Une fois l'adéquation entre la charge

et la capacité réalisée, on peut à nouveau évaluer le tableau de bord précédent pour vérifier les résultats obtenus.

IV.4. Synthèse

Si le premier tableau de bord présenté, sur un ordonnancement classique, est réalisé sur la base de données d'un logiciel d'ordonnancement commercial, et est donc assez proche de la réalité, les tableaux de bord suivants, sur l'incertitude et les opérateurs, n'ont pu être réalisés que sur des logiciels expérimentaux, et sont donc basés sur des données non réelles. Les tableaux de bord réalisés sur Ortems nous permettent de valider l'intérêt de notre approche d'un point de vue industriel, mais les tableaux de bord suivants, tout en validant notre démarche sur des problèmes spécifiques, n'en sont qu'à un stade expérimental.

Ces trois applications nous ont aussi permis de valider notre approche par un mécanisme ODBC. En effet, il est relativement facile de changer de base de données et de réaliser des tableaux de bord sur plusieurs logiciels d'ordonnancement différents. Le module d'évaluation, développé dans le cadre d'ASPIRE pour fonctionner sur une base de données Oracle, a aussi fonctionné sur une base Interbase (pour Ortems) et une base MS Access (pour les tableaux de bord des parties IV.2 et IV.3). De plus, l'implantation séparée des données relatives à la définition des tableaux de bord nous permet de changer rapidement la base de données évaluée, tout en conservant une certaine rapidité d'exécution du programme.

V. CONCLUSION

Ce dernier chapitre était consacré à l'implémentation de notre approche de l'ordonnancement interactif basé sur des indicateurs. En effet, dans le cadre d'un projet CRAFT Européen, le projet ASPIRE, nous avons été amené à développer un module d'évaluation d'ordonnancement qui nous a permis de réaliser des tableaux de bord mettant en œuvre les indicateurs proposés dans les chapitres précédents.

Dans un premier temps, nous avons présenté le projet ASPIRE, à travers notamment ses objectifs principaux, son fonctionnement et les partenaires du consortium (industriels et chercheurs). La deuxième partie de ce chapitre était consacrée à la présentation du module d'évaluation d'ASPIRE. Après avoir précisé son fonctionnement général, nous avons proposé un modèle objet de l'outil développé en langage C++ et les résultats obtenus. Enfin, dans la

troisième partie du chapitre, nous avons utilisé cet outil pour réaliser des tableaux de bord sur trois cas d'ordonnement : ordonnancement classique avec un tableau de bord sur le logiciel Ortems, ordonnancement sous incertitude et ordonnancement des opérateurs.

Ces différentes applications nous ont permis de valider d'une part notre approche de l'ordonnement interactif basé sur des indicateurs et des tableaux de bord, et d'autre part le module d'évaluation développé dans le cadre du projet ASPIRE, par son implantation sur des logiciels d'ordonnement commerciaux.

Cela nous a en outre permis de constater que la mise au point de tableaux de bord « efficaces », c'est-à-dire correspondant aux spécificités de l'entreprise et aux besoins du gestionnaire d'atelier, est relativement longue et délicate. Il faut en effet beaucoup de tâtonnements et de retours en arrière pour obtenir des tableaux de bord performants, contenant les indicateurs les plus intéressants. Pour exemple, le tableau de bord défini sur Ortems dont les indicateurs d'action sont encore perfectibles.

Enfin, le principal défaut de ces tableaux de bord reste la définition des indicateurs. Si la détermination des indicateurs utiles peut s'avérer longue et délicate, la définition des indicateurs, c'est-à-dire la conception de l'équation de l'indicateur, nécessite une bonne connaissance du logiciel d'ordonnement utilisé. En effet, s'il faut déjà savoir quels sont les différents paramètres et degrés de liberté du logiciel pour déterminer les indicateurs à mettre en place, il faut en plus connaître le fonctionnement de la base de données pour pouvoir calculer ces indicateurs. Ceci ne peut se faire rapidement sans une participation de l'éditeur ou d'un expert du logiciel utilisé.

Conclusion générale

Conclusion générale

Bilan de notre étude

Les travaux présentés dans ce mémoire traitent de l'évolution de la fonction ordonnancement au sein de l'entreprise, et plus précisément du processus d'amélioration de l'ordonnancement.

Le premier chapitre nous a permis d'exposer la problématique de l'ordonnancement. Nous l'avons situé au sein de l'entreprise et avons rapidement abordé les différentes techniques de résolution du problème présenté. Cette étude a souligné quelques points délicats de l'ordonnancement actuel, notamment le besoin des industriels d'avoir un ordonnancement plus adapté à leur atelier, leurs ressources, leurs produits, leurs clients, leurs habitudes... L'ordonnancement doit évoluer pour mieux répondre à ce besoin et pouvoir ainsi intégrer des ressources atypiques, des contraintes complexes, des critères multiples, etc. Nous avons proposé comme réponse à cette évolution de réaliser un ordonnancement interactif, basé sur l'utilisation d'indicateurs. L'interactivité s'est imposée comme étant l'approche la plus générique pour avoir un ordonnancement prenant en compte les spécificités de l'entreprise. L'utilisation des indicateurs s'est pour sa part imposée pour répondre au problème de l'aspect multi-critère de l'ordonnancement, réponse que nous avons proposé d'étendre à tout le processus d'ordonnancement.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une étude des indicateurs de performance. Cette étude bibliographique avait pour but de mieux cerner les concepts que nous nous proposons de mettre en œuvre dans le cadre d'un ordonnancement interactif. Nous avons ainsi défini et modélisé les indicateurs de performance. L'étude s'est étendue jusqu'à la définition et la construction de tableaux de bord, supports de visualisation traditionnels des indicateurs. Nous avons aussi étudié les différentes utilisations des indicateurs, indicateurs déjà utilisés dans le milieu industriel et indicateurs plus complexes en cours de développement dans le monde de la recherche. Cette revue nous a permis de constater que l'utilisation des indicateurs se limite à l'évaluation des performances d'un système quel qu'il soit. Nous n'avons pas décelé d'utilisation ou de typologie permettant de répondre aux spécificités d'un ordonnancement interactif.

Nous avons ainsi proposé dans le troisième chapitre la définition de nouveaux types d'indicateur destinés à réaliser un ordonnancement interactif. Quatre types d'indicateur ont été proposés :

- des indicateurs de contexte, destinés à renseigner sur le cadre général, le contexte dans lequel s'effectue l'ordonnancement,
- des indicateurs de diagnostic, permettant d'identifier les causes les plus classiques de problèmes d'ordonnancement typiques,
- des indicateurs d'action, destinés à aider à déterminer quels sont les degrés de liberté dont l'utilisation conduira à une amélioration des performances,
- des indicateurs de performance, qui permettent d'évaluer les performances de l'ordonnancement par rapport aux objectifs définis par l'entreprise.

Nous avons proposé plusieurs exemples de ces différents indicateurs sur quelques degrés de liberté classiques de logiciels d'ordonnancement parmi les plus courants et les plus représentatifs du marché. Ces quelques applications sont restées dans un cadre d'ordonnancement relativement générique. Aussi, nous avons proposé d'appliquer le principe de l'utilisation d'indicateurs pour améliorer l'interactivité dans le processus d'ordonnancement, à deux problématiques actuelles.

Nous avons ainsi présenté une approche basée sur l'utilisation d'indicateurs permettant de prendre en compte dans l'ordonnancement des commandes encore en cours de négociation et donc incertaines. En décrivant la répartition des OF dans des domaines d'incertitude, nous avons défini un indicateur de contexte. Nous avons aussi proposé un indicateur d'action. Cet indicateur d'action, spécifique à la planification d'OF incertains, décrit pour les ressources de l'atelier un seuil, flou, de charge acceptable. Les modalités d'ordonnancement d'opérations incertaines sur les ressources en fonction de ce seuil flou ont été exposées.

Notre approche de l'ordonnancement interactif, basée sur l'utilisation d'indicateurs et de tableaux de bord, a été aussi appliquée à la problématique de la prise en compte des compétences des opérateurs de production au niveau de l'ordonnancement, dans un contexte de temps de travail annualisé. Nous avons ainsi défini des indicateurs spécifiques à la gestion des compétences des opérateurs. Cinq indicateurs ont été proposés :

- un indicateur de potentiel d'atelier qui permet de définir le contexte d'ordonnancement en termes de compétences et d'opérateurs disponibles,
- un indicateur de capacité par opérateur, indicateur de contexte ou indicateur d'action, suivant l'utilisation qui en est faite, qui permet de visualiser les durées de travail

possibles des opérateurs,

- un indicateur de capacité par compétence, lui aussi indicateur de contexte ou d'action, qui renseigne sur le nombre d'opérateurs possédant une compétence donnée et sur la capacité fournie par ces opérateurs,
- un indicateur de charge par compétence, indicateur de contexte, qui permet de visualiser la charge induite par les différents OF dans chacune des compétences,
- un indicateur d'adéquation charge/capacité, indicateur de performance, qui permet de vérifier si les compétences disponibles et les durées de travail des opérateurs suffisent à couvrir la charge pressentie.

Des actions spécifiques à la gestion des opérateurs à court terme, rarement possibles et présentes dans les logiciels d'ordonnement commerciaux, ont été spécifiées, implémentées et testées.

Dans le sixième et dernier chapitre de ce mémoire, nous avons présenté un outil permettant de réaliser des tableaux de bord sur des ordonnancements. Cet outil a été développé dans le cadre d'un projet Européen, le projet ASPIRE. Il permet notamment d'évaluer les performances d'un ordonnancement par rapport aux objectifs de l'entreprise. Fortement paramétrable et développé de manière à rester à portée de l'utilisateur final, il permet aussi de mettre en œuvre tout type d'indicateurs, et plus précisément les différents indicateurs proposés dans les chapitres précédents. Nous avons ainsi montré, à titre d'illustration, trois tableaux de bord, destinés à des utilisations illustrant la variété d'indicateurs que nous avons identifiés :

- un tableau de bord sur un ordonnancement classique, réalisé par le logiciel Ortems, qui présentait une démarche typique de notre approche d'ordonnement interactif en proposant un indicateur de performance (retard des OF), deux indicateurs de diagnostic (taux d'occupation des ressources et rendement des OF) et deux indicateurs d'action sur les règles de priorité (dispersion des marges des OF et des durées des opérations),
- un tableau de bord sur l'ordonnement de commandes incertaines qui comportait les deux indicateurs définis au chapitre 4, l'indicateur de contexte sur la répartition des OF dans les domaines d'incertitude et l'indicateur d'action sur le seuil flou de charge acceptable des ressources,
- un tableau de bord sur la gestion des opérateurs en ordonnancement qui proposait quatre indicateurs : un indicateur d'adéquation charge/capacité, un indicateur de capacité par opérateur, un indicateur de capacité par compétence et un indicateur de charge par

compétence.

La réalisation de ces différents tableaux de bord nous a permis de valider notre approche de l'ordonnancement interactif basé sur l'utilisation d'indicateurs. Nous avons aussi grâce à eux expérimenté l'outil d'évaluation réalisé dans le cadre du projet ASPIRE, sur un logiciel d'ordonnancement commercial, le logiciel Ortems.

Apports et limites

Le principal intérêt de l'approche proposée est de permettre l'amélioration de tout ordonnancement. En effet, tant la démarche décrite que l'outil développé, peuvent facilement s'adapter à tout type de problème, de logiciel, d'entreprise, d'objectifs, etc. C'est donc une démarche fortement paramétrable et adaptable, qui peut aisément être étendue à des problèmes moins spécifiques que l'ordonnancement. A partir d'outils simples et connus comme les tableaux de bord et les indicateurs qui les composent, nous pensons parvenir à améliorer les conditions dans lesquelles le gestionnaire d'atelier met son ordonnancement au point. La souplesse d'utilisation de la démarche proposée permet en outre de s'adapter à des contextes variés. Nous proposons ainsi des axes de réponse à des problèmes particuliers tels que l'ordonnancement de commandes incertaines ou la prise en compte des ressources humaines au niveau de l'ordonnancement. L'outil développé présente quant à lui l'avantage de ne pas être intrusif. En effet, l'implantation des données définissant les indicateurs et les tableaux de bord dans une base de données séparée permet de ne pas risquer de perturber le fonctionnement du logiciel évalué, tout en assurant une utilisation rapide.

Nous avons présenté dans ce mémoire une démarche de prise en compte de l'incertitude pouvant entacher certaines commandes lors de la réalisation d'un ordonnancement. Cette méthode permet de planifier des OF dont l'occurrence n'est pas sûre. Nous avons ainsi proposé de modéliser la capacité des ressources par un seuil flou de charge acceptable et adapté le processus d'ordonnancement à ce seuil. Enfin, nous avons apporté quelques propositions de réglage des différents paramètres de la méthode proposée.

Nous avons enfin proposé une application de notre approche de l'ordonnancement interactif par des indicateurs à la problématique de la prise en compte des compétences et de l'annualisation du temps de travail de opérateurs au niveau de l'ordonnancement. Nous avons ainsi défini le lien entre l'ordonnancement et les compétences des opérateurs, en nous basant sur les souhaits des industriels. Nous avons en outre proposé diverses approches de mise au point d'un équilibre entre la charge et la capacité par compétence.

Notre approche de l'ordonnancement interactif nécessite toutefois, avant de pouvoir atteindre une utilisation réellement performante, un temps de mise au point assez important. Cette période de mise au point est séparée en deux temps : la définition des indicateurs et des tableaux de bord à mettre en place et l'amélioration progressive des indicateurs et des tableaux de bord pour qu'ils correspondent aux besoins du gestionnaire d'atelier. Ces deux étapes peuvent s'avérer relativement longues car elles nécessitent toutes deux une bonne connaissance du fonctionnement interne du logiciel d'une part et de l'atelier d'autre part.

Les deux applications présentées (ordonnancement sous incertitude et ordonnancement des opérateurs) mettent en avant les lacunes du prototype développé en soulignant le manque d'interactivité et de dynamique des visualisations proposées. Ces deux aspects sont indispensables à une utilisation performante des indicateurs et des tableaux de bord dans le cadre d'un ordonnancement interactif. Une autre axe d'amélioration possible se situe au niveau de la comparaison de deux ordonnancements. En effet, si l'on peut actuellement effectuer la même évaluation sur deux ordonnancements différents, il n'est par contre pas possible d'afficher ces deux tableaux de bord simultanément.

Perspectives

S'il paraît difficile de faciliter de manière importante la mise au point des tableaux de bord (il faudra toujours une bonne connaissance du logiciel et de son atelier, ainsi que du temps, pour mettre au point des tableaux de bord performants), les difficultés de visualisation (interactivité, dynamique et multi-affichage) peuvent être surmontées en utilisant des outils graphiques plus évolués.

L'utilisation d'indicateurs a permis de faciliter la mise au point interactive d'un ordonnancement. Nous avons ensuite validé cette approche sur deux problématiques particulières de l'ordonnancement concernant la prise en compte de commandes en cours de négociation et des opérateurs de production. Nous pensons que notre démarche pourrait être appliquée à d'autres problèmes d'ordonnancement, comme par exemple la gestion et la planification des opérations de maintenance (propositions d'indicateurs d'action pour pouvoir planifier des opérations de maintenance par exemple).

Les deux applications abordées peuvent elles aussi être davantage développées. Notre prise en compte de l'incertitude par exemple, s'est limitée au niveau de l'ordonnancement, mais l'approche proposée peut être élargie à d'autres étapes de la planification. L'incertitude étant généralement prise en compte à des niveaux plus élevés de planification par

l'intermédiaire de marges et autres délais, l'intégration de notre approche consisterait plutôt à modifier la façon dont l'incertitude est gérée en utilisant la théorie des possibilités. Il serait aussi intéressant de développer un système MRP ou SCM (Supply Chain Management) sur la même logique.

La gestion des opérateurs peut elle aussi être davantage développée, notamment au niveau de la recherche de l'adéquation charge/capacité, où les approches étudiées, si elles ont permis de valider la faisabilité de la démarche proposée, n'en restent pas moins très perfectibles.

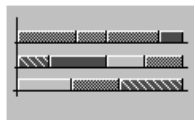
Annexes

Annexe A - Questionnaire



Laboratoire Génie de Production
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes

QUESTIONNAIRE ORDONNANCEMENT - GESTION DES OPERATEURS
--



Dans ce questionnaire, l'Ordonnancement est compris comme une planification détaillée à capacité finie sur un horizon court terme (quelques jours à quelques semaines).

ORDONNANCEMENT

1 - Comment est assuré l'ordonnancement des activités de fabrication dans votre entreprise ?

par un module du logiciel de gestion de production

nom du logiciel :

par un logiciel d'ordonnancement particulier

nom du logiciel :

manuellement

il n'y a pas d'ordonnancement en tant que tel

2 - Votre outil d'ordonnancement vous donne-t-il satisfaction ?

Oui

Non

3 - Si Non, pourquoi ?

4 - Pensez-vous avoir des besoins spécifiques en matière d'ordonnancement ?

Oui Non

5 - Ces besoins spécifiques sont-ils liés :

- à des objectifs de minimisation des temps non productifs ,
- aux règles de gestion de certaines ressources particulières (fours, lignes à équilibrer...),
- à des particularités de votre processus de fabrication (contraintes entre phases, éclatement/regroupement de lots),
- à des contraintes de disponibilité/compétence des opérateurs ,
- à des particularités de vos données techniques (gammes, nomenclatures),
- autres raisons.

Préciser :

Exemples de particularités :

GESTION DES OPERATEURS

6 - La gestion des opérateurs vous paraît-elle être une fonctionnalité d'ordonnancement :

Inutile Utile Indispensable

7 - Selon vous, doit-on :

- gérer l'affectation des opérateurs comme une conséquence de la planification réalisée sur les machines
- gérer la contrainte de disponibilité des opérateurs au même niveau que celle des machines

8 - Souhaiteriez-vous une gestion des opérateurs qui prenne en compte :

- des capacités tous opérateurs confondus,
- des capacités par type de compétence opérateur,
- des capacités par équipe,
- des capacités individuelles par opérateur.

9 - Souhaiteriez-vous associer un opérateur (plusieurs réponses possibles) :

- à un groupe de ressources équivalentes (ex: groupe « tournage »),
- à un groupe de ressources non équivalentes (atelier, cellule, ligne),
- à une ressource précise,
- à un type de phase non nécessairement effectué sur la même ressource (hors cas de régleurs),
- à un lot de pièces.

10- En fonction de la réponse précédente, comment définiriez-vous la « qualification » ou « compétence » d'un opérateur ?

11 - La qualification de régleur vous paraît-elle :

Inutile Utile Indispensable

12 - Pour l'affectation de l'opérateur, la notion de « qualification » vous paraît-elle :

Inutile Utile Indispensable

13 - La qualification de l'opérateur a-t-elle une influence sur la durée de la tâche affectée ?

Jamais Rarement Parfois Toujours

14 - Quels sont les objectifs principaux que vous poursuivez à travers la Gestion des

opérateurs ?

(classez par rang d'importance - 1 = facteur le plus important)

- connaître la capacité globale nécessaire en opérateur pour réaliser le planning
- connaître la capacité par type de compétence opérateur pour réaliser le planning
- connaître les affectations individuelles par opérateur
- affecter un opérateur présentant la meilleure qualification possible à une tâche
- maximiser la charge des opérateurs
- gérer de manière fine les heures supplémentaires
- gérer la sous-traitance
- gérer les affectations inter-ateliers
- gérer les formations

15 - La prise en compte au niveau de l'ordonnancement des contraintes liées à l'annualisation du temps de travail (durée hebdomadaire minimale, maximale, respect d'une durée moyenne hebdomadaire sur l'année...) vous paraît-elle :

Inutile Utile Indispensable

16 - Cette prise en compte vous paraît-elle suffisante dans les outils d'ordonnancement dont vous disposez ?

Insuffisante A peine suffisante Suffisante

17 - Etes-vous satisfait de votre gestion des opérateurs ?

Si Non, quels sont selon vous, les obstacles principaux à une gestion plus efficace des opérateurs

- difficulté de formaliser la stratégie d'affectation,
- difficulté de formaliser la notion de qualification,
- non disponibilité de certaines données,
- manque d'outil informatique,
- problèmes humains,

autre. Préciser :

17 - Souhaitez vous être tenu au courant des résultats de cette enquête et des développements qui en découleront ?

Oui

Non

Nom/Adresse où vous souhaitez voir arriver les résultats de l'enquête :

18 - Souhaitez vous discuter d'une possibilité de vous associer à ces développements ?

Oui

Non

Merci de bien vouloir retourner ce questionnaire à :

Bernard GRABOT
ENIT - Avenue d'Azereix
BP 1629
65016 TARBES CEDEX
Fax : 05 62 44 27 08

Annexe B – Résultats

Résultats du questionnaire sur la gestion des opérateurs

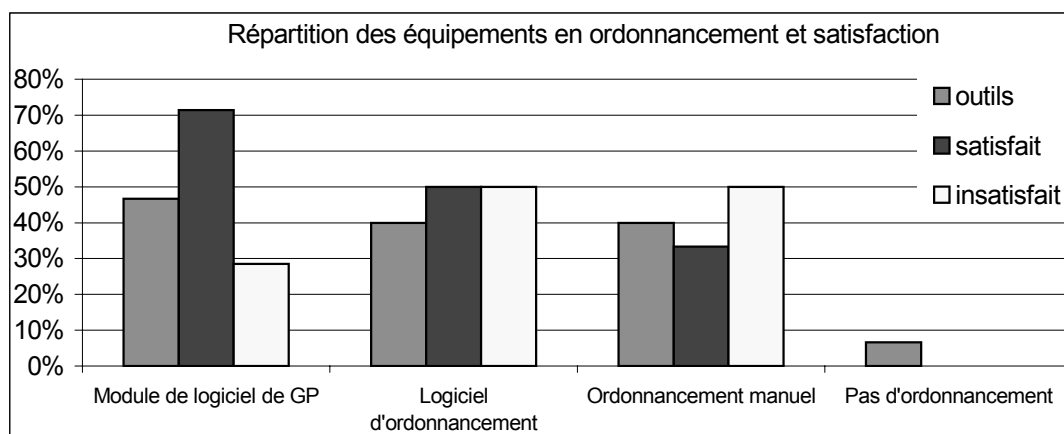
Réponses

Nombre de questionnaires envoyés	30
Nombre de questionnaires reçus	19
Réponses aux questions concernant la gestion des opérateurs	15

1 - Outils d'Ordonnancement utilisés

Comment est assuré l'ordonnancement des activités de fabrication dans votre entreprise ?
 Votre outil d'ordonnancement vous donne-t-il satisfaction ?

	outils	satisfait	insatisfait
Module de logiciel de GP	7 47%	5 71%	2 29%
Logiciel d'ordonnancement	6 40%	3 50%	3 50%
Ordonnancement manuel	6 40%	2 33%	3 50%
Pas d'ordonnancement	1 7%	0 0%	0 0%
Total	20	10 50%	8 40%



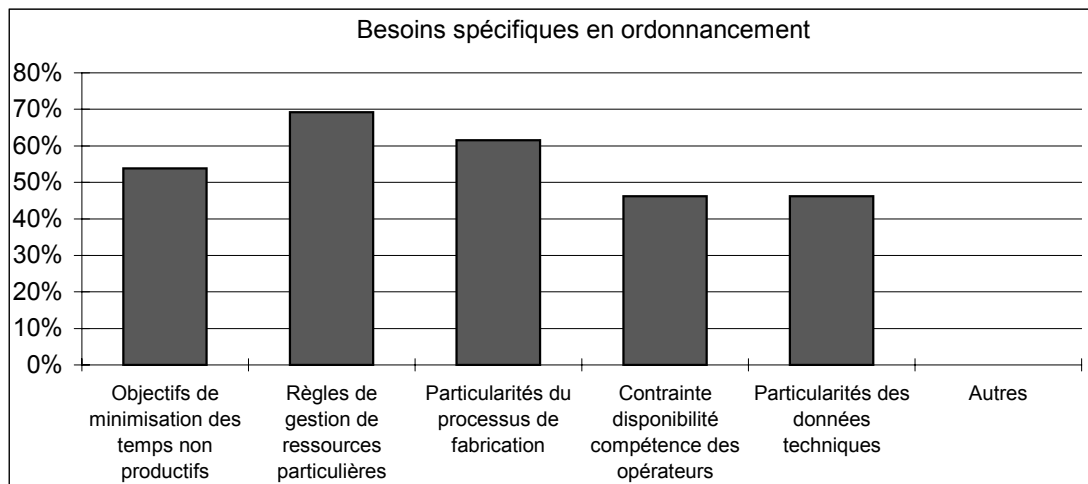
2 - Besoins spécifiques en ordonnancement

Pensez-vous avoir des besoins spécifiques en matière d'ordonnancement ?

oui : 13 => 68,4%

Ces besoins spécifiques sont liés à :

	réponse	% *
Objectifs de minimisation des temps non productifs	7	54%
Règles de gestion de ressources particulières	9	69%
Particularités du processus de fabrication	8	62%
Contrainte disponibilité compétence des opérateurs	6	46%
Particularités des données techniques	6	46%
Autres	0	0%

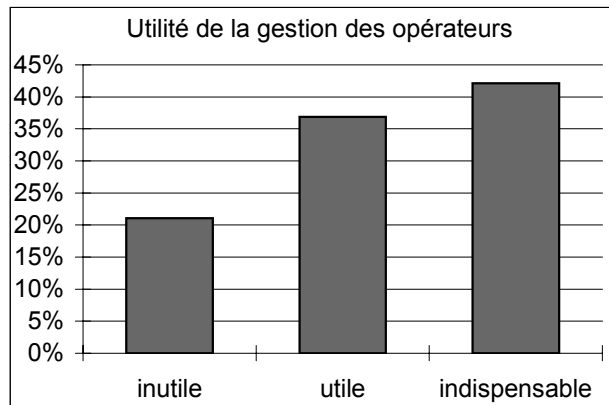


3 - Gestion des opérateurs

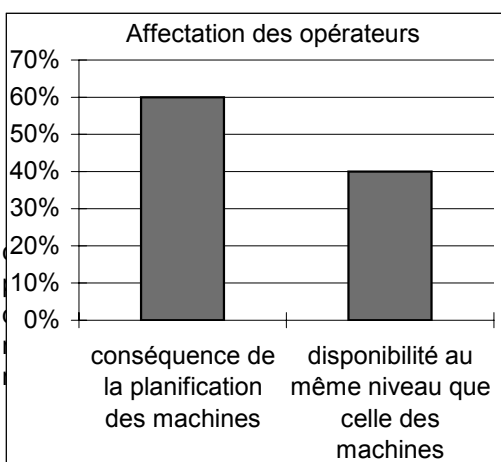
3-1 Gestion des opérateurs en ordonnancement

La gestion des opérateurs vous paraît-elle être une fonctionnalité d'ordonnancement :

	réponse	%
inutile	4	21%
utile	7	37%
indispensable	8	42%
total	19	100%



3-2 Affectation des opérateurs



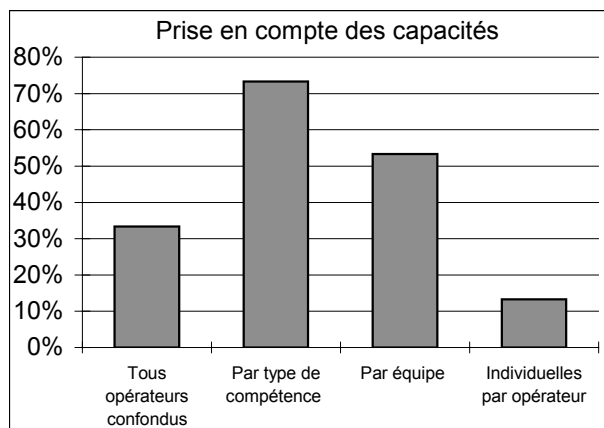
Selon vous, doit-on :

	réponse	%
Gérer l'affectation des opérateurs comme une conséquence de la planification des machines	9	60%
Gérer la contrainte de disponibilité des opérateurs au même niveau que celle des machines	6	40%
total	15	100%

3-3 Prise en compte des capacités

Souhaiteriez-vous une gestion des opérateurs qui prenne en compte des capacités :

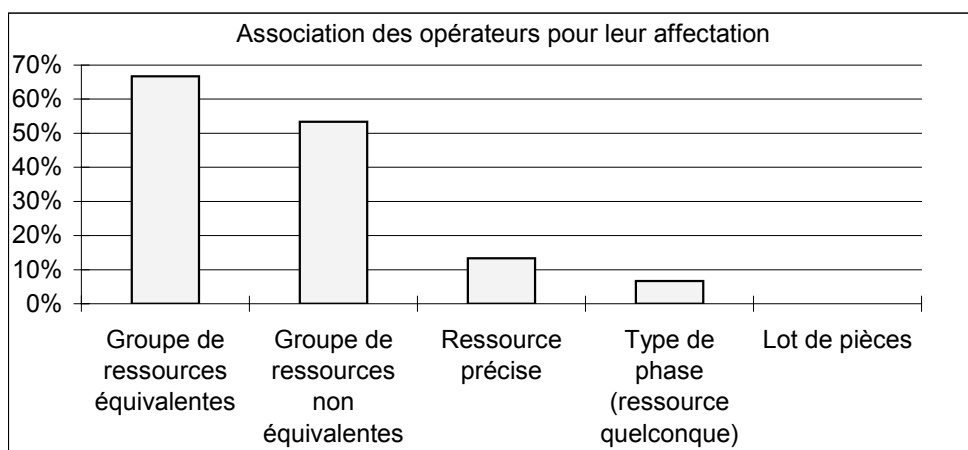
	réponse	% *
Tous opérateurs confondus	5	33%
Par type de compétence	11	73%
Par équipe	8	53%
Individuelles par opérateur	2	13%



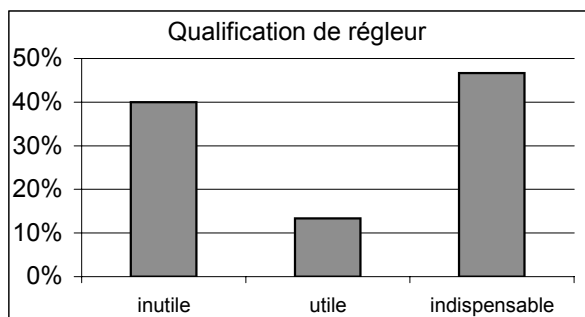
3-4 Affectation d'un opérateur

Souhaiteriez-vous associer un opérateur à :

	réponse	% *
Groupe de ressources équivalentes	10	67%
Groupe de ressources non équivalentes	8	53%
Ressource précise	2	13%
Type de phase (ressource quelconque)	1	7%
Lot de pièces	0	0%



3-5 Qualification de régleur



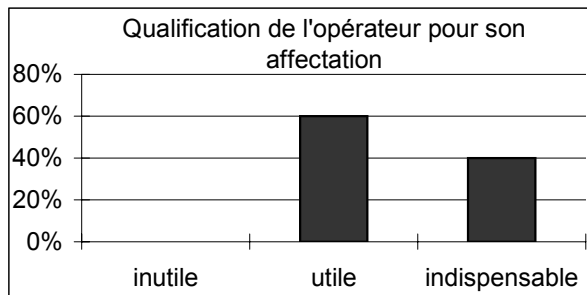
La qualification de régleur vous paraît-elle :

	réponse	%
inutile	6	40%
utile	2	13%
indispensable	7	47%
total	15	100%

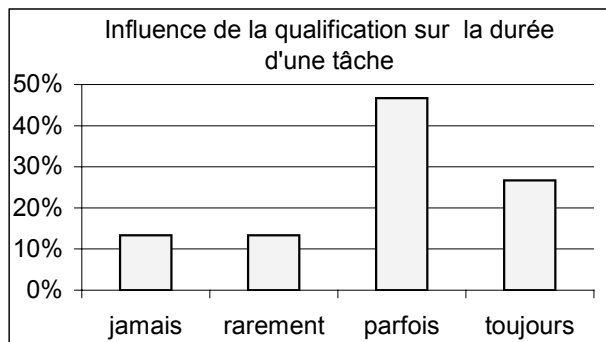
3-6 Qualification de l'opérateur pour son affectation

Pour l'affectation de l'opérateur, la notion de qualification vous paraît-elle :

	réponse	%
inutile	0	0%
utile	9	60%
indispensable	6	40%
total	15	100%



3-7 Influence de la qualification sur la durée de la tâche



La qualification de l'opérateur a-t-elle une influence sur la durée de la tâche affectée ?

	réponse	%
jamais	2	13%
rarement	2	13%
parfois	7	47%
toujours	4	27%
total	15	100%

4 - Objectifs de la gestion des opérateurs

Quels sont les objectifs principaux que vous poursuivez à travers la gestion des opérateurs ? (classez par ordre d'importance - 1 = facteur le plus important)

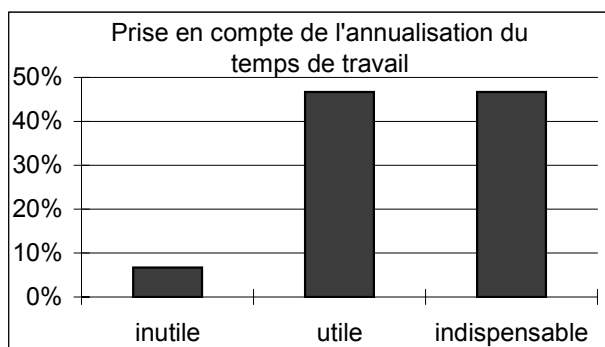
Sur certains questionnaires, le classement n'était pas entièrement fait. La colonne % indique le pourcentage de questionnaire où l'objectif était pris en compte.

La colonne rang moyen indique le rang moyen obtenu pour les questionnaires où l'objectif était classé.

L'objectif "autre" désigne 2 objectifs de rang 1 rajoutés par 2 entreprises : ISO 9000 et maximiser la production des équipements.

	%	rang moyen
Connaître la capacité globale en opérateur pour réaliser le planning	87%	2,15
Connaître la capacité par type de compétence opérateur pour réaliser le planning	80%	2,83
Affecter un opérateur présentant la meilleure qualification pour une tâche	73%	3,27
Maximiser la charge des opérateurs	73%	3,91
Gérer la sous-traitance	60%	5,00
Connaître les affectations individuelles par opérateur	47%	5,14
Gérer les affectations inter-ateliers	60%	5,78
Gérer les heures supplémentaires	53%	6,13
Gérer les informations	60%	6,78
Autre	13%	1,00

5 - Annualisation du temps de travail

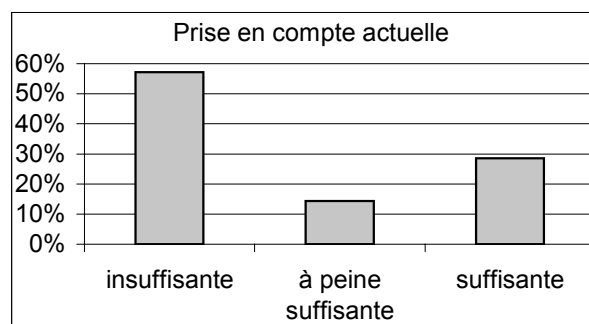


La prise en compte au niveau de l'ordonnement des contraintes liées à l'annualisation du temps de travail (durée hebdomadaire maximale, minimale, durée moyenne annuelle...) vous paraît-elle :

	réponse	%
inutile	1	7%
utile	7	47%
indispensable	7	47%
total	15	100%

Cette prise en compte vous paraît-elle suffisante dans les outils d'ordonnement dont vous disposez ?

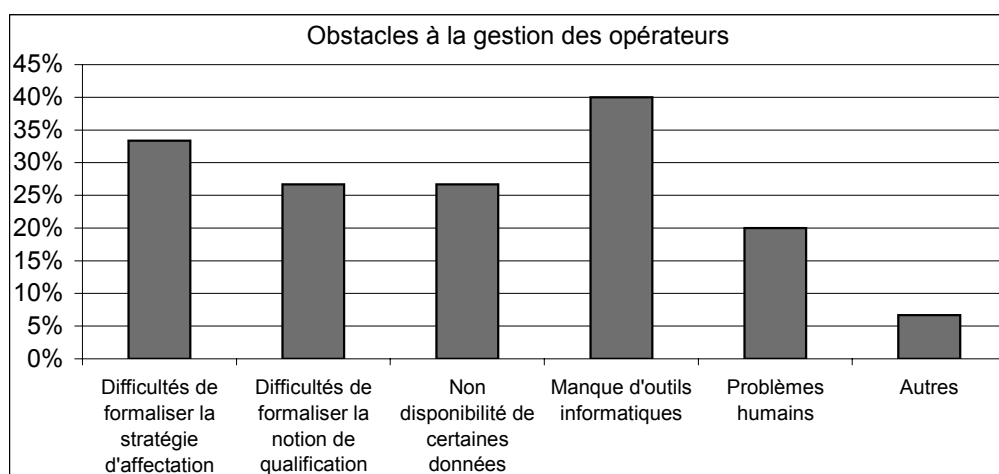
	réponse	%
insuffisante	8	57%
à peine suffisante	2	14%
suffisante	4	29%
total	14	100%



6 - Obstacles à l'efficacité de la gestion des opérateurs actuelle

Si vous n'êtes pas satisfait de votre gestion des opérateurs, quels sont les obstacles à une gestion plus efficace ?

	réponse	%*
Difficultés de formaliser la stratégie d'affectation	5	33%
Difficultés de formaliser la notion de qualification	4	27%
Non disponibilité de certaines données	4	27%
Manque d'outils informatiques	6	40%
Problèmes humains	3	20%
Autres	1	7%



Annexe C – Programme

```

Option Compare Database
Public mabase As Database
Public matab As Recordset
Public matab1 As Recordset
Public comp, comp2, nom, nom2 As String
Public champs, champs2 As Field
Public signet, signet2 As Variant
Public compt, nomt, compm As String
Public transtot, diff, maxi As Single
Public dispo, dif, trans As Single
Public mareq As QueryDef
Public neg, min, pos, max As Single
Option Explicit
Function différence()
Dim a, b As Double
Set mabase = CurrentDb
Set matab = mabase.OpenRecordset("tableau", dbOpenTable)
Set champs = matab.Fields(0)
'calcule la capacité de chaque compétence et fait la différence avec la charge
'calcule la capacité et l'inscrit dans l'enregistrement somme
matab.MoveFirst
Do Until matab.EOF
    For Each champs In matab.Fields
        If champs.Type <> dbText Then
            If IsNull(champs) = True Then
                a = 0
            Else
                a = champs
            End If
            signet = matab.Bookmark
            matab.MoveLast
            matab.Edit
            champs = champs + a
            matab.Update
            matab.Bookmark = signet
        End If
    Next champs
    matab.MoveNext
    'si on est en bas du tableau, on arrete
    If matab![Nom de Famille] = "somme" Then
        Exit Do
    End If
Loop
'Calcule la différence charge - capacité
matab.MoveLast
For Each champs In matab.Fields
    If champs.Name <> "Nom de Famille" And champs.Name <> "SommeDeQualification" Then
        matab.MoveLast
        matab.Move -3
        a = champs
        matab.Move 2
        b = champs
    End If
Next champs

```

```

        matab.MoveLast
        matab.Edit
        champs = a - b
        matab.Update
    End If
Next champs
End Function
Function sélection1()
Set matab = mabase.OpenRecordset("transfert", dbOpenTable)
Set champs = matab.Fields(0)
'sélectionne la compétence la plus négative
neg = 0
min = 0
matab.MoveLast
For Each champs In matab.Fields
    If champs.Name <> "Nom de Famille" And champs.Name <> "SommeDeQualification" Then
        If champs < 0 Then
            neg = champs
            nom = champs.Name
            If neg < min Then
                min = neg
                comp = nom
            End If
        End If
    End If
Next champs
End Function
Function sélection2()
Set matab = mabase.OpenRecordset("transfert", dbOpenTable)
Set champs = matab.Fields(0)
'sélectionne la compétence la plus positive
pos = 0
max = 0
matab.MoveLast
For Each champs In matab.Fields
    If champs.Name <> "Nom de Famille" And champs.Name <> "SommeDeQualification" Then
        If champs > 0 Then
            pos = champs
            nomt = champs.Name
            If pos > max Then
                max = pos
                comp2 = nomt
            End If
        End If
    End If
Next champs
End Function

Function sélection(comp)
Dim c, d As Integer
Set matab = mabase.OpenRecordset("transfert", dbOpenTable)
Set champs = matab.Fields(0)
'détermine le premier opérateur qui a les deux compétences
nom=""
c=0
d=0
matab.MoveFirst
Do Until matab.EOF
    If matab![Nom de Famille] <> "somme" And matab![Nom de Famille] <> "charge" And
matab![Nom de Famille] <> "opé nécessaires" And matab![Nom de Famille] <> "différence" Then

```

```

        For Each champs In matab.Fields
            If champs.Name = comp Then
                If IsNull(champs) = False Then
                    c=1
                End If
            End If
            If champs.Name = comp2 Then
                If IsNull(champs) = False And champs > 0 Then
                    d=1
                End If
            End If
        Next champs
        If d=1 And c=1 Then
            nom = matab.[Nom de Famille]
            Exit Function
        Else
            c=0
            d=0
        End If
    End If
    Matab.MoveNext
Loop
End Function
Function Transfert()
Set mabase = CurrentDb
Set matab = mabase.OpenRecordset("transfert", dbOpenTable)
Set champs = matab.Fields(0)
sélection1
Do
If min >=0 Then
    Exit Function
End If
sélection2
If max <= 0 Then
    Exit Function
End If
sélection3
If nom="" Then
    Transfert2
Else
    Transfert1
End If
sélection1
Loop Until min>=0
End Function
Function Transfert1()
Dim trans, trans_pos As Single
Set mabase = CurrentDb
Set matab = mabase.OpenRecordset("transfert", dbOpenTable)
Set champs = matab.Fields(0)
'effectue un transfert direct entre comp et comp2 sur l'opérateur nom
matab.MoveLast
'capacité maximale transférable dans comp
For Each champs In matab.Fields
    If champs.Name = comp2 Then
        trans_pos = champs
    End If
Next champs
matab.MoveFirst
'recherche d'un opérateur ayant les deux compétences comp et comp2

```

```

Do Until matab.EOF
  If matab.[Nom de Famille] = nom Then
    For Each champs In matab.Fields
      If champs.Name=comp2 Then
        trans=champs
        If trans>trans_pos Then
          trans = trans_pos
        End If
        champs = champs - trans
        For Each champs In matab.Fields
          If champs.Name=comp Then
            champs = champs + trans      'transfert
          Exit For
        End If
      Next champs
    Exit For
  End If
Next champs
matab.MoveNext

Loop
différence
End Function
Function Transfert2()
Dim trans, trans_pos As Single
Dim maxi As Integer
Dim compet As String
Set mabase = CurrentDb
Set matab = mabase.OpenRecordset("transfert", dbOpenTable)
Set champs = matab.Fields(0)
Set champs2 = matab.Fields(0)
'effectue un transfert sur le premier opérateur ayant comp de sa compétence
'la plus positive vers comp
compet = ""
maxi=0
'recherche de comp
For Each champs In matab.Fields
  If champs.Name = comp Then
    'recherche du premier opérateur non nul dans comp
    matab.MoveFirst
    Do Until matab.EOF
      If matab![Nom de Famille] <> "somme" And matab![Nom de Famille] <> "charge"
And matab![Nom de Famille] <> "opé nécessaires" And matab![Nom de Famille] <> "différence" Then
        If IsNull(champs) = False Then
          nom = matab.[Nom de Famille]
          'recherche d'une compétence positive pour cet opérateur
          For Each champs2 In matab.Fields
            If IsNull(champs2) = False Then
              signet = matab.Bookmark
              matab.MoveLast
              If champs2 > 0 And maxi < champs 2 Then
                maxi = champs2
                compet = champs.Name
              End If
              matab.Bookmark = signet
            End If
          Next champs2
          'S'il a une compétence positive, on effectue le transfert
          If compet <> "" Then
            comp2 = compet
          End If
        End If
      End If
    Next champs
  End If
Next champs

```

```

Transfert1
Exit Function
End If
'sinon, on passe à l'opérateur suivant
nom = ""
End If
End If
matab.MoveNext
Loop
'si aucun opérateur ayant comp n'a de compétence positive
Transfert3
End If
Next champs
End Function
Function Transfert3()
Dim ope, ope2 As Single
Dim maxi, mini As Integer
Dim compet, comp_trans As String
Set mabase = CurrentDb
Set matab = mabase.OpenRecordset("transfert", dbOpenTable)
Set champs = matab.Fields(0)
'effectue un transfert de comp2 vers comp sur 2 opérateurs en utilisant une compétence de transition
compet = ""
maxi=0
mini = 48
For Each champs In matab.Fields
'recherche de l'opérateur ayant la plus grande part dans comp2
If champs.Name = comp2 Then
matab.MoveFirst
Do Until matab.EOF
If matab![Nom de Famille] <> "somme" And matab![Nom de Famille] <> "charge"
And matab![Nom de Famille] <> "opé nécessaires" And matab![Nom de Famille] <> "différence" Then
If IsNull(champs) = False Then
If champs > maxi Then
maxi = champs
ope2 = matab.[Nom de Famille]
signet2 = matab.Bookmark
End If
End If
End If
matab.MoveNext
Loop
End If
'recherche de l'opérateur ayant la plus petite part dans comp
If champs.Name = comp Then
matab.MoveFirst
Do Until matab.EOF
If matab![Nom de Famille] <> "somme" And matab![Nom de Famille] <> "charge"
And matab![Nom de Famille] <> "opé nécessaires" And matab![Nom de Famille] <> "différence" Then
If IsNull(champs) = False Then
If champs < mini Then
mini = champs
ope = matab.[Nom de Famille]
signet = matab.Bookmark
End If
End If
End If
matab.MoveNext
Loop
End If

```

```
Next champs
'recherche de leur compétence commune
compet = ""
matab.Bookmark = signet
For Each champs In matab.Fields
    If IsNull(champs) = False Then
        matab.Bookmark = signet2
        If IsNull(champs) = False Then
            compet = champs.Name
        End If
        matab.Bookmark = signet
    End If
Next champs
'si on n'a pas de compétence de transition on sort
If compet = "" Then
    Exit Function
End If
'transfert sur ope2 de comp2 vers compet
comp_trans = comp
comp = compet
nom = ope2
Transfert1
'transfert sur ope de compet vers comp
comp2 = compet
comp = comp_trans
nom = ope
Transfert1
différence
End Function
```

Bibliographie

Références bibliographiques

- [AFGI 92] Association Française de Gestion Industrielle, *Evaluer pour évoluer, les indicateurs de performance au service du pilotage industriel*, ouvrage collectif AFGI, 1992.
- [AIT 94] Advanced Information Technology in Design and Manufacturing, "State of the art for manufacturing control", Deliverable D4.2.1, 1994.
- [Aldanondo et Cavaillé 01] M. Aldanondo, J.-B. Cavaillé, "Ordonnancement et gestion de production dans l'industrie", dans *Traité IC2 : Gestion de production*, J. Erschler, B. Grabot (Eds), Hermès, 2001, pp. 45-78.
- [Al Kazzaz 89] Y. Al Kazzaz, "Sur l'ordonnancement d'atelier de fabrication : approche hiérarchisée et fonctionnement en boucles de pilotage", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1989.
- [Anthony 65] R.N. Anthony, *Planning and control systems: a framework for analysis*, Harvard University Press, 1965.
- [Archimède et al. 97] B. Archimède, L. Geneste, M. Fisher, J. Högberg, "Comparison of schedules in job shop scheduling: an approach with structural indicators", 7th Mini Euro Conference, Decision Support Systems, Bruges, Belgique, 24-27 Mars, 1997.
- [Artiba et Aghezzaf 97] A. Artiba, E.H. Aghezzaf, "An architecture of a multi-model system for planning and scheduling", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol.10, n°5, 1997, pp. 380-393.
- [Baek et al. 99] D.C. Baek, S.Y. Oh, W.C. Yoon, "A visualized human-computer interactive approach to job shop scheduling", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol.12, n°1, 1999, pp. 75-83.
- [Bel et al. 88] G. Bel, E. Bensana, D. Dubois, "Construction d'ordonnancements prévisionnels : un compromis entre approches classiques et systèmes experts", *Revue d'Automatique, Productique, Informatique Industrielle*, vol.22, n°5, 1988, pp. 509-536.
- [Bellman et Zadeh 70] R.E. Bellman, L.A. Zadeh, "Decision making in a fuzzy environment", *Management Science*, vol.17, n°, 1970, pp. 141-164.
- [Bensana et al. 88] E. Bensana, G. Bel, D. Dubois, "OPAL: a multi-knowledge based system for industrial job-shop scheduling", *International Journal of*

Production Research, vol.26, n°3, 1988, pp. 795-815.

- [Bérard 83] C. Bérard, "Contribution à la conception de structures logicielles pour le pilotage d'atelier", Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Bordeaux I, 1983.
- [Bérard et al. 97] F. Bérard, C. Azzaro-Pantel, L. Pibouleau, S. Domenech, "Résolution de problèmes d'ordonnancement en génie des procédés", 2ème Congrès International Franco-Québécois, "Le génie industriel dans un monde sans frontières", Albi, France, 3-5 Septembre, 1997.
- [Bérard et al. 98] C. Bérard, B. Grabot, P. Nguyen, "Coopérations Recherche/Entreprises pour la conception de logiciels d'ordonnancement : SipaPlus, Io, TAPAS", Revue Française de Gestion Industrielle, vol.17, n°4, 1998, pp. 21-38.
- [Berrah 97] L. Berrah, "Une approche d'évaluation de la performance industrielle. Modèle d'indicateur et techniques floues pour un pilotage réactif", Thèse de Doctorat en Génie Industriel, Institut National Polytechnique de Grenoble, Juillet 1997.
- [Berrah et al. 00] L. Berrah, G. Mauris, L. Foulloy, A. Haurat, "Global vision and performance indicators for an industrial improvement approach", Computers in Industry, vol., n°43, 2000, pp. 211-225.
- [Berrah et al. 95] L. Berrah, G. Mauris, A. Haurat, L. Foulloy, "Modélisation de la performance : une approche par la logique floue des indicateurs de performance", Congrès International de Génie Industriel de Montréal, "La productivité dans un monde sans frontières", Montréal, Canada, 18-20 Octobre, 1995.
- [Berrah et Haurat 97] L. Berrah, A. Haurat, "Une stratégie de mise en place d'indicateurs de performance pour le pilotage des processus de production", MOSIM 97, 1ère Conférence Francophone sur la Modélisation et la Simulation, Rouen, France, 5-6 Juin, 1997.
- [Berrah et Haurat 99] L. Berrah, A. Haurat, "Quelles expressions de la performance pour le pilotage des processus industriels ?", 3ème Congrès International de Génie Industriel, Montréal, Canada, 26-28 Mai, 1999.
- [Billaut et Roubellat 96] J.-C. Billaut, F. Roubellat, "A new method for workshop real time scheduling", International Journal of Production Research, vol.34, n°6, 1996, pp. 1555-1579.
- [Bitton 90] M. Bitton, "ECOGRAI : méthode de conception et d'implantation des systèmes de mesure des performances pour organisations industrielles", Thèse de Doctorat en Automatique, Université de Bordeaux I, Septembre

- 1990.
- [Boucher 00] X. Boucher, "Competence management", Automated Systems Based on Human Skills, , Aachen, Allemagne, , 2000.
- [Boucher 99] X. Boucher, "Contribution à la gestion de Filières-Métiers dans un contexte d'Ingénierie Concourante", Thèse de Doctorat, Université Aix Marseille III, Septembre 1999.
- [Bouchon-Meunier 93] B. Bouchon-Meunier, *La logique floue*, Presses Universitaires de France, "Que sais je ?", 1993.
- [Boucon 91] D. Boucon, "Ordonnancement d'atelier : Aide au choix des règles de priorité", Thèse de Doctorat en Automatique, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Avril 1991.
- [Boukachour et al. 97] J. Boukachour, T. Galinho, J.-P. Pécuchet, "Un réseau de neurones pour bien sélectionner les heuristiques d'ordonnancement", MOSIM 97, 1ère Conférence Francophone sur la Modélisation et la Simulation, Rouen, France, 5-6 Juin, 1997.
- [Breuil 84] D. Breuil, "Outils de conception et de décision dans les organisations de gestion de production", Thèse d'Etat, Université de Bordeaux I, 1984.
- [Business Objects 01] Business Object, <http://www.businessobjects.com/products/businessobjects.htm>, 2001.
- [Cerutti et Gattino 92] O. Cerutti, B. Gattino, *Indicateurs et tableaux de bord*, AFNOR gestion, 1992.
- [Chang et Lo 01] P.-T. Chang, Y.-T. Lo, "Modelling of job shop scheduling with multiple quantitative and qualitative objectives and a GA/TS mixture approach", International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol.14, n°4, 2001, pp. 367-384.
- [Chankong et Haimes 83] V. Chankong, Y.Y. Haimes, *Multiobjective decision making: Theory and Methodology*, North Holland, 1983.
- [Chartier-Kastler 97] C. Chartier-Kastler, *Précis de conduite de projet informatique*, Editions d'Organisation, 1997.
- [Cognos 01] Cognos, <http://www.cognos.com/products/powerplay/>, 2001.
- [Crystal 01] Crystal, <http://www.crystaldecisions.net/products/crystalanalysispro>, 2001.
- [Davis 91] L. Davis, *Handbook of genetic algorithms*, Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [Dell'Amico et Trubian 93] M. Dell'Amico, M. Trubian, "Applying Tabu Search to the

- job shop scheduling problem", *Annals of Operation Research*, vol., n°41, 1993, pp. .
- [Doumeingts 84] G. Doumeingts, "La méthode GRAI", Thèse d'Etat, Université de Bordeaux I, 1984.
- [Dubois et Prade 87] D. Dubois, H. Prade, *Théorie de possibilités, Applications à la représentation des connaissances en informatique*, Masson, 1987.
- [Dubois et Prade 89] D. Dubois, H. Prade, "Processing fuzzy temporal knowledge", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol.19, n°4, 1989, pp. 729-744.
- [Erol et Dupont 00] M. Erol, L. Dupont, "Hierarchical planning: modelisation of the labour flexibility on two levels", *MCPL'2000, Second Conference on Management and Control of Production and Logistics*, Grenoble, France, 5-8 Juillet, 2000.
- [Erschler 76] J. Erschler, "Analyse sous contraintes et aide à la décision pour certains problèmes d'ordonnancement", Thèse d'Etat, Université Paul Sabatier, 1976.
- [eSchedule 01] Optimal Solutions, <http://www.optimal-solutions.com>, 2001.
- [ESP 01] Employee Schedule Partner, <http://www.espssoftware.com>, 2001.
- [Esquirol et Lopez 99] P. Esquirol, P. Lopez, *L'ordonnancement*, Economica, 1999.
- [Fargier 94] H. Fargier, "Problèmes de satisfaction de contraintes flexibles, application à l'ordonnancement de production", Thèse de Doctorat en Informatique, Université Paul Sabatier de Toulouse, Juin 1994.
- [Fargier 97] H. Fargier, "Fuzzy scheduling: principles and experiments", dans *Fuzzy Information Engineering: A guided tour of applications*, D. Dubois, H. Prade, R. Yager (Eds), John Wiley & Sons, 1997, pp. 655-668.
- [Farhoodi 90] F. Farhoodi, "A knowledge-based approach to dynamic job-shop scheduling", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol.3, n°2, 1990, pp. 84-95.
- [Fernandez 00] A. Fernandez, *Les nouveaux tableaux de bord des décideurs : Le projet décisionnel dans sa totalité*, Editions d'Organisation, 2000.
- [Ferrell et al. 00] W. Ferrell Jr., J. Sale, J. Sams, M. Yellamraju, "Evaluating simple scheduling rules in a mixed shop environment", *Computers and Industrial Engineering*, vol., n°38, 2000, pp. 39-66.
- [Flexplan 92] Esprit Project 2457, "Knowledge based planning and control in

- manufacturing environment", Final Report, 1992.
- [Flexitime 01] Flexitime, <http://www.staff-scheduling.com>, 2001.
- [Fortemps 97] P. Fortemps, "Jobshop scheduling with imprecise durations: a fuzzy approach", IEEE Transactions on fuzzy systems, vol.5, n°4, 1997, pp. 557-569.
- [Fox 83] M.S. Fox, "Constraint-directed search: a case study in job shop scheduling", Ph.D. Thesis, Carnegie Mellon University, 1983.
- [Franchini 00] L. Franchini, "Aide à la décision pour la gestion des opérateurs de production : Modélisation, Planification et Evaluation", Thèse de Doctorat en Systèmes Industriels, Institut National Polytechnique de Toulouse, Novembre 2000.
- [Gelders et al. 94] L. Gelders, P. Mannaert, J. Maes, "Manufacturing strategy, performance indicators and improvement programmes", International Journal of Production Research, vol.32, n°4, 1994, pp. 797-805.
- [Geneste et al. 00] L. Geneste, B. Grabot, P. Moutarlier, "Scheduling of heterogeneous data using fuzzy logic in a customer-subcontractor context", dans *Advances in scheduling and sequencing under fuzziness*, R. Slowinski, M. Hapke (Eds), Springer-Verlag, 2000, pp. 247-265.
- [Giard 88] V. Giard, *Gestion de production*, Economica, 1988.
- [Glover 89] F. Glover, "Tabu search, part 1", Orsa Journal on computing, vol.1, n°3, 1989, pp. 190-206.
- [Glover 90] F. Glover, "Tabu search, part 2", Orsa Journal on computing, vol.2, n°1, 1990, pp. 4-32.
- [Goldberg 89] D.E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison Wesley Publishing Company, 1989.
- [GOTHA 93] Groupe d'Ordonnement THéorique et Appliqué, "Les problèmes d'ordonnement", R.A.I.R.O. Recherche opérationnelle/Operational Research, vol.27, n°1, 1993, pp. 77-150.
- [Gousty et Kieffer 88] Y. Gousty, J.P. Kieffer, "Une nouvelle typologie des systèmes industriels de production", Revue française de gestion, vol.juin-juillet-août, n°, 1988, pp. 104-112.
- [Grabot 98] B. Grabot, "Objective satisfaction assessment using neural nets for balancing multiple objectives", International Journal of Production Research, vol.36, n°9, 1998, pp. 2377-2395.

- [Grabot et al. 97] B. Grabot, L. Geneste, A. Dupeux, "Tuning of fuzzy rules for multiobjective scheduling", dans *Fuzzy Information Engineering: A guided tour of applications*, D. Dubois, H. Prade, R. Yager (Eds), John Wiley & Sons, 1997, pp. 695-703.
- [Grabot et al. 99] B. Grabot, C. Bérard, P. Nguyen, "An implementation of man-software cooperative scheduling: the IO software", *Production Planning and Control*, vol.10, n°3, 1999, pp. 238-250.
- [Grabot et Letouzey 00] B. Grabot, A. Letouzey, "Short-term manpower management in manufacturing systems: new requirements and prototyping", *Computers in Industry*, vol., n°43, 2000, pp. 11 29.
- [Greif 89] M. Greif, *L'usine s'affiche*, Editions d'Organisation, 1989.
- [Harzallah 00] M. Harzallah, "Modélisation des aspects organisationnels et des compétences pour la réorganisation des entreprises", Thèse de Doctorat en Automatique et Productique, Université de Metz, Mai 2000.
- [Harzallah et Vernadat 01] M. Harzallah, F. Vernadat, "Un outil de gestion des compétences acquises et requises implanté à Trémery dans le groupe PSA", MOSIM 01, 3ème Conférence Francophone sur la Modélisation et la Simulation, Troyes, France, 25-27 Avril, 2001.
- [Hertz et Widmer 94] A. Hertz, M. Widmer, "La méthode Tabou appliquée aux problèmes d'ordonnancement", Journées d'étude "Ordonnancement en entreprise", Groupement de Recherche en Automatique, Bordeaux, France, 16-17 Juin, 1994.
- [Holland 75] J.M. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, MIT Press, 1975.
- [Holthaus et Rajendran 00] O. Holthaus, C. Rajendran, "Efficient jobshop dispatching rules: further developments", *Production Planning and Control*, vol.11, n°2, 2000, pp. 171-178.
- [Howell et Soucy 87] R.A. Howell, S.R. Soucy, *Management accounting in the new manufacturing environment*, NAA/CAM-I, 1987.
- [Hung 99] R. Hung, "Scheduling a workforce under annualized hours", *International Journal of Production Research*, vol.37, n°11, 1999, pp. 2419-2427.
- [Jacot et Micaelli 96] J.H. Jacot, J.P. Micaelli, *La performance économique en entreprise*, Hermès, 1996.
- [Jacquet-Lagrèze et Siskos 83] E. Jacquet-Lagrèze, J. Siskos, *Méthodes de décision multicritère*, Editions Hommes et Techniques, 1983.

- [Kane et al. 00] H. Kane, P. Baptiste, O. Barakat, "A new approach of the cost optimization in human resources management", MCPL'2000, Second Conference on Management and Control of Production and Logistics, Grenoble, France, 5-8 Juillet, 2000.
- [Kane et Baptiste 01] H. Kane, P. Baptiste, "Un modèle d'ajustement de la capacité à la charge basé sur les ressources humaines", MOSIM 01, 3ème Conférence Francophone sur la Modélisation et la Simulation, Troyes, France, 25-27 Avril, 2001.
- [Laakso et Karjalainen 94] T. Laakso, J. Karjalainen, "Performance Measurement - An important tool in change process", IFIP WG 5.7, Workshop on Benchmarking - Theory and Practice, Trondheim, Norvège, 16-18 Juin, 1994.
- [Lansard et Devillard 01] J.-F. Lansard, A. Devillard, "Les DRH ne voient pas la complexité informatique des trente-cing heures", 01 Informatique, vol., n°1618, 2001, pp. 46.
- [Le Boterf 94] G. Le Boterf, *De la compétence*, Editions d'Organisation, 1998.
- [Le Boterf 98] G. Le Boterf, *L'ingénierie des compétences*, Editions d'Organisation, 1998.
- [Le Dain et Ndao 97] A.-M. Le Dain, P.I. Ndao, "Sur un système d'indicateurs de performance pour l'évaluation d'une automatisation dans une entreprise papetière", 2ème Congrès International Franco-Québécois, "Le génie industriel dans un monde sans frontières", Albi, France, 3-5 Septembre, 1997.
- [LeGall 89] A. LeGall, "Un système interactif d'aide à la décision pour l'ordonnancement et le pilotage en temps réel d'atelier", Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1989.
- [LeGall et Roubellat 92] A. LeGall, F. Roubellat, "Caractérisation d'un ensemble d'ordonnements avec contraintes de ressources de type cumulatif", R.A.I.R.O. Recherche opérationnelle/Operational Research, vol.5 6, n°6, 1992, pp. .
- [Le Moigne 74] J.L. Le Moigne, *Les systèmes de décision dans les organisations*, Presses universitaires de France, 1974.
- [Le Moigne 77] J.L. Le Moigne, *La théorie du système en général. Théorie de la modélisation*, Presses universitaires de France, 1977.
- [Lereno et al. 01] E. Loreno, B. Morello, P. Baptiste, "Système d'aide au paramétrage d'un logiciel d'ordonnement", MOSIM 01, 3ème Conférence Francophone sur

la Modélisation et la Simulation, Troyes, France, 25-27 Avril, 2001.

- [Letouzey et al. 01] A. Letouzey, L. Geneste, B. Grabot, "Production Planning Forecasting under Uncertainty using Possibility Theory", CASYS 2001, 5th International Conference on Computing Anticipatory Systems, Liège, Belgique, 13-18 Août, 2001.
- [Liang et Wang 91] G.-S. Liang, M.-J. Wang, "A fuzzy multi-criteria decision-making method for facility site selection", International Journal of Production Research, vol.29, n°11, 1991, pp. 2313-2330.
- [Li et al. 00] Y. Li, K.F. Man, K.S. Tang, S. Kwong, W.H. Ip, "Genetic algorithm to production planning and scheduling problems for manufacturing systems", Production Planning and Control, vol.11, n°5, 2000, pp. 443-458.
- [Lopez et al. 92] P. Lopez, J. Erschler, P. Esquirol, "Ordonnancement de tâches sous contraintes : une approche énergétique", Revue d'Automatique, Productique, Informatique Industrielle, vol.26, n°5 6, 1992, pp. 453-481.
- [Lopez et al. 98] P. Lopez, P. Esquirol, L. Haudot, M. Sicard, "Cooperative system design in scheduling", International Journal of Production Research, vol.36, n°1, 1998, pp. 211-230.
- [Maccarthy et Liu 93] B.L. Maccarthy, J. Liu, "Addressing the gap in scheduling research: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling", International Journal of Production research, vol.31, n°1, 1993, pp. 59-79.
- [Melèse 72] J. Melèse, *L'analyse modulaire des systèmes de gestion*, Editions Hommes et Techniques, 1972.
- [Metropolis et al. 53] N.A. Metropolis, A. Rosenbluth, A. Teller, E. Teller, "Equation of state calculations by fast computing machines", Journal of Chemistry and Physics, vol.6, n°21, 1953, pp. .
- [Montazeri et Van Wassenhove 90] M. Montazeri, L.N. VanWassenhove, "Analysis of scheduling rules for an FMS", International Journal of Production Research, vol.28, n°4, 1990, pp. 785-802.
- [Moutarlier et al. 00] P. Moutarlier, L. Geneste, B. Grabot, "TAPAS: A modular framework to support reuse in scheduling software development", Production Planning and Control, vol.11, n°7, 2000, pp. 648-659.
- [Muller 98] P.A. Muller, *Modélisation objet avec UML*, Eyrolles, 1998.
- [Myers 00] K. Myers, "Planning with conflicting advice", AIPS 2000, 6th International Conference on Artificial Intelligence Planning and Scheduling, Breckenbridge, Colorado, USA, 14-17 Avril, 2000.

- [Ow et Smith 88] P.S. Ow, S.F. Smith, "Viewing scheduling as an opportunistic problem solving process", *Annals of Operations Research*, vol.12, n°, 1988, pp. 85-108.
- [Panwalker et Iskander 77] S.S. Panwalker, W. Iskander, "A survey of scheduling rules", *Operations Research*, vol.9, n°, 1977, pp. 45-61.
- [Pichot et Baptiste 01] L. Pichot, P. Baptiste, "Ordonnancement des ressources humaines : étude du cas d'une entreprise d'injection plastique", *MOSIM 01*, 3ème Conférence Francophone sur la Modélisation et la Simulation, Troyes, France, 25-27 Avril, 2001.
- [Pierreval et Mebarki 97] H. Pierreval, N. Mebarki, "Dynamic selection of dispatching rules for manufacturing systems scheduling", *International Journal of Production Research*, vol.35, n°6, 1997, pp. 1575-1591.
- [Pomerol et Barba-Romero 93] J.-C. Pomerol, S. Barba-Romero, *Choix multi-critère dans l'entreprise*, Hermès, 1993.
- [Ponnambalam et al. 01] S.G. Ponnambalam, P. Aravindan, S. Chandrasekaran, "Constructive and improvement flow shop heuristics: an extensive evaluation", *Production Planning and Control*, vol.12, n°4, 2001, pp. 335-344.
- [Ponnambalam et al. 99] S.G. Ponnambalam, N. Jawahar, P. Aravindan, "A simulated annealing algorithm for job shop scheduling", *Production Planning and Control*, vol.10, n°8, 1999, pp. 767-777.
- [Ramudhin et Marrier 93] A. Ramudhin, P. Marrier, "SMART: An object-oriented logistic tool-kit for schedule modeling and representation", *International Conference on Industrial Engineering and Production Management*, Mons, Belgique, 2-4 Juin, 1993.
- [Riane et al. 99] F. Riane, C. De Brauwer, A. Artiba, "OCEHO : un outil de comparaison et d'évaluation d'heuristiques de résolution de problèmes d'ordonnancement", *Journal Européen de Systèmes Automatisés*, vol.32, n°7 8, 1999, pp. 853-874.
- [Ribeiro 96] R.A. Ribeiro, "Fuzzy multiple attribute decision making: A review and new preference elicitation techniques", *Fuzzy Sets and Systems*, vol.78, n°2, 1996, pp. 155-181.
- [Roboam 93] M. Roboam, *La méthode GRAI : Principes, outils et démarche pratique*, Edition TEKNA, 1993.
- [Romanowicz et al. 97] R. Romanowicz, J. Jacot, A. Hertz, E. Verdebout, "An expert system prototype for the selection of scheduling method", *ETFA'97*, 6th

- International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Los Angeles, USA, 9-12 Septembre, 1997.
- [Roy 68] B.Roy, "Classement et choix en présence de points de vue multiples", R.A.I.R.O. Recherche opérationnelle/Operational Research, vol.2, n°8, 1968, pp. 57-75.
- [Roy 85] B. Roy, *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*, Economica, 1985.
- [Rumbaugh 96] J. Rumbaugh, *OMT : modélisation et conception orientées objet*, Masson, 1996.
- [Saaty 80] T.L. Saaty, *The analytic hierarchy process*, McGrawHill, 1980.
- [Sabuncuoglu 98] I. Sabuncuoglu, "Scheduling with neural networks: a review of literature and new research directions", Production Planning and Control, vol.9, n°1, 1998, pp. 2 12.
- [Sassine 98] C. Sassine, "Intégration des politiques de maintenance dans les systèmes de production manufacturiers", Thèse de Doctorat en Automatique et Productique, Institut National Polytechnique de Grenoble, Juillet 1998.
- [Savall et Zardet 89] H. Savall, V. Zardet, *Maitriser les coûts et les performances cachés*, Eyrolles, 1989.
- [Schwalb et Dechter 97] E. Schwalb, R. Dechter, "Processing disjunctions in temporal constraint networks", Artificial Intelligence, vol., n°93, 1997, pp. 29-61.
- [Selmer 99] C. Selmer, *Concevoir le tableau de bord*, Dunod, 1999.
- [Simon 77] H.A. Simon, *The new science of management decision*, Prentice-Hall, 1977.
- [Smith 92] S. F. Smith, "Knowledge-Based production management: approaches, results and prospects", Production Planning and Control, vol.3, n°4, 1992, pp. 350-380.
- [Subramaniam et al. 00] V. Subramaniam, G.K. Lee, G.S. Hong, Y.S. Wong, T. Ramesh, "Dynamic selection of dispatching rules for job shop scheduling", Production Planning and Control, vol.11, n°1, 2000, pp. 73-81.
- [Taillard 94] E. Taillard, "Parallel tabu search technique for the job shop scheduling problem", Orsa Journal on Computing, vol., n°6, 1994, pp. .
- [Temposoft 01] Temposoft, <http://www.temposoft.com>, 2001.
- [Teste 00] O. Teste, "Modélisation et manipulation d'entrepôts de données complexes et historisées", Thèse de Doctorat en Informatique, Université Paul Sabatier de Toulouse, Décembre 2000.

- [Türksen 97] I.B. Türksen, "Scheduling system design: three fuzzy approaches", dans *Fuzzy Information Engineering: A guided tour of applications*, D. Dubois, H. Prade, R. Yager (Eds), John Wiley & Sons, 1997, pp. 669-693.
- [Van Bael 99] P. Van Bael, "A study of rescheduling strategies and abstraction levels for a chemical process scheduling problem", *Production Planning and Control*, vol.10, n°4, 1999, pp. 359-364.
- [Vila et Marçola 01] E. Vila Gonçalves, J.A. Marçola, "Annualized hours as a capacity planning tool in make-to-order or assemble-to-order environment: an agricultural implements company case", *Production Planning and Control*, vol.12, n°4, 2001, pp. 388-398.
- [Woodward 65] J. Woodward, *Industrialisation Organisation: theory and practice*, Oxford University Press, 1965.
- [Yager 88] R.R. Yager, "On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol.18, n°, 1988, pp. 183-190.
- [Zadeh 65] L.A. Zadeh, "Fuzzy sets", *Information and Control*, vol.8, n°, 1965, pp. 338-353.
- [Zadeh 75] L.A. Zadeh, The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, *Information Sciences*, Partie 1 : vol.8, pp. 199-249, Partie 2 : vol.8, pp. 301-357, Partie 3 : vol.9, pp. 43-80, 1975.
- [Zadeh 78] L.A. Zadeh, "Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility", *Fuzzy sets and Systems*, vol., n°1, 1978, pp. 3 28.
- [Zeleny 82] M. Zeleny, *Multiple criteria decision making*, McGrawHill, 1982.
- [Zülch et al. 94] G. Zülch, T. Grobel, U. Jonsson, "Indicators for the evaluation of organizational performance", *IFIP WG 5.7, Workshop on Benchmarking - Theory and Practice*, Trondheim, Norvège, 16-18 Juin, 1994.

Résumé :

Pour répondre aux attentes de clients de plus en plus exigeants, les entreprises d'aujourd'hui doivent accroître leur compétitivité, leur productivité et leur réactivité. Pour répondre à ces exigences, la fonction ordonnancement se doit d'être plus réactive, plus performante et plus adaptée aux spécificités des compagnies. Parmi les différentes possibilités d'évolution de l'ordonnancement, la voie de l'ordonnancement interactif semble répondre à ces besoins, et parmi les approches possibles de l'interactivité, l'utilisation d'indicateurs permet au gestionnaire d'atelier de connaître toutes les données nécessaires à la mise au point d'un ordonnancement performant.

Quatre types d'indicateurs ont été définis :

- des indicateurs de contexte décrivant l'état général de l'atelier,
- des indicateurs de diagnostic aidant à identifier les causes de problèmes courants,
- des indicateurs d'action renseignant sur la pertinence et l'efficacité de l'utilisation des degrés de liberté,
- des indicateurs de performance, évaluant les performances de l'ordonnancement par rapport aux objectifs de l'entreprise.

Cette approche de l'ordonnancement interactif a été appliquée à deux problématiques actuelles. Des indicateurs spécifiques à ces deux problèmes ont été définis. La première application concerne la prise en compte dans l'ordonnancement de commandes incertaines, encore en cours de négociation. La deuxième application concerne la gestion des opérateurs de production à court terme, au niveau de l'ordonnancement.

Un outil de construction de tableaux de bord mettant en œuvre ces différents indicateurs a été réalisé dans le cadre d'un projet européen (le projet ASPIRE).

Mots clef : Ordonnancement interactif - Tableaux de bord – Opérateurs – Indicateurs - Commandes incertaines

Abstract :

To come up to customers expectations, current companies must increase competitiveness, productivity and reactivity. Facing directly these needs, the scheduling function of the companies have to be more reactive, to perform better results and to be adapted to companies specificities. Among the possible ways of improving the schedule, the interactive manner seems to be able to face the expectations, and among the possible ways of performing interactivity, the use of indicators (or indexes) allows the workshop manager to gather all the knowledge needed to perform a satisfying schedule.

Fours indicators have been defined :

- context indicators describing the global state of the workshop,
- diagnosis indicators helping to identify classical problems causes,
- action indicators showing the relevance and the efficiency of the degrees of freedom,
- performance indicators assessing the performance of the schedule against the company objectives.

This approach to interactive scheduling has been applied to two current problems of manufacturing companies. Specific indicators have been defined for these problems. These applications concern the management of uncertain orders and the manpower management in the scheduling process.

A tool allowing to build dashboards presenting the defined indicators has been developed within a European project (the ASPIRE project).

Key words : Interactive scheduling – Indicators – Dashboards - Uncertain orders - Manpower