



Approche multiniveau et ordonnancement d'activités dans un contexte de production à la commande

Jose Fernando Hernandez-Silva

► To cite this version:

Jose Fernando Hernandez-Silva. Approche multiniveau et ordonnancement d'activités dans un contexte de production à la commande. Automatique / Robotique. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2008. Français. NNT: . tel-00245958

HAL Id: tel-00245958

<https://theses.hal.science/tel-00245958>

Submitted on 7 Feb 2008

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

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

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE TOULOUSE
Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS

THÈSE

en vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE
délivré par l'Institut National des Sciences Appliquées

Discipline : Systèmes Industriels
Ecole Doctorale : Ecole Doctorale Systèmes

présentée et soutenue

par

José Fernando HERNANDEZ SILVA

le 25 janvier 2008

**APPROCHE MULTINIVEAU ET ORDONNANCEMENT
D'ACTIVITES DANS UN CONTEXTE DE PRODUCTION
A LA COMMANDE.**

Directeurs de thèse

Gérard FONTAN

Colette MERCE

JURY

M. Bernard GRABOT Présidente

M. Alain GUINET Rapporteur

M. Rémy DUPAS Rapporteur

M. Samir LAMOURI Examineur

Remerciements

Le travail de recherche présenté dans ce document a été réalisé au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS) du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). A ce titre, je tiens à remercier tout d'abord à M. Mallik GHALLAB et M. Raja CHATILA (successivement) directeur du LAAS, de m'avoir accueilli dans leur laboratoire.

Je remercie également M. Pierre LOPEZ responsable du Groupe Modélisation, Optimisation et Gestion Intégrée de Systèmes d'Activités (MOGISA) pour son accueil et son soutien au sein du groupe.

Je tiens à remercier particulièrement et à exprimer ma profonde reconnaissance à mes directeurs de thèse, Mme. Colette MERCE, Professeur à l'INSA de Toulouse et M. Gérard FONTAN, Professeur à l'INP de Toulouse. Leur sympathie, leur confiance, leur compétence, leurs encouragements et leur disponibilité tout au long de ces années m'ont permis de mener à bien ces travaux. Je ne saurais jamais assez les remercier de leur soutien, leur patience et de leur précieuse aide dans la phase de rédaction en y apportant leurs connaissances et leur rigueur ... MUCHAS GRACIAS.

Je tiens à exprimer mes remerciements aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer mon travail de thèse : Messieurs Alain GUINET, Professeur à l'INSA de Lyon et Rémy DUPAS, Professeur à l'Université de Bordeaux 1, en leur qualité de rapporteurs, Monsieur Bernard GRABOT, Professeur à l'Ecole National d'Ingénieurs de Tarbes, en sa qualité de président de jury, Monsieur Samir LAMOURI, Maître de Conférences, à l'Institut Supérieur de Mécanique de Paris, en sa qualité d'examinateur.

Je suis également reconnaissant de l'effort financier que mon pays, le Mexique, a fait pour me permettre de réaliser cette thèse. Cette aide financière a été gérée par la Dirección General de Educación Superior Tecnológica que je tiens à remercier vivement, ainsi que mon université, l'Instituto Tecnológico de Hermosillo pour leur soutien dans toutes les démarches administratives.

Je tiens à remercier chaleureusement mes collègues du Groupe MOGISA qui ont réellement contribué à rendre ce travail de thèse très agréable. Je remercie mes collègues doctorants et plus particulièrement Hassen GHARBI avec qui je démarré une partie très importante de cette thèse, merci beaucoup amigo, pour ton amitié, ton aide et ton soutien.

Je voudrais exprimer mes remerciements à M. Michel COURDESSES, Directeur de l'Atelier Interdisciplinaire de Productique (AIP), ainsi qu'à son équipe : M. Philippe Baillon et Philippe Gil. Je leur remercie pour m'avoir accueilli et avoir supporté au début des expérimentations.

Je voudrais remercier mes amis desquels j'ai reçu beaucoup de soutien dès mon arrivée à Toulouse : Guillermo Cortez, Alberto Aguilar, Don Fidel Chavez et Maria Elena, Luisita Lagunez, Don Hector Hernandez y Rebeca, Oscar Baez y el primo Fabian, Alejandra Ayala, et plus spécialement Lucila Morales, Ruth Lezama et Niriaska Perozo pour leur aide et amitié inconditionnelle.

J'adresse également un grand merci à ma famille : ma mère et mon père pour leur soutien et leurs encouragements, mes beaux parents et plus particulièrement ma belle-mère Maria Elena pour être là aux moments les plus difficiles et de maladie.

Finalement, je souhaite exprimer toute ma gratitude aux moteurs de ma vie : mon épouse Carmen et à mon fils Oscar Fernando qui ont été toujours à côté de moi en m'apportant leur amour, leur patience et son soutien à l'aboutissement de ce projet de vie. Les mots ne suffisent plus à décrire les sentiments...

Table des matières

Introduction Générale	13
1 Gestion des activités de production et approches multiniveaux	17
1.1 Le système de production	18
1.1.1 Définitions de système de production	18
1.1.2 Sous-systèmes d'un système de production	19
1.1.3 Typologie des systèmes de production	19
1.1.4 La chaîne Logistique	22
1.1.4.1 Définition	22
1.1.4.2 Les flux d'une chaîne logistique	22
1.1.4.3 Structures typiques de chaînes logistiques	23
1.2 Gestion de Production : concepts et généralités	24
1.2.1 Définition de gestion de production	24
1.2.2 Typologie décisionnelle en gestion de production	25
1.2.3 Modèle générique décisionnel	27
1.3 Ordonnancement de la production	28
1.3.1 Définitions et concepts basiques d'ordonnancement	28
1.3.1.1 Définitions	28
1.3.1.2 Critères de performance	30
1.3.1.3 Différents classes d'ordonnancement	32
1.3.1.4 Représentation par diagrammes de Gantt	32
1.3.2 Techniques de résolution basées sur la programmation mathématique	33
1.3.2.1 Modélisation en temps continu	34
1.3.2.2 Modélisation en temps discret (finement discrétisé)	34
1.3.3 Autres techniques de résolution	35
1.3.3.1 Les graphes potentiels et la méthode PERT	36
1.3.3.2 Heuristiques et metaheuristiques	37
1.3.3.3 Programmation par contraintes	38
1.4 Approches multiniveaux en Gestion de Production - Principes	40
1.4.1 Principes et intérêts	40
1.4.2 Agrégation de données	41
1.4.2.1 Agrégation des matières ou moyennes de production	41
1.4.2.2 Agrégation du travail	42
1.4.2.3 Agrégation du temps	42
1.4.3 Interactions entre niveaux décisionnels : robustesse et cohérence	43
1.5 Classification des approches multiniveaux	44
1.5.1 Planification hiérarchisé de la production	44

1.5.2	Intégration de la planification et l'ordonnancement	45
1.5.3	Ordonnancement hiérarchisé	46
1.6	Objectif de la thèse	46
2	Approche multiniveaux pour la gestion de la production à la com-	49
	mande	
2.1	Présentation de la problématique et de la structure décisionnelle	50
2.1.1	Description de la problématique	50
2.1.2	Approche retenue et structure décisionnelle considérée	51
2.1.3	Éléments clés de la structure	53
2.1.4	Notations de base	53
2.2	Modélisation du niveau Macro-ordonnancement	54
2.2.1	Objectif du modèle	54
2.2.2	Les données associées au modèle	55
2.2.3	Les variables	56
2.2.4	Les contraintes	56
2.2.5	Le critère de base	58
2.3	Mécanisme d'agrégation temporel	58
2.3.1	Conversion de dates en périodes	58
2.3.2	Introduction d'opérations fictives dans les gammes	60
2.3.3	Modèle de macro-ordonnancement avec opérations fictives	62
2.3.4	Agrégation de la disponibilité des ressources en capacité par période	63
2.4	Mécanisme de guidage de base proposé	64
2.4.1	Principe du mécanisme de guidage par dates	64
2.4.2	Guidage sans opérations fictives	65
2.4.3	Guidage avec opérations fictives	68
2.5	Mise en œuvre de la structure sur un exemple simple (Influence des opé-	
	rations fictives)	70
2.5.1	Exemple traité sans opérations fictives	71
2.5.2	Exemple traité avec opérations fictives	75
3	Evaluation de l'approche	83
3.1	Cadre de l'évaluation	84
3.1.1	Principe général de l'évaluation	84
3.1.2	Le logiciel Xpress-MP	85
3.1.3	Preactor	86
3.2	Indicateurs de performance	88
3.2.1	Rappel des notations utilisées dans les différentes étapes de l'ap-	
	proche à deux niveaux	89
3.2.2	Notations utilisées dans l'approche directe	90
3.2.3	Qualité des approches	90
3.2.4	Robustesse du guidage	91
3.2.5	Efficacité du guidage	93
3.3	Jeux de données	95
3.3.1	Génération des jeux de données	95
3.3.2	Caractérisation des jeux de données utilisées	95
3.4	Expérimentations et analyses	97

3.4.1	Problème avec durées opératoires identiques	97
3.4.2	Problèmes avec durées opératoires différentes	105
3.4.3	Récapitulatif et conclusions des tests	110
4	Proposition d'enrichissement de l'approche	115
4.1	Autres modes de guidage	116
4.1.1	Mécanisme de guidage par dates intermédiaires (principe)	116
4.1.2	Mécanisme de guidage par contraintes de précédence (principe)	118
4.1.3	Expérimentations	119
4.1.4	Analyse et conclusions	122
4.2	Amélioration de la robustesse (macro ordonnancement sur-contraint)	123
4.2.1	Principe	124
4.2.2	Sous estimation de la longueur de la période	124
4.2.3	Sous estimation de la capacité	126
4.2.4	Expérimentations	127
4.3	Diversification du problème global d'ordonnancement	130
4.3.1	Prise en compte de calendriers d'ouverture de ressources	130
4.3.2	Diversification du critère : Approche centrée minimisation des en- cours	133
5	Macro-ordonnancement et ressources alternatives	139
5.1	Macro-ordonnancement avec ressources alternatives	140
5.1.1	Notion de ressources alternatives et de pool de ressources	140
5.1.2	Modèle de macro-ordonnancement avec affectation de ressources	141
5.1.2.1	Les variables	141
5.1.2.2	Les contraintes	141
5.1.2.3	Le critère	142
5.2	Agrégation des pools de ressources et modèle de macro-ordonnancement agrégé	142
5.2.1	Mécanisme d'agrégation des pools de ressources	143
5.2.2	Exemple d'application du mécanisme d'agrégation des pools	143
5.2.3	Modèle de macro-ordonnancement agrégé	145
5.3	Expérimentations numériques	146
5.3.1	Objectifs des expérimentations	146
5.3.2	Indicateurs et génération de données	147
5.3.3	Expérimentations	148
5.3.4	Conclusions des expérimentations	150
	Conclusion	151
	Conclusions et perspectives	152
	Bibliographie	164

Table des figures

1.1	Domaine de la production et ses fonctions connexes	18
1.2	Vue schématique d'un système de production [Ait-Hssain, 2005]	19
1.3	Représentation d'une chaîne logistique [Lee et al., 1993]	22
1.4	Différentes structures de la chaîne logistique	23
1.5	Vision systémique de la gestion d'un système de production	25
1.6	La gestion de production et les autres fonctions de l'entreprise	25
1.7	Classification hiérarchique de décisions [Deschaps, 1994]	26
1.8	Modèle générique de la décision de gestion de production [Baptiste et al., 2005]	28
1.9	Classes d'ordonnancements	32
1.10	Représentation d'un ordonnancement par un diagramme de Gantt	33
1.11	Loi de distribution Bêta	36
1.12	Données d'une activité [Baptiste et al., 2001]	39
1.13	Structure décisionnelle hiérarchisée [Schneewesiss, 1999]	40
1.14	Agrégation de matière (ou de produits)	42
1.15	Agrégation du travail	42
1.16	Agrégation du temps	42
1.17	Robustesse et cohérence [Merce et Fontan, 2001]	44
1.18	Structure d'agrégation [Schneeweiss, 1999]	45
2.1	Eléments de la structure décisionnelle à deux niveaux	52
2.2	Notion d'un OF	54
2.3	Surdimensionnement des fenêtres	60
2.4	Introduction d'opérations fictives	61
2.5	Capacité instantanée d'une ressource	64
2.6	Capacité agrégée	64
2.7	Notations associées de l'approche	66
2.8	Détermination de la fin guidante	67
2.9	Exemple de calcul de la date de début rd_i^G	68
2.10	Détermination de la fin guidante cas a	69
2.11	Détermination de la fin guidante cas b	70
2.12	Macro-ordonnancement ($lg = 12$)	72
2.13	Ordonnancement détaillé	74
2.14	Macro-ordonnancement avec opérations fictives	76
2.15	Ordonnancement détaillé	78
2.16	Dimension des fenêtres des macro-ordonnancements	80
2.17	Dimension des fenêtres des ordonnancements détaillés	80

3.1	Les deux approches	85
3.2	Interface graphique de Preactor	86
3.3	Fenêtres temporelles associées aux différentes étapes de l'approche multi-niveau	89
3.4	Fenêtres temporelles associées à l'approche directe	90
3.5	Indicateur de qualité d'un ordonnancement	91
3.6	Macro-ordonnancement des OF	92
3.7	Ordonnancement détaillé avec $(i, 1)$ avant $(j, 1)$	92
3.8	Ordonnancement détaillé avec $(j, 1)$ avant $(i, 1)$	92
3.9	Indicateurs d'efficacité et de robustesse d'un ordonnancement	94
3.10	Macro-ordonnancement pour $lg = 4$	101
3.11	Ordonnancement détaillé issu de l'approche multiniveau pour $lg = 4$. . .	101
3.12	Ordonnancement détaillé issu de l'approche multiniveau pour $lg = 4$. . .	102
3.13	Macro-ordonnancement pour $lg = 7$	103
3.14	Ordonnancement détaillé	104
3.15	Evolution des fenêtres des OF	104
4.1	Construction des Sous-OF	116
4.2	Construction des Sous-OF	118
4.3	Macro-ordonnancement($lg = 12$) avec relations de précédence	121
4.4	Macro-ordonnancement à durée réelle	125
4.5	Macro-ordonnancement associé à une longueur de période sous-estimée ($\alpha = 0, 7$)	125
4.6	Macro-ordonnancement à capacité réelle	126
4.7	Sous-estimation de la capacité par ($\beta = 0, 7$)	126
4.8	Macro-ordonnancement avec calendrier des ressources	131
4.9	Ordonnancement détaillé avec calendrier des ressources	132
4.10	Les deux approches (centrée minimisation des encours)	134
5.1	Notion de Pool	140
5.2	Notion de pool agrégé	144
5.3	Comparaison des deux approches	147

Liste des tableaux

1.1	Exemples de classification Quantité/Répétitivité [Courtois et al., 2006]	20
1.2	Critères de performance [Grangeon, 2001]	31
1.3	Règles de priorité	38
2.1	Fenêtres temporelles initiales du problème	59
2.2	Durées opératoires et ressources requises	59
2.3	Fenêtres temporelles agrégées du problème	60
2.4	Durées opératoires avec opérations fictives	61
2.5	Fenêtres temporelles initiales du problème	71
2.6	Durées opératoires et ressources requises	71
2.7	Fenêtres temporelles agrégées du problème (avec $lg = 12$)	72
2.8	Fenêtres agrégées optimisées	73
2.9	Fenêtres guidantes	73
2.10	Dates ordonnancées	74
2.11	Durées opératoires avec opérations fictives	75
2.12	Fenêtres temporelles agrégées du problème (avec $lg = 12$)	76
2.13	Fenêtres agrégées optimisées	77
2.14	Fenêtres guidantes	77
2.15	Dates ordonnancées	79
3.1	Calcul de l'efficacité du guidage	94
3.2	Fenêtres temporelles initiales du problème	98
3.3	Gammes (durées opératoires et ressources requises)	98
3.4	Caractéristiques du problème	98
3.5	Indicateurs de performance des deux approches	99
3.6	Dates initiales et dates guidantes	100
3.7	Dates initiales et dates guidantes	103
3.8	Fenêtres temporelles initiales du problème	105
3.9	Gammes opératoires (durée - ressource requise)	105
3.10	Caractéristiques du problème	105
3.11	Indicateurs de performance des approches	106
3.12	Fenêtres temporelles initiales du problème	106
3.13	Gammes (durées opératoires et ressources requises)	107
3.14	Caractéristiques du problème	107
3.15	Indicateurs de performance des deux approches	107
3.16	Caractéristiques du problème	108
3.17	Indicateurs de performance des deux approches	108

3.18	Fenêtres temporelles initiales du problème PB_{CTF}	109
3.19	Gammes (durées opératoires et ressources requises)	109
3.20	Caractéristiques du problème	109
3.21	Indicateurs de performance des deux approches	110
3.22	Valeurs de OP_Per dans les expérimentations sur PB_{CM}	111
3.23	Valeurs de OP_Per dans les expérimentations sur $PB_{CF1}, PB_{CF2}, PB_{CTF}$	111
3.24	Taux d'amélioration de la qualité par l'approche multiniveau	112
3.25	Robustesse relative du guidage	113
4.1	Calcul de dates des sous-OF	117
4.2	Performance de l'approche (PB_{CF2})	120
4.3	Performance de l'approche (PB_{CF2})	121
4.4	Comparaison entre guidages (qualité de l'approche) (PB_{CF2})	122
4.5	Comparaison entre guidages (robustesse de l'approche) (PB_{CF2})	123
4.6	Résultats de l'approche ($\alpha = 1$)	127
4.7	Résultats de l'approche ($\alpha = 0.8$)	128
4.8	Résultats de l'approche ($\alpha = 1$)	128
4.9	Résultats de l'approche ($\alpha = 0.8$)	129
4.10	Résultats de l'approche ($\alpha = 1$)	129
4.11	Résultats de l'approche ($\alpha = 0.8$)	129
4.12	Fenêtres temporelles initiales du problème	130
4.13	Données du problème (vue OF)	131
4.14	Caractéristiques du problème	131
4.15	Performance de l'approche multiniveaux	132
4.16	Qualité de l'approche PB_{CAL} (retards)	133
4.17	Fenêtres temporelles initiales du problème	134
4.18	Gammes (durées opératoires et ressources requises)	135
4.19	Caractéristiques du problème	135
4.20	Performance de l'approche multiniveaux	135
4.21	Fenêtres temporelles initiales du problème	136
4.22	Caractéristiques du problème	136
4.23	Performance de l'approche multiniveaux	136
4.24	Qualité de l'approche (minimisation de WIP)	137
5.1	Données des opérations avant agrégation	144
5.2	Caractéristiques agrégées (agrégation des pools)	145
5.3	Critère en fonction du nombre total d'OP	148
5.4	Temps CPU en fonction du nombre total d'OP (en secondes)	148
5.5	Valeurs du Critère	149
5.6	Temps CPU (seconds)	149

Introduction Générale

Depuis quelques années, les entreprises manufacturières font face à des environnements de plus en plus concurrentiels. Elles sont alors obligées de diversifier leur production afin d'étendre leur offre sur le marché. D'autres aspects comme l'évolution des techniques de production, les incertitudes du marché et les exigences du niveau de qualité de produits rendent le contexte industriel plus difficile à gérer. De ce fait, la gestion de la production devient une activité également de plus en plus cruciale. Cette activité s'intéresse à l'ensemble de décisions à prendre pour assurer le bon fonctionnement du système de production de l'entreprise.

L'efficacité des nouvelles technologies de l'information et de la communication au sein des entreprises de production et de services permet de nouveaux modes de fonctionnement (réseaux d'entreprise, chaînes logistiques) et augmente les besoins en outils d'aide à la décision. De manière à maîtriser les caractéristiques de ces nouveaux types de fonctionnement : complexité des modèles, incertitudes des données, etc. une décomposition de la prise de décisions peut être réalisée par la mise en oeuvre d'approches multiniveau basées sur les notions d'agrégation des données et de désagrégation des décisions. Dans de telles structures décisionnelles les niveaux supérieurs élaborent des décisions agrégées à partir de données et de modèles agrégés qui sont désagrégées par affinements successifs par les niveaux inférieurs de décisions.

Le marché des outils logiciels assurant la planification et l'ordonnancement de la production est assez vaste. Les outils du type planification optimisent les flux de produits à moyen terme. Les outils d'ordonnancement positionnent les opérations sur le court terme. Ces deux catégories de logiciels sont mal adaptées à la production à la commande notamment lorsqu'on souhaite optimiser sur le moyen terme des politiques élaborées de gestion. En effet, il ne s'agit plus d'optimiser des flux (outils de planification non adéquats) et les modules d'ordonnancement savent mal optimiser les leviers décisionnels, variés et parfois complexes, disponibles dans l'entreprise. Ils sont de plus mal adaptés à la prise en compte d'horizons de type moyen terme.

Les recherches présentées dans ce mémoire s'intéressent plus particulièrement à la problématique de l'ordonnancement de tâches dans le cadre de la planification de la production à moyen terme d'un système de production à la commande. Il est proposé une approche décisionnelle à deux niveaux qui permet d'optimiser les leviers décisionnels disponibles sur le moyen terme afin d'assurer l'ajustement charge-capacité des ressources ainsi que l'ordonnancement des tâches.

Le niveau macro-ordonnancement (niveau supérieur) définit un positionnement grossier optimisé (planification) des opérations appartenant à un ensemble d'ordres de fa-

brications (*OF*) sur un horizon moyen terme discrétisé en périodes. Ce positionnement nous permet d'anticiper ainsi les ajustements de la capacité des ressources (notamment au niveau des ressources humaines) sans considérer des détails inutiles à ce niveau de décision. Ce niveau aide ainsi le décideur à élaborer une planification agrégée optimisée compte tenu de la politique de gestion retenue (leviers décisionnels pris en compte). Ce niveau est modélisé par un programme linéaire en variables mixtes. Afin de construire les données adaptées à ce niveau décisionnel, des mécanismes d'agrégation sont proposés ainsi que des mécanismes de compensation pour pallier certains effets de l'agrégation.

Le niveau ordonnancement détaillé (niveau inférieur), positionne finement les opérations sur les ressources utilisées, en prenant en compte toutes les contraintes. Dans ce cadre, le temps est continu et l'horizon est de type court-terme. Ce niveau est chargé de désagréger les décisions prises par le niveau supérieur. Autrement dit, il s'occupe de suivre au mieux le positionnement temporel optimisé des *OF* proposé par le niveau de macro-ordonnancement. Il pourra ainsi être construit à partir de modules d'ordonnancement détaillés classiques bien répandus et souvent efficaces pour assurer la tenue des délais.

La présentation des travaux s'articule autour de cinq chapitres :

Le premier chapitre présente un état de l'art de définitions et de concepts de base autour des systèmes de production et de leur gestion, en relation avec la problématique associée à ce travail de thèse. Il rappelle ensuite les concepts de base et les outils de résolution associés aux problèmes d'ordonnancement. Enfin, il propose une analyse et une classification des approches multiniveau en gestion de production. Cette classification montre un déficit de méthodes et d'outils pour résoudre les problèmes d'ordonnancement pour la production à la commande prenant en compte les leviers décisionnels utilisables dans les entreprises. Cette présentation permet ainsi de positionner l'étude présentée dans ce mémoire.

Le deuxième chapitre, introduit la structure d'ordonnancement à deux niveaux liée à la problématique considérée. Une modélisation en variables mixtes associée au niveau macro-ordonnancement (niveau supérieur) est proposée. Cette modélisation permet de prendre en compte des leviers décisionnels souvent mis à disposition des décideurs. Ce niveau est notamment construit à partir d'un mécanisme d'agrégation temporel (horizon discrétisé en périodes) dont l'objectif est de transformer les caractéristiques détaillées (définies à partir du temps continu) en caractéristiques agrégées (définies sur du temps discrétisé). Afin d'intégrer les deux niveaux de la structure, il est proposé un mécanisme de guidage basée sur le positionnement global des *OF* (guidage par dates). Le niveau inférieur est alors chargé de suivre ce guidage en ordonnant finement les opérations de manière à respecter au mieux ces "consignes" temporelles issues du macro-ordonnancement. Enfin, une première expérimentation permettant d'illustrer le comportement de la structure est présentée sur un exemple simple.

Le troisième chapitre est entièrement consacré à l'évaluation des performances de l'approche à deux niveaux. Les outils logiciels nécessaires à la mise en oeuvre de chaque niveau de la structure décisionnelle sont brièvement présentés. Les expérimentations réalisées visent principalement à évaluer l'efficacité de l'approche multiniveau face au comportement d'une approche directe élaborée à partir d'un module d'ordonnancement

traditionnel. Afin d'évaluer et comparer les résultats obtenus, des indicateurs de performances sont développés. Ils permettent d'apprécier les résultats en termes de qualité des solutions fournies, de la robustesse du macro-ordonnancement et de l'efficacité du guidage. Des expérimentations numériques sont faites afin de pouvoir mettre en évidence la performance de l'approche face à différentes valeurs d'éléments : paramètres liés au macro-ordonnancement, comme la longueur du pas de discrétisation, paramètres des problèmes testés, comme la charge des ressources, ...

Le quatrième chapitre s'intéresse à des pistes d'approfondissement de l'approche selon trois axes : guidage, robustesse et diversification de la problématique. Concernant le premier axe, il s'agit d'étudier l'impact de nouveaux modes de guidage sur le fonctionnement de l'approche multiniveau. En effet, l'information proposée par le module de macro-ordonnancement peut être interprétée et utilisée de différentes manières. Deux types différents de guidage sont envisagés. Le premier prend en compte le positionnement détaillé des opérations sur les périodes (guidage par sous-*OF*) et l'autre utilise les relations de précédence entre opérations positionnées sur des périodes différentes (guidage par contraintes de précédence). Des expérimentations numériques sur des exemples sont présentées afin de tester les nouveaux modes de guidage. Pour le deuxième axe, un mécanisme d'amélioration de la robustesse permettant de suivre au mieux les décisions prises au niveau supérieur est ensuite présenté. Dans le cadre du troisième axe, deux extensions du problème global sont envisagées ; la première concerne la prise en compte de calendriers de disponibilité des ressources et la deuxième concerne la diversification du critère à optimiser (minimisation des encours). Des expérimentations numériques sont également présentées en fin de chapitre.

Finalement, le cinquième chapitre présente une extension du problème global en prenant en compte la notion de pool de ressources (ou ressources alternatives). Il se concentre essentiellement sur la structuration et sur la modélisation du niveau macro-ordonnancement. Dans ce contexte, deux modélisations en variables mixtes sont proposées. La première prend explicitement en compte l'affectation des ressources, la seconde propose une agrégation du pool de ressources. Des expérimentations sur des exemples académiques sont réalisées afin d'observer les performances comparées de ces deux modélisations. Dans ce cadre, une attention particulière est donnée aux indicateurs représentant la charge des problèmes afin de permettre d'analyser l'opportunité de ce type d'agrégation.

Chapitre 1

Gestion des activités de production et approches multiniveaux

Introduction au chapitre 1

Comme nous l'avons déjà souligné, la planification et l'ordonnancement d'activités respectant les leviers décisionnels souhaités par les décideurs est un défi majeur pour l'entreprise. Ceci est d'autant plus vrai que les informations à manipuler ont des volumes importants et sont fortement soumises à incertitude.

L'axe de recherche que nous allons proposer est une contribution à ce constat et consiste à utiliser une structure décisionnelle d'ordonnancement à deux niveaux dans le cadre de la production à la commande.

Pour définir précisément notre problématique et les réponses à y apporter, il est nécessaire d'aborder certains points issus de la littérature.

Dans ce chapitre, nous rappelons, dans la première et la deuxième partie des définitions et des notions de base des systèmes de production et de la gestion de production. Ces définitions sont importantes dans l'optique de la définition du cadre général de notre étude.

Dans la troisième partie, nous nous intéressons plus particulièrement à l'ordonnancement d'atelier. Nous présentons les notions et définitions de base ainsi qu'un résumé de techniques de résolution traditionnellement utilisées en ordonnancement de production.

La quatrième et cinquième partie sont consacrées aux approches multiniveaux afin de présenter leur fonctionnement. Ceci va servir de base à l'approche que nous allons proposer dans cette thèse. Ces chapitres montrent également certains types d'agrégation de données utilisées en Gestion de Production. Enfin, une classification des structures multiniveaux est présentée.

En dernier, nous présentons l'objectif de la thèse en soulignant le contexte général de l'étude ainsi que l'approche proposée.

1.1 Le système de production

Dans ce paragraphe nous allons présenter quelques rappels concernant les systèmes de production, notamment au niveau de la terminologie. Plusieurs définitions ont été proposées dans la littérature dont un nombre limité d'entre elles sont présentées ici.

1.1.1 Définitions de système de production

Avant de définir un système de production il semble judicieux de définir ces deux termes : *Système et Production*. Il existe de nombreuses définitions de "système" selon le domaine concerné. Nous pouvons trouver la notion de système dans des domaines tels que la cybernétique, l'automatique, la biologie, etc. Parmi les définitions une semble être la plus adaptée au cadre de notre étude.

"Un système est un ensemble d'éléments en interaction, orienté vers la réalisation d'un objectif, ces éléments pouvant être des hommes, des machines et des organes" [Melèse, 1984].

D'un autre côté, la *Production* peut être définie comme *"une transformation de ressources appartenant à un système productif et conduisant à la création de biens ou de services"* [Giard, 2003].

Dans le cadre de notre travail nous allons nous intéresser à la production au sein d'une entreprise manufacturière.

Une entreprise est une entité complexe composée de plusieurs fonctions formant un réseau où circulent des flux de nature différentes (matières, décisions, informations, capitaux,...). Dans [Blodel, 2002] le domaine de la production au sein d'une entreprise est représenté par le schéma de la figure 1.1 :

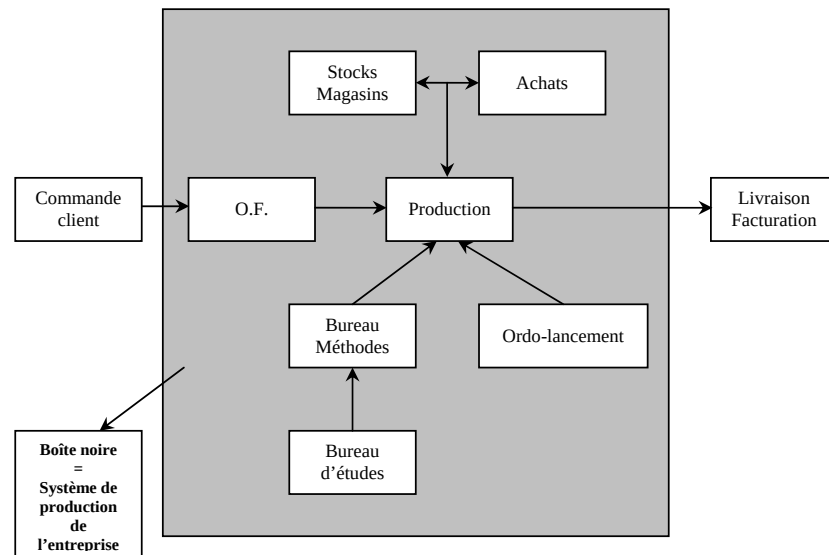


FIG. 1.1 – Domaine de la production et ses fonctions connexes

D'une manière très générale, un système de production peut être défini comme un ensemble des moyens qui permettent la transformation de ressources en produits ou en services.

Plus récemment, Dolgui et Proth [Dolgui et Proth, 2006] définissent un système de production comme un ensemble des moyens déployés pour satisfaire un client, depuis l'enregistrement d'une commande jusqu'à sa livraison et l'encaissement de la facture correspondante. Un système de production inclut donc, l'étude de marché, l'achat de la matière première et de ses composants, la formation, la fabrication, le conditionnement des produits finis, leur livraison, le service après vente, pour ne citer que les principaux.

1.1.2 Sous-systèmes d'un système de production

D'un point de vue systémique, un système de production peut à la fois être décomposé en sous-systèmes. Dans [Huguet, 1994] ; [Hétreux, 1996] et plus récemment [Despontin-Monsarrat, 2004] un système de production est structuré en trois sous-systèmes :

- *Le sous-système physique* qui rassemble l'ensemble des ressources du système de production.
- *Le sous-système d'information* qui regroupe les informations, relatives au système de production et à son environnement, qui sont utilisées par le sous-système de décision.
- *Le sous-système de décision* qui élabore, à partir des informations disponibles dans le sous-système d'information, des décisions permettant d'assurer un fonctionnement convenable du système de production.

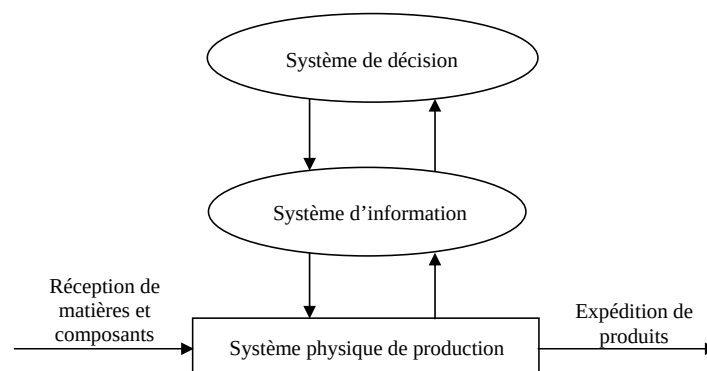


FIG. 1.2 – Vue schématique d'un système de production [Ait-Hssain, 2005]

1.1.3 Typologie des systèmes de production

La connaissance scientifique est basée notamment sur la notion de classification. Une classification présente l'avantage de mettre en avant certaines caractéristiques des éléments à trier. Dans le cadre des systèmes de production ce genre de structuration est fondamentale, car il conditionne le choix de méthodes de gestion de production qui sont les plus adaptées.

Dans la littérature il existe plusieurs typologies des systèmes de production [Roux, 1997] ; [Deschamps, 1994], ces typologies sont notamment construites en fonction de la nature de l'organisation et de la spécificité des produits que les entreprises

fabriquent. Plus récemment nous trouvons une classification multidimensionnelle qui considère des nouvelles perspectives de classification comme le temps de réponse et l'organisation du travail [MacCarthy et Fernandes, 2000]. Dans [Courtois *et al.*, 2006], il est présenté une classification traditionnelle en fonction de trois critères : (i) quantités fabriquées et répétitivité ; (ii) organisation des flux de production ; (iii) relation avec les clients.

• Typologie en fonction de la Quantité/Répétitivité

La première différence notable entre les entreprises a trait bien sûr à l'importance des productions. Les quantités lancées peuvent être :

- en production unitaire ;
- en production par petites séries ;
- en production par moyennes séries ;
- en production par grandes séries.

Pour chacune des quantités de production, les lancements peuvent être répétitifs ou non, ce qui agit également sur la typologie de l'entreprise. On peut donc établir le tableau croisé (tableau 1.1) :

	Lancements répétitifs	Lancements non répétitifs
Production unitaire	Pompes destinées au nucléaire	Moules pour presses
Petites et moyennes séries	Machines outils	Préséries
Grandes séries	Automobile	Articles de mode

TAB. 1.1 – Exemples de classification Quantité/Répétitivité [Courtois *et al.*, 2006]

• Typologie en fonction de l'organisation du flux de production

Dans cette typologie on peut distinguer trois types de production, sachant que l'on pourrait trouver de nombreux types intermédiaires. Ce genre de classification a été largement abordée dans la littérature par [Bénassy, 1987], [Crouhy et Greif, 1991] et plus récemment par [Courtois *et al.*, 2006].

- *La production en continu* est retenue lorsqu'on traite de quantités importantes d'un produit ou d'une famille de produits. L'implantation est réalisée en ligne de production, ce qui rend le flux du produit linéaire. Dans ce type de production, les machines ou les installations sont dédiées au produit à fabriquer ce qui, en général, ne permet pas une grande flexibilité. En règle générale, ce type de production est accompagné d'une automatisation poussée des processus de production ainsi que des systèmes de manutention. Parmi les entreprises typiques utilisant ce type de production on peut citer : les industries pétrochimiques, les cimenteries, assemblage, etc.

- *La production en discontinu* est retenue lorsque l'on traite des quantités relativement faibles de nombreux produits variés, réalisés à partir d'un parc machine à vocation générale. Dans ce type de production, les machines ou les installations sont capables de réaliser un grand nombre de travaux ; elles ne sont pas spécifiques à un produit, ce qui donne une grande flexibilité. Les industries mécaniques et les entreprises de confection sont des entreprises de ce type.
- *La production unitaire ou par projet* concerne la réalisation d'un produit unique où l'aspect répétitif de la production paraît secondaire. La taille du produit nécessite en générale une construction spécifique. Dans ce type de production, on ne peut pas stabiliser de façon formelle une production. Aussi, l'organisation doit être capable de prendre en compte de nombreuses et importantes perturbations extérieures, et de permettre des modifications. Des exemples de ce type de production concernent notamment la construction de bateaux, de fusées spatiales, d'avions, etc.

- **Typologie en fonction de la politique de fabrication**

Dans ce cadre on trouve en général deux classes : production sur stock et production à la commande.

- *La Production sur stock* est déclenchée par l'anticipation d'une demande solvable s'exerçant sur un produit dont les caractéristiques sont définies par le fabricant. Dans ce type de production, le client achète des produits existant dans le stock créé par l'entreprise. Pour envisager de produire sur stock, deux conditions sont nécessaires [Giard, 2003] ; (i) l'éventail des produits finis visés doit être restreint ; et (ii) la demande de chaque produit doit être suffisamment importante et prévisible. Il est donc clair qu'une entreprise opte, en général, pour une organisation de production sur stock lorsqu'il est possible d'effectuer une prévision fiable de la demande.
- *La production à la commande* n'est commencée que si l'on dispose d'un engagement ferme du client. On évite alors (sauf cas d'annulation) le stock de produits finis. Ce type de production est alors préférable au type de production sur stock, car il conduit à une diminution des stocks, donc des frais financiers. Une entreprise typique utilisant ce type de production doit en général produire une grande variété de produits, normalement en petites quantités, qui sont adaptés aux besoins des clients [Haskose *et al.*, 2004]. Nous trouvons dans la littérature plusieurs entreprises typiques qui appliquent cette politique de production, parmi elles on trouve des entreprises de composants électroniques [Sawik, 2006], [Sawik, 007b], d'assemblage [Toivonen *et al.*, 2006], l'industrie de semi conducteurs [Kang et Lee, 2007] et encore dans l'industrie "high tech" [Sawik, 007a]. Il existe également des études pour déterminer la pertinence d'installer un système de production à la commande dans [Jodlbauer, atre].
- Finalement, les deux types de production peuvent coexister dans une entreprise, consacrant une partie de sa capacité installée pour produire sur stock et l'autre pour produire à la commande ([Tsubone *et al.*, 2002], [Soman *et al.*, 2004]).

Il convient de rappeler que ce travail de thèse s'intéresse à une forme de production à la commande.

1.1.4 La chaîne Logistique

Etant donné la complexité de l'environnement des systèmes de production d'une entreprise d'aujourd'hui, celle-ci est confrontée de plus en plus aux pressions du marché (demandes des produits finis) et aux relations avec les fournisseurs (demande de matière première). Pour accroître leur compétitivité les entreprises se recentrent sur leur cœur de métier et organisent leurs activités à partir de la notion de "chaîne logistique".

1.1.4.1 Définition

Des nombreuses définitions ont été proposées pour la chaîne logistique dans la littérature. Dans ce paragraphe nous allons rappeler un nombre limité d'entre elles.

Pour certains auteurs ([Lee *et al.*, 1993], [Rota-Franz *et al.*, 2001]), la chaîne logistique est assimilée à un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières en composants puis en produits finis, et de distribution des produits finis vers le client.

Pour d'autres [Tayur *et al.*, 1999], la chaîne logistique est définie pour un produit donné mais présenté comme une succession de relations client-fournisseur.

Plus récemment en 2001, [Mentzer *et al.*, 2001] proposent une revue des définitions les plus représentatives dans le monde académique, puis cette revue a été complétée par [Mahmoudi *et al.*, 2005].

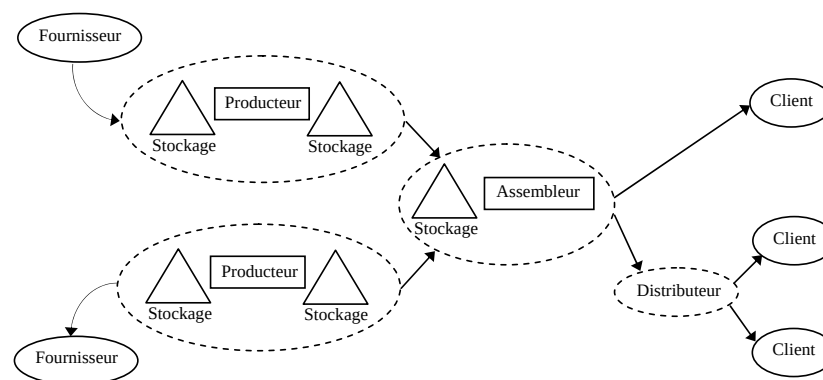


FIG. 1.3 – Représentation d'une chaîne logistique [Lee et al., 1993]

1.1.4.2 Les flux d'une chaîne logistique

Ce sous-paragraphe s'appuie sur les travaux présentés dans [Monteiro, 2001] et [Giard, 2003]. Les entreprises appartenant à une même chaîne logistique sont reliées par des *flux de produits*, des *flux d'informations* et des *flux financiers*.

- *le flux de produits* correspond au flux de matières entre les entreprises. Ce flux peut être bidirectionnel : il circule évidemment du fournisseur vers le client, mais il peut

aussi, dans le cas d'une relation de sous-traitance, circuler du donneur d'ordre vers le sous-traitant.

- *le flux d'informations* contient toutes les données utiles dans le cadre des relations client/fournisseur. Ce flux peut être partitionné en un flux de données et un flux de décisions. Dans le cas de la production à la commande, les informations échangées sont plus particulièrement relatives aux commandes liant deux acteurs de la chaîne logistique. Le flux de données peut correspondre, par exemple, à la communication d'un retard de livraison d'un fournisseur prévenant un de ses clients, tandis que le flux de décisions peut correspondre aux commandes envoyées par les clients à leurs fournisseurs. Le flux d'informations peut donc être bidirectionnel au vu de ces deux exemples.
- *le flux financier* regroupe les paiements et les arrangements financiers divers (crédits, mensualisations de paiements, etc.) entre les clients et les fournisseurs. Il est donc lui aussi bidirectionnel.

1.1.4.3 Structures typiques de chaînes logistiques

Il est difficile de donner une définition de différents types de structures de chaînes logistiques reflétant l'ensemble des cas réels étant donné la complexité et la variété des applications. Dans [Galasso, 2007] il est présenté une décomposition typique des structures de chaînes logistiques qui a été également proposée par [Huang *et al.*, 2003]. La figure 1.4 présente les décompositions classiques en : Série, Divergente, Dyadique, Convergente et réseau.

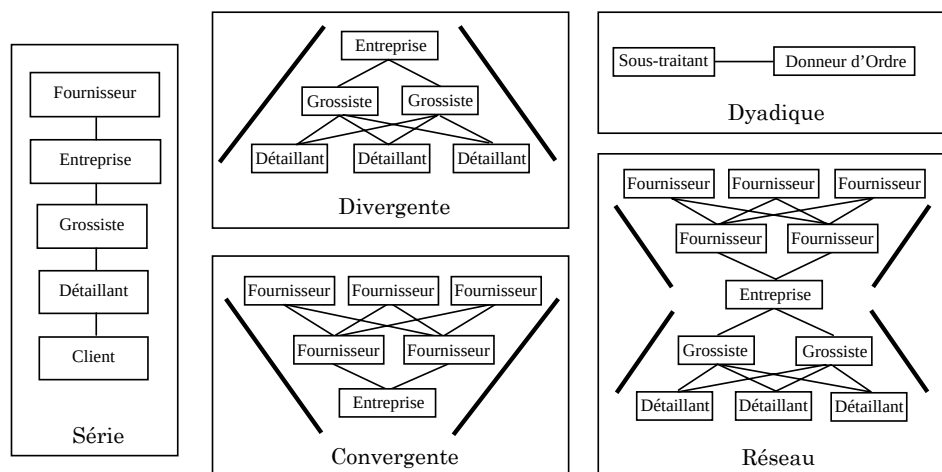


FIG. 1.4 – Différentes structures de la chaîne logistique

La structure *série* correspond à un procédé de fabrication linéaire et vertical. La structure *divergente* permet de modéliser un réseau de distribution avec pour objectif, par exemple, d'étudier la localisation des sites de distribution ou leur dimensionnement. La structure *convergente* représente un processus d'assemblage dans lequel le choix des fournisseurs peut être un sujet d'étude. La structure *réseau* est la composition d'une structure convergente et divergente permettant de prendre en compte des chaînes logistiques plus complexes. Enfin, la structure *dyadique* peut être vue comme un cas parti-

culier d'une chaîne en série limitée à deux étages, elle peut servir de base à l'étude de relations client/fournisseur ou donneur d'ordre/sous-traitant.

1.2 Gestion de Production : concepts et généralités

1.2.1 Définition de gestion de production

[Baptiste *et al.*, 2005] ainsi que [Giard, 2003] définissent la *Gestion de Production* comme une fonction ayant pour objet la recherche d'une organisation efficace de la production de biens et de services. En situant la production dans la perspective plus large de la chaîne logistique, la définition de cette organisation doit aussi impérativement prendre en compte la maîtrise des flux entrants (approvisionnements) et celle des flux sortants (distribution) pour assurer le niveau de satisfaction globalement attendu par les clients. L'interdépendance des problèmes conduit à porter autant d'attention à la définition des interfaces qui conditionnent les problèmes à résoudre qu'à la résolution de ces problèmes.

Comme cela a été mentionné plus haut, quand on parle de gestion de production dans les entreprises, on fait constamment référence à des notions de flux, flux poussés, flux tirés, flux tendus, flux logistiques. La notion de flux est synonyme de mouvement, de circulation, d'évolution, de rapidité et donc d'efficacité.

Nous avons évoqué au paragraphe 1.1.2 les trois sous-systèmes qui composent un système de production. De manière classique, le sous-système d'information et le sous-système de décision forment le système de gestion de production qui exerce quatre principales activités (cf. figure 1.5) :

- *la gestion de données techniques* qui recense les nomenclatures (liste de composants et/ou matières premières requis pour réaliser un produit donné) et les gammes opératoires (listes ordonnées d'opérations permettant de réaliser un produit donné) nécessaires à la fabrication des produits de l'entreprise.
- *la gestion de matières* qui assure l'approvisionnement en matières premières ou en produits semi-finis et le stockage des produits (finis ou semi-finis) fabriqués.
- *la gestion des données commerciales* qui reçoit les commandes et négocie les prix, quantités et délais de livraison souhaités.
- *la gestion des données du travail* qui organise dans le temps la réalisation des opérations nécessaires à la fabrication des produits sur les ressources en prenant en compte les données techniques et commerciales ainsi que les retours du suivi de fabrication.

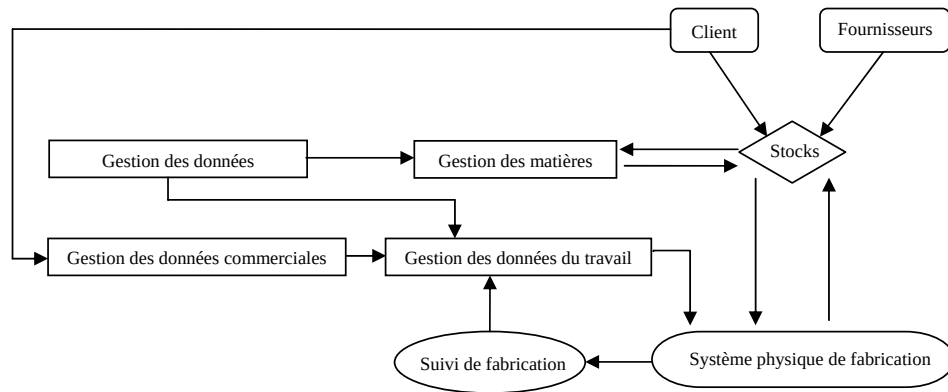


FIG. 1.5 – Vision systémique de la gestion d'un système de production

Le système de gestion de production d'une entreprise doit alors assurer l'organisation de son système de production afin de fabriquer les produits en quantités et en temps voulus, compte tenu des moyens disponibles dans le système physique. Il est alors clair que la gestion de la production doit impérativement interagir avec les autres fonctions de l'entreprise (c.f. 1.6).

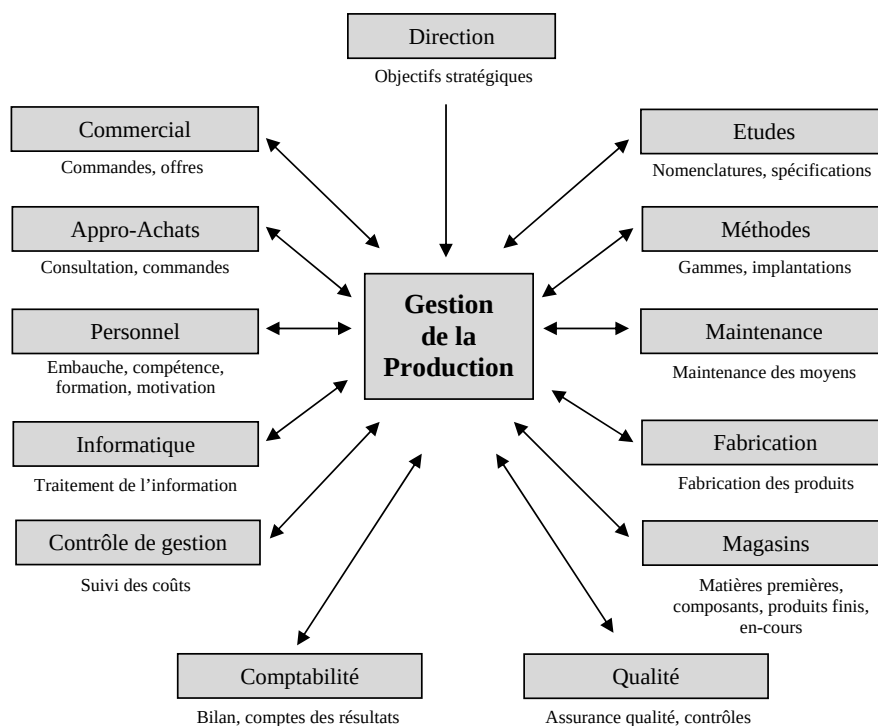


FIG. 1.6 – La gestion de production et les autres fonctions de l'entreprise

1.2.2 Typologie décisionnelle en gestion de production

Le système de gestion de production doit maintenir un certain niveau de productivité tout en restant compatible avec les contraintes commerciales, techniques, financières et sociales. Mais, en raison des contraintes imposées par le marché et de la diversité des

fonctions à assurer, celui-ci est souvent confronté à des prises de décisions possédant une forte combinatoire et surtout, incluant plusieurs problématiques différentes. C'est pourquoi les décisions de gestion sont souvent structurées en niveaux.

L'organisation des décisions prises par le système de gestion d'une unité de production s'inspire du modèle classique pyramidal, décomposant les décisions selon trois niveaux : stratégique, tactique et opérationnel [Anthony, 1965], [Bitran et Tirupati, 1993]. (voir figure 1.7).

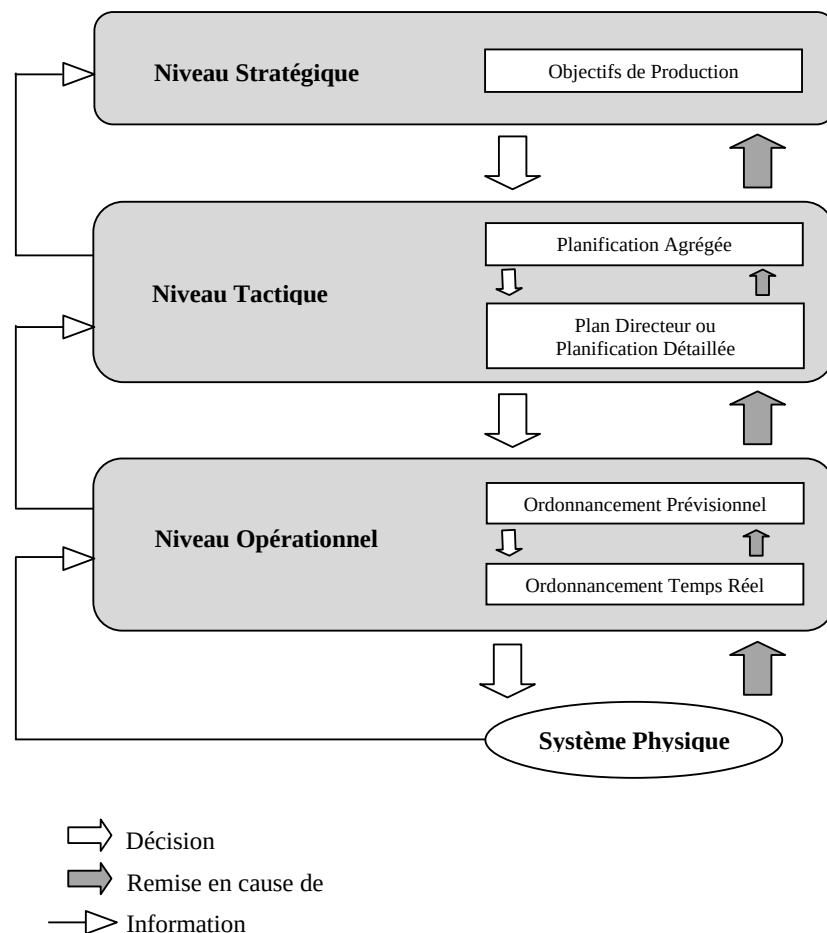


FIG. 1.7 – Classification hiérarchique de décisions [Deschaps, 1994]

- *le niveau stratégique* élabore la stratégie au plus haut niveau en formulant une politique à long terme de l'entreprise (vision à plus de deux ans, en général) au niveau des moyens financiers, matériels et humains qui sont déterminés par une série de décisions, compte tenu d'objectifs techniques et économiques. Des exemples de ce type de décisions sont par exemple : la détermination de la taille et l'emplacement de nouvelles usines, l'acquisition d'équipements neufs, le choix de nouvelles gammes de produits, etc.

- *le niveau tactique* assure l'organisation de la production en cohérence avec les décisions prises au niveau stratégique de façon à obtenir une utilisation efficace des ressources du système. Ce problème est complexe et nécessite généralement une décomposition. Par exemple, les décisions tactiques prises à moyen terme peuvent nécessiter une agrégation de la fabrication des produits en familles ou un fractionnement de la production en sous-ensembles ou lots.
- *le niveau opérationnel* prend des décisions à court terme et à très court terme celles-ci, sont prises et/ou mises en œuvre par des agents de maîtrise ou d'exécution. Les données sont ici beaucoup plus détaillées. Les décisions prises à ce niveau concernent la mise en œuvre des moyens de l'atelier afin de produire, dans les délais, les quantités fixées au niveau supérieur, ce qui nécessite une désagrégation complète du plan si celui-ci a été construit par famille de produits. Les types de problème que l'on rencontre sont : l'ordonnancement de la production, la gestion du stockage, etc.

Il n'y a pas toujours de démarcation très franche entre les différents niveaux car, suivant le type d'entreprise, certaines décisions peuvent être prises plus au moins tôt dans la hiérarchie. Chaque niveau se caractérise par un modèle et des objectifs internes qui lui sont propres, ainsi que les objectifs externes résultant de décisions prises à un plus haut niveau [Erschler et De Terssac, 1988].

Les décisions portent sur des horizons et des volumes de production différents, et correspondent à la hiérarchie des compétences impliquées selon le court, moyen ou long terme. Plus l'horizon est long, plus les données sont imprécises et plus les risques ainsi que les responsabilités associées sont importants [Giard, 2003].

Toute décision prise à un niveau constitue un objectif pour le niveau immédiatement inférieur (processus top-down). Eventuellement, un retour d'information d'un niveau vers celui immédiatement supérieur peut être nécessaire afin d'évaluer ou de remettre en cause les décisions prises par celui-ci.

1.2.3 Modèle générique décisionnel

Quelle que soit la classe de décision considérée (stratégique, tactique, opérationnelle), on peut envisager le problème de la gestion de production comme le choix d'une "solution", c'est-à-dire un ensemble cohérent de décisions, qui satisfait l'ensemble des contraintes et qui est, si possible, "meilleure" que toute autre. Le choix de telle ou telle solution agit sur les différentes composantes du système de production : les hommes, les matières premières, les produits, l'équipement, etc.

Dans la majorité des cas, l'objectif associé à l'élaboration d'une solution peut s'exprimer par "l'optimisation" du coût induit par la solution.

Pour [Baptiste *et al.*, 2005] il est possible de schématiser la prise de décision de la façon suivante (figure 1.8) :

- la **Demande** est exprimée sous la forme d'une quantité de produits ou de travail à réaliser sur un horizon donné : $Produit \times Temps$, que l'on notera $(P \times T)$;
- les **Données Ressources** (R) décrivent la capacité disponible à une date donnée (nombre de ressources, caractéristiques), par exemple les effectifs par catégorie pour les ressources humaines ;

- les **Gammes** décrivent la quantité de ressources et la durée de mobilisation nécessaire pour réaliser un produit : $Ressource \times Temps / Produit ((R \times T) / P)$.

Compte tenu de ces informations, la **Décision de production** aura pour résultat :

- un **Plan de production** résultant de la prise en compte des ressources. Il rend compte de l'activité des ressources : $(Produit / (Ressource \times Temps)) (P / (R \times T))$; cela peut être représenté par exemple par un diagramme de Gant;
- une **Modification** éventuelle des **Données Ressources** : par exemple, investissement en équipement, ou embauche;
- un **Plan de charge** des ressources sur l'horizon considéré : $Ressource \times Temps (R \times T)$.

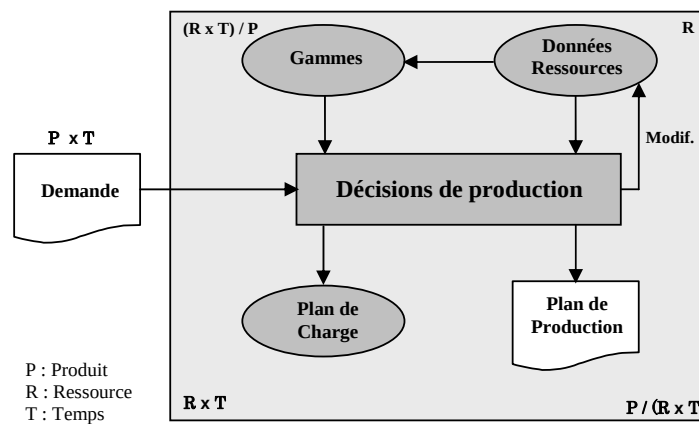


FIG. 1.8 – Modèle générique de la décision de gestion de production [Baptiste et al., 2005]

1.3 Ordonnancement de la production

"Les problèmes d'ordonnancement apparaissent dans des domaines aussi variés que l'organisation opérationnelle du travail dans les usines, la planification de grands projets, l'organisation d'activités de service, mais aussi l'allocation dynamique des ressources dans les systèmes d'exploitation d'ordinateurs" [Esquirol et Lopez, 1999].

1.3.1 Définitions et concepts basiques d'ordonnancement

1.3.1.1 Définitions

Avant de définir l'ordonnancement il faut mentionner le problème de séquençement ("*sequencing problem*", dans la littérature anglaise). Dans [Conway et al., 1967] cette notion existe quand il y a un choix de l'ordre dans lequel les opérations doivent être exécutées. Le problème de séquence selon Conway peut alors s'exprimer et résoudre de la manière suivante :

1. α est la conséquence agrégée d'exécuter la tâche A en premier, suivie par B.

2. β es la conséquence agrégée d'exécuter la tâche B en premier, suivie par A.
3. Si α est préférable à β l'ordre (séquence) " A , après B " est sélectionnée.

L'ordonnancement ne se limite pas à une simple question de séquence de tâches, le problème d'ordonnancement doit prendre en compte également des contraintes temporelles et de disponibilité de ressources. Dans la littérature un bon nombre de définitions du "*problème d'ordonnancement*" ont été proposées.

Définition 1 [Rodammer et White, 1988]

"Ordonnancer ou (planifier) le fonctionnement d'un système industriel de production consiste à gérer l'allocation (ou l'accès à des ressources au cours du temps, tout en satisfaisant au mieux un ensemble de critères").

Définition 2 [Carlier et Chrétienne, 1988]

"Ordonnancer, c'est programmer l'exécution d'une réalisation en attribuant des ressources aux tâches et en fixant leurs dates d'exécution".

Définition 3 [GOTHA, 1993]

"Une tâche est un travail élémentaire nécessitant un certain nombre d'unités de temps et de ressources. Ordonnancer un ensemble de tâches, c'est programmer leur exécution en leur allouant les ressources requises et en fixant leur date de début".

Définition 4 [Esquirol et Lopez, 1999]

"Le problème d'ordonnancement consiste à organiser dans le temps la réalisation de tâches, compte tenu de contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement,...) et de contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité des ressources requises".

D'autres définitions de l'ordonnancement existent dans la littérature, voir par exemple [Baker, 1974], [Blazewicz *et al.*, 1994] et [Bruker, 1998].

L'ordonnancement est considéré comme un processus de prise de décision qui joue un rôle important dans la plupart des systèmes de production et de fabrication. La fonction ordonnancement existe également dans différents domaines : transport, distribution, dans les industries de services, systèmes informatiques, ... Nous pouvons dire donc que les problèmes d'ordonnancement apparaissent dans de nombreux secteurs d'activités. Dans les domaines de l'ordonnancement précédemment mentionnés plusieurs types de travaux de recherche ont été entrepris, dont les principaux portent sur :

- **l'ordonnancement de la production (atelier)** : est chargé d'orchestrer tous les flux de produits et de matières (la demande) sur l'ensemble des ressources mobilisées dans l'atelier (les capacités) en suivant des procédés de fabrication (gammes), et ce, au moindre coût (objectif).
- **l'ordonnancement de projet** : consiste à déterminer les dates d'exécution des tâches en tenant compte de la disponibilité des ressources et de façon à satisfaire au mieux les objectifs fixés.
- **l'ordonnancement des ressources humaines** : est un type d'ordonnancement qui intègre l'affectation des opérateurs aux machines, il est basé sur les caractéristiques détaillées de ces deux types de ressources. Il s'agit de planifier l'état de l'atelier au cours du temps, c'est-à-dire prévoir sa configuration physique ainsi que l'affectation individuelle ou par équipe des opérateurs.

Afin de mieux comprendre la terminologie des problèmes d'ordonnancement nous allons présenter un nombre de concepts de base liés à la terminologie utilisée dans le domaine de l'ordonnancement :

OF_i : représente l'ordre de fabrication (OF) ou produit i demandé par un client.

NOF : représente le nombre d'Ordres de Fabrication.

NOF_i : représente le nombre d'opérations dans un Ordre de Fabrication.

r : représente la ressource nécessaire pour effectuer une opération i

NR : représente le nombre de ressources

Durée opératoire p_{ij} (processing time) : représente la durée opératoire de l'opération j de l'ordre de fabrication i .

Date de disponibilité rd_i (release date) : indique la date au plus tôt à laquelle l'ordre i peut commencer son exécution.

Date de début sd_i (starting date) : indique la date à laquelle l'ordre i commence son exécution.

Date due dd_i (Due date) : date à laquelle l'ordre i doit être fini.

Date de fin cd_i (completion date) : date de fin effective de l'ordre de fabrication i .

Retard algébrique L_i (lateness) de l'ordre i : $L_i = C_i - d_i$.

Retard vrai T_i (Tardiness) de l'ordre i : $T_i = \max(0, C_i - d_i)$.

Nombre d'OF en retard U : $U = \sum_i U_i$ avec $U_i = 0$ si $T_i = 0$, et $U_i = 1$ sinon.

1.3.1.2 Critères de performance

La résolution des problèmes d'ordonnancement nécessite le plus souvent le calcul ou l'évaluation de critères de performance (qualitatifs ou quantitatifs). Lorsque les hypothèses sur le système le permettent (stocks de capacité illimitée, pas d'événement aléatoire,...), certains critères de performance peuvent être calculés par un modèle mathématique ou un simple algorithme. Le tableau 1.2 montre les critères les plus fréquents dans la littérature.

Il existe dans la littérature un grand nombre de critères de performance, dont certains sont décrits dans le tableau 1.2. Ils peuvent concerner, par exemple, la date de fin de traitement des produits, la durée de présence des produits dans le système. Dans le tableau il est présenté trois familles de critères de performance : de type "maximum" qui représente la valeur maximale d'une fonction, de type "somme" qui représente la moyenne d'une fonction et de type "somme pondérée" qui représente la moyenne pondérée d'une fonction.

Soient :

w_i	"poids" du produit i
set_i	Temps de préparation de la ressource R ou de changement d'outils du produit i
O_i	= 1 s'il y a un changements d'outils pour débiter la fabrication de i , 0 sinon
$F = C - r$	Temps passé dans le système par le produit i (flow time)
$W_i = C_i - r_i - \sum_{j=1}^m p_{ij}$	Temps d'attente dans le système du produit i (waiting time)
$E_i = \max(0, d_i - C_i)$	Avance du produit i par rapport à la date de fin souhaitée (earliness)
Ct_i	Coût de fin de traitement du produit i à la date C_i
U_i^t	=1 si le produit i est en retard ($C_i \geq d_i$) , 0 sinon
U_i^e	=1 si le produit i est en avance ($C_i \leq d_i$) , 0 sinon

Critère	Maximum	Somme	Somme Pondérée
Fin de traitement	$C_{max} = \max_{i=1, NOF} C_i$	$\bar{C} = \frac{1}{NOF} \sum_{i=1}^{NOF} C_i$	$\bar{C}_w = \sum_{i=1}^{NOF} w_i C_i$
Décalage	$L_{max} = \max_{i=1, NOF} L_i$	$\bar{L} = \frac{1}{NOF} \sum_{i=1}^{NOF} L_i$	$\bar{L}_w = \sum_{i=1}^{NOF} w_i L_i$
Retard	$T_{max} = \max_{i=1, NOF} T_i$	$\bar{T} = \frac{1}{NOF} \sum_{i=1}^{NOF} T_i$	$\bar{T}_w = \sum_{i=1}^{NOF} w_i T_i$
Avance	$E_{max} = \max_{i=1, NOF} E_i$	$\bar{E} = \frac{1}{NOF} \sum_{i=1}^{NOF} E_i$	$\bar{E}_w = \sum_{i=1}^{NOF} w_i E_i$
Durée totale	$F_{max} = \max_{i=1, NOF} F_i$	$\bar{F} = \frac{1}{NOF} \sum_{i=1}^{NOF} F_i$	$\bar{F}_w = \sum_{i=1}^{NOF} w_i F_i$
Durée de Préparation	$set_{max} = \max_{i=1, NOF} set_i$	$\overline{set} = \frac{1}{NOF} \sum_{i=1}^{NOF} set_i$	$\overline{set}_w = \sum_{i=1}^{NOF} w_i set_i$
Coût	$Ct_{max} = \max_{i=1, NOF} Ct_i$	$\overline{Ct} = \frac{1}{NOF} \sum_{i=1}^{NOF} Ct_i$	$\overline{Ct}_w = \sum_{i=1}^{NOF} w_i Ct_i$
Temps d'attente	$W_{max} = \max_{i=1, NOF} W_i$	$\bar{W} = \frac{1}{NOF} \sum_{i=1}^{NOF} W_i$	$\bar{W}_w = \sum_{i=1}^{NOF} w_i W_i$
Nombre de retards		$\bar{U} = \frac{1}{NOF} \sum_{i=1}^{NOF} U_i^t$	$\bar{U}_w = \sum_{i=1}^{NOF} w_i U_i^t$
Nombre de décalages		$\sum_{i=1}^{NOF} (U_i^t + U_i^e)$	$\sum_{i=1}^{NOF} (U_i^t + U_i^e)$
Nombre de changements d'outils		$\bar{O} = (\sum_{i=1}^{NOF} O_i)$	$\bar{O}_w = (\sum_{i=1}^{NOF} w_i O_i)$

TAB. 1.2 – Critères de performance [Grangeon, 2001]

1.3.1.3 Différents classes d'ordonnancement

Dans le cas général, les ordonnancements peuvent être classés en quatre catégories : les ordonnancements quelconques, les ordonnancements *semi-actifs*, les ordonnancements *actifs* et les ordonnancements *sans délai*. Dans ce qui suit nous donnons la définition de chacun des trois dernières catégories [Aloulou, 2002].

Un ordonnancement semi-actif (ou calé à gauche ou calé au plus tôt) "est un ordonnancement pour lequel une opération ne peut être décalée vers la gauche pour commencer plus tôt sans changer la séquence des opérations sur les différentes machines ni violer une contrainte de précédence ni violer une date de début au plus tôt".

Un ordonnancement actif "est un ordonnancement pour lequel aucune opération ne peut être démarrée plus tôt sans retarder (décaler vers la droite) au moins une autre opération ou violer les contraintes de précédence ou violer les dates de début au plus tôt".

Un ordonnancement sans délai "est un ordonnancement pour lequel aucune machine n'est laissée inactive alors qu'elle pourrait commencer une opération".

La figure 1.9 montre les définitions précédentes avec un exemple simple comportant 5 tâches : 1, 2, 3, 4 et 5. Les contraintes de précédence associées sont : $1 < 2 < 5$ et $3 < 4$.

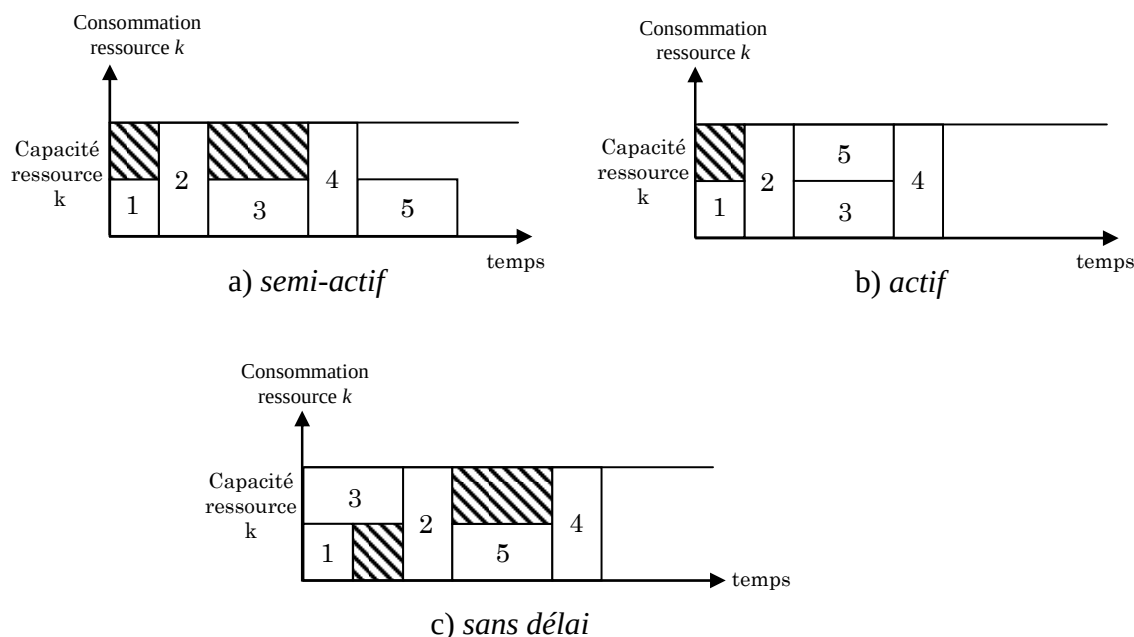


FIG. 1.9 – Classes d'ordonnements

1.3.1.4 Représentation par diagrammes de Gantt

La représentation d'un ordonnancement se fait traditionnellement à l'aide d'un diagramme de Gantt (en honneur à Henry L. Gantt, 1861-1919). La figure 1.10 donne une idée d'une telle représentation. Ce diagramme met en abscisse le temps et en ordonnée, les ressources. Les activités sont représentées par des bandes de longueur proportionnelle à leur durée. Souvent, un arrière-plan permet de voir, pour chaque ressource, les périodes ouvertes (travail possible) et fermées (ressource non disponible). Cet arrière-plan

est en quelque sorte le calendrier d'ouverture des ressources. En ordonnancement de la production, le même produit (ou le même lot de pièces) doit subir plusieurs opérations. On utilise alors la même couleur pour toutes les activités du lot afin de mieux visualiser son "histoire".

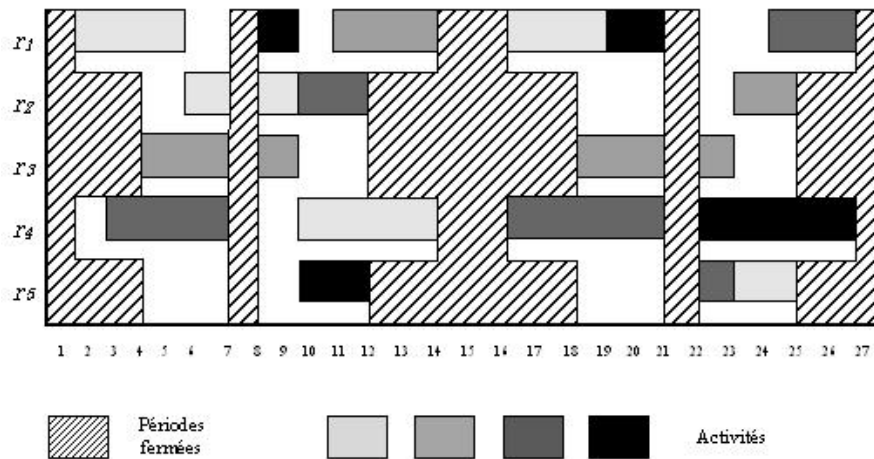


FIG. 1.10 – Représentation d'un ordonnancement par un diagramme de Gantt

Cette représentation est parfaitement efficace pour montrer les enchaînements d'activités. En revanche, en ordonnancement d'atelier, elle ne permet pas de visualiser les encours de production, et plus particulièrement le volume de travail en amont d'une machine. Malheureusement, il n'existe aucune représentation plus parlante pour les encours.

1.3.2 Techniques de résolution basées sur la programmation mathématique

Dans le domaine de l'ordonnancement d'activités il y a eu de nombreux travaux de recherche consacrés au développement de techniques de résolution.

Depuis déjà quelques années les outils de résolution basés sur la programmation mathématique et notamment les outils associés à la programmation linéaire sont devenus très utilisés dans le milieu universitaire comme dans le milieu industriel. Cette attractivité est liée essentiellement à deux évolutions : une fantastique progression des performances et de la démocratisation de matériels informatiques, associé à un perfectionnement continu des approches mathématiques de résolution. Ceci a permis le perfectionnement des solveurs correspondants. Ces techniques s'appuient sur une modélisation mathématique possédant de nombreux avantages notamment d'être très facilement évolutive.

Il convient d'indiquer dès maintenant que ce travail de thèse s'appuie sur cette classe de modèles et sur les solveurs associés.

Une des technique prometteuse en gestion de production est la résolution par la programmation linéaire en variables mixtes.

Dans ce paragraphe nous allons présenter deux modélisations s'appuyant sur la programmation mathématique, l'une pour la modélisation en temps continu et l'autre en temps discret. Ces deux modélisations sont appliquées normalement sur les problèmes d'ordonnancement de projet sous contraintes de ressources, aussi appelé *RCPSP*. Nous

pouvons appliquer ces modélisations car les problèmes d'ordonnancement de la production, parmi d'autres, peuvent être vus comme de cas particuliers de l'ordonnancement de projet [Baptiste *et al.*, 2005].

1.3.2.1 Modélisation en temps continu

Nous étudions la formulation linéaire en temps continu de [Alvarez-Valdés, 1993] issue de la formulation disjonctive de [Balas, 1970] et la notion d'ensemble critique minimal de tâches $C \in \mathcal{C}_m$ qui sont présentés dans [Demasse, 2003], [Baptiste *et al.*, 2005]. Un ensemble C de tâches est critique si la somme des consommations des tâches de C excède la quantité disponible pour au moins une ressource, et critique minimal si aucun sous-ensemble strict de C n'est critique.

Soient :

- x_{ij} : variable binaire prenant la valeur 1 si la tâche i précède la tâche j .
- p_{ij} : durée de la tâche i .
- E : relation d'ordre partiel sur l'ensemble des tâches.
- S_i : Date de début d'une tâche i .
- M : valeur suffisamment grande.

$$\min S_{n+1} \tag{1.1}$$

sous les contraintes :

$$x_{ij} = 1 \quad \forall ij \in E \tag{1.2}$$

$$S_j - S_i \geq -M + (p_i + M)x_{ij} \quad i, j = 0, \dots, n+1 \tag{1.3}$$

$$\sum_{(i,j) \in C^2} x_{ij} \geq 1 \quad \forall C \in \mathcal{C}_C \tag{1.4}$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad x_{ii} = 0, \quad S_i \geq 0 \quad i, j = 0, \dots, n+1 \tag{1.5}$$

La formulation en temps continu est basée sur la propriété selon laquelle dans toute solution réalisable, au moins deux tâches dans chaque ensemble admissible ne peuvent être exécutés en parallèle (contraintes 1.4). L'expression (1.2) modélise les contraintes de précedence initiales du problème. Les contraintes (1.3) lient les deux types de variables du modèle : pour une valeur de M suffisamment grande (par exemple $M = T$), les contraintes imposent que, pour toute précedence $x_{ij} = 1$, l'exécution de la tâche j doit commencer après la complétion de i . Autrement, si $x_{ij} = 0$, la distance $S_j - S_i$ n'est pas contrainte ($S_j - S_i \geq -M$). Cette formulation contient un nombre exponentiel de contraintes (1.4) et l'ensemble $\mathcal{C}_m$ n'est donc pas totalement énuméré en pratique. De plus, la présence des contraintes "grand M" (1.3) affaiblit la relaxation continue de ce programme.

1.3.2.2 Modélisation en temps discret (finement discrétisé)

Les formulations en variables discrètes sont associées à une forme de discrétisation "fine" du temps et contiennent un nombre de variables dépendant de l'horizon T . Si les relaxations obtenues sont de meilleure qualité que pour les modèles en temps continu, la

discrétisation du temps engendre des programmes de grande taille dans le cas de certaines instances.

La première modélisation du RCPSP en un programme linéaire revient à Prisker et al. [Prisker *et al.*, 1969]. Voici une variante avec les variables binaires : $y_{it} = 1$ si la tâche i débute à l'instant t et 0 sinon. L'ensemble des tâches en cours à un instant t s'écrit alors $\mathcal{A}_t = \{i = 1, \dots, n \mid \sum_{s=t}^{t+p_i-1} y_{is} = 1\}$, ce qui permet de traduire les contraintes de ressources $\sum_{i \in \mathcal{A}_t} r_{ik} \leq R_k$ ($\forall t = 0, \dots, T, k = 1, \dots, m$) par les inégalités (1.9). Les contraintes de précédence (1.8) et de non-préemption (1.7) ainsi l'objectif (1.6) s'expriment clairement avec la correspondance $S_i \sum_{t=0}^T y_{it}$.

$$\min \sum_{t=0}^T t y_{(n+1)t} \quad (1.6)$$

sous les contraintes :

$$\sum_{t=0}^T y_{it} = 1 \quad i = 0, \dots, n+1 \quad (1.7)$$

$$\sum_{t=0}^T t(y_{jt} - y_{it}) \geq p_i \quad \forall (i, j) \in E \quad (1.8)$$

$$\sum_{i=1}^n r_{ik} \sum_{\tau=t-p_i+1}^t y_{i\tau} \leq R_k \quad k = 1, \dots, m, t = 0, \dots, T \quad (1.9)$$

$$y_{it} \in \{0, 1\} \quad i = 0, \dots, n+1, t = 0, \dots, T \quad (1.10)$$

Nous avons donc présenté deux formulations classiques de la modélisation des problèmes d'ordonnancement. Il existe plusieurs manières de modéliser les problèmes de planification et d'ordonnancement à l'aide de la programmation mathématique. Dans la littérature nous pouvons trouver d'une part des modélisations en temps continu [Giannelos et Georgiadis, 2003]. D'autre part on trouve également des techniques de modélisations en temps discret qui améliorent par exemple les performances des résultats par la reformulation du problème [Belvaux et Wolsey, 2001], [Wolsey et Chen, 2002], [Sawik, 2005], [Burkard et Hatzl, 2006]. Plus récemment, nous pouvons trouver une modélisation qui intègre la planification de la production et l'ordonnancement [Chen et Ji, 2007] et une autre pour l'industrie de l'acier [Tang et Liu, 2007].

Dans cette section nous n'avons pas présenté un état de l'art exhaustif et précis des techniques de modélisation; nous renvoyons donc à la lecture de [Pochet et Wolsey, 2006], par exemple, pour un exposé plus complet, et finalement pour avoir une idée de l'état de l'art des méthodes d'optimisation basées sur la programmation mathématique [Mendez *et al.*, 2006].

1.3.3 Autres techniques de résolution

Il existe de nombreuses techniques de modélisation et de résolution qui ne sont pas basées sur la programmation mathématique. Ce paragraphe souhaite donner un aperçu très limité d'autres outils, également très répandus.

1.3.3.1 Les graphes potentiels et la méthode PERT

Les outils de résolution basés sur des modélisations par graphes sont très répandus. Dans ce contexte, la résolution de problèmes d'ordonnancement s'appuie sur la notion de chemin critique. Ces outils graphiques peuvent être étendus (graphes non conjonctifs, ...) pour résoudre des problèmes d'ordonnancement complexes.

La méthode PERT est très certainement une des méthodes la plus connue dans cette catégorie. Avant la réalisation d'un projet, les données numériques (en particulier les durées des tâches) ne sont que des estimations. Pour prendre en compte l'incertitude sur ces estimations, on peut utiliser un modèle probabiliste. On spécifie pour cela une distribution de probabilité pour chaque durée.

L'estimation des paramètres espérance et variance pouvant s'avérer délicate, la méthode PERT fournit un mécanisme pour leur obtention. Généralement, c'est la loi statistique Bêta qui décrit la distribution de probabilité de la durée d'une tâche. Pour une tâche i , on doit préciser une limite inférieure $\underline{p}_i$ associée à une durée optimiste, une limite supérieure $\overline{p}_i$ associée à une durée pessimiste et un mode μ_i lié à la valeur la plus probable de la durée (figure 1.11).

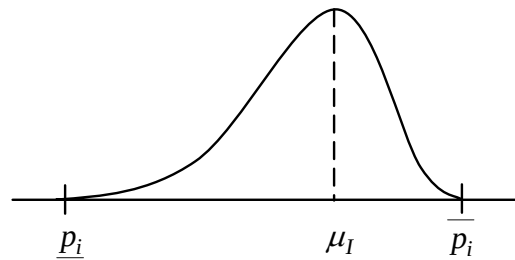


FIG. 1.11 – Loi de distribution Bêta

La méthode PERT calcule la moyenne et la variance de cette durée aléatoire selon les formules suivantes :

$$E(p_i) = \frac{\underline{p}_i + 4\mu_i + \overline{p}_i}{6} \quad (1.11)$$

$$var(p_i) = \left(\frac{\overline{p}_i - \underline{p}_i}{6} \right)^2 \quad (1.12)$$

On construit ensuite le graphe potentiels en associant à chaque tâche sa durée moyenne. De la même façon que dans le cas de durées déterministes, on identifie les tâches du chemin critique. En appliquant le théorème de la limite centrale, on considère que la distribution de probabilité de la durée totale du projet est une loi normale dont la moyenne est la somme des durées moyennes des tâches critiques. En utilisant la fonction de répartition de la loi normale, on en déduit alors la probabilité que le projet puisse se terminer dans un certain délai.

Si $\sum_{i \in l} E(p_i)$ représente la durée du projet établie sur un chemin critique l . P représente la durée du projet, on peut donc écrire :

- moyenne : $E(P) = \sum_{i \in I} E(p_i)$
- variance : $var(P) = \sum_{i \in I} var(p_i)$

1.3.3.2 Heuristiques et metaheuristiques

Les problèmes de planification et d'ordonnancement peuvent être modélisés par la programmation mathématique comme nous l'avons vu dans la section précédente. Ils peuvent aussi être résolus dans un temps raisonnable par des algorithmes dits en temps polynomial. Par contre, il existe de nombreux problèmes très difficiles à résoudre (NP-difficile). Il n'existe pas de règles simples ou algorithmes qui rendent une solution optimale dans un temps raisonnable. De ce fait, l'on doit se contenter d'une solution "acceptable" proche de l'optimum.

Il existe un bon nombre d'heuristiques parmi lesquelles on peut citer les *méthodes de construction progressive*, parmi ces méthodes, on trouve les algorithmes sériel et parallèle ainsi que les heuristiques basées sur les *règles de priorité*.

L'*algorithme sériel* sélectionne les tâches dans l'ordre de la liste et ordonnance la tâche le plus tôt possible compte tenue des contraintes de précédence et de ressources, en tenant compte des tâches ordonnancées aux étapes précédentes.

L'*algorithme parallèle* ordonnance les tâches en incrémentant un instant de décision t initialisé à 0. A chaque étape, l'algorithme parcourt la liste des tâches non encore ordonnancées et place successivement au temps t les tâches possibles, sans violer de contraintes de précédence ou de ressources. Quand plus aucune tâche ne peut démarrer à t , t est augmentée d'une unité.

Heuristiques basées sur les règles de priorité. Une heuristique simple, dite à passe unique, consiste à déterminer l'ordre de sélection des tâches par une unique règle de priorité. Les efforts de recherche à ce sujet ont été importants les dernier années, nous pouvons trouver dans [Panwalkar et Iskander, 1977] un résumé des règles de priorité. Nous trouvons également une analyse des règles dans [Yanpin *et al.*, 1997] et plus récemment dans [Subramaniam *et al.*, 2000] une analyse pour la sélection des règles pour un Job Shop. Le tableau 1.3 montre les règles de priorité les plus connues (cas monomachine) :

Finalement, les métaheuristiques peuvent donner de bien meilleurs résultats. Un premier élément important dans la conception d'une métaheuristique est la représentation (le codage) des solutions. La plupart des méthodes (méthode Tabou, Recuit simulé,...) travaillent sur la notion de voisinage, en s'efforçant d'explorer au mieux l'espace des solutions afin d'éviter des optimum locaux. D'autres méthodes travaillent sur des populations de solutions (Algorithmes Génétiques) et peuvent ainsi proposer aux décideurs un ensemble de solutions de qualité. Des metaheuristiques récentes tentent d'explorer de nouvelles représentations des solutions (par les schémas d'ordonnancements disjonction-parallélisme ou par flots d'unités de ressources) ou bien, de nouvelles formes d'hybridation au sein de méthodes de grand voisinage, où la recherche du meilleur voisin est un problème NP-difficile, résolu par recherche arborescente tronquée. Pour des plus amples notions sur les heuristiques et les métaheuristiques, il est intéressant de lire [Pinedo, 2005]. De même on trouve dans [Dréo *et al.*, 2003] des métaheuristiques pour l'optimisation des problèmes difficiles.

Règle	Description
EDD (<i>Earliest Due Date</i>)	Consiste à classer les tâches par dates croissantes. Permet de minimiser $1 L_{max} T_{max}$.
SPT (<i>Shortest Processing Time</i>)	Classe les tâches par durées d'exécution croissantes. Permet de minimiser le retard algébrique et le critère de date d'achèvement moyenne.
LPT (<i>Longest Processing Time</i>)	Classe les tâches par durées décroissantes. Cette heuristique maximise les files d'attente.
WSPT (<i>Weighted SPT</i>)	Classe les lots par p_{ij}/w_i croissants et minimise la date d'achèvement moyenne pondérée.
FIFO (<i>First In First Out</i>)	Classe les lots dans l'ordre d'arrivée sur la machine.
LIFO (<i>Last In First Out</i>)	Classe les lots dans l'ordre inverse de leur date d'arrivée.
MST (<i>Minimum Slack Time</i>)	Classe les lots par ordre de marge décroissante.
Priorité	Il s'agit ici d'appliquer des règles de priorité extérieures au problème d'ordonnancement lui-même. Cela survient en ordonnancement de la production lorsque les clients cherchent à agir sur la priorité de leurs lots.

TAB. 1.3 – Règles de priorité

1.3.3.3 Programmation par contraintes

La programmation par contraintes (PPC) est, au sens large, l'étude et l'utilisation des systèmes de calcul basés sur les contraintes. L'approche de la PPC pour résoudre des problèmes combinatoires consiste à les modéliser par un ensemble de variables prenant leur valeur dans un ensemble fini et liées par un ensemble des contraintes mathématiques ou symboliques. L'efficacité de ce paradigme repose sur de puissants algorithmes de propagation de contraintes qui éliminent du domaine des variables les valeurs qui engendrent des solutions irréalisables. Si la propagation de contraintes ne suffit pas à elle seule à établir une solution réalisable, une recherche arborescente est entreprise afin de réduire davantage le domaine des variables définissant le problème. A chaque nœud de l'arbre de recherche une variable est d'abord choisie selon une certaine politique (statique ou dynamique) puis fixée à une des valeurs possibles de son domaine. On a une solution lorsque le domaine de chaque variable ne contient qu'une seule valeur et une impasse lorsque le domaine d'une variable devient vide. Il est généralement possible de guider la recherche de solutions réalisables en incorporant de l'information sur la nature du problème dans les politiques de sélection de variables et de valeurs.

• Modélisation

La modélisation d'un problème d'ordonnancement peut se faire à l'aide de la PPC. Ici, nous allons présenter la modélisation pour un problème d'ordonnancement proposée dans [Baptiste *et al.*, 2001].

• Activités (ou tâches)

Pour chaque activité A_i trois variables sont introduites, $S(A_i)$, $C(A_i)$, $proc(A_i)$, représentant le début, la fin et le temps d'exécution de l'activité A_i respectivement.

Comme données initiales du problème nous avons r_i la date de début au plus tôt et d_i la date due de l'activité A_i , alors $[r_i, d_i]$ est la fenêtre de réalisation où l'activité A_i doit

être exécutée. Alors, les domaines initiaux de $S(A_i)$ et $C(A_i)$ sont $[r_i, lst_i]$ et $[eet_i, d_i]$ respectivement, où lst_i et eet_i représentent la date de début au plus tard et la date de fin au plus tôt de l'activité A_i respectivement.

Le temps d'exécution de l'activité est défini par la différence entre fin et le début de l'activité : $proc(A_i) = C(A_i) - S(A_i)$. p_i dénote la valeur la plus petite dans le domaine de $proc(A_i)$. La figure 1.12 représente tous les données précédemment décrites. La couleur gris claire représente la fenêtre temporelle $[r_i, d_i]$ d'une activité et la région sombre représente le temps d'exécution de l'activité.

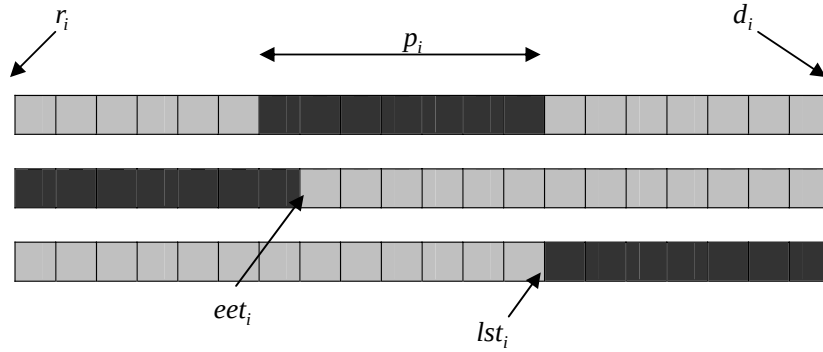


FIG. 1.12 – Données d'une activité [Baptiste et al., 2001]

• Relations temporelles

Les relations temporelles entre activités peuvent s'exprimer par contraintes linéaires par des variables de début et de fin des activités. Par exemple, la précédence entre deux activités A_i et A_j est modélisé par la contrainte linéaire :

$$C(A_i) \leq S(A_j) \quad (1.13)$$

• Contraintes de ressources

Les contraintes de ressources représentent le fait que les activités nécessitent une quantité de ressources pour son exécution. Etant donné une activité A_i et une ressource R avec une capacité $Capa(R)$, dénotons $Capa(A_i, R)$ comme la variable qui représente la quantité de ressource R pour l'activité A_i . Pour représenter un ordonnancement, nous avons besoin d'une variable $E(A_i, t, R)$ qui dénote le nombre d'unités de la ressource R utilisées par l'activité A_i à l'instant t . Dans tous les cas, nous avons la contrainte énonçant qu'une quantité suffisant de ressource doit être affectée aux activités pour couvrir le besoin d'énergie :

$$E(A_i, R) = \sum_t E(A_i, t, R) \quad (1.14)$$

Pour une activité A_i il existe des fortes relations entre $E(A_i, t, R)$ et $X(A_i, t)$ ($X(A_i, t)$ variable binaire prenant la valeur 1 si l'activité A_i est exécutée à l'instant t) :

$$E(A_i, t, R) = X(A_i, t) Capa(A_i, R) \quad (1.15)$$

En général, la contrainte de ressources peut s'écrire de la manière suivante :

$$\sum_{i=1}^n E(A_i, t, R) \leq \text{Capa}(R) \quad (1.16)$$

A partir des relations temporelles et des contraintes de ressources, il est alors possible de proposer ces contraintes [Baptiste *et al.*, 2001] afin d'actualiser les domaines $S(A_i)$ et $C(A_i)$ associées à chaque activité A_i .

1.4 Approches multiniveaux en Gestion de Production - Principes

1.4.1 Principes et intérêts

La gestion de la production est un problème très complexe traitant un grand nombre de données. Même réduite à sa seule fonction d'ordonnancement, la complexité du problème reste importante : elle est directement liée au nombre de produits et de ressources. La modélisation conduit fréquemment à des programmes mathématiques de grande taille. Pour résoudre de tels problèmes on utilise par exemple, les méthodes de décomposition issues de la programmation mathématique (Dantzig-Wolfe, Benders, relaxation lagrangienne, etc.) ou bien encore les techniques d'agrégation-désagrégation développées en optimisation mathématique [Fontan *et al.*, 1997].

Une approche couramment adoptée par de nombreux auteurs est une décomposition hiérarchique du problème global en s'appuyant sur une *structure décisionnelle hiérarchisée* où les décisions prises à un niveau de la structure deviennent des contraintes pour les niveaux inférieurs (cf. figure 1.13). Au sommet de la hiérarchie, les données manipulées sont grossières (agrégées), les variables de décision sont limitées en nombre, les horizons temporels sont longs. En bas de la structure, les données sont détaillées, les horizons temporels se raccourcissent. Dans ce contexte, les mécanismes d'agrégation ou de désagrégation qui sont généralement mis en œuvre entre les niveaux exploitent les caractéristiques du système de production et correspondent à une réalité physique. Il s'agit donc plus d'une *modélisation agrégée* que d'une *agrégation de modèles*. Dans la littérature anglaise les travaux regroupant ce type d'approche se connaît sur le terme de *Hierarchical Production Planning (HPP)*. Les travaux pionniers dans la littérature sur ce sujet ont été ceux de [Bitran et Hax, 1977], [Hax et Golovin, 1978] et [Bitran *et al.*, 1981].

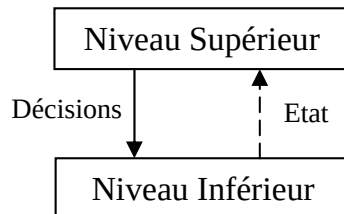


FIG. 1.13 – Structure décisionnelle hiérarchisée [Schneewesiss, 1999]

Les avantages procurés par les approches hiérarchiques ou multiniveaux les rendent particulièrement intéressantes dans le domaine de la gestion de la production.

[Anthony, 1965] a, le premier, introduit le principe d'une approche hiérarchisée pour la gestion de la production en proposant une structure décisionnelle à trois niveaux (stratégique, tactique et opérationnelle) se différenciant par la nature et la portée temporelle des décisions, ainsi que par la finesse des informations manipulées. Depuis, ces approches se sont largement développées et des travaux décrivant et analysant les notions fondamentales des structures hiérarchisées ont été faits [Dempster *et al.*, 1981], [Schneeweiss, 1995], [Schneeweiss, 1999], [Schneeweiss, 2003]. L'application de ces structures ont connu des succès par de implémentations dans des secteurs industriels très variés tels que la production d'acier [Bowers et Jarvis, 1992], [Özdamar *et al.*, 1997], [Cowling, 2003], [Neureuther *et al.*, 2004], la production de chaussures [Caravilla et De Souza, 1995], l'industrie mécanique [Axsater et Jönsson, 1984], [Özdamar *et al.*, 1998], l'industrie chimique [Qiu et Burch, 1997], [Qiu *et al.*, 2001], l'industrie pétrochimique [Katayama, 1996], de lessives [Günther, 1986], [Özdamar et Yazgaç, 1999], la gestion de projets [Hans *et al.*, 2007] et dans l'affectation de personnel médical [Grunow *et al.*, 2004] et pour l'ordonnancement de salles d'opération [Guinet et Chaabane, 2003], [Jebali *et al.*, atre].

Les structures hiérarchisées permettent de laisser de l'autonomie aux différents niveaux, de manière à faciliter la réactivité du processus décisionnel. Le traitement des données (mécanismes d'agrégation) souvent associé à ce type d'approche permet de limiter l'influence de l'incertitude, inhérente notamment à toute action de prévision, par un phénomène de compensation d'erreurs et par le choix d'horizons temporels adaptés. En fin, l'utilisation des structures multiniveaux permet, comme il a été déjà mentionné plus haut, de réduire la complexité du modèle réduisant ainsi le temps de calcul associé à sa résolution comme il a été mentionné dans [Sawik, 2002], [Mercé et Fontan, 2001], [Fontan *et al.*, 1997] et Fontan et al. [Fontan *et al.*, 2005].

1.4.2 Agrégation de données

Le concept d'agrégation est généralement défini comme une forme d'abstraction par laquelle un ensemble de données ou de variables présentant des caractéristiques communes peut être remplacé par une donnée ou une variable agrégée [Fontan *et al.*, 1997]. Dans le cadre de la gestion de la production, l'agrégation peut porter sur les matières, les moyens de production, le travail, le temps. En combinant les différents types d'agrégation, il est possible d'obtenir une modélisation plus ou moins fine de la réalité.

1.4.2.1 Agrégation des matières ou moyennes de production

Cette agrégation vise en général à regrouper des produits ou des ressources ne se différenciant que par des caractéristiques jugées secondaires, en familles de produits ou en familles de machines. Les objets ainsi regroupés sont banalisés par une même appellation agrégée (cf. figure 1.14).

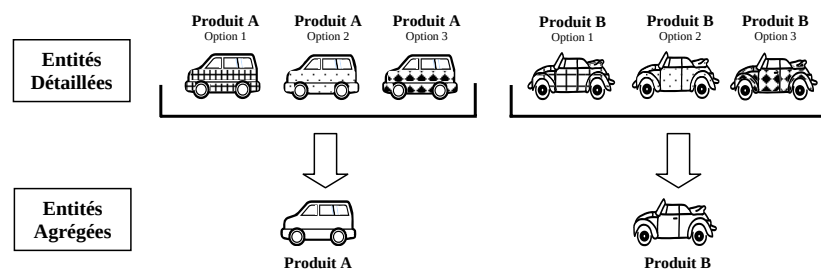


FIG. 1.14 – Agrégation de matière (ou de produits)

1.4.2.2 Agrégation du travail

L'agrégation du travail consiste notamment à représenter différentes tâches élémentaires devant se succéder, par une macro-tâche (cf. figure 1.15).

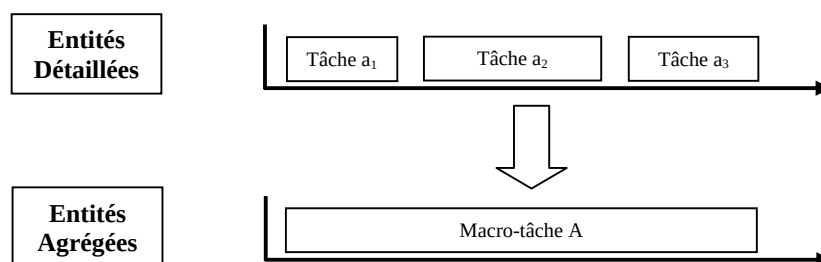


FIG. 1.15 – Agrégation du travail

1.4.2.3 Agrégation du temps

L'agrégation du temps regroupe dans un macro-période un ensemble de périodes élémentaires consécutives (cf. figure 1.16).

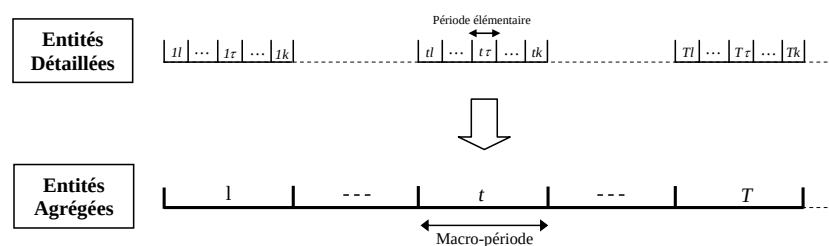


FIG. 1.16 – Agrégation du temps

1.4.3 Interactions entre niveaux décisionnels : robustesse et cohérence

Lorsque l'on décompose le problème global en une structure décisionnelle à plusieurs niveaux (chaque niveau ayant en général un degré différent de granularité des données) il peut s'avérer difficile d'établir une interaction correcte pour assurer le bon fonctionnement de la structure.

En effet, de telles structures utilisent en général une résolution descendante où les niveaux inférieurs sont soumis aux exigences du niveau supérieur ce qui peut provoquer des infaisabilités et conduire à un dysfonctionnement du processus décisionnel.

Pour éviter ce type d'inconvénient, il est nécessaire de construire une structure hiérarchisée et des modèles de décision associés prenant en compte a priori les interactions entre niveaux.

[Erschler *et al.*, 1985] ont postulé que pour assurer un fonctionnement satisfaisant d'une structure multiniveaux il faut que :

- 1) La décision élaborée par le niveau supérieur doit assurer l'existence de solutions au niveau inférieur,
- 2) Toute solution élaborée par le niveau inférieur doit satisfaire la décision du niveau supérieur.

Cette double analyse permet la définition de deux concepts génériques *Robustesse* et *Cohérence*, structurant l'étude des interactions entre niveaux. Dans [Mercé et Fontan, 2001] ces deux termes sont définis de la manière suivante :

Robustesse : "une décision agrégée est dite robuste si elle assure l'existence d'au moins une décision détaillée".

Cohérence : "une décision détaillée est cohérente si elle est compatible avec la décision agrégée".

La mise en œuvre de ces deux concepts est réalisée à l'aide de la formalisation d'un modèle d'étude des interactions. Ce modèle est généralement construit à partir d'éléments contenus dans le modèle de désagrégation (ou d'un modèle de désagrégation sur-contraint), des relations d'agrégation-désagrégation et du modèle agrégé. Les conditions d'existence de solutions associées au modèle d'étude des interactions permettent d'établir des conditions de robustesse et des conditions de cohérence. Celles-ci, introduites sous forme de contraintes dans les modèles mathématiques associés respectivement au niveau supérieur et au niveau inférieur, assurent un fonctionnement correct de la structure de décision (figure 1.17).

Cette problématique que nous venons d'évoquer a donné lieu à des travaux concernant l'introduction de conditions de robustesse et cohérence associés à un niveau particulier. Dans [Fontan *et al.*, 1994] des conditions de robustesse ont été établies grâce à un traitement des données détaillées et une adaptation adéquate des variables agrégées. Dans [Dauzère-Pérès et Lasserre, 2002] pour obtenir la cohérence entre les modules de planification et ordonnancement il est proposé un modèle intégré qui prend en compte les décisions de séquence et en considérant la capacité au niveau de l'ordonnancement. L'introduction de contraintes de sous-estimations de longueur de périodes de discrétisation et de contraintes de capacité a été utilisé par [Fontan *et al.*, 2005] pour obtenir la robustesse dans une structure d'ordonnancement à deux niveaux.

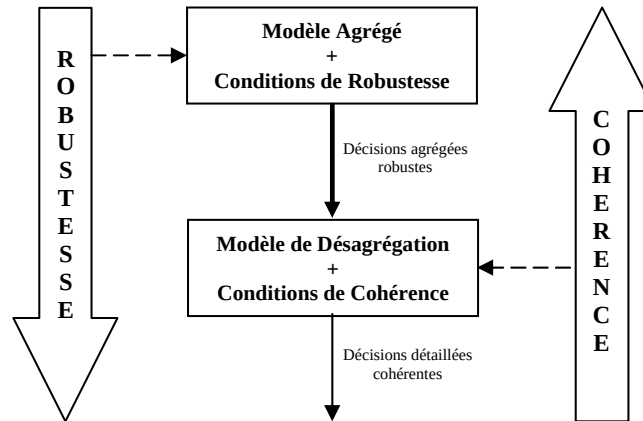


FIG. 1.17 – Robustesse et cohérence [Merce et Fontan, 2001]

Lorsque les modèles associés à deux niveaux sont de natures différentes (modèle à variables continues, modèle à variables discrètes), il peut être délicat d'étudier analytiquement les interactions. Dans ce contexte, la robustesse et la cohérence sont assurées par des procédures itératives faisant dialoguer le modèle associé au niveau supérieur avec le modèle associé au niveau inférieur [Fontan et Imbert, 1985], [Lasserre, 1992].

Différentes définitions sur la robustesse apparaissent dans la littérature. Dans les travaux de [Guenin *et al.*, 2007] par exemple, la propriété de robustesse est reliée à la stabilité d'une solution optimale lorsque des paramètres incertains évoluent au cours du temps.

1.5 Classification des approches multiniveaux

Dans le paragraphe précédent nous avons évoqué les structures décisionnelles multiniveaux ainsi que quelques travaux de recherche concernés. Les travaux de recherche dans le domaine de la mise en œuvre des structures décisionnelles peut se diviser en trois grandes classes : *Planification hiérarchisée de la production*, *Intégration de la planification et l'ordonnancement* et *Ordonnancement hiérarchisé*.

1.5.1 Planification hiérarchisé de la production

La première classe de problèmes abordés dans les travaux concernant des structures décisionnelles multiniveaux est la Planification Hiérarchisée de la Production (ou HPP *Hierarchical Production Planning* dans la littérature anglaise). Dans ces travaux le problème de planification est décomposé en plusieurs niveaux décisionnels où chaque niveau détermine les volumes de production au niveau d'agrégation du produit concerné (e.g. [Bitran et Hax, 1977], [Erschler *et al.*, 1985], [Fontan *et al.*, 1994]). L'agrégation de produits a été classiquement décomposée en trois grandeurs : *Groupes*, *Familles* et *Items* (e.g. figure 1.18).

Dans la figure précédente est présentée une manière générale de décomposer les décisions, mais nous trouvons d'autres approches utilisant plus ou moins cette décomposition. Dans un grand nombre de travaux nous trouvons des structures décisionnelles à deux niveaux, par exemple dans [Gfrerer et Zäpfel, 1995] la structure consi-

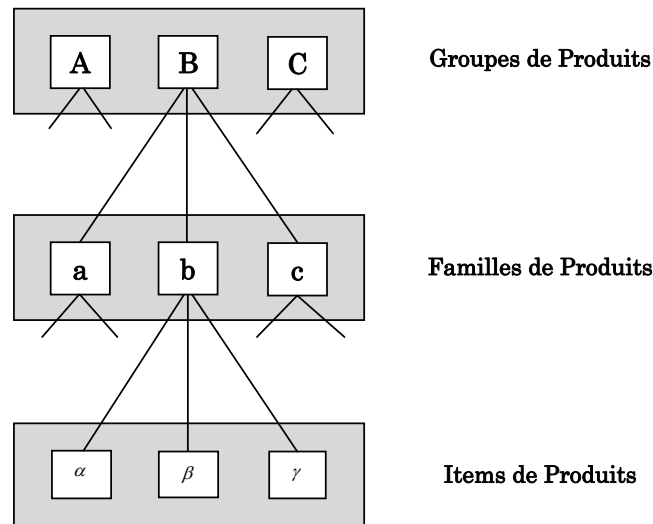


FIG. 1.18 – Structure d'agrégation [Schneeweiss, 1999]

dérée comporte la planification de groupes de produits au niveau supérieur et les familles au niveau inférieur. Par contre il existe d'autres travaux [Tsubone *et al.*, 2002], [Ashayeri et Selen, 2003], [Yan *et al.*, 2004], [Selçuk *et al.*, 2006] qui considèrent les niveaux de familles et d'items. Dans [Mehra *et al.*, 1996], une structure du même type (à deux niveaux) a été considérée, ils agrègent les produits en familles de produits, les machines en cellules et le temps en périodes.

Nous pouvons également trouver des décompositions de structures à trois niveaux. Dans [Rutten, 1993] trois modèles hiérarchiques sont présentés utilisant notamment une agrégation temporelle dans une industrie laitière et dans [Caravilla et De Souza, 1995] dans une industrie de chaussures.

1.5.2 Intégration de la planification et l'ordonnancement

La deuxième classe considère l'intégration des fonctions de planification et d'ordonnancement dans une même structure décisionnelle. Dans ces structures les niveaux supérieurs déterminent les tailles des lots et les niveaux inférieurs sont chargés de faire l'ordonnancement et affectation des opérations sur les ressources ou lignes de production.

Dans [Yan *et al.*, 2004] une structure à deux niveaux est considéré où le niveau supérieur détermine un plan grossier de la production par un programme mathématique alors que le niveau inférieur réalise un ordonnancement à l'aide d'algorithmes tabous. Nous pouvons trouver également des structures à trois niveaux [Bowers et Jarvis, 1992], [Das *et al.*, 2000]. Ainsi dans [Bowers et Jarvis, 1992] une structure à trois niveaux est présentée. Le niveau supérieur détermine les quantités à produire par mois, le niveau intermédiaire se focalise en l'affectation de des produits aux lignes de production et finalement le niveau inférieur cherche l'ordonnancement des tâches.

Plus récemment dans [Omar et Teo, 2007] est considéré une structure à trois niveaux décisionnels où le premier niveau détermine la demande des familles de produits, le deuxième niveau sert à déterminer les quantités d'items à produire puis dans le troisième niveau déterminer un ordonnancement faisable. La décomposition en niveaux correspond

alors au niveau de détail de la planification recherchée.

L'application de cette classe de structures décisionnelle est très variée. On peut noter des mises en œuvre dans l'industrie de la production du yaourt [Entrup *et al.*, 2005], comme dans le domaine de la planification et l'ordonnancement des services médicaux (e.g. [Robert *et al.*, 2006], [Fei *et al.*, 2006]).

1.5.3 Ordonnancement hiérarchisé

Dans cette classe le problème d'ordonnancement est abordé par une structure décisionnelle hiérarchisée. Ici, les opérations sont ordonnancées d'une manière plus ou moins agrégée selon le niveau décisionnel considéré. Dans la littérature, la plupart des recherches ont commencé dans le domaine des systèmes informatiques [Wolf et Chen, 1995].

Dans le domaine des systèmes industriels nous pouvons trouver des d'applications concernant l'utilisation d'une structure hiérarchisée pour l'ordonnancement [Ichimura, 1996]. En général ces applications se concentrent sur l'agrégation de ressources dans le contexte de systèmes manufacturiers classiques [Tsukiyama *et al.*, 1996], [Fontan *et al.*, 2005], [Sawik, 2006] ou plus fréquemment dans le contexte de systèmes de manufacture flexible [Araujo *et al.*, 1995], [Tung *et al.*, 1999].

Dans ce mémoire de thèse est développée une structure de cette dernière classe.

1.6 Objectif de la thèse

• *Le contexte général du travail*

Ce travail de thèse s'inscrit dans le contexte de la gestion de systèmes de *production à la commande* dans une vision à *moyen terme*.

La production à la commande est essentiellement caractérisée par un ensemble d'*ordre de fabrication* à réaliser pour des dates de *livraison déterminées*. Il convient de souligner que dans un tel cadre, les volumes de production et les dates de livraison associées, qui caractérisent les ordres de fabrication, ont été préalablement déterminées en relation directe avec les clients.

Le souci de prendre en compte un horizon à moyen terme permet de s'intéresser et éventuellement de combiner des politiques de gestion (*leviers décisionnels de l'entreprise*) de différents types :

- gestion des retards de livraison
- gestion des capacités de production
 - internes : affectation des ressources, calendrier en heures normales, heures supplémentaires, ...
 - externalisées : sous-traitance, rejets de demandes, ...
- gestion d'aspects financiers : gestion des encours, lissage des entrées financières, budgétisation des activités, ...

Il est ainsi possible de s'intéresser à la prise en compte de différentes catégories de leviers décisionnels, depuis les leviers à caractère technique (plus traditionnels en ordonnancement) jusqu'à des leviers à caractère plus économique (souvent réservés à la planification de flux).

De manière plus synthétique, ce travail s'intéresse à l'ordonnancement d'ordres de fabrication et des opérations associées sur les moyens de production en recherchant le meilleur compromis (optimisation) entre les leviers décisionnels disponibles dans l'entreprise.

• *L'approche proposée*

A la lumière de ces derniers points, ce travail propose une structure d'ordonnancement à *deux niveaux*.

Le *niveau supérieur* s'attache à élaborer un *macro-ordonnancement*. Il s'agit d'ordonner les ordres de fabrication (et les opérations associés) sur des *périodes temporelles* liées à un horizon moyen terme. Le macro-ordonnancement définit notamment le positionnement *optimisé* des OF et des opérations, la gestion des capacités,... sur des périodes, de manière à satisfaire au mieux les leviers décisionnels retenus sur le moyen terme.

Le *niveau inférieur* est chargé de réaliser un ordonnancement détaillé en positionnant finement sur le temps continu les opérations.

Pour cela, il prend en compte :

- la planification "grossière" des activités et des ressources sur les périodes, élaborée par le macro ordonnancement
- les contraintes "fines" d'utilisation des moyens, que le macro-ordonnancement n'aura pas su considérer.

Le niveau inférieur est donc chargé de suivre les décisions du niveau supérieur, décisions se traduisant par des *contraintes de dates*, type de contraintes pouvant être prise en compte de manière traditionnelle par tout module classique d'ordonnancement. L'horizon temporel considéré pour ce niveau peut être à court terme permettant ainsi une forme de réactivité de l'approche.

Comme dans l'étude de toute structure décisionnelle multiniveau, une attention particulière est donnée : aux *modèles* associés aux différents niveaux, à l'étude de la *robustesse* du macro-ordonnancement vis à vis de l'existence d'ordonnancement détaillé, à *l'interaction* entre les deux niveaux matérialisée notamment par la notion de *guidage*, à l'évaluation de la qualité de l'approche par une série d'*expérimentations* associée à des *indicateurs de performances*.

• *L'étude*

Le *deuxième chapitre* décrit en détail la structure décisionnelle envisagée, propose un modèle de macro ordonnancement limité dans un premier temps à la prise en compte de politiques de gestion traditionnelles. Il définit également le mécanisme d'agrégation de données qu'il convient de mettre en IJuvre dans ce contexte. Il matérialise les interactions du niveau supérieur vers le niveau inférieur en proposant un premier *mécanisme de guidage*. Une première expérimentation illustre l'approche.

Le *troisième chapitre* s'intéresse à une *évaluation* plus approfondie de l'approche. Il présente le module d'ordonnancement détaillé retenu pour matérialiser le niveau inférieur de la structure. Il définit un cadre d'expérimentation ainsi que des *indicateurs de performances* indispensables pour l'analyse du comportement de structures multiniveaux. De tels indicateurs mesurent la qualité du résultat par rapport à des approches classiques a

un niveau, la robustesse du macro-ordonnancement, la réalité du guidage, . . . Ce chapitre présente également les résultats d'expérimentations montrant notamment l'influence de la longueur de la période de discrétisation, le taux de contraintes du problème (charge des ressources, densité des ordres de fabrication, . . .) sur les qualités des ordonnancements détaillés obtenus.

Le *quatrième chapitre* propose d'enrichir l'approche sur trois points : par une sophistication des mécanismes de guidage, par l'amélioration de la *robustesse* du niveau supérieur, par la *diversification* des leviers décisionnels pris en compte (traduit par la diversification des critères du macro-ordonnancement). Il s'agit d'apprécier l'impact de ces différents points sur les indicateurs de performance associés à l'approche.

Le *cinquième chapitre* enrichit la problématique en s'intéressant aux ressources alternatives. Dans ce contexte il propose différents mécanismes d'agrégation de ressources et différents modèles de macro-ordonnancement. Des expérimentations permettent ici également d'apprécier le comportement du niveau supérieur de la structure.

Conclusion du chapitre 1

Ce chapitre introductif nous a permis de définir quelques notions essentielles pour positionner cette étude. La première partie nous a donné les définitions de base et la classification des systèmes de production, où nous avons pu dégager le type de système de production auquel nous nous intéressons, *le système de production à la commande*.

Nous avons vu dans la deuxième partie comment est organisé un système de gestion de production et nous avons détaillé les différents niveaux de décision. Cette thèse s'intéresse plus particulièrement aux *niveaux tactique et opérationnel*.

Ce chapitre a également présenté les différentes techniques de modélisation des problèmes d'ordonnancement de la production. L'intérêt de notre étude se concentre sur une modélisation et une résolution par la *programmation linéaire* ainsi que par des *heuristiques*.

Etant donné que nous allons proposer une approche multiniveaux pour l'ordonnancement il est apparu judicieux de présenter les notions caractéristiques des structures multiniveaux en gestion de production. Ceci nous a permis de positionner notre étude dans la classe de *l'ordonnancement hiérarchisé*.

Enfin, nous avons décrit l'objectif général de cette thèse, en décrivant brièvement le contexte général de l'étude ainsi comme l'approche considérée.

Chapitre 2

Approche multiniveaux pour la gestion de la production à la commande

Introduction au chapitre 2

Face aux défis qui doivent confronter les industriels (productivité, tenue des délais de livraison, réactivité,...) au niveau de compétitivité, l'entreprise doit adopter des nouveaux modes de fonctionnement (réseaux d'entreprise, chaînes logistiques). Dans de tels modes de fonctionnement, la gestion des activités dans les entreprises devient un élément fondamental. De manière à maîtriser les caractéristiques de ces nouveaux types de fonctionnement : complexité des modèles, incertitudes des données, etc. une décomposition de la prise de décisions est réalisée par la mise en œuvre d'approches multiniveaux basées sur les notions d'agrégation des données et de désagrégation des décisions. Dans de telles structures décisionnelles les niveaux supérieurs élaborent des décisions agrégées à partir de données et de modèles agrégés qui sont désagrégées par affinements successifs par les niveaux inférieurs de décisions.

L'objet de ce chapitre est de proposer une structure multiniveaux capable de faire face aux caractéristiques des nouveaux types de fonctionnement évoqués précédemment. Pour effectuer cela il est nécessaire d'établir des mécanismes d'agrégation - désagrégation, ainsi que des mécanismes de communication entre niveaux de la structure décisionnelle.

Ce chapitre est décomposé de cinq parties :

- Dans la première partie, nous décrivons le cadre général et la problématique de l'étude ainsi que les caractéristiques de la structure décisionnelle à deux niveaux associée à cette problématique.
- Dans la deuxième partie, nous présentons le modèle de macro-ordonnancement de base associé au niveau supérieur de la structure décisionnelle retenue. La formulation conduit à un programme linéaire en variables mixtes, qui exprime les souhaits du décideur face aux différents leviers décisionnels.
- La troisième partie, est consacrée à la notion fondamentale sur laquelle repose l'approche à deux niveaux proposée : l'agrégation temporelle. Nous expliquerons d'abord le mécanisme d'agrégation temporelle qui sera proposé. La perte d'information liée à une telle agrégation est également décrite. Pour pallier cela, un mécanisme de correction de dates par opérations fictives est présenté. En fin de

section une description de l'agrégation de la capacité liée à l'agrégation temporelle est présente.

- La quatrième partie présente le mécanisme de guidage proposé utilisant le positionnement global des OF, planifiés par le module de Macro-ordonnancement. Un exemple simple est traité avec cette méthode afin d'illustrer son utilisation.
- Finalement, la cinquième partie présente la mise en œuvre de la structure multiniveaux avec les mécanismes d'agrégation et de guidage développés dans ce chapitre. Un même exemple est traité sans et avec introduction d'opérations fictives pour matérialiser l'intérêt des opérations fictives.

2.1 Présentation de la problématique et de la structure décisionnelle

Nous présentons dans un premier temps la problématique et l'approche multiniveau que nous avons retenue. Ensuite, les fonctionnalités associées aux différents niveaux de la structure sont présentées afin de comprendre le rôle de chaque niveau et leurs interactions dans la structure décisionnelle.

2.1.1 Description de la problématique

Nous nous situons dans un environnement de production à la commande où des décisions de diverses natures doivent être prises pour organiser au mieux la production et pour réduire les coûts. Dans ce contexte, les demandes qui émanent des clients sont des ordres de fabrication (OF). Une date de début au plus tôt, souvent liée à la disponibilité des matières, et une date de fin souhaitée (date due) sont associées à chaque OF. Ces dates définissent la fenêtre de réalisation de l'OF. Un OF est constitué d'un ensemble d'opérations (OP) dont l'enchaînement est défini par une gamme opératoire linéaire. Les opérations de la gamme ont un seul mode opératoire. Elles ont des durées opératoires connues et nécessitent des ressources.

Les ressources ont une capacité limitée; leur disponibilité au cours du temps est supposée connue (calendrier d'ouverture).

Pour organiser au mieux la production, le planificateur a à sa disposition différents leviers décisionnels. Ainsi, un OF peut être fabriqué en interne ou complètement sous-traité pour réduire la charge et permettre éventuellement une meilleure tenue des délais. Il est également possible d'avoir recours à des heures supplémentaires ou d'accepter certains retards. D'autres leviers décisionnels peuvent être imaginés tels que le lissage des entrées financières liées à l'achèvement des OF, l'importance accordée à certains clients jugés prioritaires, etc.

Les préférences du décideur sur ces différents leviers décisionnels sont matérialisées par des poids (coûts) qui traduisent leur importance relative.

L'objectif est de définir une politique de gestion (production en interne, sous-traitance, acceptation de retards, recours aux heures supplémentaires) et d'ordonner les ordres de fabrication le mieux possible tout en prenant en compte la politique de gestion souhaitée.

Il est donc nécessaire d'une part, d'ordonnancer les opérations sur les ressources et dans le temps en respectant les contraintes technologiques (gammes, disponibilité de ressources) et les contraintes temporelles (dates de disponibilité des matières premières, dates de fin). D'autre part il est également important de maîtriser les leviers décisionnels et d'effectuer des ajustements de capacité (lissage de charges, gestion de sous-traitance et des heures supplémentaires, et des calendriers d'ouvertures de ressources).

Actuellement, l'offre en outils logiciels dans le domaine de l'ordonnancement est vaste. Malheureusement, les outils généralement proposés aux décideurs manquent d'une vision à moyen terme et proposent très peu de possibilités pour les ajustements de charge-capacité des ressources et de manière plus générale pour le choix de leviers décisionnels pertinents. Les outils traditionnels existants sont bien adaptés aux problèmes d'ordonnancement à court terme ou en temps réel. Par contre, ils ne permettent pas d'effectuer une gestion adéquate à moyen terme de la capacité et ne sont pas en mesure de faire une optimisation globale des politiques de gestion. En effet, ils ont à traiter un nombre très important de données détaillées, ce qui ne permet pas de mettre en œuvre d'optimisation globale. Ils sont en général basés sur des règles locales de priorité. Les outils avancés de planification tels que les APS (*Advanced Planning Systems*) aident les décideurs à planifier la capacité mais ne rendent en général pas possible le traitement simultané de l'ordonnancement des tâches et de l'adéquation de la charge-capacité.

Dans ce travail de thèse, nous proposons une approche à deux niveaux basée sur une agrégation temporelle de manière à synchroniser et rendre cohérentes les décisions associées au moyen terme et les décisions associées au court terme.

2.1.2 Approche retenue et structure décisionnelle considérée

La structure retenue comporte deux niveaux décisionnels. Le niveau supérieur travaille sur un horizon moyen terme, qui est divisé en périodes de longueurs identiques (périodes de planification). La longueur des périodes est supposée plus grande que la durée maximale des opérations à ordonnancer. Ce niveau positionne les OF et leurs opérations dans les périodes de l'horizon en prenant en compte les contraintes de gamme et de disponibilité de ressources. Il intègre les leviers décisionnels tels que la sous-traitance, la gestion des heures supplémentaires, la minimisation des retards, etc. et définit donc également la politique de gestion la plus adaptée. L'ensemble des décisions associées à ce niveau sont relatives à des périodes. Elles constituent un "macro-ordonnancement". L'objectif du niveau supérieur est donc d'établir un **macro-ordonnancement optimisé à moyen terme**.

Les caractéristiques du macro-ordonnancement optimisé obtenu sont partiellement ou totalement transmises au niveau inférieur afin de "guider" la construction d'un ordonnancement détaillé cohérent avec le macro-ordonnancement obtenu. Les informations transmises au niveau inférieur constituent le **guidage**, qui est une notion importante dans la structure proposée.

Le niveau inférieur **affine** le positionnement "global" défini par le niveau supérieur. À ce niveau, l'échelle de temps est continue et l'on recherche un ordonnancement détaillé qui positionne finement les opérations dans le temps et sur les ressources. Cet affinement peut être mis en œuvre dans le court-terme (seulement les premières périodes de l'horizon sont concernées) et il peut être mis à jour dynamiquement. Il est basé sur les informations détaillées disponibles à court-terme (qui ne sont pas intégrées au niveau su-

périeur) et prend en compte l'ensemble des contraintes de gamme et de disponibilité des ressources. Le niveau inférieur s'appuie sur le guidage qui émane du niveau supérieur. A travers ce guidage, il intègre l'optimisation réalisée et exploite la flexibilité donnée par le macro-ordonnancement pour prendre en compte ses propres contraintes locales. Le niveau inférieur fournit donc un **ordonnancement sur le court terme, faisable pour l'ensemble des contraintes et cohérent dans la mesure du possible avec le guidage issu du niveau supérieur**. La figure 2.1 montre les différentes étapes de l'approche proposée.

L'approche à deux niveaux que nous proposons est bien adaptée à la problématique évoquée précédemment, et elle présente plusieurs avantages théoriques et pratiques. Elle permet de définir un positionnement grossier mais optimisé des OF sur un horizon discrétisé à moyen terme (réalisé par le niveau supérieur). L'approche, permet ainsi de prévoir des ajustements de capacité sans considérer les détails jugés inutiles pour cette fonction (ordonnancement détaillé dans les périodes).

Le raffinement est obtenu à partir des mécanismes de guidage qui seront proposés ultérieurement (paragraphe 4 de ce chapitre pour le mécanisme de guidage de base). Les mécanismes de guidage permettent de "ramener" le problème détaillé à un problème d'ordonnancement "classique" qui peut donc être résolu en utilisant des méthodes de résolution déjà développées (méthodes exactes ou heuristiques) ou en faisant appel à des logiciels d'ordonnancement du commerce.

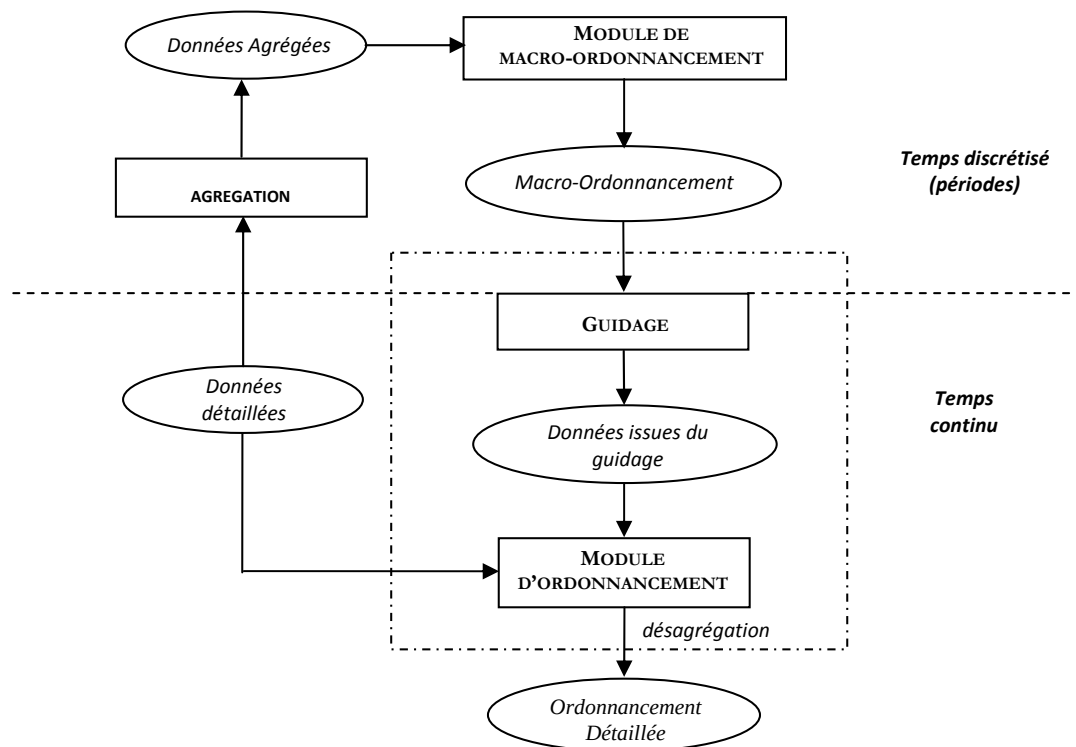


FIG. 2.1 – Éléments de la structure décisionnelle à deux niveaux

Il est important de remarquer d'une part qu'un point fort de l'approche est l'avantage lié à l'agrégation et plus particulièrement à l'agrégation du temps (réduction de la taille et la complexité du problème agrégé, optimalité et flexibilité du macro-ordonnancement obtenu). Mais il est important aussi de rappeler que les mécanismes d'agrégation peuvent

générer des inconsistances entre des niveaux décisionnels successifs. Ainsi, la faisabilité globale de l'approche doit être étudiée ainsi que les relations entre niveaux décisionnels [Schneeweiss, 1999]. Il est important d'analyser finement la robustesse des décisions issues du niveau de macro-ordonnancement comme cela a été mentionné dans [Dauzère-Pérès et Lasserre, 2002] et [Mercé et Fontan, 2001].

Finalement, dans le cadre de notre travail, un des buts principaux est d'étudier le comportement de l'approche face à des différentes longueurs des périodes de discrétisation. En effet, la longueur de discrétisation peut affecter la qualité des solutions obtenues ainsi que la robustesse ; cet aspect sera étudié par les expérimentations que nous allons effectuer.

2.1.3 Eléments clés de la structure

Pour compléter la description de la structure dont les fonctionnalités viennent d'être présentées et permettre sa mise en œuvre effective, il est important :

- de proposer une modélisation du niveau supérieur qui permettra d'obtenir le macro-ordonnancement
- de définir comment les données associées au niveau supérieur (relatives à des périodes) peuvent être obtenues à partir des données initiales (exprimées sur le temps continu) dans le cadre de l'agrégation du temps retenue
- de préciser un mécanisme de guidage liant le niveau supérieur et le niveau inférieur
- de choisir une approche de résolution au niveau inférieur.

Les paragraphes suivants de ce chapitre présentent l'ensemble de ces éléments.

Le chapitre 3 sera consacré à l'évaluation des performances de la structure proposée notamment en fonction de la longueur de la période de discrétisation choisie au niveau supérieur. En effet, ce choix est fondamental dans la structure : il définit le "niveau d'agrégation" et fixe la granularité du macro-ordonnancement.

2.1.4 Notations de base

Sont présentées ici les données du problème initial et les notations associées.

- Données associées aux dimensions du problème

NOF : nombre d'Ordres de Fabrication
 NOP_i : nombre d'opérations de l'OF i
 NR : nombre de ressources

- Données associées aux OF

i : indice d'un OF ($i = 1 \dots NOF$)
 rd_i : date de début au plus tôt de l'OF i (rd pour "release date")
 dd_i : date de fin au plus tard souhaitée de l'OF i (dd pour "due date")

- Données associées aux opérations

i, j : j ème opération de l'OF i (les opérations sont numérotées dans l'ordre de la gamme)

p_{ij} : durée de l'opération j de l'OF i

m_{ijr} : consommation de l'opération j de l'OF i sur la ressource r

Nous pouvons remarquer que cette double caractérisation (durée opératoire et consommation) enrichit la modélisation et facilite la prise en compte certaines caractéristiques industrielles telles que l'utilisation d'une ressource (un opérateur par exemple) pendant une partie de l'opération.

La figure 2.2 illustre les notations précédentes.

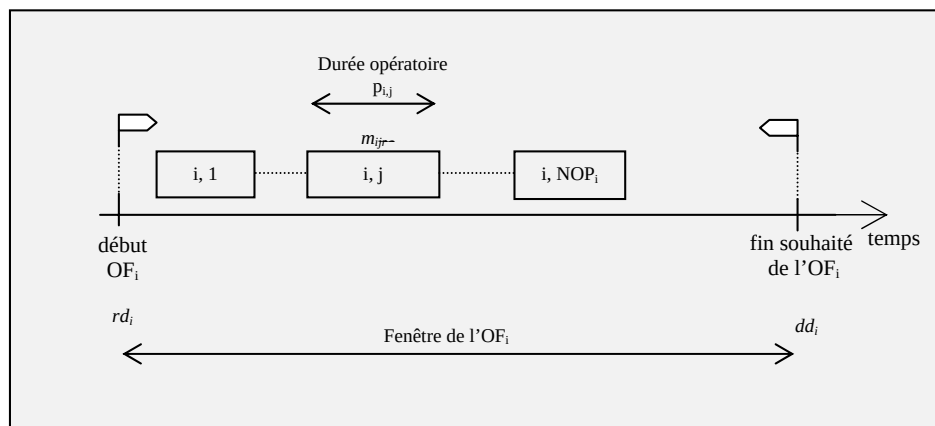


FIG. 2.2 – Notion d'un OF

2.2 Modélisation du niveau Macro-ordonnancement

Dans ce paragraphe nous présentons le modèle de macro-ordonnancement associé au niveau supérieur de la structure décisionnelle. Nous présenterons d'abord l'objectif du modèle pour ensuite entrer dans la modélisation mathématique du problème.

2.2.1 Objectif du modèle

Rappelons que le module de macro-ordonnancement doit d'une part définir le positionnement des OF et des OP sur les périodes de l'horizon et doit d'autre part intégrer les leviers décisionnels à disposition du décideur ainsi que les préférences de celui-ci. Le problème de macro-ordonnancement que nous venons de définir est formalisé par un programme linéaire en variables mixtes qui nous permet d'optimiser le positionnement des opérations appartenant aux OF sur les périodes de l'horizon. Autrement dit, il s'agit de préciser quand réaliser les OF en définissant les périodes de début et de fin associées de manière à satisfaire au mieux la date de fin au plus tard tout en respectant la date de début au plus tôt et la capacité des machines. Les préférences du décideur étant matérialisées par des coûts (poids relatifs des différents leviers), le but est de minimiser l'ensemble des coûts sur l'horizon pour obtenir le meilleur compromis.

Il faut mentionner que le modèle présenté dans ce chapitre est construit en visant un ensemble d'objectifs "classiques" basé simplement sur la minimisation des coûts de retard et d'avance des OF, du recours aux heures supplémentaires et/ou à la sous-traitance. Dans le chapitre 4 nous présentons quelques extensions au modèle de macro-ordonnancement proposé et donc un autre objectif à optimiser tel que par exemple la minimisation des en-cours.

Il est important de remarquer que certaines données qui alimentent le modèle de macro-ordonnancement que nous allons présenter sont des données agrégées c'est à dire relatives à des périodes. Les mécanismes d'agrégation qui permettent d'obtenir ces données "agrégées" à partir des données initiales présentées dans le paragraphe 2.1.4 sont présentés ultérieurement (paragraphe 3 de ce chapitre).

2.2.2 Les données associées au modèle

Le modèle de macro-ordonnancement est basé sur un ensemble de données qui ont été décomposées en données : *temporelles*, *associées aux ressources*, *associées aux OF* et *aux OP* et *associées aux coûts*.

- **Données temporelles**

T : nombre de périodes de l'horizon moyen terme considéré
 t : indice d'une période ($t = 1, \dots, T$)
 lg : longueur de la période

Ces paramètres - longueur de l'horizon et plus particulièrement longueur de la période - caractérisent la granularité temporelle associée au niveau supérieur. Plus longue est la période, plus importante est l'agrégation mise en œuvre. L'influence de ces choix sera plus particulièrement étudiée dans le cadre du chapitre 3.

- **Données associées aux OF**

i : indice d'un OF ($i = 1, \dots, NOF$)
 NOF : nombre d'Ordres de Fabrication
 NOF_i : nombre d'opérations de l'OF i
 RP_i : **période** de début au plus tôt de l'OF i (Obtenue par agrégation)
 DP_i : **période** de fin au plus tard souhaitée de l'OF i (Obtenue par agrégation)

- **Données associées aux opérations**

i, j : j ème opération de l'OF i ($j = 1, \dots, NOF_i$)
 p_{ij} : durée de l'OP j de l'OF i
 m_{ijr} : consommation de l'OP j de l'OF i sur la ressource r

- **Données associées aux ressources**

NR	: nombre de ressources
$Capa_{rt}$	: capacité de la ressource r sur la période t (en nombre d'heures régulières disponibles) - cette capacité est obtenue par agrégation de la disponibilité des ressources
Hrs_Max_{rt}	: nombre max d'heures supplémentaires autorisées sur la ressource r pendant la période t

- **Coûts associés aux leviers décisionnels**

Ct_ret_i	: coût associé à un retard de 1 période de l'OF i par rapport à la date due
Ct_ava_i	: coût associé à une avance de 1 période de l'OF i par rapport à la date due
Ct_st_i	: coût associé à la sous-traitance de l'OF i
Ct_hsup_{rt}	: coût d'une heure supplémentaire sur la ressource r à la période t

2.2.3 Les variables

Les variables représentant les décisions prises au niveau du macro-ordonnancement sont les suivantes :

X_{ijt}	: variable binaire prenant la valeur 1 si l'OP j de l'OF i est réalisée en période t , 0 sinon
St_i	: variable binaire prenant la valeur 1 si l'OF i est sous-traité, 0 sinon
Ret_i	: nombre de périodes de retard de l'OF i
Ava_i	: nombre de périodes d'avance de l'OF i
$HSup_{rt}$	: nombre d'heures supplémentaires allouées en période t sur la ressource r

Les variables X_{ijt} traduisent le positionnement des opérations sur les périodes et les variables St_i le choix de recourir à la sous-traitance. Ret_i et Ava_i matérialisent le retard ou l'avance d'un OF par rapport à sa date due. $HSup_{rt}$ correspond à un ajustement de capacité d'une ressource par l'intermédiaire d'heures supplémentaires allouées.

2.2.4 Les contraintes

A ce niveau, les contraintes doivent refléter, sous une forme agrégée puisque le temps est matérialisé par des périodes, les caractéristiques du problème décrites précédemment (respect des fenêtres temporelles, gammes, caractéristiques des opérations, etc.).

Les contraintes sont mathématiquement formulées de la manière suivante :

$$\sum_{t=1}^T X_{ijt} + St_i = 1 \quad \forall i \in 1 \dots NOF \quad \forall j \in 1 \dots NOP_i \quad (2.1)$$

$$\sum_{n=1}^t X_{ijn} \geq \sum_{n=1}^t X_{ij+1n} \quad \forall i \in 1 \dots NOF \quad \forall j \in 1 \dots NOP_i \quad \forall t \in T \quad (2.2)$$

$$\sum_{i=1}^{NOF} \sum_{j=1}^{NOP_i} m_{ijr} \times X_{ijt} \leq Capa_{rt} + HSup_{rt} \quad \forall r \in NR \quad \forall t \in T \quad (2.3)$$

$$\sum_{t=RP_i}^T t \times X_{iNOP_it} - DP_i(1 - St_i) = Ret_i - Ava_i \quad \forall i \in 1 \dots NOF \quad (2.4)$$

$$\sum_{t=1}^{RP_i-1} X_{ijt} = 0 \quad \forall i \in 1 \dots NOF \quad \forall j \in 1 \dots NOP_i \quad (2.5)$$

$$HSup_{rt} \leq Hrs_Max_{rt} \quad \forall r \in NR \quad \forall t \in T \quad (2.6)$$

$$\sum_{j=1}^{NOP_i} p_{ij} \times X_{ijt} \leq lg \quad \forall i \in 1 \dots NOF \quad \forall t \in T \quad (2.7)$$

$$X_{ijt}, St_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in 1 \dots NOF \quad \forall j \in 1 \dots NOP_i \quad \forall t \in T \quad (2.8)$$

$$Ret_i, Ava_i, HSup_{rt} \geq 0 \quad \forall i \in 1 \dots NOF \quad \forall r \in NR \quad \forall t \in T \quad (2.9)$$

L'équation (2.1) assure que toutes les opérations de toutes les OF sont réalisées en interne ou sous-traitées. La contrainte (2.2) vérifie le bon enchaînement de toutes les opérations de chaque OF, correspondant à la gamme. On peut remarquer ici que des opérations successives d'un même OF peuvent être positionnées dans une même période. L'enchaînement des opérations **au sein d'une période** est ignoré dans ce modèle agrégé, dans lequel la période est l'unité de temps élémentaire. L'équation (2.3) représente le respect de la capacité et l'attribution des heures supplémentaires. La contrainte (2.4) évalue l'avance et le retard pour chaque OF en nombre de périodes. Ces grandeurs sont évaluées en comparant la **période** dans laquelle est positionnée la dernière opération de la gamme d'un OF à la **période due** DP_i . La contrainte (2.5) assure le respect des périodes de début des OF.

On peut noter ici la non symétrie dans le traitement des périodes de début au plus tôt et de fin au plus tard (période due). En effet, le respect de la période de début au plus tôt (RP_i) est considéré une contrainte dure qu'il est obligatoire de satisfaire, ce qui n'est pas le cas pour la période due. De manière à obtenir le meilleur compromis entre les leviers décisionnels, on pénalisera dans le critère les retards ou avance des OF.

L'équation (2.6) vérifie que les heures supplémentaires attribuées par ressource et par période ne dépassent pas le volume maximum autorisé. Enfin, la contrainte (2.7) vérifie que des OP appartenant à un même OF ne sont affectées à une même période que si

la somme de leurs durées opératoires ne dépasse pas la longueur de cette période. De fait, cette contrainte limite le nombre d'opérations successives d'un même OF affectées à une même période. Cette restriction est importante car elle permet de réduire les risques d'incohérences au sein de la structure. Ce point sera largement développé ultérieurement.

Compte tenu de cette contrainte, si la longueur lg choisie pour la période au niveau supérieur est inférieure à la durée d'une opération, cette opération ne pourra être affectée à aucune période et l'OF associé devra nécessairement être sous-traité. C'est pour éviter cette situation que l'on suppose dans l'ensemble du travail que la longueur (lg) est largement supérieure à toutes les durées opératoires.

2.2.5 Le critère de base

Le critère, aussi appelé fonction objectif, est la somme pondérée par les différents coûts, des termes, avance, retard, sous-traitance et heures supplémentaires. Cette somme est à minimiser sur l'horizon. Elle s'exprime mathématiquement de la manière suivante :

$$\min \sum_{i=1}^{NOF} Ct_ret_i \times Ret_i + Ct_ava_i \times Ava_i + Ct_st_i \times St_i + \sum_{r=1}^{NR} \sum_{t=1}^T Ct_Hsup_{rt} \times HSup_{rt} \quad (2.10)$$

C'est avec ce modèle mathématique que nous générons dans un premier temps le macro-ordonnancement optimisé sur l'horizon. Ce macro-ordonnancement est utilisé pour établir le couplage avec le module d'ordonnancement détaillé sous la forme d'un mécanisme de guidage décrit au paragraphe 4 de ce chapitre.

2.3 Mécanisme d'agrégation temporel

Le mécanisme d'agrégation que nous utilisons permet d'obtenir les données temporelles utilisées au niveau supérieur de notre structure d'ordonnancement à partir des données détaillées. A ce niveau les fenêtres temporelles doivent être définies en termes de périodes et non de dates car l'horizon pris en compte est discrétisé en périodes de longueurs identiques. Cela nous permet de définir un problème de macro-ordonnancement bien adapté aux fonctionnalités du niveau supérieur.

2.3.1 Conversion de dates en périodes

Ce paragraphe décrit le mécanisme élémentaire d'agrégation temporelle de l'approche, c'est à dire la conversion des **dates** (détaillées) du problème original en **périodes**. Cette transformation est faite en fonction de la longueur de discrétisation souhaitée.

Etant donnée la longueur lg choisie, une période $t (\forall t \in [1, T])$ couvre toutes les dates appartenant à l'intervalle $[(t-1) \times lg, t \times lg]$. Pour transformer (agréger) les dates de début au plus tôt (rd_i) et les dates dues (dd_i) en périodes de début au plus tôt (RP_i) et périodes dues (DP_i) qui sont utilisées dans le modèle de macro-ordonnancement, nous

utilisons les formules (2.11) et (2.12) respectivement. Elles permettent d'associer aux dates (de début ou de fin) les périodes auxquelles appartiennent ces dates.

$$RP_i = \left\lceil \frac{rd_i}{lg} \right\rceil + 1 \quad (2.11)$$

$$DP_i = \left\lceil \frac{dd_i}{lg} \right\rceil \quad (2.12)$$

avec $\lceil x \rceil$ (respectivement $\lfloor x \rfloor$) étant l'arrondi à l'entier supérieur (respectivement inférieur) de x .

A titre d'illustration, cette agrégation des fenêtres associées aux OF est appliquée sur l'exemple simple dont les données sont définies dans les tableaux 4 et 5.

L'exemple comprend 4 OF et le tableau 2.1 donne la fenêtre temporelle exprimée en dates associée à chaque OF. Les OF comportent de 3 à 5 opérations, numérotées en fonction de la gamme ; le tableau 2.2 indique la durée et la ressource requise par chaque opération.

OF_i	rd_i	dd_i
1	0	12
2	0	21
3	0	10
4	3	26

TAB. 2.1 – Fenêtres temporelles initiales du problème

OF \ OP	1	2	3	4	5
1	3 R1	3 R3	4 R2	2 R4	-
2	4 R2	6 R1	6 R3	3 R4	-
3	3 R4	3 R1	4 R3	-	-
4	3 R4	2 R3	6 R2	6 R1	2 R4

TAB. 2.2 – Durées opératoires et ressources requises

Considérons une discrétisation de $lg = 6$. En appliquant les formules (2.11) et (2.12), nous obtenons les périodes de début et fin rapportées dans le tableau 2.3 :

La figure 2.3 matérialise les fenêtres temporelles initiales et les fenêtres obtenues par agrégation.

Il apparaît que l'agrégation conduit en pratique à un surdimensionnement des fenêtres temporelles associées aux OF ; les contraintes temporelles du problème considérées au niveau agrégé sont donc "relâchées" par rapport à celles du problème initial. Le surdimensionnement devient plus important lorsque la longueur de la période s'accroît.

OF_i	RP_i	DP_i
1	1	2
2	1	4
3	1	2
4	1	5

TAB. 2.3 – Fenêtres temporelles agrégées du problème

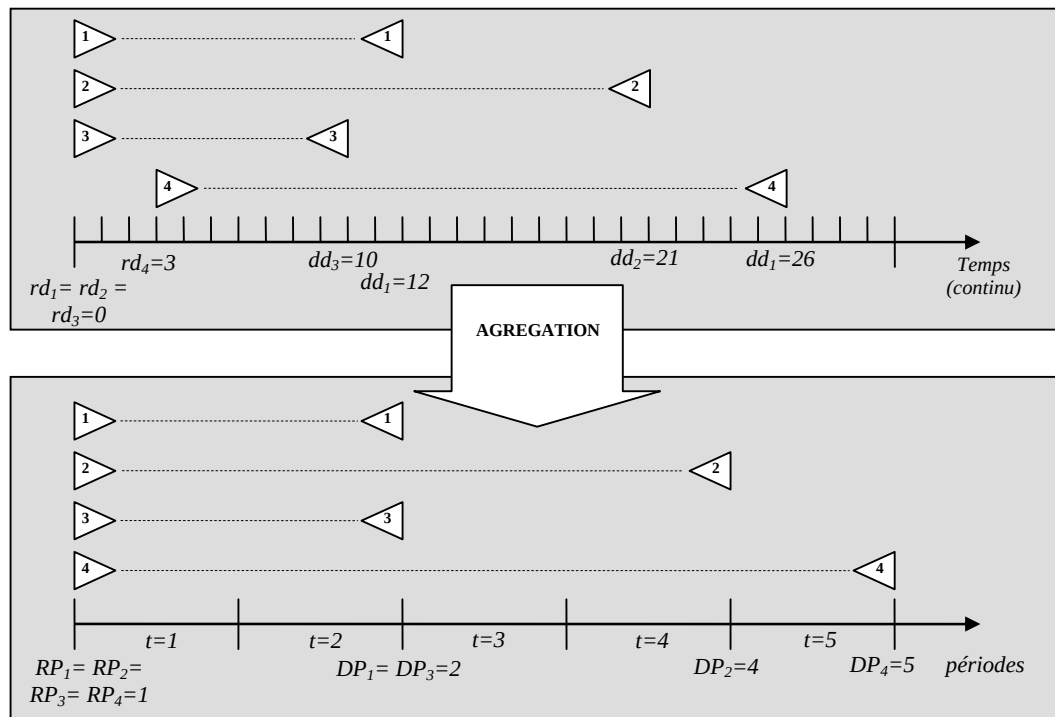


FIG. 2.3 – Surdimensionnement des fenêtres

L'introduction "d'opérations fictives" lors de la phase d'agrégation vise à compenser ce surdimensionnement ; ces opérations fictives peuvent également être utilisées lors de l'étape de désagrégation (guidage), pour élaborer avec le plus de précision possible les dates détaillées guidantes transmises au niveau inférieur.

2.3.2 Introduction d'opérations fictives dans les gammes

Dans ce paragraphe, nous introduisons une nouvelle notion pour diminuer les effets de l'agrégation temporelle notamment au niveau de la perte de précision expliquée précédemment. Afin de limiter l'impact du surdimensionnement de la fenêtre, nous complétons la gamme associée à un OF en introduisant deux opérations supplémentaires appelées "opérations fictives" : une opération fictive placée en début de gamme notée $(i, 0)$ et une opération fictive placée en fin de gamme notée $(i, NOP_i + 1)$. Ces opérations fictives ne consomment pas de ressources ($m_{i,0,r} = 0$ et $m_{i,NOP_i+1,r} = 0$, $\forall i, \forall r$) ce qui explique leur dénomination de fictive. Leurs durées sont calculées de manière à compenser le sur-dimensionnement introduit par l'agrégation. Les formules associées aux calculs des

durées des opérations fictives sont respectivement les suivantes :

$$p_{i,0} = rd_i - [(RP_i - 1) \times lg] \quad (2.13)$$

$$p_{i,NOP_i+1} = [(DP_i \times lg) - dd_i] \quad (2.14)$$

Pour mieux illustrer l'application des formules (2.13) et (2.14), nous calculons les durées des opérations fictives sur l'exemple précédent. La figure 2.4 matérialise les fenêtres temporelles agrégées et les opérations fictives introduites.

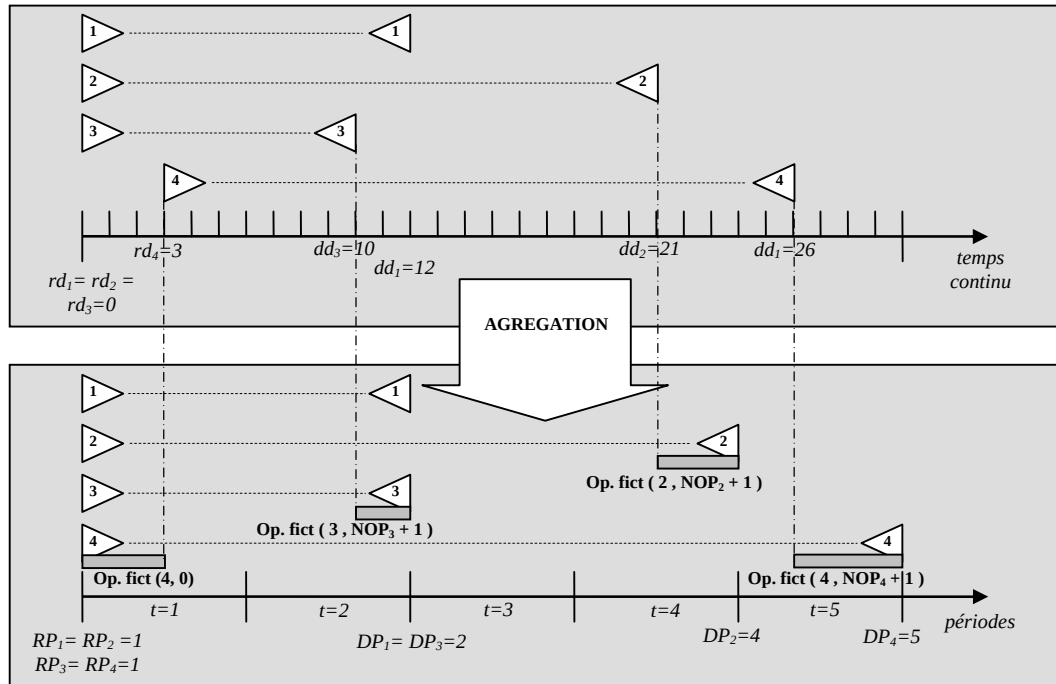


FIG. 2.4 – Introduction d'opérations fictives

Les nouvelles gammes sont récapitulées dans le tableau 2.4, dans lequel les opérations fictives sont présentées en gras.

$OF_i \backslash OP_i$	0	1	2	3	4	5	6
1	0-	3 R1	3 R3	4 R2	2 R4	0-	-
2	0-	4 R2	6 R1	6 R3	3 R4	3-	-
3	0-	3 R4	3 R1	4 R3	2-	-	-
4	0-	3 R4	2 R3	6 R2	6 R1	2 R4	4-

TAB. 2.4 – Durées opératoires avec opérations fictives

Ainsi après agrégation pour $lg = 6$, les OF du problème décrit de manière détaillée dans les tableaux 2.1 et 2.2 ont donc les caractéristiques agrégées décrites dans les tableaux 2.3 (fenêtres temporelles) et 2.4 (gammes opératoires).

Les opérations fictives introduites dans la gamme des OF sont positionnées dans des périodes par le module de macro-ordonnancement au même titre que les autres opérations. Il est important de rappeler qu'elles ne consomment pas de ressource et que seule leur durée opératoire intervient dans le modèle (contrainte (2.7)). Leur positionnement est exploité dans le cadre du guidage par les dates décrit au paragraphe 2.4.

2.3.3 Modèle de macro-ordonnancement avec opérations fictives

Le modèle de macro-ordonnancement doit permettre d'optimiser le positionnement des opérations appartenant aux OF sur les périodes de l'horizon toute en respectant au mieux la date de fin au plus tard et la date de début au plus tôt. Le respect des dates de fin est renforcé par l'introduction des opérations fictives de fin, permettant ainsi de respecter au maximum la vraie date détaillée (date exacte). L'objectif du modèle est de minimiser le retard de l'opération de fin de la gamme d'un OF ainsi que le retard de l'opération fictive.

Afin de pouvoir intégrer les opérations fictives au modèle de Macro-ordonnancement nous reprenons donc le modèle de macro-ordonnancement de base présenté au paragraphe 2.2. Celui-ci est élargi à la prise en compte des opérations fictives (j varie de $0 \dots NOP_i + 1$). Les variables Ret_{i,NOP_i} et Ret_{i,NOP_i+1} définissent le retard de l'opération (i, NOP_i) et de l'opération fictive de fin ($i, NOP_i + 1$) par rapport à la date due de l'OF. Ces variables sont calculées par la contrainte 4' qui permet d'évaluer le retard et l'avance de la dernière opération de l'OF et de la dernière opération fictive.

$$\sum_{t=1}^T X_{ijt} + St_i = 1 \quad \forall i \in 1 \dots NOF \quad \forall j \in 0 \dots NOP_i + 1 \quad (2.1')$$

$$\sum_{n=1}^t X_{ijn} \geq \sum_{n=1}^t X_{ij+1n} \quad \forall i \in 1 \dots NOF \quad \forall j \in 0 \dots NOP_i + 1 \quad \forall t \in T \quad (2.2')$$

$$\sum_{i=1}^{NOF} \sum_{j=1}^{NOP_i} m_{ijr} \times X_{ijt} \leq Capa_{rt} + HSup_{rt} \quad \forall r \in NR \quad \forall t \in T \quad (2.3')$$

$$\sum_{t=RP_i}^T t \times X_{ijt} - DP_i(1 - St_i) = Ret_i - Ava_i \quad \forall i \in 1 \dots NOF \quad \forall j \in NOP_i, NOP_i + 1 \quad (2.4')$$

$$\sum_{t=1}^{RP_i-1} X_{ijt} = 0 \quad \forall i \in 1 \dots NOF \quad \forall j \in 0 \dots NOP_i + 1 \quad (2.5')$$

$$HSup_{rt} \leq Hrs_Max_{rt} \quad \forall r \in NR \quad \forall t \in T \quad (2.6')$$

$$\sum_{j=1}^{NOP_i+1} p_{ij} \times X_{ijt} \leq lg \quad \forall i \in 1 \dots NOF \quad \forall t \in T \quad (2.7')$$

$$X_{ijt}, St_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in 1 \dots NOF \quad \forall j \in 1 \dots NOP_i \quad \forall t \in T \quad (2.8')$$

$$Ret_i, Ava_i, HSup_{rt} \geq 0 \quad \forall i \in 1 \dots NOF \quad \forall r \in NR \quad \forall t \in T \quad (2.9')$$

Le critère de même est sensiblement modifié pour pouvoir prendre en compte l'introduction d'opérations fictives.

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^{NOF} \sum_{j=NOP_i}^{NOP_i+1} Ct_ret_i \times Ret_{ij} + Ct_ava_i \times Ava_{ij} + Ct_st_i \times St_i \\ + \sum_{r=1}^{NR} \sum_{t=1}^T Ct_Hsup_{rt} \times HSup_{rt} \end{aligned} \quad (2.10')$$

Il faut remarquer que ce nouveau critère pénalise le retard de la vraie dernière opération de l'OF i (i, NOP_i) et de l'opération fictive ($i, NOP_i + 1$). Cela nous permettra de contrôler d'une part le positionnement de la vraie dernière opération par rapport à sa date due et d'autre part le positionnement de l'opération fictive qui sert à corriger les dates.

2.3.4 Agrégation de la disponibilité des ressources en capacité par période

Comme cela a été expliqué dans les paragraphes précédents, l'agrégation temporelle conduit à ne plus considérer le temps comme une caractéristique continue mais comme une caractéristique discrète (périodes).

Au niveau détaillé, une ressource est caractérisée par sa capacité instantanée c'est à dire par le nombre d'unités de ressources pouvant être simultanément utilisées à une date donnée. A titre d'exemple, la figure 2.5 montre l'évolution au cours du temps de la capacité instantanée d'une ressource donnée. L'agrégation de cette disponibilité sur une période fournit le nombre d'heures de travail globalement disponibles pour la ressource sur la période. C'est cette capacité globale notée $Capa_{rt}$ qui est prise en compte dans la contrainte 2.3 (ou 2.3') du modèle de macro-ordonnancement. La figure 2.6 donne la capacité de la ressource obtenue par agrégation de la capacité instantanée pour des périodes de longueur 6.

Dans chaque période la capacité agrégée dépend donc de la disponibilité détaillée (qui est liée aux calendriers d'ouverture des ressources, aux fenêtres de maintenance, aux réglages, ...). Dans le modèle de macro-ordonnancement proposé, cette capacité peut être augmentée par l'utilisation d'heures supplémentaires en fonction des besoins liés au positionnement des OF.

Ce mécanisme d'agrégation qui ignore l'évolution de la disponibilité détaillée des ressources au sein d'une période génère une perte d'information au niveau supérieur pour l'ajustement charge-capacité. Ceci peut être une source de non robustesse des décisions agrégées. Un mécanisme pour diminuer de phénomène sera présenté dans le chapitre 4.

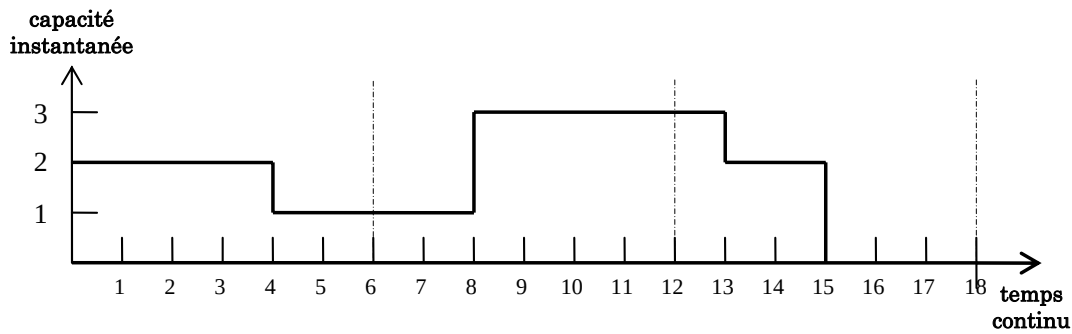


FIG. 2.5 – Capacité instantanée d'une ressource

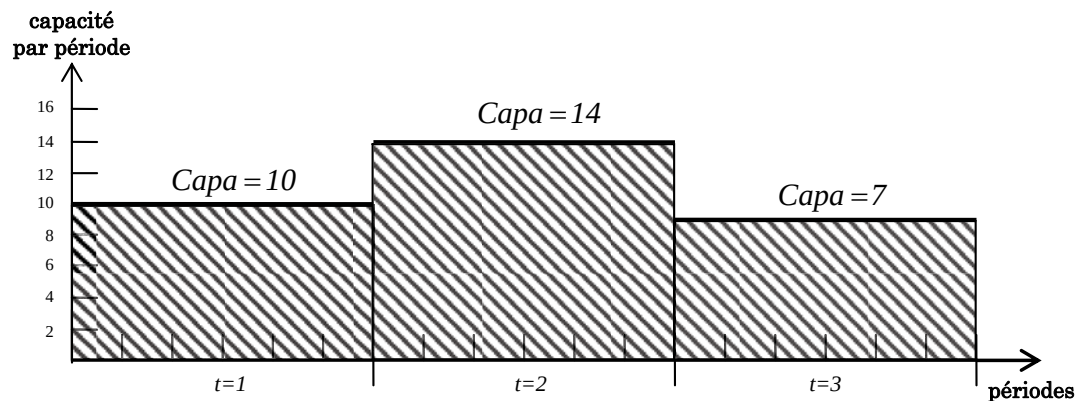


FIG. 2.6 – Capacité agrégée

2.4 Mécanisme de guidage de base proposé

Au niveau supérieur, le macro-ordonnancement est établi de manière à optimiser le critère considéré qui prend en compte l'ensemble des leviers décisionnels disponibles. Ce macro-ordonnancement peut être utilisé de différentes manières pour "guider" ou "contraindre" le niveau inférieur dans l'établissement d'un ordonnancement détaillé. Celui-ci doit d'une part prendre en compte ses propres contraintes et d'autre part "suivre" au mieux le guidage établi.

Le macro-ordonnancement fournit un ensemble d'informations (périodes de début et de fin planifiées de chaque OF, positionnement des opérations dans les périodes, séquençement partiel d'opérations sur les ressources, etc.). Ces éléments peuvent être complètement ou partiellement utilisés pour "guider" le niveau inférieur. Selon la nature et la forme des informations agrégées exploitées, plusieurs types de guidage peuvent être envisagés. Dans cette section nous développons un guidage de base qui s'appuie sur les périodes de début et de fin des OF proposées par le macro-ordonnancement. Pour cette raison, il est appelé "guidage par dates".

2.4.1 Principe du mécanisme de guidage par dates

Le **guidage par dates** est un guidage à partir d'informations partielles qui est basé uniquement sur le positionnement global des OF (périodes de début et de fin planifiées des OF). Il permet d'affiner la fenêtre temporelle associée à chaque OF à partir de

l'optimisation du placement réalisé au niveau supérieur. De nouvelles fenêtres temporelles issues du guidage sont ainsi transmises au niveau inférieur ; celui-ci cherche à établir un ordonnancement compatible avec les contraintes détaillées d'une part et les nouvelles fenêtres temporelles optimisées d'autre part.

Dans le cadre de ce guidage, le niveau inférieur se trouve confronté à un problème d'ordonnancement "classique" et la logique (méthode) d'ordonnancement mise en IJuvre peut s'appuyer sur différents approches (optimisation, heuristiques, ...). La manière dont est résolu le problème d'ordonnancement détaillé dans le cadre de ce travail sera traité au chapitre suivant.

2.4.2 Guidage sans opérations fictives

a) Fenêtre temporelle agrégée optimisée

Après résolution du modèle de macro-ordonnancement, les valeurs des variables X_{ijt} , $i \in [1, NOF]$, $j \in [NOP_i]$, $t \in [1, T]$ fournissent le positionnement optimal de l'ensemble des opérations sur les périodes et sur les ressources. La fenêtre temporelle d'un OF planifiée et optimisée au niveau macro-ordonnancement est définie par les périodes sur lesquelles la première et la dernière opération de cet OF ont été positionnées.

On note :

- SP_i : la période dans laquelle le macro-ordonnancement place la première opération de l'OF i (SP pour "start period").
- CP_i : la période dans laquelle le macro-ordonnancement place la dernière opération de l'OF i (CP pour "completion period").

Ces périodes sont déduites du macro-ordonnancement de la manière suivante :

$$SP_i = \sum_{t=1}^T t \times X_{i1t} \quad (2.15)$$

$$CP_i = \sum_{t=1}^T t \times X_{i,NOP_i,t} \quad (2.16)$$

La fenêtre d'un OF i planifiée par le niveau supérieur est alors représentée par $[SP_i, CP_i]$.

Pour reconstituer une fenêtre temporelle "guidante" en temps continu (c'est à dire "utilisable" au niveau inférieur), il est nécessaire de définir un mécanisme symétrique de celui proposé au paragraphe 2.3.1.

b) Fenêtre "guidante" (transmise au niveau détaillé)

Soit $[rd_i^G, dd_i^G]$ la fenêtre guidante associée à chaque OF i dans laquelle

rd_i^G représente la **date** de début de l'OF i , obtenue par "désagrégation" de la **période** de début de l'OF i dans le macro-ordonnancement (rd_i^G pour "release date" guidante).

dd_i^G représente la **date** de fin de l'OF i obtenue par désagrégation de la **période** de fin de l'OF i dans le macro-ordonnancement (dd_i^G pour "due date" guidante).

La figure 2.7 matérialise les notations associées aux fenêtres temporelles à chaque étape de l'approche.

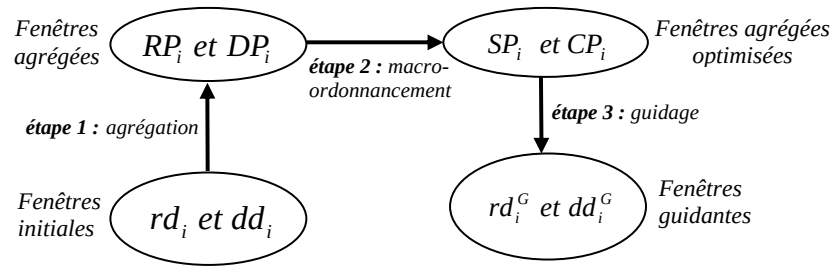


FIG. 2.7 – Notations associées de l'approche

- Détermination de la date de fin guidante dd_i^G

Pour avoir la date de fin guidante d'un OF i à partir du positionnement fourni par le module de macro-ordonnancement, il faut juste de transformer sa période de fin en date continue (cf. figure 2.8) avec :

$$dd_i^G = CP_i \times lg \quad (2.17)$$

- Détermination de la date de début guidante rd_i^G

Les dates de début au plus tôt ne représentent pas un même "niveau" de contrainte que les dates de fin au plus tard dans les problèmes d'ordonnancement. En effet les dates de fin au plus tard peuvent être dépassées (retard) alors que les dates de début au plus tôt ne peuvent être anticipées. Il en découle une forte dissymétrie dans leur traitement qui conduit à un mode de calcul spécifique pour élaborer les dates de début guidantes.

Le calcul de la date de début guidante d'un OF i dépend de la ressource requise par la première opération de cet OF, de la période dans laquelle le macro-ordonnancement place cette opération et des opérations positionnées sur cette même ressource dans des périodes antérieures.

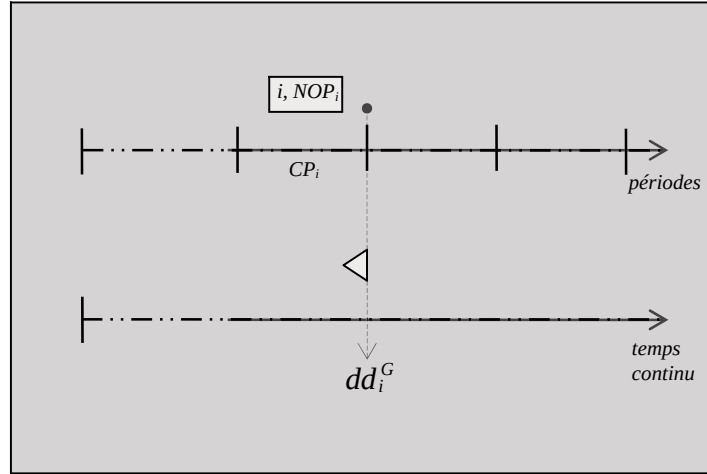


FIG. 2.8 – Détermination de la fin guidante

Soient :

- r_{i1} la ressource requise par l'opération $(i, 1)$ de l'OF i
- SP_i la période sur laquelle est positionnée l'opération $(i, 1)$ dans le macro-ordonnancement.
- O_i l'ensemble des opérations (k, l) nécessitant la ressource r_i et placées par le module de macro-ordonnancement avant la période SP_i .

Nous avons alors :

$$rd_i^G = \max(rd_i, \sum_{(kl) \in O_i} p_{k,l}) \quad (2.18)$$

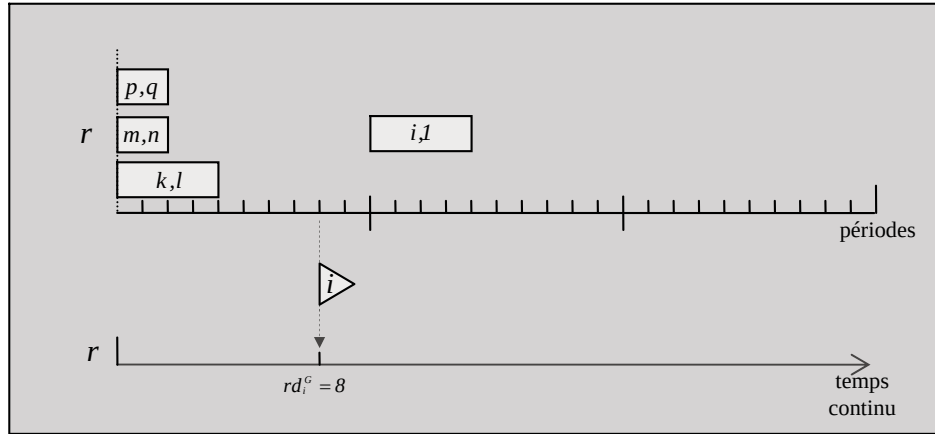
avec :

rd_i : date de début au plus tôt initiale

Pour mieux illustrer ce mécanisme de calcul, nous présentons un exemple numérique simple et une figure associée.

Exemple : Considérons un OF i tel que $rd_i = 3$ et supposons que l'opération $(i, 1)$ de durée 4 requiert la ressource r . La figure 2.9 montre un macro-ordonnancement partiel sur la ressource r pour des périodes de longueur $lg = 10$. Dans l'exemple, on suppose que 3 opérations (k, l) , (m, n) , (p, q) de durées respectives 4, 2 et 2 appartenant à d'autres OF ont été positionnées dans la période précédente sur la même ressource. La date de début guidante de l'OF i devient alors :

$$rd_i^G = \max(3, 4 + 2 + 2) = 8$$

FIG. 2.9 – Exemple de calcul de la date de début rd_i^G

2.4.3 Guidage avec opérations fictives

a) Fenêtre temporelle agrégée optimisée

Comme il a été décrit au paragraphe précédent les valeurs des variables X_{ijt} , $i \in [1, NOF]$, $j \in [NOP_i]$, $t \in [1, T]$ fournissent le positionnement optimal des opérations sur les périodes et sur les ressources. La fenêtre temporelle d'un OF planifiée et optimisée est définie par les périodes sur lesquelles la première et la dernière opération (fictives ou non) de cet OF ont été positionnées.

On note :

SP_i^f : la période dans laquelle le macro-ordonnancement place la première opération fictive de l'OF i

CP_i : la période dans laquelle le macro-ordonnancement place la dernière opération (fictive) de l'OF i .

Ces périodes sont déduites du macro-ordonnancement de la manière suivante :

$$SP_i^f = \sum_{t=1}^T t \times X_{i0t} \quad (2.19)$$

$$CP_i^f = \sum_{t=1}^T t \times X_{i, NOP_i+1, t} \quad (2.20)$$

La fenêtre d'un OF i planifiée par le niveau supérieur est alors représentée par $[SP_i^f, CP_i^f]$ si l'on prend en compte les opérations fictives, $[SP_i, CP_i]$ si l'on ne considère que les opérations réelles.

b) Fenêtre "guidante" (transmise au niveau détaillé)

Soit $[rd_i^G, dd_i^G]$ la fenêtre guidante associée à chaque OF i dans laquelle

rd_i^G représente la **date** de début de l'OF i , obtenue par "désagrégation" de la **période** de début de l'OF i dans le macro-ordonnancement.

dd_i^G représente la **date** de fin de l'OF i obtenue par désagrégation de la **période** de fin de l'OF i dans le macro-ordonnancement.

- **Détermination de la date de fin guidante dd_i^G**

Pour avoir la date de fin guidante d'un OF i à partir du positionnement fourni par le module de macro-ordonnancement, il est nécessaire de mentionner deux situations qui peuvent apparaître selon le positionnement relatif de la dernière vraie opération (i, NOP_i) et de l'opération fictive de fin de gamme $(i, NOP_i + 1)$.

- si la dernière opération d'un OF i et son opération fictive de fin de gamme ne sont pas positionnées dans la même période, la date de fin guidante pour l'OF i correspond à la date de fin de la période où a été placée la dernière opération (cf. figure 2.10).
- si la dernière opération d'un OF i et son opération fictive de fin de gamme sont placées sur la même période, la date de fin guidante pour l'OF est fixée par la date de fin de cette période diminuée de la durée opératoire de l'opération fictive (cf. figure 2.11). Cette interprétation du positionnement de l'opération fictive de fin de gamme permet de définir finement les dates guidantes. Elle est cohérente avec la caractérisation des opérations fictives basée simplement sur une durée opératoire (pas de consommation de ressources).

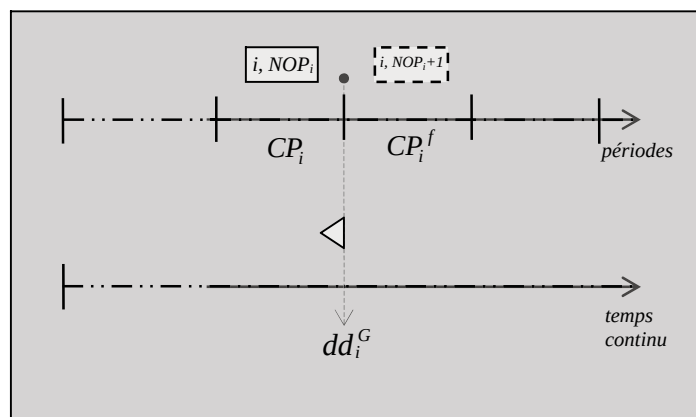


FIG. 2.10 – Détermination de la fin guidante cas a

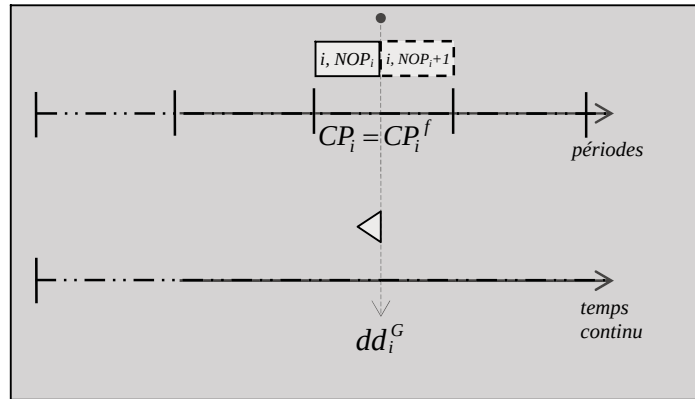


FIG. 2.11 – Détermination de la fin guidante cas b

Le mécanisme de calcul de dates suit alors la démarche suivante :

Algorithme de calcul des dates de fin guidantes

Si $CP_i \neq CP_i^f$
Alors
 $dd_i^G = CP_i \times lg$
Sinon
 $dd_i^G = (CP_i \times lg) - p_{i,NOP_i+1}$
Fin Si

- **Détermination de la date de début guidante rd_i^G**

Le mécanisme de détermination de la date de début guidante est le même que celui utilisé au paragraphe 2.4.2 (guidage sans opérations fictives) utilisant la formule (2.18).

2.5 Mise en œuvre de la structure sur un exemple simple (Influence des opérations fictives)

Pour concrétiser et illustrer les différentes étapes de l'approche proposée, nous présentons leur mise en œuvre sur un exemple volontairement simplifié (pas de sous-traitance, pas d'heures supplémentaires). Pour matérialiser l'influence et l'intérêt des opérations fictives, l'exemple sera traité dans un premier temps sans opérations fictives et dans un deuxième temps avec les opérations fictives. Les résultats des deux tests seront confrontés pour analyser les résultats obtenus. Le problème de macro-ordonnancement est résolu à l'aide du solveur Xpress-MP et l'ordonnancement détaillé est obtenu au niveau inférieur à l'aide d'un module d'ordonnancement détaillé, le logiciel Préactor. Ces deux outils sont présentés en détail dans le chapitre suivant.

L'exemple que nous allons aborder est un Job Shop classique dont chaque opération passe une seule fois sur chaque machine ; les gammes opératoires des OF sont différentes. L'exemple comporte 8 Ordres de Fabrication (OF) avec 5 opérations chacun. Les fenêtres temporelles (dates de début et de fin) de chaque OF sont montrées dans le tableau 2.5.

Les ressources requises par les opérations et les durées opératoires sont montrées dans le tableau 2.6. La première valeur dans chaque cellule du tableau correspond à la durée opératoire ; la deuxième valeur R_x correspond à la ressource requise par l'opération. On suppose que chaque opération requiert une unité de la ressource considérée sur toute sa durée ; on a donc $m_{ijr} = 1 \times p_{ij} = p_{ij}$.

OF i	rd _i	dd _i
1	0	32
2	0	46
3	0	21
4	0	42
5	0	37
6	0	28
7	0	31
8	0	53

TAB. 2.5 – Fenêtres temporelles initiales du problème

OF \ OP	1	2	3	4	5
1	7 R5	5 R2	5 R4	3 R3	6 R1
2	4 R4	3 R5	4 R1	7 R2	3 R3
3	7 R5	6 R3	2 R1	2 R2	4 R4
4	4 R4	2 R1	2 R5	5 R2	2 R3
5	4 R3	7 R5	8 R2	2 R4	4 R1
6	6 R3	8 R5	3 R1	5 R4	4 R2
7	3 R2	4 R1	8 R4	4 R3	5 R5
8	7 R4	8 R1	7 R5	5 R3	8 R2

TAB. 2.6 – Durées opératoires et ressources requises

Dans le cadre de cet exemple, nous choisissons une longueur de période $lg = 12$. Les ressources sont supposées disponibles sur tout l'horizon (pas de calendrier d'ouverture). On a donc $Capa_{rt} = 12$ pour tout r et tout t .

2.5.1 Exemple traité sans opérations fictives

a) agrégation des fenêtres temporelles

Il faut d'abord transformer les dates détaillées en caractéristiques temporelles en temps discret (périodes de début et de fin). Pour cela, nous appliquons les formules (2.11) et (2.12) présentées dans ce chapitre. Le tableau 2.7 montre les périodes de début et de fin (fenêtres temporelles agrégées) associées à chaque OF.

Les gammes opératoires décrites par le tableau 2.6 restent inchangées (pas d'opérations fictives).

	Fenêtres initiales		Fenêtres agrégées	
OF _i	rd _i	dd _i	RP _i	DP _i
1	0	32	1	3
2	0	46	1	4
3	0	21	1	2
4	0	42	1	4
5	0	37	1	4
6	0	28	1	3
7	0	31	1	3
8	0	53	1	5

TAB. 2.7 – Fenêtres temporelles agrégées du problème (avec $lg = 12$)

b) *macro-ordonnancement et fenêtres agrégées optimisées*

A partir de ces caractéristiques agrégées, nous résolvons le modèle du niveau supérieur avec le logiciel Xpress et obtenons le macro-ordonnancement présenté dans la figure 2.12.

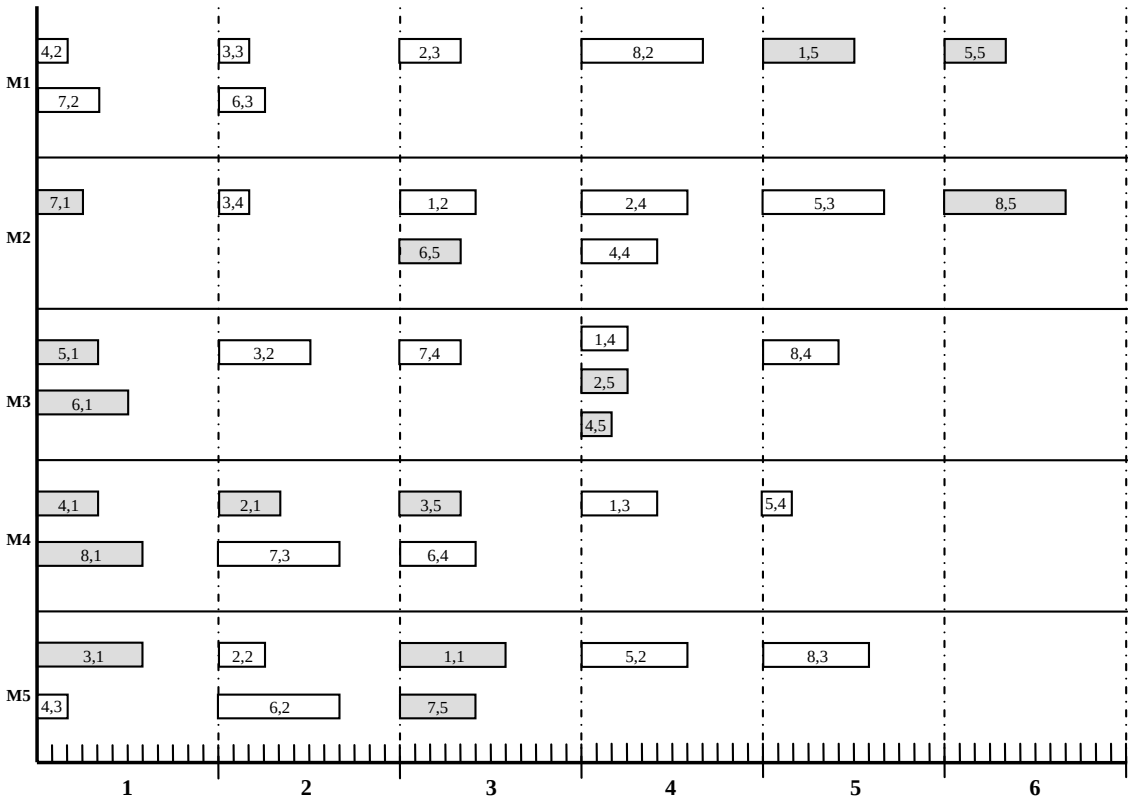


FIG. 2.12 – Macro-ordonnancement ($lg = 12$)

Les opérations de début et de fin de gamme sont représentées avec une couleur plus foncée pour mieux les situer sur les périodes planifiées. Le tableau 2.8 montre les périodes de début et de fin optimisées issues de ce macro-ordonnancement.

	Fenêtres initiales		Fenêtres agrégées		Fenêtres agrégées optimisées	
OF _i	rd _i	dd _i	RP _i	DP _i	SP _i	SP _i
1	0	32	1	3	3	5
2	0	46	1	4	2	4
3	0	21	1	2	1	3
4	0	42	1	4	1	4
5	0	37	1	4	1	6
6	0	28	1	3	1	3
7	0	31	1	3	1	3
8	0	53	1	5	1	6

TAB. 2.8 – Fenêtres agrégées optimisées

c) obtention des dates guidantes

Le mécanisme de guidage de base présenté au paragraphe 2.4.1 est mis en œuvre pour obtenir les dates guidantes.

A partir des périodes planifiées de début et de fin (SP_i et CP_i respectivement) on calcule les dates guidantes de début et de fin (rd_i^G et dd_i^G respectivement) en utilisant les formules (2.17) et (2.18) présentés dans le paragraphe 2.4.2. Les dates de début et de fin guidantes obtenues sont reportées dans le tableau 2.9.

	Fenêtres initiales		Fenêtres agrégées		Fenêtres agrégées optimisées		Fenêtres guidantes	
OF _i	rd _i	dd _i	RP _i	DP _i	SP _i	CP _i	rd _i ^G	dd _i ^G
1	0	32	1	3	3	5	20	60
2	0	46	1	4	2	4	11	48
3	0	21	1	2	1	3	0	36
4	0	42	1	4	1	4	0	48
5	0	37	1	4	1	6	0	72
6	0	28	1	3	1	3	0	36
7	0	31	1	3	1	3	0	36
8	0	53	1	5	1	6	0	72

TAB. 2.9 – Fenêtres guidantes

On remarque que les fenêtres guidantes sont différentes des fenêtres initiales. Les dates de début guidantes des OF 1 et 2 sont retardées par rapport aux dates initiales. Les dates de fin guidantes sont également différentes aux dates de fin initiales. Le module de macro-ordonnancement a donc une influence forte sur les fenêtres. Ceci est dû à la fois au taux de contrainte de l'exemple (dates de fin serrées par rapport à la somme des durées opératoires des OF) et à la longueur choisie pour les périodes.

d) Ordonnancement détaillé

Le problème d’ordonnancement détaillé modifié par les fenêtres guidantes est résolu en utilisant le logiciel Preactor, la solution détaillée (désagrégation) est montrée dans la figure 2.13 et les dates de début et de fin obtenues sont reportées dans le tableau 2.10.



FIG. 2.13 – Ordonnancement détaillé

	Fenêtres initiales		Fenêtres agrégées		Fenêtres agrégées optimisées		Fenêtres guidantes		Dates Ordonnancées	
OFi	rd _i	dd _i	RP _i	DP _i	SP _i	CP _i	rd _i ^G	dd _i ^G	sd _i ^{MN}	cd _i ^{MN}
1	0	32	1	3	3	5	20	60	32	63
2	0	46	1	4	2	4	11	48	19	47
3	0	21	1	2	1	3	0	36	0	28
4	0	42	1	4	1	4	0	48	0	25
5	0	37	1	4	1	6	0	72	6	40
6	0	28	1	3	1	3	0	36	0	37
7	0	31	1	3	1	3	0	36	0	29
8	0	53	1	5	1	6	0	72	4	60

TAB. 2.10 – Dates ordonnancées

Nous pouvons remarquer que les dates de fin ordonnancées sont différentes des dates initiales. La date de fin ordonnancée de l'OF 1 a été retardée par rapport à la date de fin initiale, il est de même pour l'OF 6. Cela est dû aux dates guidantes issues du macro-ordonnancement qui les positionnées en retard.

Si nous regardons en détail les dates guidantes (fenêtres guidantes) nous notons que les dates de fin ne correspondent pas (pour la plupart des OF) aux dates souhaitées et en plus certaines dates de fin des OF sont similaires (ex. OF 3, 6 et 7 ayant la même date de fin à 36). Il peut alors s'avérer difficile pour un module d'ordonnancement détaillé de différencier ces OF. Ceci paraît normal étant donné le phénomène d'élaboration des dates en temps continu à partir des dates définies en temps discret. En ce qui concerne le suivi du plan optimisé, l'ordonnancement détaillé a pu suivre la planification malgré les retards des OF 1,6 et 8, le suivi du plan a été respecté car certaines des dates guidantes étaient assez relâchées par rapport aux dates initiales (OF 1, 3, 6 et 8).

La valeur du retard est calculée à partir de la somme des retards générés par les dates de fin de chaque OF par rapport aux celles de dates initiales. Pour cet exemple la valeur du **retard** de l'approche est de **58 jours**.

2.5.2 Exemple traité avec opérations fictives

a) agrégation des fenêtres temporelles et nouvelles gammes opératoires

Maintenant nous allons résoudre le même problème en introduisant les opérations fictives avec la méthode que nous avons décrite au paragraphe 2.3.2 de ce chapitre. Le tableau 2.11 montre les gammes opératoires complétées par les opérations fictives (en gras dans le tableau).

OF \ OP	0	1	2	3	4	5	6
1	0 -	7 R5	5 R2	5 R4	3 R3	6 R1	4 -
2	0 -	4 R4	3 R5	4 R1	7 R2	3 R3	2 -
3	0 -	7 R5	6 R3	2 R1	2 R2	4 R4	3 -
4	0 -	4 R4	2 R1	2 R5	5 R2	2 R3	6 -
5	0 -	4 R3	7 R5	8 R2	2 R4	4 R1	11 -
6	0 -	6 R3	8 R5	3 R1	5 R4	4 R2	8 -
7	0 -	3 R2	4 R1	8 R4	4 R3	5 R5	5 -
8	0 -	7 R4	8 R1	7 R5	5 R3	8 R2	7 -

TAB. 2.11 – Durées opératoires avec opérations fictives

Comme nous pouvons le remarquer, les opérations fictives de début ont toutes une durée nulle car les OF peuvent commencer à la date 0. Par contre, les opérations fictives de fin ont des durées qui permettent de compenser les effets de la discrétisation du temps. Le calcul des durées des différentes opérations fictives a été fait par l'application des formules (2.13) et (2.14).

Les fenêtres temporelles agrégées restent inchangées par rapport à l'exemple sans opérations fictives, comme le montre le tableau 2.12 :

	Fenêtres initiales		Fenêtres agrégées	
OF _i	rd _i	dd _i	RP _i	DP _i
1	0	32	1	3
2	0	46	1	4
3	0	21	1	2
4	0	42	1	4
5	0	37	1	4
6	0	28	1	3
7	0	31	1	3
8	0	53	1	5

TAB. 2.12 – Fenêtres temporelles agrégées du problème (avec $lg = 12$)

b) *macro-ordonnancement et fenêtres agrégées optimisées*

La résolution par Xpress du problème agrégé avec introduction d'opérations fictives conduit au macro-ordonnancement de la figure 2.14. Les fenêtres agrégées optimisées issues de ce macro-ordonnancement sont reportées au tableau 2.13.

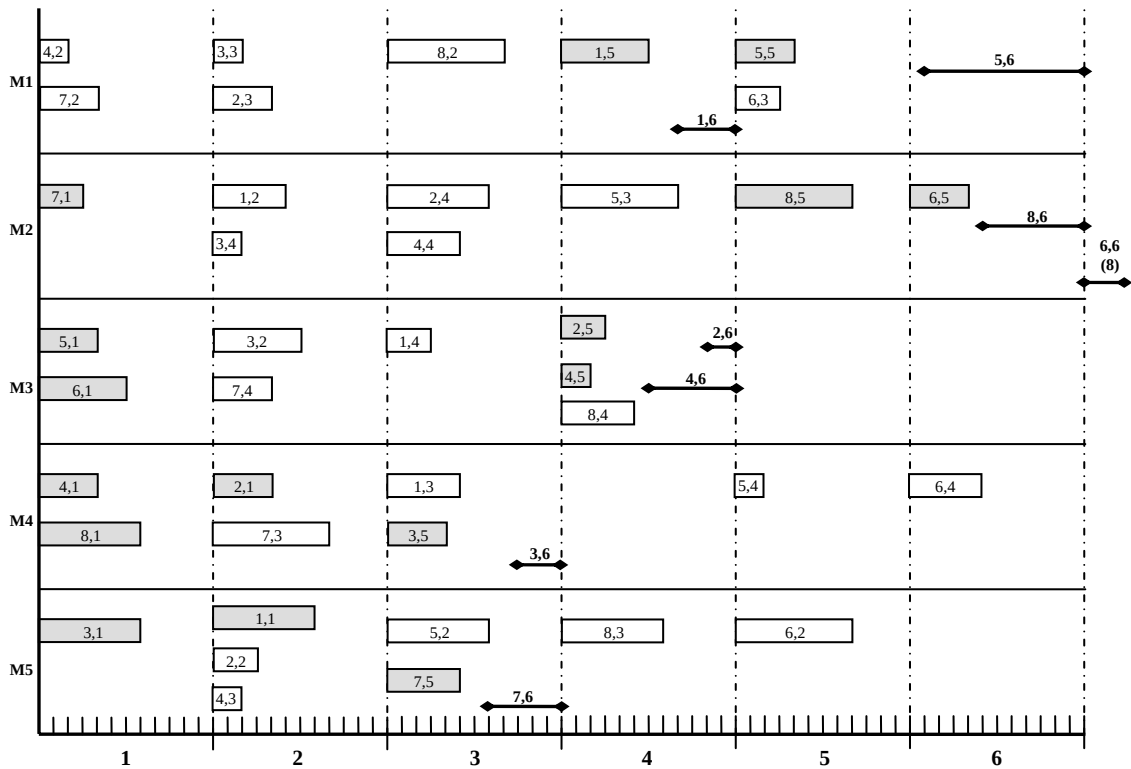


FIG. 2.14 – Macro-ordonnancement avec opérations fictives

	Fenêtres initiales		Fenêtres agrégées		Fenêtres agrégées optimisées	
OF _i	rd _i	dd _i	RP _i	DP _i	SP _i	SP _i
1	0	32	1	3	2	4
2	0	46	1	4	2	4
3	0	21	1	2	1	3
4	0	42	1	4	1	4
5	0	37	1	4	1	5
6	0	28	1	3	1	6
7	0	31	1	3	1	3
8	0	53	1	5	1	5

TAB. 2.13 – Fenêtres agrégées optimisées

c) obtention des dates guidantes

A partir du macro-ordonnancement proposé dans la figure 2.14 nous pouvons obtenir les dates guidantes selon la procédure décrite dans le paragraphe 2.4.3.

Comme dans l'exemple traité sans opérations fictives, à partir des périodes planifiées de début et de fin (SP_i^f et CP_i^f respectivement) on calcule les dates guidantes de début et de fin (rd_i^G et dd_i^G respectivement) en utilisant la formule (2.18) et l'algorithme de calcul des dates de fin guidantes présenté dans le paragraphe 2.4.2. Les dates guidantes sont obtenues et présentées dans le tableau 2.14.

	Fenêtres initiales		Fenêtres agrégées		Fenêtres agrégées optimisées		Fenêtres guidantes	
OF _i	rd _i	dd _i	RP _i	DP _i	SP _i	CP _i	rd _i ^G	dd _i ^G
1	0	32	1	3	2	4	7	44
2	0	46	1	4	2	4	11	46
3	0	21	1	2	1	3	0	33
4	0	42	1	4	1	4	0	42
5	0	37	1	4	1	5	0	60
6	0	28	1	3	1	6	0	72
7	0	31	1	3	1	3	0	31
8	0	53	1	5	1	5	0	60

TAB. 2.14 – Fenêtres guidantes

On remarque encore une fois que les fenêtres guidantes sont différentes des fenêtres initiales. Les dates de début guidantes des OF 1 et 2 sont retardées par rapport aux dates initiales. Les dates de fin guidantes sont également différentes aux dates de fin initiales, la différence qu'il existe par rapport à l'exemple traité sans introduction d'opérations fictives est que les dates de certaines OF ont été reconstituées comme les dates initiales (OF 2, 4 et 7). Autre caractéristique des fenêtres guidantes est que les dates de fin des OF ont été discriminées entre elles sauf pour les OF 5 et 8, qui ont la même date de fin guidante. L'introduction des opérations fictives a

donc une influence forte sur les dates de fin des fenêtres, cela pourrait améliorer la qualité du guidage (qui sera traité dans le chapitre suivant).

d) *Ordonnancement détaillé*

Le problème d'ordonnancement détaillé modifié par les fenêtres guidantes est résolu en utilisant le logiciel Preactor, la solution détaillée (désagrégation) est montrée dans la figure 2.15 et les dates de début et de fin obtenues sont reportées dans le tableau 2.15.



FIG. 2.15 – Ordonnancement détaillé

Nous pouvons voir à partir des résultats du tableau que certaines dates de fin ordonnancées des OF sont en retard par rapport aux dates initiales, notamment les OF 3 et 6. Malgré cela, pour d'autres OF les retards ne sont pas très importantes, il existe même des OF qui sont en avance. Il est important de remarquer que le suivi du plan par l'ordonnancement détaillé est quasi parfait. Le résultat au niveau du **retard** est de **47 jours**, résultat qui améliore celui trouvé par la méthode sans introduction d'opérations fictives (58 jours de retard).

Avec l'application de cet exemple nous avons pu mettre en œuvre le mécanisme de guidage de base proposé. Nous avons pu transformer le positionnement des OF par le module de macro-ordonnancement en dates guidantes. En plus, nous avons montré le mécanisme d'introduction d'opérations fictives et comment celles-ci peuvent aider à calculer des meilleures dates guidantes.

	Fenêtres initiales		Fenêtres agrégées		Fenêtres agrégées optimisées		Fenêtres guidantes		Dates Ordonnancées	
OF _i	rd _i	dd _i	RP _i	DP _i	SP _i	CP _i	rd _i ^G	dd _i ^G	sd _i ^{MN}	cd _i ^{MN}
1	0	32	1	3	2	4	7	44	7	33
2	0	46	1	4	2	4	11	46	24	47
3	0	21	1	2	1	3	0	33	0	32
4	0	42	1	4	1	4	0	42	0	29
5	0	37	1	4	1	5	0	60	0	41
6	0	28	1	3	1	6	0	72	4	58
7	0	31	1	3	1	3	0	31	0	28
8	0	53	1	5	1	5	0	60	4	52

TAB. 2.15 – Dates ordonnancées

Comparaison des exemples

Une autre optique des modifications qui ont été faits par l'introduction des opérations fictives peut se voir dans les figures 2.16 et 2.17. La figure 2.16 montre les fenêtres optimisées obtenues par le macro-ordonnancement avec ou sans opérations fictives. On constate que pour certains OF les fenêtres temporelles optimisées sont différentes dans les deux cas. Le guidage transmis au niveau inférieur est alors différent.

La figure 2.17 montre les fenêtres obtenues après résolution par le niveau détaillé (avec ou sans opérations fictives). De manière à matérialiser les retards, les dates initiales ont été également reportées dans la figure. Les fenêtres détaillées avec ou sans opérations fictives sont tous proches, sauf pour l'OF 1. Un retard important par rapport à la date due est généré lorsque les opérations fictives ne sont pas prises en compte. Les résultats obtenus sont pour cet exemple meilleurs lorsque les opérations fictives sont introduites car elles limitent le manque de précision introduite par l'agrégation temporelle.

D'autres exemples testés et non reportés ici confirment ces résultats. Dans la suite, nous introduisons toujours les opérations fictives. Finalement, l'étude de ce mécanisme est résumé dans [Hernandez-Silva *et al.*, 2007].

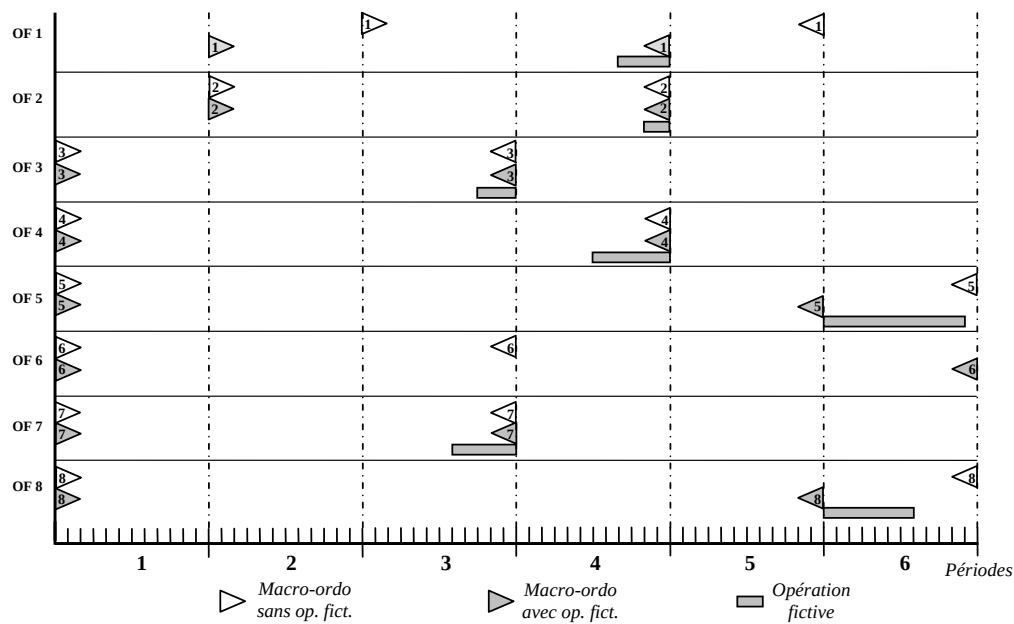


FIG. 2.16 – Dimension des fenêtres des macro-ordonnancements

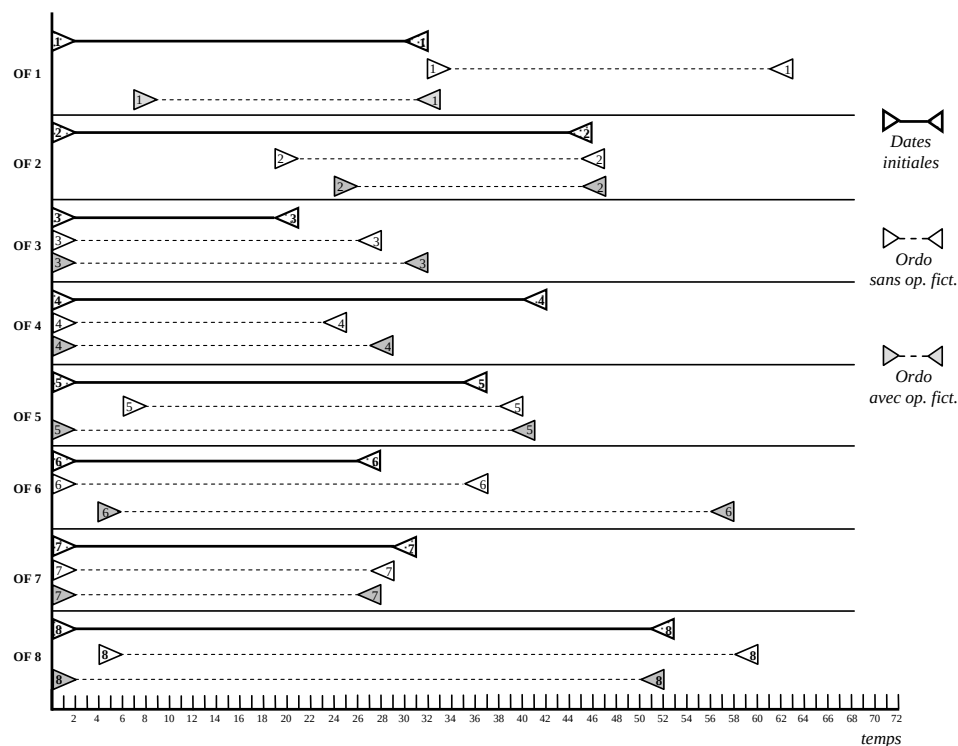


FIG. 2.17 – Dimension des fenêtres des ordonnancements détaillés

Conclusion du chapitre 2

Dans ce chapitre, nous avons proposé d'abord une structure à deux niveaux capable de traiter le problème d'ordonnancement en deux parties. Une partie consacrée à l'optimisation du problème à moyenne terme tenant en compte les ajustements de charge-capacité, et l'autre partie effectuant la désagrégation des décisions prises au niveau supérieur. La structure proposée nous permet d'optimiser des leviers décisionnels cherchés par le décideur au niveau de retard, d'acceptation d'ordres, etc.

Une modélisation pour cette structure est proposée à l'aide de la programmation linéaire en variables mixtes. Un tel modèle permet d'optimiser des leviers décisionnels classiques, ici le retard, l'utilisation d'heures supplémentaires, de la sous-traitance, etc.

L'approche multiniveaux que nous proposons est notamment basé sur une agrégation temporelle (agrégation du temps, de la capacité) alors un mécanisme d'agrégation a été défini. Ce mécanisme nous permet de transformer de caractéristiques temporelles continues en caractéristiques discrètes. Cette transformation peut induire des infaisabilités (au niveau de la capacité) ou des pertes d'informations (au niveau de dates), il a donc été nécessaire d'introduire des informations de compensation par les opérations fictives pour réduire le phénomène de perte d'information au niveau de dates. Pour pouvoir prendre en compte cette nouvelle caractéristique nous avons élargi le modèle de macro-ordonnancement de base pour permettre de prendre en compte les opérations fictives. Le mécanisme de réduction d'infaisabilité au niveau de la capacité sera présenté ultérieurement.

Finalement, un mécanisme de guidage est présenté, le mécanisme de guidage par dates qui profite du positionnement global des OF sur les périodes. Un exemple simple est également développé mettant en œuvre les mécanismes d'agrégation et de guidage proposés dans ce chapitre. L'exemple est traité sans et avec introduction d'opérations fictives pour voir son impact dans la solution proposée.

Chapitre 3

Evaluation de l'approche

Introduction au chapitre 3

Le chapitre précédent a présenté l'approche multiniveau proposée. Il a également montré sa mise en œuvre sur un exemple académique simple. L'expérimentation avait comme objectif principal de montrer l'intérêt de l'introduction d'opérations fictives dans les gammes.

Dans ce chapitre, il s'agit de faire une évaluation de l'approche multiniveau à partir d'expérimentations numériques variées. Les performances de l'approche multiniveau sont confrontées aux performances d'une approche dite "directe" mise en œuvre sur les mêmes problèmes.

Pour faciliter la comparaison entre approches, il est judicieux de proposer des indicateurs de performance qui mesurent la qualité de l'approche pour l'objectif recherché (ici la minimisation du retard) ainsi que la performance au niveau de la robustesse du plan et de la qualité du guidage.

Différents problèmes sont traités avec les deux approches. Ils se différencient par les gammes et les dates dues de leurs OF ainsi que par le niveau de charge des ressources. Pour étudier l'impact de la longueur des périodes choisie au niveau du macro-ordonnancement sur les performances de l'approche multiniveau, les problèmes sont traités et analysés pour différentes valeurs de cette longueur.

Ce chapitre se décompose alors quatre parties :

- dans la première partie nous présentons le cadre général des expérimentations ainsi que les outils de résolution utilisés par les approches que nous allons comparer.
- la deuxième partie définit les trois indicateurs utilisés pour mesurer la performance de l'approche multiniveau. Ces indicateurs mesurent la qualité de l'ordonnancement obtenu (évaluation des écarts entre dates ordonnancées et dates dues initiales), la robustesse du guidage (évaluation des écarts entre dates guidantes et dates ordonnancées) et l'efficacité de ce guidage (évaluation des écarts entre dates guidantes et dates initiales).
- dans la troisième partie, nous présentons la manière dont sont obtenus les jeux de données ainsi qu'une caractérisation des problèmes qui permet de les classer (charge de ressources, densité de dates dues, ...).

- enfin la quatrième partie fournit et analyse les résultats obtenus par les deux approches.

3.1 Cadre de l'évaluation

Dans ce chapitre nous allons mettre en œuvre sur des exemples, la structure d'ordonnancement multiniveau décrite au chapitre 2. Il est judicieux avant de montrer les résultats des expérimentations effectuées, de préciser le cadre dans lequel se situe l'évaluation de l'approche et les outils utilisés pour sa mise en œuvre effective.

3.1.1 Principe général de l'évaluation

Les apports de l'approche à 2 niveaux sur un plan fonctionnel ont été abordés dans le chapitre 2. Il est cependant nécessaire d'évaluer quantitativement les performances. La démarche retenue pour procéder à l'évaluation de l'approche est de comparer les résultats obtenus par l'approche à deux niveaux avec ceux issus d'une approche "directe" qui consiste à résoudre le problème initial en une seule étape.

Pour cela, on restreint le problème initial à un problème d'ordonnancement "classique" dont le seul objectif est la minimisation des retards, sans chercher à prendre en compte les leviers décisionnels évoqués dans le paragraphe 2.2.5 (recours à la sous-traitance, aux heures supplémentaires). Il est alors possible de résoudre ce problème initial par un algorithme classique d'ordonnancement ou par un logiciel d'ordonnancement standard, adaptés à la minimisation des retards.

Le même problème peut également être résolu par l'approche à 2 niveaux dans laquelle le niveau supérieur ne prend en compte dans la fonction objectif que la minimisation des retards (pour rester dans un contexte similaire à celui de l'approche directe). Dans ce cadre, il est possible de comparer les ordonnancements détaillés issus des deux approches en développant des indicateurs de performance adaptés.

Outils utilisés :

L'approche directe (ou monolithique) consiste donc à élaborer un ordonnancement cherchant à minimiser seulement le retard des OF. Dans le contexte de cette étude, cette résolution est effectuée en utilisant un logiciel d'ordonnancement commercial **Preactor**. Ce logiciel est présenté en détail ci-après ainsi que les règles d'ordonnancement qu'il propose. Dans le cadre de l'approche directe on choisira la règle la plus adaptée à l'objectif global du problème d'ordonnancement que l'on souhaite résoudre c'est à dire ici la minimisation des seuls retards.

L'approche multiniveaux consiste d'abord à effectuer l'agrégation temporelle des données détaillées ; le problème de macro-ordonnancement formalisé par un modèle linéaire en variables mixtes est ensuite résolu. Le logiciel utilisé ici est le solveur **Xpress-MP** présenté dans le paragraphe suivant. Une fois que la solution (agrégée) a été obtenue, on développe le mécanisme de guidage entre niveaux (décrit au chapitre précédent) pour transmettre au module détaillé les informations de guidage. Il s'agit alors de résoudre le problème d'ordonnancement détaillé en suivant les consignes de guidage et les contraintes détaillées propres à ce niveau. Pour cette deuxième étape, le logiciel **Preactor** est encore

utilisé ; on choisira ici la règle de Preactor la plus adaptée au suivi des consignes de guidage.

Il faut remarquer que, dans le cadre de ce chapitre, pour toutes les expérimentations réalisées avec l'approche proposée, le critère retenu dans le modèle de macro-ordonnancement est la minimisation des retards et les poids (coûts de retard) associées sont identiques pour tous les OF.

La figure 3.1 schématise les 2 approches.

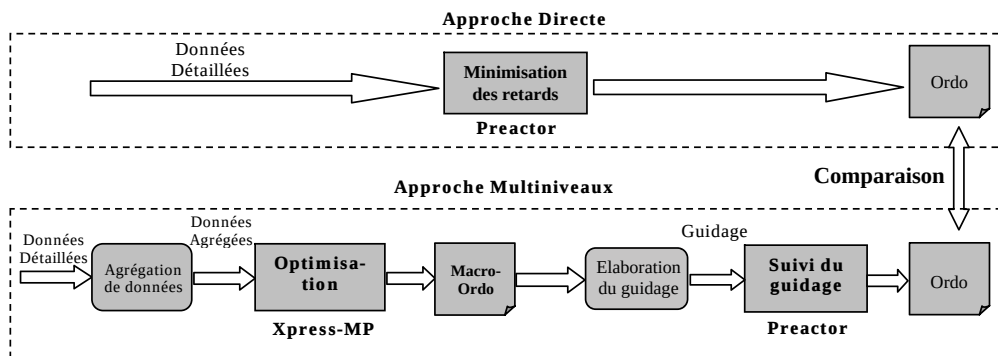


FIG. 3.1 – Les deux approches

3.1.2 Le logiciel Xpress-MP

Xpress est un produit développé par DASH Optimisation basé au Royaume Uni et distribué par une filiale française : Artelys.

Xpress-MP propose une gamme complète d'outils de modélisation et d'optimisation numérique. L'efficacité des algorithmes mis en œuvre par Xpress-MP est intéressante. Il n'y a pas besoin de développements longs pour pouvoir en bénéficier grâce au modèleur Xpress-Mosel. Ce langage synthétique, proche du langage mathématique donne une capacité d'expression qui réduit considérablement le temps de développement. L'optimiseur Xpress-MP résout des problèmes linéaires et quadratiques, qu'ils soient continus, en nombres entiers ou en variables mixtes. Xpress-MP propose une gamme étendue de composants d'optimisation numérique :

- Méthode du simplexe pour les problèmes linéaires et quadratiques continus.
- Méthode de points intérieurs pour les problèmes linéaires et quadratiques continus de grande taille.
- Méthode de Branch-and-Bound/Branch-and-Cut pour les problèmes en nombres entiers (aussi bien linéaires que quadratiques).

Xpress est complété par un environnement de développement graphique intégré : Xpress-IVE. Il comprend un éditeur de modèles, un débogueur et un environnement d'exécution. Grâce à Xpress-IVE, il est possible de visualiser les entités du modèle (variables de décisions, contraintes, données, ...) et leurs solutions.

C'est donc ce solveur que nous avons retenu pour résoudre le problème d'optimisation du niveau supérieur de la structure d'ordonnancement proposée. L'utilisation de

Xpress-MP dans le cadre de nos expérimentations a été réalisée sur un PC HP Pentium IV à 2,80 Ghz.

3.1.3 Preactor

Preactor est développé par "The CIMulation Centre Ltd", à Chippenham, Royaume Uni. Preactor possède une interface graphique qui permet de visualiser des plannings de production complets et de qualité. L'interface de Preactor a été conçue de façon à ce que l'utilisateur puisse visualiser le planning des ressources et le planning des ordres de fabrication.

L'utilisateur peut agir de manière interactive sur ces plannings. Le calendrier de production de chaque ressource est affiché à l'écran. L'utilisateur dispose des opérations à planifier sous forme d'icônes dans une "corbeille". Il peut afficher le détail d'une opération, puis affecter celle-ci à la ressource appropriée (Preactor vérifie que le type de ressource choisi permet de réaliser l'opération et la cohérence globale des enchaînements).

La figure 3.2 montre l'affichage d'un ordonnancement par ressource.

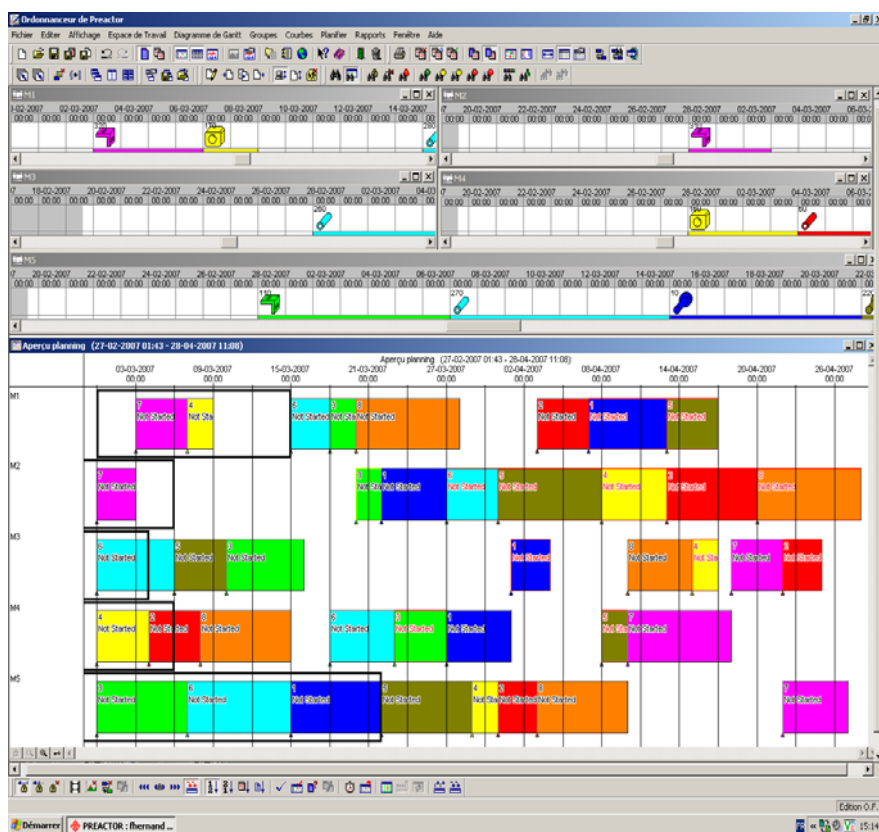


FIG. 3.2 – Interface graphique de Preactor

Preactor peut également résoudre un problème d'ordonnancement sans intervention directe de l'utilisateur. Preactor peut alors travailler selon deux approches différentes : "Algorithmic sequencing" ou "Simulation-Based Sequencing".

a) Algorithmic base sequencing

Dans ce cadre, Preactor traite les OF les uns après les autres selon un ordre déterminé (critère de sélection). Toutes les opérations de l'OF considéré sont ordonnancées sur les ressources selon une règle d'ordonnancement déterminée avant de passer à l'OF suivant.

Les critères de sélection des ordres de fabrication et les règles d'ordonnancement disponibles sont précisés ci-après.

Critères de sélection d'ordres

Par Priorité Décroissante (ou croissante) : Preactor sélectionne les commandes (ou ordres de fabrication) par ordre décroissant (ou croissant) de la valeur du champ "Priorité" (i.e. plus la valeur est petite, plus la commande est prioritaire). Le champ priorité de chaque OF doit être renseigné par l'utilisateur.

Par Date d'Echéance : Preactor sélectionne les commandes par ordre croissant de la valeur du champ "Due Date" associé à chaque commande ou ordre de fabrication.

Par Règle F.I.F.O. : Preactor sélectionne les commandes dans l'ordre dans lequel elles ont été déclarées dans le fichier des commandes.

Règles d'ordonnancement

Ordonnancement Au Plus Tôt : toutes les opérations de l'ordre de fabrication considéré sont traitées dans l'ordre de la gamme et sont positionnées **au plus tôt** sur les ressources requises compte tenu de la disponibilité de chaque ressource et de la date de fin de l'opération précédente dans la gamme ("ordonnancement automatique avant").

Ordonnancement Au Plus Tard : toutes les opérations de l'ordre de fabrication considéré sont traitées dans l'ordre inverse de la gamme et sont positionnées **au plus tard** sur les ressources requises compte tenu de la disponibilité de chaque ressource et de la date de début au plus tard des opérations déjà placées ("ordonnancement automatique arrière").

Bi-directionnel autour des Opérations Verrouillées : permet de réaliser un ordonnancement automatique bi-directionnel des opérations en attente de planification appartenant à une commande dont une ou plusieurs opérations sont déjà planifiées et verrouillées.

b) Simulation-Based Sequencing (version APS)

Dans ce contexte, une file d'attente est associée à chaque ressource ; elle contient toutes les opérations en attente d'être ordonnancées sur cette ressource quels que soient les ordres de fabrication auxquelles elles appartiennent. La progression du temps est alors simulée par le séquenceur. Chaque fois qu'une ressource se libère (événement), le séquenceur examine les opérations présentes dans la file, sélectionne une des opérations de la file selon une règle prédéfinie et la charge sur la machine. Ce mécanisme se répète jusqu'à ce que toutes les opérations aient été ordonnancées sur les ressources.

Les règles de Preactor APS sont :

Parallel Loading (PL) : quand une ressource est libre, cette règle analyse la file des opérations qui attendent d'être ordonnancées sur la ressource et sélectionne la meilleure selon la règle qu'on lui définit.

Preferred Sequence (PS) : cette règle a un fonctionnement similaire à celui de la règle PL avec la notion supplémentaire "fenêtre de recherche en avant" (Look ahead window). Cette fenêtre définit une période de temps qui est employée pour déterminer si une opération peut être placée dans la file d'attente d'une ressource spécifique. Quand une ressource se libère, la règle détermine la fenêtre de recherche à partir du temps courant. Une opération susceptible d'être ordonnancée sur cette ressource n'est placée dans la file que si elle appartient à un ordre dont la date due appartient à la fenêtre. Dans le cas contraire, elle n'est pas placée dans la file d'attente à l'instant courant. L'opération ordonnancée sur la ressource est sélectionnée selon les mêmes critères que précédemment. Cette règle permet de limiter le nombre d'opérations placées dans la file.

Il est important de souligner que tous les ordonnancements générés par ce type d'approche sont des ordonnancements sans délais.

Les règles disponibles pour sélectionner la tâche à ordonnancer sont les suivants :

- Plus petit (ou plus grand) temps opératoire
- Plus petit (ou plus grand) temps de réglage
- Plus petite (ou plus grande) date due
- Plus petite (ou plus grande) priorité de l'ordre auquel appartient l'opération
- Plus grand (ou petit) ratio critique : le ratio critique d'une opération (i, j) est le rapport entre la somme des durées des opérations suivant (i, j) dans la gamme et la différence entre la date due de l'ordre de fabrication et l'instant courant. Lorsque ce ratio s'approche de 1, cela signifie qu'il reste très peu de marge pour que cet ordre soit planifié sans retard et les opérations qui le constituent doivent être placées sur les ressources le plus rapidement possible.

Pour notre étude, nous avons choisi la règle "Preferred Sequence" en utilisant le critère "ratio critique". En effet cette règle semble la plus adaptée pour minimiser le retard des OF par rapport à leur date due, que celle-ci soit la date due initiale (dans le cas de l'approche directe) ou la date due actualisée par le mécanisme de guidage (approche à 2 niveaux). Ce choix est donc cohérent avec les objectifs de l'approche suivie pour l'évaluation.

3.2 Indicateurs de performance

Afin d'évaluer les performances, différents indicateurs de performance sont proposés. Ils ont pour but de quantifier "la qualité globale de l'approche" ainsi que la "robustesse" et "l'efficacité" du macro-ordonnancement. Ces indicateurs seront utilisés d'une part pour comparer l'approche directe et l'approche à 2 niveaux et d'autre part pour comparer les

résultats obtenus par l'approche à deux niveaux avec différents pas de discrétisation de l'horizon.

3.2.1 Rappel des notations utilisées dans les différentes étapes de l'approche à deux niveaux

L'approche à deux niveaux déjà décrite au chapitre précédent, comporte un certain nombre d'étapes qui permettent d'établir des dates ou périodes de début et de fin associées à chaque OF. La figure 3.3 récapitule ces étapes et rappelle la notation relevant de l'approche.

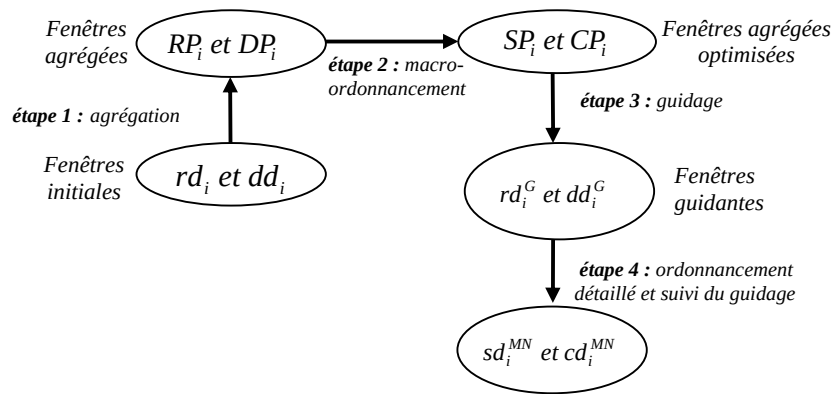


FIG. 3.3 – Fenêtres temporelles associées aux différentes étapes de l'approche multinationale

Etape 1. Agrégation. Les **dates** initiales de début au plus tôt et de fin au plus tard rd_i et dd_i qui définissent les fenêtres des OF sont transformées en **périodes** de début au plus tôt et de fin au plus tard RP_i et DP_i . Cette étape effectue une agrégation des caractéristiques temporelles. Les mécanismes d'agrégation ont été présentés au paragraphe 2.3.

Etape 2. Macro-ordonnancement. La résolution du problème agrégé par le module de macro-ordonnancement permet d'obtenir le positionnement optimal des opérations des différents OF sur les ressources et dans le temps c'est à dire sur les périodes de l'horizon de planification. Différentes grandeurs agrégées peuvent être obtenues à partir du macro-ordonnancement comme par exemple les périodes de début et fin optimisées SP_i et CP_i des différents OF.

Etape 3. Guidage. Le macro-ordonnancement est exploité pour guider le niveau détaillé. Dans le cadre d'un guidage par dates, les **périodes** de début et de fin optimisées sont transformées en **dates** de début et de fin guidantes rd_i^G et dd_i^G (des relations de précedence entre opérations peuvent également être obtenues dans le cadre d'un guidage par contraintes de précedence). Les mécanismes pour effectuer cette transformation ont été présentés au paragraphe 2.4.1.

Etape 4. Ordonnancement détaillé. Dans cette étape, il s'agit de définir un ordonnancement détaillé compatible avec le guidage choisi. Dans le cadre d'un guidage par date par exemple, la solution proposée par ce module doit respecter au mieux les dates

guidantes évoquées à l'étape 3. Quelle que soit la méthode d'ordonnancement utilisée, le résultat de cette étape est un ordonnancement détaillé qui définit entre autres les dates de début et de fin des OF ordonnancés. Ces dates issues de l'approche multiniveaux sont notées sd_i^{MN} et cd_i^{MN} respectivement.

Les paragraphes suivants fournissent une explication détaillée des indicateurs de performance utilisés.

3.2.2 Notations utilisées dans l'approche directe

L'approche directe consiste à résoudre en une seule étape le problème initial (cf. figure 3.4). Comme indiqué dans le paragraphe 3.1.1, l'ordonnancement détaillé direct est obtenu en utilisant le logiciel Preactor. On note :

sd_i^D ... la date de début de l'OF i ordonnancée selon l'approche directe.

cd_i^D ... la date de fin de l'OF i ordonnancée selon l'approche directe.

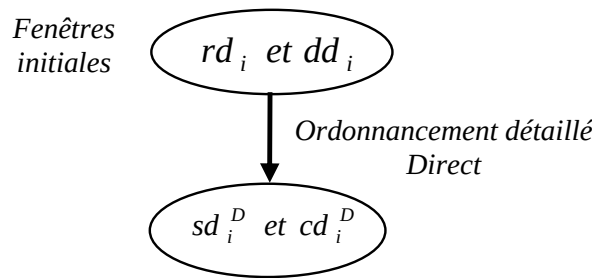


FIG. 3.4 – Fenêtres temporelles associées à l'approche directe

3.2.3 Qualité des approches

Un indicateur global dont l'objectif est de mesurer la "qualité" de l'approche à travers la "qualité" de l'ordonnancement obtenu est défini.

La "qualité" d'un ordonnancement est établie ici par l'évaluation des différences entre les dates de fin ordonnancées et les dates dues initiales. Cette caractéristique peut être mesurée pour l'ordonnancement issu de l'approche multiniveaux et pour celui issu de l'approche directe.

Nous définissons donc :

$$Q^{MN} = \sum_{i=1}^{NOF} \max(0, cd_i^{MN} - dd_i) \quad (3.1)$$

qui calcule la somme des retards des différents OF vis à vis des dates dues initiales dans l'ordonnancement résultant de l'approche multiniveau. Cet indicateur matérialise la qualité de l'ordonnancement obtenu par l'approche à deux niveaux.

$$Q^D = \sum_{i=1}^{NOF} \max(0, cd_i^D - dd_i) \quad (3.2)$$

qui calcule la somme des retards des différents OF vis à vis des dates dues initiales dans l'ordonnancement obtenu par l'approche directe. Cet indicateur matérialise donc la qualité de l'ordonnancement obtenu par l'approche directe.

La confrontation de ces deux indicateurs de qualité nous indiquera quelle est la meilleure approche dans le contexte choisi (ici la minimisation des retards). La figure 3.5 positionne ces indicateurs pour l'approche directe et pour l'approche multiniveau.

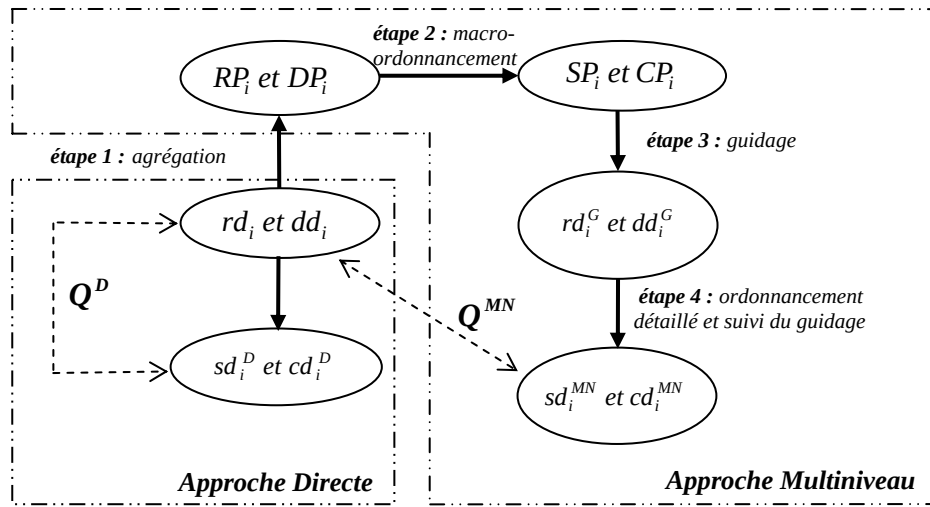


FIG. 3.5 – Indicateur de qualité d'un ordonnancement

3.2.4 Robustesse du guidage

La notion de robustesse ne s'applique qu'à l'approche multiniveau proposée ; elle caractérise le suivi par le module d'ordonnancement détaillé des consignes de guidage issues du macro-ordonnancement.

Robustesse du guidage : Le guidage résultant du niveau supérieur est dit robuste si le niveau inférieur (désagrégation) peut trouver au moins un ordonnancement faisable compatible avec les dates guidantes transmises par le niveau de macro-ordonnancement.

Il est important de remarquer que le niveau de macro-ordonnancement ne prend pas en compte les contraintes de gamme entre opérations appartenant à un même OF quand elles sont positionnées dans une même période. Il peut alors dans certains cas, être impossible de trouver un ordonnancement détaillé faisable au sein d'une période, des opérations positionnées dans cette période par le macro-ordonnancement. L'exemple et les figure suivantes donnent un exemple très simple de l'infaisabilité générée au niveau détaillé alors que les contraintes agrégées sont toutes satisfaites.

Exemple : Soient deux OF i et j constitués de deux opérations chacun ; les opérations $(i, 1)$ et $(i, 2)$ ont une durée opératoire de 4 ; $(i, 1)$ requiert la ressource r_1 et consomme 4 unités de la ressource, l'opération $(i, 2)$ requiert la ressource r_2 avec une consommation de 4. Les opérations $(j, 1)$ et $(j, 2)$ ont des durées de 4 et 5 respectivement et elles utilisent les ressources r_1 et r_2 respectivement avec une consommation de 4 et 5 respectivement. La longueur de la période de discrétisation est de 10. Les capacités des ressources sont de 10 par période. La figure 3.6 montre un macro-ordonnancement faisable de ces deux OF. Les quatre opérations sont affectées à la même période.

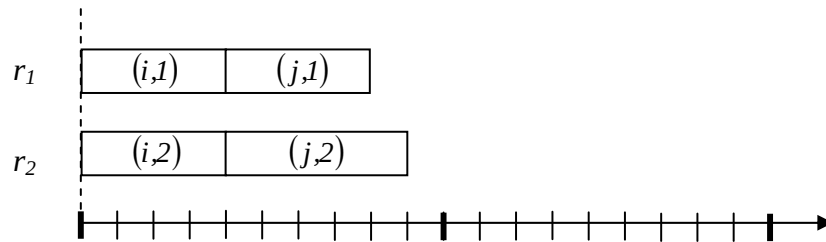
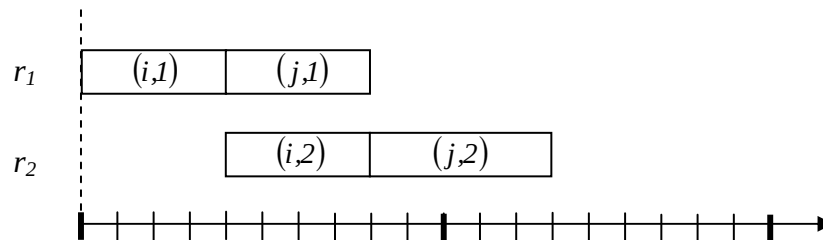
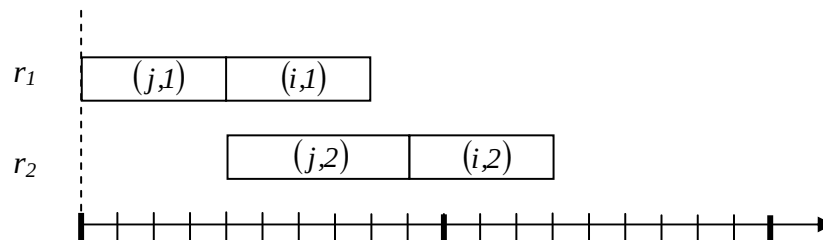


FIG. 3.6 – Macro-ordonnancement des OF

En effet, au niveau de la capacité, la somme des consommations des opérations est de 8 pour la ressource 1 et de 9 pour la ressource 2, alors que la capacité des ressources est de 10. En ce qui concerne les durées des opérations d'un même OF affectées à une même période, l'OF i a une durée de 8 et l'OF j a une durée de 9, qui sont inférieures à la longueur de la période. Les figures 3.7 et 3.8 montrent qu'il n'existe pas d'ordonnancement détaillé faisable compatible avec le macro-ordonnancement.

FIG. 3.7 – Ordonnancement détaillé avec $(i, 1)$ avant $(j, 1)$ FIG. 3.8 – Ordonnancement détaillé avec $(j, 1)$ avant $(i, 1)$

Les figures montrent que, dans aucun cas, une désagrégation robuste avec la planification du macro-ordonnancement n'est possible.

Lorsque ce type d'infaisabilité apparaît au niveau détaillé, il n'est plus possible d'ordonnancer toutes les opérations détaillées dans la période de temps prévue et cela retarde en général les opérations suivantes. Le niveau détaillé ne peut suivre le guidage par dates issu du niveau supérieur. On dit alors que le guidage (ou le macro-ordonnancement dont est issu le guidage) n'est pas robuste.

L'indicateur Rob^G mesure la robustesse du guidage en évaluant l'écart entre dates de fin guidantes et dates de fin des OF obtenues dans l'ordonnancement final proposé par l'approche multiniveau. Si l'ordonnancement final n'a pas de retard par rapport aux dates guidantes, cela veut dire que le macro-ordonnancement a été désagréé en un ordonnancement faisable et compatible avec les dates de guidage.

L'indicateur de robustesse s'exprime par :

$$Rob^G = \sum_{i=1}^{NOF} \max(0, cd_i^{MN} - cd_i^G) \quad (3.3)$$

L'exemple a mis en évidence un mécanisme élémentaire conduisant à la non robustesse, lié au fait que les contraintes de gamme ne sont pas prises en compte au sein d'une période. On peut remarquer que plus les périodes sont grandes, plus on peut placer un nombre important d'opérations d'un même OF sur une même période et plus important est le risque de non robustesse.

3.2.5 Efficacité du guidage

Cet indicateur, spécifique de l'approche multiniveau, cherche à apprécier globalement "l'efficacité" du module de macro-ordonnancement en se basant sur les modifications des fenêtres des OF induites par ce niveau.

Le macro-ordonnancement est dit "efficace" si les dates guidantes issues de celui-ci modifient la structure temporelle du problème initial. L'indicateur E^G mesure l'efficacité du guidage par la comparaison des dates guidantes de fin avec les dates dues initiales des différents OF.

$$E^G = \sum_{i=1}^{NOF} \max(0, dd_i^G - dd_i) \quad (3.4)$$

Pour mieux illustrer le calcul de l'efficacité du guidage reprenons l'exemple du paragraphe 2.5.2 du chapitre précédent. Prenons alors, l'information issue des tableaux 2.5 (pour les dates de fin initiales dd_i) et 2.14 (pour les date de fin guidantes dd_i^G). Le tableau 3.1 récapitule ces données et évalue l'indicateur d'efficacité correspondant, on obtient donc, ici E^G .

Le tableau 3.1 montre que certaines dates de fin guidantes sont différentes des dates dues initiales. Ces modifications résultent de l'optimisation effectuée au niveau du macro-ordonnancement. Les valeurs nulles montrent que le positionnement de l'OF respecte exactement la date due initiale (positionnement juste à temps) ou qu'il a été placé plus tôt que sa date due (OF en avance).

OF	dd_i^G	dd_i	$\max(0, dd_i^G - dd_i)$
1	44	32	12
2	46	46	0
3	33	21	12
4	42	42	0
5	60	37	23
6	72	28	44
7	31	31	0
8	60	53	7
			$E^G = 98$

TAB. 3.1 – Calcul de l'efficacité du guidage

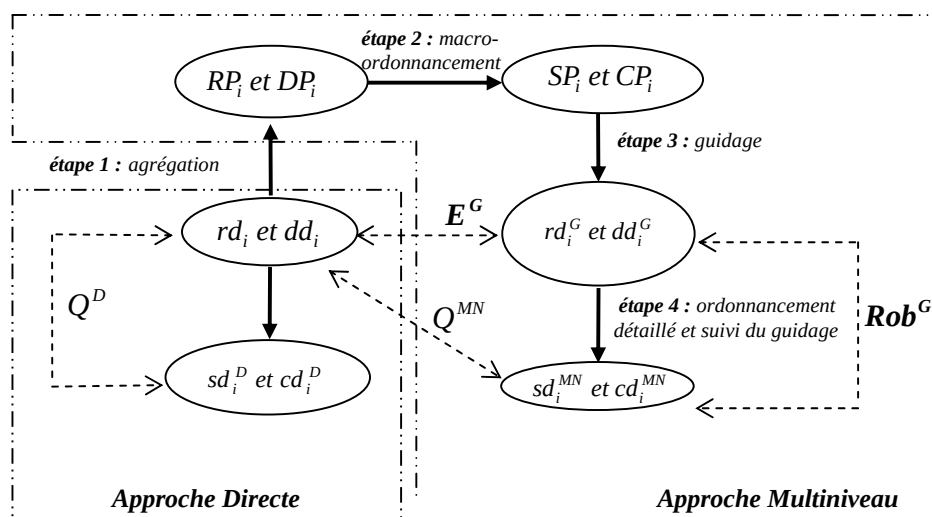


FIG. 3.9 – Indicateurs d'efficacité et de robustesse d'un ordonnancement

La figure 3.9 positionne les indicateurs de robustesse et d'efficacité par rapport aux fenêtres issues des différentes étapes.

Il est aussi important de mentionner que tous les indicateurs proposés sont basés seulement sur le calcul du retard vrai. Leur implémentation sera significative dans le cadre de problèmes fortement contraints (fenêtres temporelles serrées, charges fortes,...). En effet si le problème est lâche (notamment au niveau des dates dues), tous ces indicateurs prendront la valeur zéro.

Comme il a été déjà mentionné, les indicateurs que nous venons d'évoquer nous serviront à évaluer globalement les performances de l'approche multiniveau proposée. Dans le paragraphe 3.4 des problèmes seront traités et les résultats obtenus seront mesurés par ces indicateurs qui nous donneront des éléments de réflexion sur la performance de l'approche.

3.3 Jeux de données

3.3.1 Génération des jeux de données

Pour évaluer l'approche proposée nous avons généré différentes instances de problèmes d'ordonnancement. Ces problèmes ont été générés en utilisant un programme de génération automatique de benchmarks (en code ANSI C) proposé par [Demirkol *et al.*, 1998]. Le programme permet de générer des problèmes de différentes tailles, de différentes structures (Flow Shops et Job Shops) destinés à être résolus selon différents critères (minimisation du makespan ou des retards) ; il permet également de choisir la valeur de certains paramètres pour rendre le problème plus (ou moins) contraint au niveau des dates dues.

Ce logiciel nécessite comme données d'entrée le nombre d'ordres de fabrication et le nombre de machines dans l'environnement. Il est également nécessaire de fixer un taux de contrainte μ pour représenter le niveau de contrainte des dates dues voulues. A partir de ces données, nous obtenons en sortie les gammes et durées opératoires (qui sont générées aléatoirement par le programme) et les dates dues pour chaque OF.

Dans le cadre de ce chapitre, nous travaillerons principalement sur des instances comportant 8 OF de 5 opérations chacun. 5 ressources sont considérées. Chaque OF utilise les 5 ressources selon une structure de jobshop. L'affectation des opérations aux ressources et les durées opératoires sont tirées aléatoirement dans la fourchette [2-8] pour les durées opératoires.

3.3.2 Caractérisation des jeux de données utilisées

Pour faciliter l'analyse des résultats, il est important de pouvoir caractériser un jeu de données. Les caractéristiques principales des instances à évaluer peuvent se diviser en deux parties :

- a) celles qui sont liées aux caractéristiques générales du problème détaillé initial.
- b) celles qui sont dépendantes de la longueur de la période choisie.

a) Caractéristiques liées aux données générales du problème

La *durée moyenne* $\bar{p}$ représente la moyenne des durées des opérations des OF. Cette caractéristique sera à rapprocher de la longueur de la période de discrétisation choisie.

$$\bar{p} = \frac{\sum_{ij} p_{ij}}{\sum_{i=1}^{NOF} NOP_i} \quad (3.5)$$

La *consommation moyenne* $\overline{m_r}$, mesure la consommation moyenne sur une ressource r de l'ensemble des opérations utilisant cette ressource r . Soit $O_r = \{(i, j)/m_{ijr} \neq 0\}$, nous avons donc,

$$\overline{m}_r = \frac{\sum_{ij \in O_r} m_{ijr}}{\text{card}(O_r)} \quad (3.6)$$

Le taux de charge Ch_r d'une ressource r , mesure le rapport entre la consommation globale des opérations qui utilisent cette ressource et la capacité de cette ressource sur l'horizon considéré. Dans cette étude l'horizon considéré correspond à la plus grande date due des OF. Dans le cadre de ce chapitre, nous supposons que chaque ressource est disponible sur l'ensemble de l'horizon (avec une capacité instantanée de 1 unité). La capacité globale sur l'horizon est donc : $Capa_r = \max_i(dd_i \times 1)$

$$Ch_r = \frac{\sum_{ij \in O_r} m_{ijr}}{Capa_r} \quad (3.7)$$

Deux points doivent être notés :

- il s'agit d'un indicateur global indépendant des fenêtres associées aux OF. Il lisse la charge sur l'horizon et ne met donc pas en évidence d'éventuels pics de sollicitations sur une ressource liés à la répartition des fenêtres.
- il est nécessaire de fixer un horizon pour évaluer cet indicateur. Dans le cadre de cette étude, l'horizon choisi correspond à la date due maximale sur l'ensemble des OF.

Nous pouvons également calculer un taux de charge moyen sur l'ensemble des ressources :

$$\overline{Ch} = \frac{\sum_{r=1}^{NR} Ch_r}{NR} \quad (3.8)$$

dans lequel NR représente le nombre de ressources.

La densité d'un OF i notée Den_i , correspond au rapport entre la somme des durées opératoires d'un OF et sa fenêtre de réalisation. Cette densité matérialise le "niveau de contrainte" d'un OF c'est à dire la "marge" dont on dispose pour ordonnancer les opérations de l'OF en respectant la date due de l'OF. Plus la valeur se rapproche de 1, plus le problème est contraint et plus importants seront les retards.

$$Den_i = \frac{\sum_{j=1}^{NOP_i} p_{ij}}{fen_i} \quad (3.9)$$

dans lequel fen_i représente la fenêtre initiale de l'OF i : $fen_i = dd_i - rd_i$

La densité moyenne sur l'ensemble des OF s'exprime par :

$$\overline{Den} = \frac{\sum_{i=1}^{NOF} Den_i}{NOF} \quad (3.10)$$

Le taux de charge et la densité d'un OF permettent d'évaluer le niveau de contrainte du problème détaillé initial indépendamment de l'approche de résolution choisie.

b) Caractéristiques liées à la discrétisation (longueur de la période)

L'indicateur **OP_Per** est le nombre maximal d'opérations pouvant s'enchaîner dans une période compte tenu de la durée opératoire moyenne dans le problème considéré et de la longueur de période choisie. Cet indicateur est à rapprocher de la contrainte (2.7) du modèle présenté en section 2.2.4.

Rappelons que pour un problème détaillé donné, plus longue est la période, plus important est le nombre d'opérations d'un même OF que l'on pourra placer dans une même période. Il s'ensuit un risque plus important de générer des infaisabilités lors de l'élaboration d'un ordonnancement détaillé puisque les contraintes de gamme entre opérations d'un même OF ne sont pas prises en compte dans le macro-ordonnancement lorsque ces opérations sont positionnées dans la même période. Nous pouvons l'exprimer par :

$$OP_Per = \frac{lg}{\bar{p}} \quad (3.11)$$

Toutes les caractéristiques citées précédemment sont utilisées au cours des expérimentations afin de mieux caractériser et comprendre la nature des problèmes à traiter.

3.4 Expérimentations et analyses

Dans cette partie, nous effectuons un ensemble d'expérimentations numériques et montrons les résultats obtenus par notre approche en fonction de différentes longueurs de périodes. Ceci nous permettra d'analyser l'impact de l'agrégation du temps (discrétisation) sur la qualité de la solution proposée, sur la propriété de robustesse du guidage et sur l'efficacité du macro-ordonnancement.

3.4.1 Problème avec durées opératoires identiques

Une première série de tests a été mise en œuvre pour analyser le comportement de notre approche dans le cas où toutes les durées opératoires sont identiques. Cette simplification facilite l'analyse des résultats et met en évidence les différents éléments qui ont une incidence sur le comportement de l'approche à 2 niveaux. Afin d'analyser l'impact

du choix de la discrétisation en fonction de la durée des opérations à ordonnancer, les expérimentations sont menées pour différentes longueurs de période.

Le problème considéré est similaire à celui traité au paragraphe 2.5 en ce qui concerne la taille (nombre d'OF, nombre d'opérations par OF et nombre de machines). La différence est que les durées opératoires ont été toutes fixées à 4 unités. Les tableaux 3.2 et 3.3 récapitulent les données du problème (fenêtres et gammes); la dernière colonne du tableau 3.3 matérialise la densité de chaque OF.

OF <i>i</i>	rd_i	dd_i
1	0	32
2	0	46
3	0	21
4	0	42
5	0	37
6	0	28
7	0	31
8	0	53

TAB. 3.2 – Fenêtres temporelles initiales du problème

OF \ OP	1	2	3	4	5	$\sum p_{ij}$	Den_i
1	4 R5	4 R2	4 R4	4 R3	4 R1	20	0.62
2	4 R4	4 R5	4 R1	4 R2	4 R3	20	0.43
3	4 R5	4 R3	4 R1	4 R2	4 R4	20	0.95
4	4 R4	4 R1	4 R5	4 R2	4 R3	20	0.47
5	4 R3	4 R5	4 R2	4 R4	4 R1	20	0.54
6	4 R3	4 R5	4 R1	4 R4	4 R2	20	0.71
7	4 R2	4 R1	4 R4	4 R3	4 R5	20	0.64
8	4 R4	4 R1	4 R5	4 R3	4 R2	20	0.37

TAB. 3.3 – Gammes (durées opératoires et ressources requises)

Dans cet exemple, on considère pour simplifier que chaque opération nécessite une unité de ressource sur toute sa durée, ce qui induit une consommation m_{ijr} de 4 quelle que soit l'opération et la ressource. De plus, les ressources sont supposées continuellement disponibles sur l'ensemble de l'horizon. Le tableau 3.4 fournit les caractéristiques moyennes associées à ce problème en termes de densité des OF, durée opératoire moyenne et charge moyenne des ressources.

$\overline{Den}$	$\overline{p}$	$\overline{Ch}$
0.59	4.0	0.6

TAB. 3.4 – Caractéristiques du problème

Ces indicateurs montrent que le problème considéré est assez peu contraint compte tenu à la fois des fenêtres associées aux OF et du taux de charge des ressources.

a) Approche Directe

Avec ces données, nous utilisons l'outil Preactor pour trouver un ordonnancement avec *l'approche directe*. Preactor propose un ordonnancement sans retard, ce qui est cohérent dans le cadre d'un problème peu contraint. L'indicateur Q^D qui mesure pour un ordonnancement donné la somme des retards par rapport aux dates dues initiales est donc nul : $Q^D = 0$.

b) Approche à 2 niveaux pour différentes discrétisations

Après avoir résolu le problème initial par l'approche directe, nous le résolvons par l'approche à deux niveaux pour différentes valeurs de la longueur de période c'est à dire pour $lg = 4, 7, 8, 10$, et 16 . Le tableau 3.5 récapitule les valeurs des trois indicateurs de performance associées à l'approche multiniveau. Rappelons que Q^{MN} mesure la qualité de l'ordonnancement obtenu (somme des retards par rapport aux dates initiales), Rob^G mesure la robustesse du guidage (écarts entre dates de fin ordonnancées et dates dues guidantes) et E^G l'efficacité du guidage (écarts entre dates dues guidantes et dates dues initiales).

Type d'Approche	lg	Q^{MN} ou Q^D	Rob^G	E^G
Multiniveau	4	0	0	0
	7	15	0	121
	8	2	2	0
	10	7	0	28
	16	6	6	0
Directe	-	0	-	-

TAB. 3.5 – Indicateurs de performance des deux approches

Dans cet exemple volontairement simplifié, nous avons des résultats très diversifiés en fonction de la discrétisation choisie. On peut noter que la qualité de l'approche multiniveau est parfaite pour $lg = 4$, très bonne pour $lg = 8$ mais mauvaise pour $lg = 7$.

Pour des longueurs de période multiples de la durée opératoire ($lg = 4, 8, 16$), le macro-ordonnancement respecte les dates dues puisque l'indicateur E^G est nul. Ceci est lié au fait que le macro-ordonnancement maximise l'utilisation de la capacité agrégée et des longueurs de période sans générer de "temps mort". Pour $lg = 7$, le positionnement des OF par le macro-ordonnancement génère beaucoup de retards par rapport aux dates dues (l'efficacité du guidage est de 121). En effet, dans chaque période de 7 unités, il n'est possible de ne placer qu'une seule opération de durée 4 (contrainte (2.7) du modèle). Le retard est moindre pour $lg = 10$ puisque les temps morts sont moins longs (2 unités sont perdues par période) et moins nombreux (nombre de périodes plus faible).

On remarque également que la robustesse est parfaite $Rob^G = 0$ pour $lg = 4$ et $lg = 7$. Ceci est lié au fait que compte tenu des durées opératoires et des longueurs de période, il y a une seule opération par période et donc pas de risque d'infaisabilité. Les résultats

sont analysés plus finement pour $lg = 4$ et $lg = 7$.

Analyse des résultats pour $lg=4$

Après agrégation des dates initiales en périodes, génération des opérations fictives qui compensent l'effet de l'agrégation, les données agrégées sont fournies au solveur XpressMP qui établit le macro-ordonnancement présenté dans la figure 3.10.

On constate que le macro-ordonnancement positionne une seule opération par période ce qui laisse préjuger qu'il n'y aura pas d'infaisabilités lors de la recherche d'un ordonnancement détaillé. Au niveau de la valeur du retard, la planification obtenue nous donne une valeur de 0, ce qui veut dire qu'il n'existe pas de retard dans cette planification ; tous les OF ont été positionnés à temps ou en avance par rapport à leur date due.

Une fois le macro-ordonnancement obtenu, les périodes de début et fin planifiées sont transformées en dates guidantes en utilisant le mécanisme de guidage par dates décrit dans le chapitre 2. Les opérations fictives étant toutes positionnées dans une période différente de celles des dernières opérations des gammes, les dates guidantes sont obtenues par l'algorithme de calcul de dates de fin guidantes (cas a) présenté au paragraphe 2.4.3. Le tableau 3.6 montre les dates issues de ce guidage qui sont transmises au niveau inférieur de la structure.

OF	rd_i	dd_i	rd_i^G	dd_i^G	$\max(0, dd_i^G - dd_i)$
1	0	32	4	32	0
2	0	46	0	44	0
3	0	21	0	20	0
4	0	42	4	40	0
5	0	37	8	36	0
6	0	28	0	28	0
7	0	31	0	28	0
8	0	53	24	52	0
					$E^G = 0$

TAB. 3.6 – Dates initiales et dates guidantes

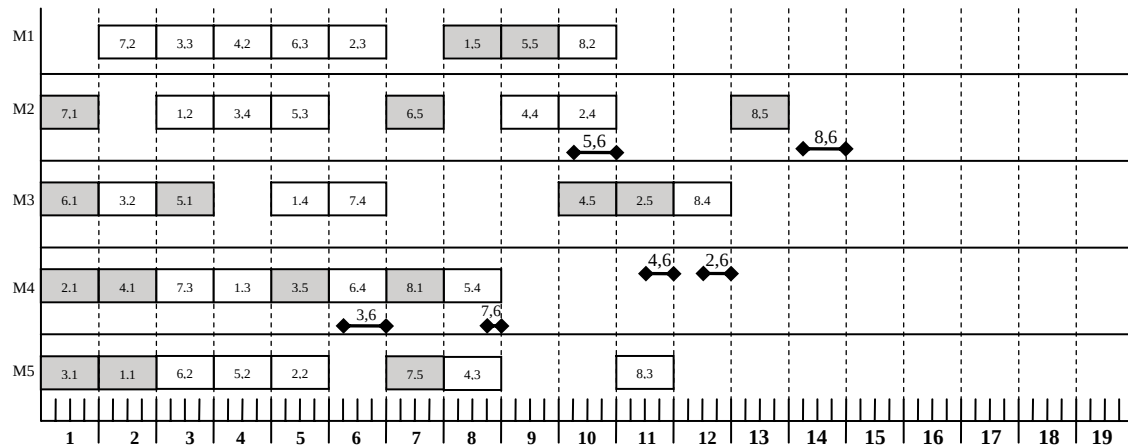
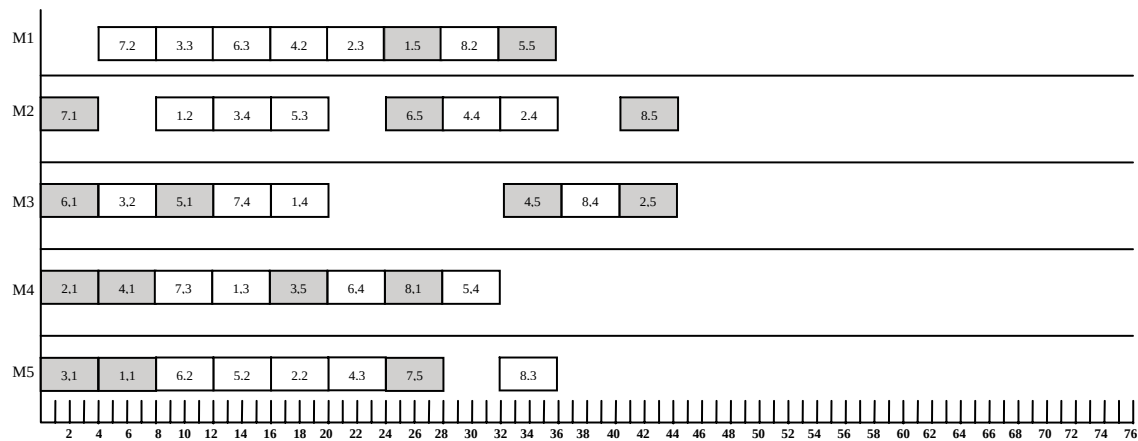
On peut remarquer que le guidage modifie les fenêtres initiales sans que cela n'apparaisse dans l'indicateur d'efficacité (OF positionnés en avance). Ainsi par exemple, la fenêtre de l'OF 1 est raccourcie par une modification de la date de début. La fenêtre de l'OF 8 est fortement réduite par une modification simultanée des dates de début et de fin associées à cet OF.

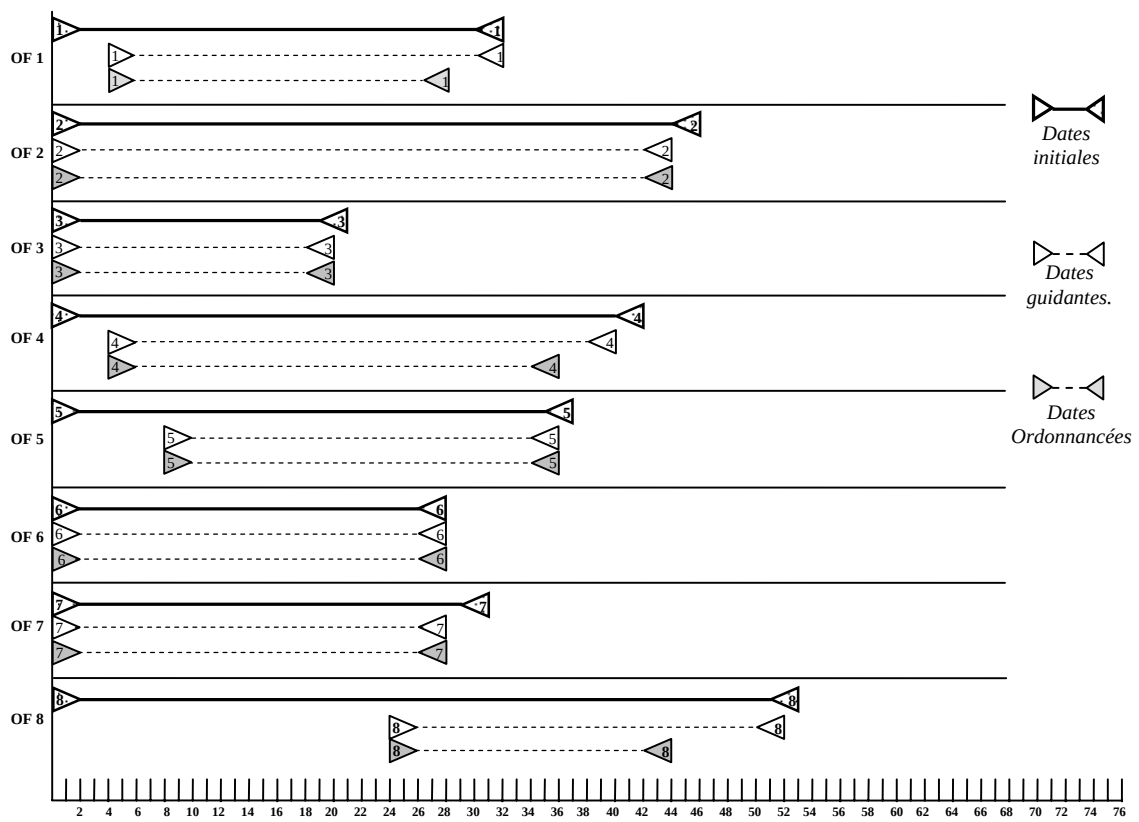
Ces dates guidantes sont alors fournies au logiciel d'ordonnancement Preactor qui les utilise pour établir l'ordonnancement détaillé.

La figure 3.11 montre l'ordonnancement détaillé proposé par Preactor. On voit que le séquençement des opérations sur les ressources dans l'ordonnancement détaillé n'est pas forcément identique à celui du macro-ordonnancement. Ceci est cohérent dans le cas du guidage considéré. En effet, seules les dates guidantes de début et fin sont transmises au niveau détaillé qui a donc l'autonomie du placement des opérations en fonction de sa propre logique. L'ordonnancement détaillé ne génère aucun retard par rapport aux dates

guidantes, conduisant à une robustesse parfaite. Ce résultat était attendu puisque il y a une seule opération positionnée sur chaque période et donc pas de risque d'infaisabilité susceptible de générer du retard.

Finalement, la figure 3.12 synthétise l'évolution des fenêtres en matérialisant les fenêtres initiales, les fenêtres guidantes issues du macro-ordonnancement et les fenêtres de réalisation issues de l'ordonnancement détaillé.

FIG. 3.10 – Macro-ordonnancement pour $lg = 4$ FIG. 3.11 – Ordonnancement détaillé issu de l'approche multiniveau pour $lg = 4$

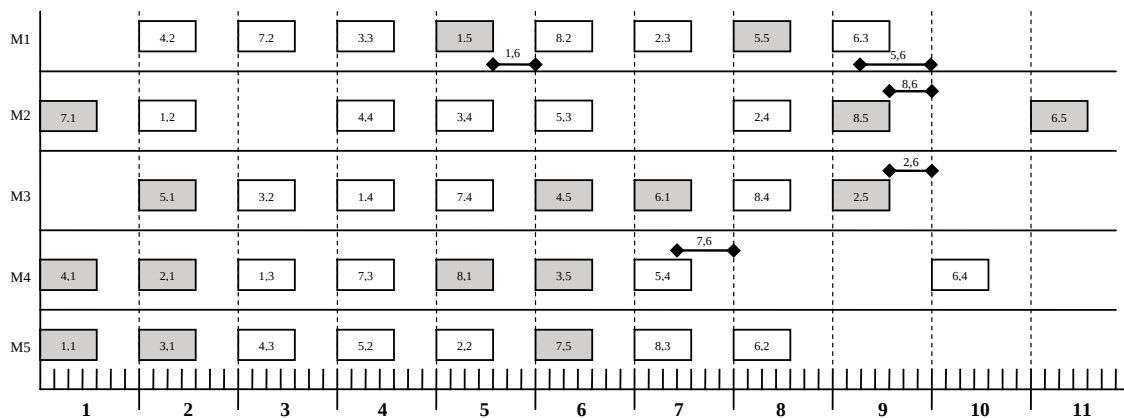
FIG. 3.12 – Ordonnancement détaillé issu de l'approche multiniveau pour $lg = 4$

Analyse des résultats pour $lg=7$

Nous analysons maintenant les résultats pour une longueur de période de 7 unités. Les figures 3.13 et 3.14 montrent le macro-ordonnancement et l'ordonnancement obtenus à chaque niveau. Le tableau 3.7 fournit les dates guidantes issues du macro-ordonnancement et la figure 3.15 synthétise l'évolution des fenêtres liée aux différentes étapes de l'approche multiniveau.

OF	rd_i	dd_i	rd_i^G	dd_i^G	$\max(0, dd_i^G - dd_i)$
1	0	32	0	32	0
2	0	46	4	60	14
3	0	21	4	42	21
4	0	42	0	42	0
5	0	37	0	56	19
6	0	28	4	77	49
7	0	31	0	42	11
8	0	53	16	60	7
					$E^G = 121$

TAB. 3.7 – Dates initiales et dates guidantes

FIG. 3.13 – Macro-ordonnancement pour $lg = 7$

Le macro-ordonnancement place les OF très en retard par rapport à leurs dates dues ; l'efficacité du guidage est de 121. Ceci est du à la longueur lg choisie. En effet, une seule opération de durée 4 peut être positionnée dans chaque période, ce qui génère des "temps morts" importants dans chaque période et retarde d'autant la réalisation des OF. Les dates guidantes transmises sont donc bien supérieures aux dates dues initiales. L'ordonnancement détaillé place les opérations au plus tôt et a beaucoup de facilité à suivre ces dates guidantes, générant finalement moins de retard que prévu par le macro-ordonnancement. La robustesse est donc parfaite. Cependant, le guidage trop lâche n'est pas suffisamment discriminant pour que l'ordonnancement détaillé ne génère aucun retard par rapport aux dates initiales et la qualité globale de l'approche est dégradée.

A travers cet exemple simple où les durées opératoires sont identiques, il paraît souhaitable pour avoir de bons résultats avec l'approche multiniveau, que d'une part le

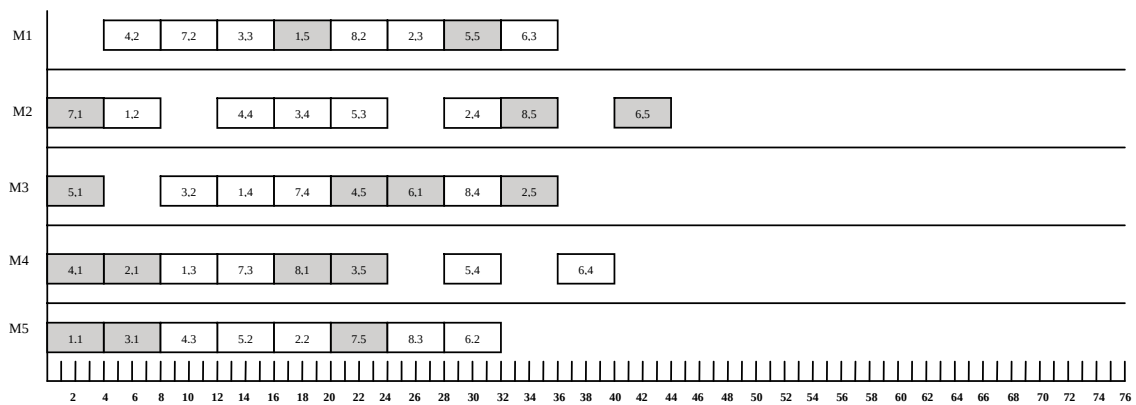


FIG. 3.14 – Ordonnancement détaillé

macro-ordonnancement ne crée pas de "temps morts" dans l'utilisation des ressources et que d'autre part, le nombre d'opérations d'un même OF affectées à une même période ne soit pas trop important afin de favoriser la robustesse du guidage. La longueur de la période devrait être choisie en fonction de ces considérations. Lorsque les durées opératoires sont variées, les phénomènes se compensent partiellement et le choix de la durée opératoire peut s'avérer très délicat.

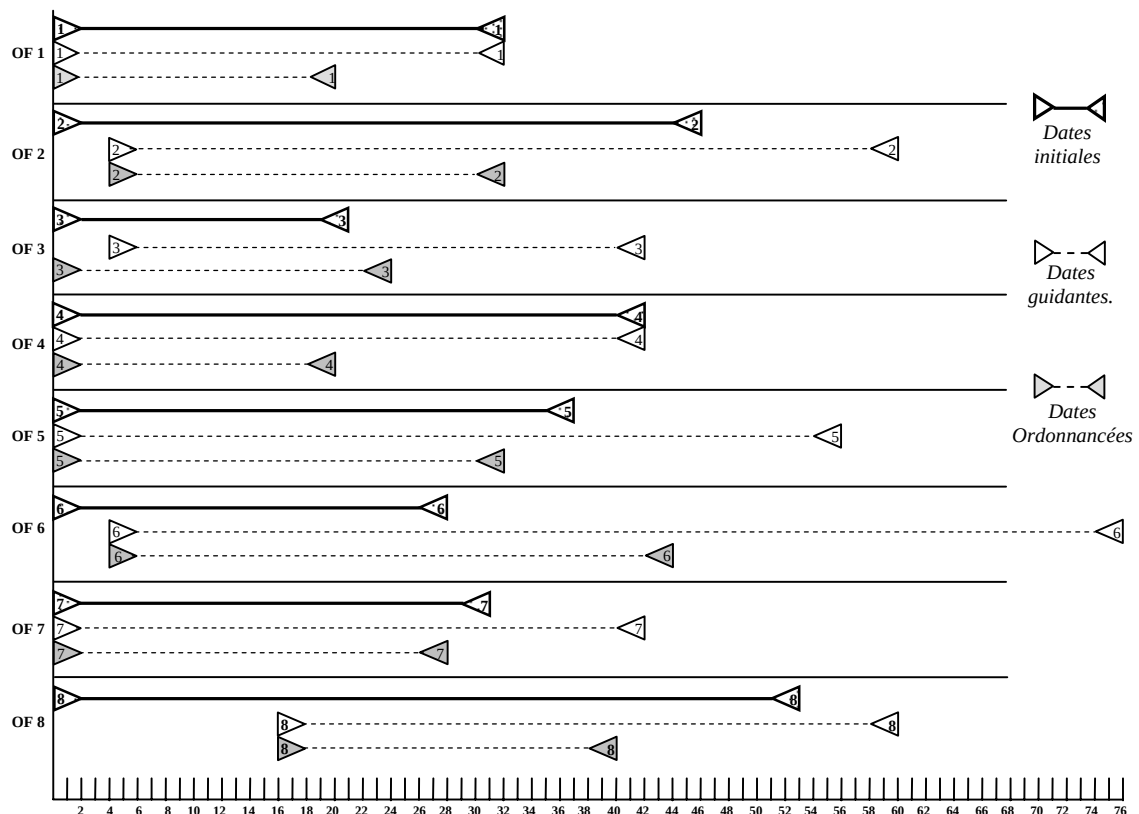


FIG. 3.15 – Evolution des fenêtres des OF

3.4.2 Problèmes avec durées opératoires différentes

D'autres expérimentations sont mises en œuvre pour des problèmes dont les durées opératoires sont variables. Les problèmes sont présentés ici par ordre croissant de leur caractéristique de charge.

●Problème à charge moyenne PB_{CM}

Le problème considéré noté PB_{CM} comporte 6 OF, 6 opérations par OF et 6 ressources. Toutes les opérations passent sur chaque ressource une seule fois comme dans les exemples précédents. Les données caractéristiques de cet exemple (fenêtres et gammes opératoires) sont montrées dans les tableaux 3.8 et 3.9 :

OF	rd _i	dd _i
1	0	30
2	0	55
3	0	50
4	0	40
5	0	35
6	0	45

TAB. 3.8 – Fenêtres temporelles initiales du problème

OF \ OP	1	2	3	4	5	6	$\sum p_{ij}$	Den_i
1	1 R3	3 R1	6 R2	7 R4	3 R6	6 R5	26	0.86
2	8 R2	5 R3	10 R5	10 R6	10 R1	4 R4	47	0.85
3	5 R3	4 R4	8 R6	9 R1	1 R2	7 R5	34	0.68
4	5 R2	5 R1	5 R3	3 R4	8 R5	9 R6	35	0.87
5	9 R3	3 R2	5 R5	4 R6	3 R1	1 R4	25	0.71
6	3 R2	3 R4	9 R6	10 R1	4 R5	1 R3	30	0.60

TAB. 3.9 – Gammes opératoires (durée - ressource requise)

Les caractéristiques du problème (densité moyenne des OF, durée opératoire moyenne et charge moyenne) sont fournies dans le tableau 3.10.

$\overline{Den}$	$\overline{p}$	$\overline{Ch}$
0.76	5.4	0.56

TAB. 3.10 – Caractéristiques du problème

Les caractéristiques de cet exemple montrent que la densité des dates dues est forte $\overline{Den} = 0.76$; en ce qui concerne la charge des ressources, il présente une sollicitation de ressources moyenne $\overline{Ch} = 0.56$.

Les valeurs des indicateurs issus des expérimentations effectuées sur ce problème sont montrées dans le tableau 3.11. Les résultats ont été obtenus d'abord en appliquant l'approche directe, puis l'approche à deux niveaux avec différentes longueurs de période.

Type d'Approche	lg	Q^{MN} ou Q^D	Rob^G	E^G
Multiniveau	10	40	8	50
	15	37	0	60
	20	47	17	30
	25	49	33	30
	30	47	47	0
Directe	-	47	-	-

TAB. 3.11 – Indicateurs de performance des approches

On voit dans cet exemple, que pour les trois premières longueurs de période (cellules grisées), la qualité de l'ordonnancement détaillé obtenu par l'approche multiniveau est meilleure ou égale à celle de l'ordonnancement issu de l'approche directe. La discrétisation à 15 montre une réduction des retards de 10 jours, ce qui est remarquable étant donné la petite taille du problème. Pour cette discrétisation, l'optimisation effectuée au niveau supérieur et le guidage qui en découle permettent au niveau détaillé d'obtenir un très bon ordonnancement. Par contre, la longueur de période de 25 conduit à un guidage sans doute trop optimiste que le niveau détaillé ne peut suivre (mauvaise robustesse). Dans cet exemple nous trouvons le phénomène de la dégradation de la robustesse au fur et à mesure que la période de discrétisation augmente.

●Problème à charge forte

Problème PB_{CF1} . Un problème à charge forte est développé pour 8 OF, 5 opérations et 5 ressources ; les dates de début au plus tôt, les dates dues, les gammes opératoires et les caractéristiques sont résumées dans les tableaux 3.12, 3.13 et 3.14 :

OF i	rd_i	dd_i
1	0	33
2	0	18
3	0	46
4	0	20
5	0	27
6	0	37
7	0	50
8	0	40

TAB. 3.12 – Fenêtres temporelles initiales du problème

Tout d'abord, les caractéristiques du problème nous montrent que l'exemple à traiter est d'une nature contrainte, les indicateurs de densité des OF et de la sollicitation de ressources sont de nature forte, $\overline{\text{Den}} = 0.69$ et $\overline{\text{Ch}} = 0.72$ respectivement.

OF \ OP	1	2	3	4	5	$\sum p_{ij}$	Den_i
1	2 R3	2 R1	5 R4	4 R2	6 R5	19	0.57
2	8 R4	3 R5	3 R3	2 R2	2 R1	18	1
3	6 R2	7 R1	7 R4	4 R5	2 R3	26	0.56
4	2 R1	6 R5	2 R2	3 R4	6 R3	19	0.95
5	5 R5	2 R1	4 R4	2 R2	8 R3	21	0.77
6	4 R2	7 R4	4 R1	3 R3	4 R5	22	0.59
7	8 R3	5 R5	2 R1	4 R2	8 R4	27	0.54
8	8 R2	4 R5	3 R3	3 R1	5 R4	23	0.57

TAB. 3.13 – Gammes (durées opératoires et ressources requises)

$\overline{Den}$	$\overline{p}$	$\overline{Ch}$
0.69	4.37	0.70

TAB. 3.14 – Caractéristiques du problème

Les deux approches ont été appliquées sur cet exemple, le récapitulatif des expérimentations est présenté dans le tableau 3.15.

Type d'Approche	lg	Q^{MN} ou Q^D	Rob^G	E^G
Multiniveau	8	43	11	42
	12	31	1	49
	16	30	10	28
	20	32	21	16
	24	75	45	37
	32	64	33	31
	40	36	36	0
Directe	-	36	-	-

TAB. 3.15 – Indicateurs de performance des deux approches

Comme dans les exemples précédents, l'approche multiniveau réussit à trouver pour trois longueurs de période, des solutions meilleures que la solution proposée par l'approche directe (cellules grisées dans le tableau 3.15).

Dans cet exemple on retrouve les mécanismes déjà soulignés dans les exemples précédents :

- Pour des périodes courtes, le niveau supérieur propose un positionnement réaliste des OF (retard du guidage de l'ordre de grandeur de celui de l'approche directe) qui peut donc être suivi par le niveau détaillé (bonne robustesse). L'ordonnancement obtenu est de qualité.
- Lorsque les périodes s'allongent, il y a moins de temps morts dans le macroor-

donnancement (E^G plus faible) mais la robustesse se dégrade à cause de la perte d'information (omission de contraintes de précédence) associée à l'agrégation.

Enfin, nous remarquons que pour la discrétisation de 40, l'indicateur d'efficacité du guidage est à 0, ce qui veut dire qu'il n'existe plus de guidage ; les dates guidantes sont les mêmes que les dates détaillées utilisées par l'approche directe.

Problème PB_{CF2} . Nous reprenons ici le problème qui a été présenté pour illustrer la mise en oeuvre de la structure multiniveau proposée (cf. paragraphe 2.5.2). Les données liées aux fenêtres et aux gammes sont rappelées dans les tableaux 2.5 et 2.6. Le tableau 3.17 fournit les indicateurs associés aux solutions obtenues avec différentes longueurs de périodes ainsi que l'indicateur de qualité de l'approche directe.

$\overline{Den}$	$\overline{p}$	$\overline{Ch}$
0.70	4.8	0.72

TAB. 3.16 – Caractéristiques du problème

Type d'Approche	lg	Q^{MN} ou Q^D	Rob^G	E^G
Multiniveau	8	46	4	70
	12	47	1	98
	16	59	5	65
	20	62	10	67
	24	72	38	39
	32	77	62	32
	40	61	53	27
Directe	-	61	-	-

TAB. 3.17 – Indicateurs de performance des deux approches

Les résultats des expérimentations pour cet exemple montrent des résultats intéressants pour certains choix de longueurs de périodes, dont les plus remarquables sont pour $lg = 8$, $lg = 12$ et $lg = 16$ avec 46, 47 et 59 jours de retard respectivement face aux 61 jours de retard proposés par l'ordonnancement trouvé par l'approche directe.

Pour ce problème, on observe encore qu'au fur et à mesure que l'on augmente la longueur de la période, la qualité de l'ordonnancement se dégrade ainsi que la robustesse.

Problème à charge très forte PB_{CTF} .

Le problème PB_{CTF} comme les précédents comporte 8 OF avec 5 opérations chacun, le nombre de ressources est également de 5. Les différences sont au niveau des gammes opératoires des OF et des dates de fin souhaitées. Les données et caractéristiques du PB_{CTF} sont montrées dans les tableaux 3.18, 3.19 et 3.20 :

OF <i>i</i>	<i>rd_i</i>	<i>dd_i</i>
1	0	27
2	0	25
3	0	34
4	0	30
5	0	44
6	0	32
7	0	20
8	0	38

TAB. 3.18 – Fenêtres temporelles initiales du problème PB_{CTF}

OF \ OP	1	2	3	4	5	$\sum p_{ij}$	Den_i
1	4 R1	2 R4	7 R3	5 R2	3 R5	21	0.77
2	7 R5	8 R1	4 R3	2 R4	3 R2	24	0.96
3	4 R1	8 R2	5 R5	2 R4	3 R3	22	0.64
4	6 R4	5 R5	4 R2	3 R3	3 R1	21	0.70
5	8 R4	2 R2	2 R5	4 R1	4 R3	20	0.45
6	8 R2	3 R5	2 R1	3 R4	5 R3	21	0.65
7	4 R4	7 R5	2 R2	2 R1	3 R3	18	0.90
8	6 R5	8 R3	5 R1	2 R4	3 R2	24	0.63

TAB. 3.19 – Gammes (durées opératoires et ressources requises)

$\overline{Den}$	$\overline{p}$	$\overline{Ch}$
0.72	4.27	0.77

TAB. 3.20 – Caractéristiques du problème

Les caractéristiques indiquent que le problème présente une densité forte des OF ($\overline{Den} = \mathbf{0.72}$); la charge (solicitation) des ressources est très forte ($\overline{Ch} = \mathbf{0.77}$). Ce taux de contrainte élevé explique les retards importants associés à l'ordonnancement obtenu par l'approche directe : 43 jours de retard.

Le tableau 3.21 récapitule les valeurs des différents solutions obtenues pour différentes longueurs de période.

Type d'Approche	lg	Q^{MN} ou Q^D	Rob^G	E^G
Multiniveau	8	36	3	57
	12	48	11	69
	16	52	25	28
	20	43	25	24
	24	44	11	44
	32	50	34	30
	40	43	43	0
Directe	-	43	-	-

TAB. 3.21 – Indicateurs de performance des deux approches

Pour une discrétisation ($lg = 8$), l'approche multiniveau réussit à trouver un ordonnancement qui améliore de 7 jours l'ordonnancement proposé par l'approche directe, ce qui est notable compte tenu du caractère fortement contraint du problème considéré. Nous trouvons également deux autres discrétisations (20 et 40) qui obtiennent un ordonnancement de même qualité que ceux issus que l'approche directe.

Une remarque que nous pouvons faire est que les indicateurs de guidage et robustesse ont tous les deux des répercussions sur la qualité de l'approche. En effet, si le guidage est mauvais (positionnements des OF très en retard par rapport aux dates dues initiales matérialisé par un indicateur E^G élevé), malgré une robustesse acceptable, la qualité de l'ordonnancement obtenu ne pourra pas être bonne (par exemple pour $lg = 12$). Si le guidage se rapproche des dates dues initiales mais si la robustesse n'est pas bonne, une mauvaise qualité de l'approche apparaît ($lg = 40$).

Pour ce problème, une discrétisation petite conduit à un ordonnancement de bonne qualité par rapport à la solution de l'approche directe.

3.4.3 Récapitulatif et conclusions des tests

Pour faciliter l'analyse des expérimentations en fonction de la discrétisation utilisée, nous avons cherché à classer les différentes expérimentations en nous basant sur la caractéristique OP_Per c'est à dire sur le rapport entre la durée opératoire moyenne et la longueur de la période. Rappelons que OP_Per indique le nombre maximal d'opérations d'un même OF qui peuvent être affectées à une même période dans le macro-ordonnancement. Les tableaux 3.22 et 3.23 fournissent la valeur de cette caractéristique pour les différents problèmes considérés et les différentes longueurs des périodes.

Nous nous focalisons plus particulièrement sur la qualité de l'ordonnancement obtenu par l'approche multiniveau et sur la robustesse du guidage.

- **Analyse de la qualité de l'ordonnancement obtenu**

Pour chaque problème considéré, les résultats concernant la qualité sont maintenant présentés en fonction de la caractéristique OP_Per . De plus, de manière à nous affranchir de valeurs numériques difficiles à interpréter dans l'absolu, nous évaluons le taux d'amélioration (en terme de retards) procuré par l'approche à deux niveaux. Ce taux de qualité TQ est obtenu par (3.12) :

lg \ Problèmes	PB_{CM} $\bar{p} = 5.47$
10	1.82
15	2.74
20	3.65
25	4.57
30	5.48

TAB. 3.22 – Valeurs de OP_Per dans les expérimentations sur PB_{CM}

lg \ Problèmes	PB_{CF1} $\bar{p} = 4.37$	PB_{CF2} $\bar{p} = 4.8$	PB_{CTF} $\bar{p} = 4.27$
8	1.8	1.6	1.9
12	2.7	2.5	2.8
16	3.7	3.3	3.7
20	4.6	4.1	4.7
24	5.5	5.0	5.6
32	7.3	6.6	7.5

TAB. 3.23 – Valeurs de OP_Per dans les expérimentations sur $PB_{CF1}, PB_{CF2}, PB_{CTF}$

$$TQ(en\%) = \frac{Q^D - Q^{MN}}{Q^D} \times 100 \quad (3.12)$$

Ainsi par exemple si l'approche directe conduit à un ordonnancement dont le retard global par rapport aux dates dues est de 10 jours alors que le retard dans l'ordonnancement issu de l'approche multiniveau est de 5 jours, le taux d'amélioration est de 50%.

Une valeur positive de TQ représente une amélioration apportée par l'approche multiniveau ; à l'inverse, une valeur négative correspond à une dégradation de l'indicateur de qualité issu de l'approche multiniveau.

Les taux issus des expérimentations sont indiqués dans le tableau 3.24 pour chaque problème et chaque valeur de OP_Per .

Différents points déjà mentionnés dans les analyses précédentes apparaissent clairement ici.

Pour les problèmes à charges moyennes ou fortes, l'approche multiniveau améliore la qualité de l'ordonnancement obtenu de manière significative tant que OP_Per reste inférieur à 4. Cette amélioration peut être significative (jusqu'à 24%).

Ce résultat n'est plus vrai pour le problème très contraint considéré.

Il existe dans ce tableau de résultats un point singulier pour PB_{CF1} et $1 < Op_Per < 2$: l'approche multiniveau dégrade l'ordonnancement obtenu de façon sensible. Ce résultat met en évidence les difficultés d'analyse de ces problèmes fortement combinatoires : deux problèmes de caractéristiques "voisines" peuvent dans certains cas conduire à des résultats qui diffèrent de manière importante. Par exemple, deux macro-ordonnements équivalents du point de vue de leur fonction objectif peuvent être sensiblement diffé-

lg/p	Problème à charge moyenne (PC_{CM})		Problème à charge forte (PC_{CF1})		Problème à charge forte (PC_{CF2})		Problème à charge très forte (PC_{CTF})	
	$\overline{Den}$	$\overline{Ch}$	$\overline{Den}$	$\overline{Ch}$	$\overline{Den}$	$\overline{Ch}$	$\overline{Den}$	$\overline{Ch}$
	0.77	0.56	0.69	0.70	0.70	0.72	0.72	0.77
$1 < OP_Per < 2$	+14%		-19%		+24%		+16%	
$2 < OP_Per < 3$	+21%		+13%		+22%		-11%	
$3 < OP_Per < 4$	0%		+16%		+3%		-20%	
$4 < OP_Per < 5$	-4%		+11%		-1%		0%	
$5 < OP_Per < 6$	0%		-100%		-18%		-2%	
$6 < OP_Per < 8$	-		-77%		-26%		-16%	

TAB. 3.24 – Taux d'amélioration de la qualité par l'approche multiniveau

rents du point de vue du positionnement des OF. Ils peuvent alors conduire à des guidages différents et induire des ordonnancements détaillés différents. Il serait intéressant d'approfondir ces mécanismes d'équivalence de solutions agrégées qui peuvent peut être expliquer certaines singularités dans les résultats.

Il est enfin important de noter que le nombre d'expérimentations réalisées n'est pas suffisant pour obtenir des caractéristiques statistiques fortes.

• Analyse de la robustesse de l'approche

Sur le même principe, nous avons cherché à synthétiser les résultats concernant la robustesse de l'approche en fournissant une mesure relative de la robustesse de manière à faciliter la comparaison de toutes les expérimentations entre elles. L'indicateur Rob^G mesure la robustesse du guidage en comparant les dates de fin des OF dans l'ordonnancement multiniveau avec les dates de fin guidantes transmises au niveau détaillé. Pour obtenir une mesure relative de la robustesse, nous construisons un indicateur qui positionne la robustesse par rapport à la longueur totale des fenêtres guidantes (exprimées en jours). On obtient ainsi un indicateur (3.13) de la robustesse relative suivant :

$$Rob_{rel}^G(en\%) = \frac{Rob^G}{\sum_{i=1}^{NOF} fen_i^G} \times 100 \quad \text{avec} \quad fen_i^G = dd_i^G - rd_i^G \quad (3.13)$$

Lorsque l'ordonnancement détaillé suit parfaitement les dates guidantes (OF en avance ou juste à temps par rapport aux dates guidantes), la robustesse est parfaite et les indicateurs sont nuls (en absolu comme en relatif). Les valeurs contenues dans le tableau 3.25 mesurent l'éloignement à la robustesse parfaite et sont nécessairement positives. Plus faible est le pourcentage, meilleure est la robustesse.

On observe que la robustesse se dégrade fortement au fur et à mesure que OP_Per augmente. Ceci confirme bien l'analyse théorique sur la robustesse : plus le nombre d'opérations d'un même OF affectées à une même période dans le macro-ordonnancement est élevé, plus la perte d'informations est importante au niveau supérieur, plus optimiste est alors le macro-ordonnancement et donc plus nombreux sont les risques de non robustesse.

lg/p	Problème à charge moyenne (PC_{CM})		Problème à charge forte(PC_{CF1})		Problème à charge forte(PC_{CF2})		Problème à charge très forte(PC_{CTF})	
	$\overline{Den}$	$\overline{Ch}$	$\overline{Den}$	$\overline{Ch}$	$\overline{Den}$	$\overline{Ch}$	$\overline{Den}$	$\overline{Ch}$
	0.77	0.56	0.69	0.70	0.70	0.72	0.72	0.77
$1 < OP_Per < 2$	2.8%		4.2%		1%		1%	
$2 < OP_Per < 3$	0%		0.3%		0.2%		3.8%	
$3 < OP_Per < 4$	6.3%		3.6%		1.5%		9%	
$4 < OP_Per < 5$	12%		7.8%		2.9%		9%	
$5 < OP_Per < 6$	18%		16%		13.5%		4.2%	
$6 < OP_Per < 8$	-		12%		19.2%		12%	

TAB. 3.25 – Robustesse relative du guidage

Il apparaît dans le tableau que la charge du problème n'a pas une influence sensible sur la robustesse.

En conclusion, le choix de la longueur de la période doit intégrer l'ensemble de ces considérations. L'indicateur OP_Per doit être suffisamment petit pour garantir la qualité et la robustesse de l'approche mais ne doit pas cependant conduire à un modèle de macro-ordonnancement trop important en taille dont le temps de résolution serait prohibitif. Notons que pour les problèmes académiques traités, les temps de calcul sont faibles (inférieur ou de l'ordre de la minute) pour des petites longueurs de discrétisation.

Sur les expérimentations conduites, compte-tenu de la qualité et de la robustesse, OP_Per pourrait être choisi inférieur ou égal à 4.

Conclusion du chapitre 3

Ce chapitre s'est focalisé sur l'évaluation de l'approche multiniveau. Cette évaluation repose sur un ensemble d'expérimentations numériques de caractéristiques variées (taux de charge des ressources, densité des OF). Pour chaque problème considéré, l'approche multiniveau a été mise en œuvre pour différentes longueurs de la période considérée au niveau du macro-ordonnancement. Ceci permet de mettre en évidence l'impact de ce paramètre fondamental sur les performances de l'approche.

Trois aspects ont été plus particulièrement étudiés à travers des indicateurs qui mesurent la qualité de l'ordonnancement obtenu, la robustesse et l'efficacité du guidage.

Les expérimentations numériques et la comparaison avec l'approche directe montrent que l'approche multiniveau conduit à des résultats prometteurs lorsque la longueur de la période reste raisonnable.

Deux points méritent cependant d'être soulignés. D'une part, le nombre d'expérimentations est insuffisant pour obtenir des conclusions statistiquement justifiées. D'autre part, le contexte volontairement restreint de l'expérimentation (limitation des leviers décisionnels pris en compte) ne permet pas de valoriser complètement les potentialités fonctionnelles de l'approche multiniveau.

Chapitre 4

Proposition d'enrichissement de l'approche

Introduction au chapitre 4

L'enrichissement de l'approche multiniveau proposée dans les chapitres précédents fait l'objet de ce chapitre. Le chapitre précédent nous a présenté une évaluation de l'approche multiniveau pour tester ses performances face à des différents types de problèmes. Dans ces problèmes la structure décisionnelle a été mise en œuvre en utilisant un guidage basé sur les dates issues du macro-ordonnancement. L'objectif principal du problème d'ordonnancement était de minimiser les retards par rapport à des dates dues. Des expérimentations ont été conduites afin de tester l'approche face à cas de figures : différentes longueurs de périodes pour le macro-ordonnancement, différents taux de contraintes,...

Afin d'enrichir l'approche nous allons proposer dans ce chapitre d'autres types de guidage. Nous allons également proposer un mécanisme d'amélioration de la robustesse. Nous allons également étendre cette approche à d'autres types de problèmes souvent rencontrés dans la réalité industrielle tels que les calendriers de disponibilités des ressources et la minimisation des encours. Ce chapitre est composé de trois parties :

- La première partie, propose deux nouveaux mécanismes de guidage. Ces guidages sont issus d'une analyse plus fine du positionnement des opérations des OF dans le macro-ordonnancement optimisé. Les deux guidages proposés sont le guidage par "sous-OF" et le guidage par "contraintes de précédence". Les principes et expérimentations sur des exemples sont présentés dans le premier paragraphe.
- La deuxième partie propose un mécanisme d'amélioration de la robustesse. Ce mécanisme s'appuie sur une "sous estimation" au niveau macro-ordonnancement de caractéristiques fondamentales (longueur de discrétisation, capacité des ressources) Ceci facilite le respect des plans proposés par le module de macro-ordonnancement. Des expérimentations numériques sont présentées en fin de paragraphe.
- Finalement, la troisième partie est consacrée à quelques essais de diversification du problème global d'ordonnancement. Le premier point abordé concerne la prise en compte de calendriers de disponibilité de ressources. Une autre problématique liée à la minimisation des encours est également abordée. Dans ce contexte, une

modification du critère de base du modèle d'ordonnancement sera proposée. Des expérimentations numériques sont également présentées et analyses.

4.1 Autres modes de guidage

Dans le chapitre 2 nous avons proposé un mécanisme de guidage de base, le "guidage par dates".

Nous souhaitons maintenant étudier l'impact de mécanismes de guidage plus "fins" sur les performances de l'approche multiniveau. Pour effectuer cette étude, nous proposons deux autres mécanismes qui profitent du positionnement des opérations des OF sur les ressources dans l'horizon. Le premier mécanisme que nous allons présenter consiste à réaliser un guidage par les dates intermédiaires associées à des sous ensembles d'opérations qui ont été positionnées par le macro-ordonnancement sur une même période agrégée. Le deuxième mécanisme guide par la prise en compte des contraintes de séquence que l'on peut obtenir à partir du positionnement des opérations dans le macro-ordonnancement. En fin de chaque paragraphe une série de tests est présentée pour mieux illustrer les fonctionnements de ces différents mécanismes.

4.1.1 Mécanisme de guidage par dates intermédiaires (principe)

L'information issue du module de macro-ordonnancement peut être interprétée et utilisée de manières différentes. Dans le mécanisme de guidage de base nous avons utilisé uniquement le positionnement global des OF, à savoir le positionnement des premières et dernières opérations de chaque OF (cf. chapitre 2).

A partir de la planification du macro-ordonnancement il existe différentes manières d'exploiter l'information obtenue par ce niveau. Dans cette section nous présentons un guidage qui exploite plus finement le positionnement sur les périodes, des opérations sur les ressources de manière à générer des dates intermédiaires pour des opérations ou des sous-ensembles d'opérations.

Avant de décrire cette approche de guidage il est important de définir la notion de "Sous-OF". Un sous-OF k (SOF_{ik}) d'un OF i est un sous ensemble d'opérations (i, j) appartenant cet OF qui sont placées sur une même période t dans un macro-ordonnancement. Autrement dit, un OF i est décomposé en autant de sous-OF que de périodes sur lesquelles ses opérations ont été placées. La figure 4.1 montre un macro-ordonnancement partiel (limité à l'OF i , avec une représentation du positionnement sur les périodes et non sur les ressources) et la formation des sous-OF générés.

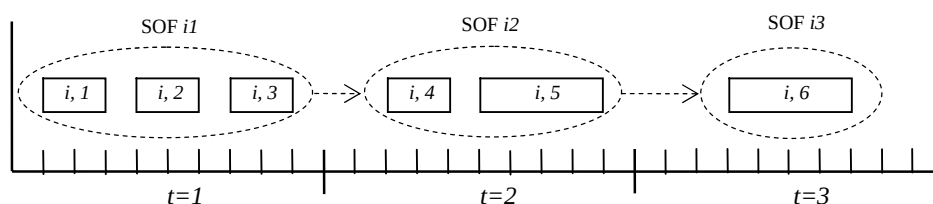


FIG. 4.1 – Construction des Sous-OF

Il est alors clair qu'un OF i peut être décomposé en un (si toutes les opérations de l'OF sont positionnées sur la même période) ou plusieurs sous-OF.

A partir de cette décomposition, il est possible d'associer des dates de début et de fin aux sous-OF. Par ce biais, on effectue une forme de découplage des sous-OF entre-eux. Ces dates sont transmises au niveau inférieur qui considère les sous-OF comme des OF indépendants (caractérisés par une gamme et une fenêtre temporelle) et les ordonnance de manière classique.

Dans ce mécanisme, le guidage "habituel" par dates intervient pour déterminer les dates de début de chaque sous-OF (cf. paragraphe 2.4.3) et la date de fin de l'ensemble de sous-OF (cf. paragraphe 2.4.3). Autrement dit, le guidage se fait par l'affectation d'une date de début rd_{ik}^G pour chaque sous-OF et une date de fin dd_i^G commune pour tous les sous-OF de l'OF i .

Nous limitons cette étude à l'attribution d'une date de fin commune pour tous les sous OF (date de fin de l'OF initial) de manière d'une part à ne pas contraindre trop fortement les fenêtres de réalisation des sous OF, ce qui pourrait être une source de non robustesse. Les liens créés entre sous OF pour la création de l'ordonnancement détaillé permettent bien entendu de reconstituer le déroulement temporel de la totalité de l'OF.

Pour mieux illustrer le calcul, reprenons l'exemple de la figure 4.1. Nous avons un OF comportant 6 opérations, dont les durées sont : 2, 2, 2, 2, 4 et 4 respectivement. Sa date de début au plus tôt est 0 et sa date de fin est de 30. Nous utiliserons une longueur de discrétisation à 10. La figure 4.1 montre un macro-ordonnancement possible sur l'horizon considéré pour cet OF, dans la figure nous avons ignoré la notion de ressource. A partir du macro-ordonnancement obtenu nous pouvons voir que les opérations 1, 2 et 3 de l'OF i ont été positionnées sur la période 1, alors nous créons le sous-OF $i1$, de même les opérations 4 et 5 ont été positionnées sur la période 2 formant le sous-OF $i2$, finalement l'opération 6 est positionnée en période 3 et devient le sous-OF $i3$. Les dates sont indiquées dans le tableau 4.1 :

Sous-OF k	rd_{ik}^G	dd_{ik}^G
1	0	30
2	6	30
3	12	30

TAB. 4.1 – Calcul de dates des sous-OF

Le guidage par sous OF vise à positionner dans le temps, des sous ensembles d'opérations. Le guidage par contraintes de précédences (présenté dans le paragraphe suivant) fige des ordres relatifs entre opérations. Ces deux classes d'informations sont issues du macro-ordonnancement et plus particulièrement des positions des opérations dans les périodes (informations "internes" aux OF). Il n'empêche que ces guidages peuvent être interprétés très différemment par des modules d'ordonnancement détaillés. Le deuxième mode de guidage paraît laisser plus d'autonomie dans l'élaboration de cet ordonnancement. Il est donc intéressant de pouvoir analyser leur apport respectif dans des structures de décisions multiniveaux, ce qui est fait dans le paragraphe suivant.

4.1.2 Mécanisme de guidage par contraintes de précédence (principe)

Comme cela a déjà été évoqué plus haut, une autre information fournie par le macro-ordonnancement concerne le positionnement des opérations dans les périodes. On peut alors en déduire une séquence des opérations sur les différentes ressources utilisées (figure 4.2).

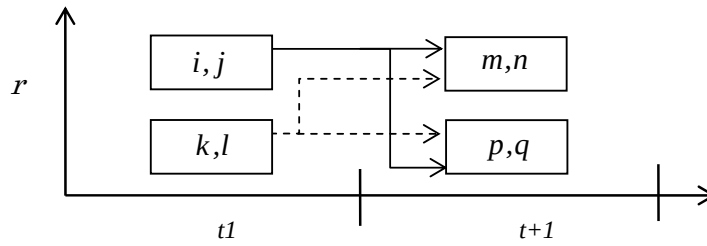


FIG. 4.2 – Construction des Sous-OF

Dans ce paragraphe nous introduisons donc la notion "de conditions de précédence" entre opérations partageant une même ressource.

Soit O_{rt} l'ensemble des opérations (i, j) , $i \in [1, NOF]$, $j \in [1, NOP_i]$ utilisant la ressource r et positionnées en période t par le macro-ordonnancement. Compte-tenu de la numérotation des périodes nous avons,

$$O_{r,t-1} \prec O_{rt} \quad \forall r \in 1 \dots NR, \forall t \in 2 \dots T$$

ce qui signifie que toute opération de $O_{r,t-1}$ précède toute opération de O_{rt} .

Cet ordre partiel entre opérations utilisant une même ressource peut ainsi être transmis au niveau détaillé de façon à imposer ces contraintes de précédence entre opérations appartenant à des OF différents. Le modèle détaillé peut donc être enrichi par ce guidage.

Dans la figure 4.2 nous pouvons voir l'ordre de séquence entre les opérations (i, j) , (k, l) , (m, n) , (p, q) , leur positionnement sur les périodes nous donne un ensemble de conditions de séquence. Les contraintes qui en découlent sont alors les suivantes :

$$\begin{array}{ll} i, j \prec m, n & i, j \prec p, q \\ k, l \prec m, n & k, l \prec p, q \end{array}$$

L'algorithme de cette méthode de guidage est le suivant :

Algorithme de génération de contraintes de précédence

```

Pour  $r = 1 \dots NR$  répéter
  Pour  $t = 1 \dots T$  répéter
    construire  $O_{rt} = \{ij/m_{ijr} \neq 0 \text{ et } X_{ijt} = 1\}$ 
  fin pour
  Pour  $t = 1 \dots T - 1$  répéter
    Pour  $(ij) \in O_{rt}$  répéter
      Générer  $(ij) \prec (kl) \quad \forall kl \in O_{rt+1}$ 
    fin pour
  fin pour
fin pour

```

4.1.3 Expérimentations

- **Guidage par dates intermédiaires**

Dans cette partie nous allons tester brièvement le guidage par dates intermédiaires liées à la génération de sous-OF. Comme cela a déjà été mentionné, cette approche est le guidage le plus détaillé car il affecte une date de début à chaque opération d'un sous-OF selon son positionnement par le niveau supérieur. Ici nous essayons de respecter au maximum la planification proposée pour conserver au mieux la robustesse des décisions agrégées.

Comme illustration nous reprenons le problème à charge forte PB_{CF2} (présenté au paragraphe 3.4.2 du chapitre 3) que nous avons testé avec le guidage par dates. Le mécanisme consiste à faire une décomposition des OF en sous-OF selon le positionnement des opérations sur les périodes. Ces sous-OF sont proposés au niveau détaillé. Ce niveau est construit comme dans le chapitre précédant à l'aide de Preactor. On obtient ainsi la solution de l'approche multiniveaux. Dans ce contexte le module détaillé (Préactor) considère que les sous OF appartenant à un même OF sont couplés par des liens de précédence.

Pour cet exemple nous avons testé différentes discrétisations. Pour ne pas alourdir la présentation, les sous-OF et les dates associées pour chaque discrétisation ne sont pas détaillées. Les résultats des expérimentations menées et le nombre de sous-OF par discrétisation sont présentés dans le tableau 4.2.

Nous pouvons remarquer également, que la qualité de l'approche au niveau du critère retards a été dégenérée par rapport au guidage par dates (tableau 3.17 du paragraphe 3.4.2). Nous pouvons constater que pour les trois premières discrétisations la qualité du guidage par sous-OF a été sensiblement dégradée par rapport au guidage par dates. Par exemple pour une $lg = 8$ nous avons ici 63 jours de retard, alors que pour le guidage par dates nous avons obtenu 46 jours de retard (un écart de 17 jours). Un autre résultat donne pour $lg = 12$, 61 jours de retard pour le guidage avec sous-OF et 47 jours de retard pour le guidage par dates. Avec cette méthode de guidage la valeur minimale que l'on obtient es de 61 jours de retard pour $lg = 12$, ce qui est le même résultat obtenu par

Type d'Approche	lg	Nombre de sous-OF	Q^{MN} ou Q^D	Rob^G	E^G
Multiniveau	8	32	63	7	70
	12	26	61	2	98
	16	20	70	12	65
	20	18	63	14	67
	24	13	81	49	39
	32	13	70	52	32
Directe	-	-	61	-	-

TAB. 4.2 – Performance de l'approche (PB_{CF2})

l'approche directe. La valeur minimale avec le guidage par dates est obtenue avec $lg = 8$ qui donne 46 jours de retard. Il est alors possible de conclure que pour les problèmes considérés, le guidage par dates est globalement meilleur.

Il pourrait se trouver que la forte nature de liens de précédence des sous-OF induits au problème l'on sur-contraint donnant ainsi des macro-ordonnancements difficiles à désagréger notamment pour des petites périodes. De ce fait, au niveau de la robustesse, les résultats ont été également dégradés par rapport à ceux trouvés par le guidage de base, notamment les résultats pour des longueurs de 8 et 16 (7 et 12 respectivement). Nous constatons finalement, que lorsque la longueur augmente les résultats ont une tendance à se dégrader.

• Guidage par contraintes de précédence

Dans ce paragraphe nous allons présenter quelques expérimentations concernant le guidage par contraintes de précédence. Ce type de guidage a été développé pour assurer la robustesse des décisions de séquençement prises au niveau supérieur. Nous avons appliqué notre approche à un exemple qui a été traité avec la méthode de guidage par dates puis par le guidage par dates intermédiaires.

L'exemple que nous développons pour illustrer la spécification de contraintes de précédence est l'exemple à charge forte PB_{CF2} avec une longueur de la période à 12. Pour cet exemple plusieurs cas de discrétisations seront présentés en fin de paragraphe, les résultats sont reportés dans le tableau 4.3.

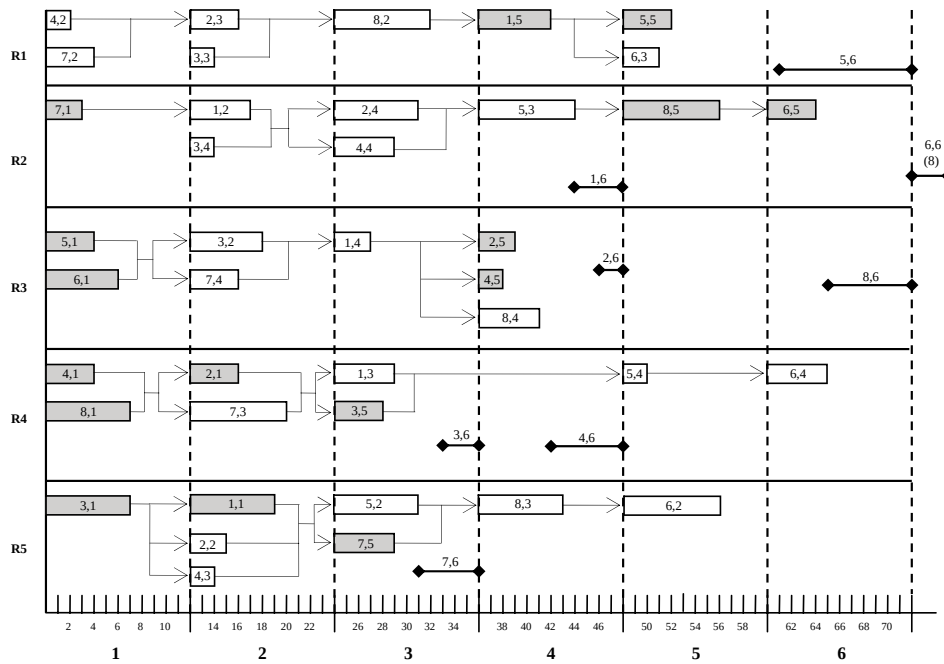
Dans la figure 4.3 nous présentons le macro-ordonnancement proposée par Xpress. Nous montrons également les relations de précédence (matérialisées par des flèches) entre opérations affectées à une même machine.

A partir du positionnement des opérations de la figure 4.3 nous obtenons les relations de précédence suivantes :

Sur M1 : $Op_{42}, Op_{72} \prec Op_{23}, Op_{33} \prec Op_{82} \prec Op_{15} \prec Op_{55}, Op_{63}$

Sur M2 : $Op_{71} \prec Op_{12}, Op_{34} \prec Op_{24}, Op_{44} \prec Op_{53} \prec Op_{85} \prec Op_{65}$

Sur M3 : $Op_{51}, Op_{61} \prec Op_{32}, Op_{74} \prec Op_{14} \prec Op_{25}, Op_{45}, Op_{84}$

FIG. 4.3 – Macro-ordonnancement($lg = 12$) avec relations de précedence

Sur M4 : $Op_{41}, Op_{81} \prec Op_{21}, Op_{73} \prec Op_{13}, Op_{35} \prec Op_{54} \prec Op_{64}$

Sur M5 : $Op_{31} \prec Op_{11}, Op_{22}, Op_{43} \prec Op_{52}, Op_{75} \prec Op_{83}, Op_{62}$

Les relations de précedence générées sur chaque ressource sont introduites au module d'ordonnancement détaillé (Preactor dans cette étude) ainsi que les dates de début et de fin de chaque OF (selon le positionnement du macro-ordonnancement). Pour pouvoir introduire les relations de précedence dans Preactor nous avons modifié le fichier de configuration pour que le logiciel accepte ces contraintes.

Le tableau 4.3 montre les résultats obtenus pour différentes discrétisations avec le guidage par contraintes de précedence. Rappelons que pour chaque valeur de la discrétisation, le module de macro-ordonnancement peut générer différentes contraintes de précedence.

Type d'Approche	lg	Q^{MN} ou Q^D	Rob^G	E^G
Multiniveau	8	66	2	70
	12	52	7	98
	16	79	17	65
	20	54	1	67
	24	86	56	39
	32	77	50	32
Directe	-	61	-	-

TAB. 4.3 – Performance de l'approche (PB_{CF2})

Après avoir obtenu les résultats pour différentes longueurs de discrétisations avec cette approche, nous remarquons que par rapport aux solutions proposées par la méthode de guidage par dates, la qualité de l'approche est dégradée. Comme pour le guidage par sous-OF nous constatons que pour les trois premières longueurs la valeur de la qualité de l'approche (en nombre de jours en retard) a été sensiblement détériorée. Nous avons par exemple pour $lg = 8$, 66 jours de retard face aux 46 jours de retard obtenus par le guidage par dates. D'un autre point de vue, les valeurs minimales des deux types de guidage sont de 52 jours de retard pour le guidage par contraintes de précédence et de 46 jours de retard avec le guidage par dates. A partir de ces essais on peut penser que le guidage par dates reste meilleur que celui par contraintes de précédence.

Nous pouvons également observer des dégradations des valeurs de la robustesse (par rapport au guidage par dates) notamment pour les longueurs de 12, 16 et 24 (7, 17 et 56 respectivement).

4.1.4 Analyse et conclusions

Afin de comparer l'efficacité des trois types de guidages proposés une synthèse est présentée dans le tableau 4.4. Cette comparaison est réalisée en fonction des résultats obtenus à partir du problème traité avec les différents mécanismes de guidage proposés dans cette section et le résultat obtenu par l'approche directe (en termes de qualité du guidage). Le tableau montre les trois types de guidages (par dates, par sous-OF et par contraintes de précédence) qui ont été testés sur le problème PB_{CF2} présenté au chapitre 3. Nous présentons également trois valeurs pour l'indicateur Q^{MN} (qualité de l'approche), la valeur moyenne, minimal et maximale ($\bar{Q}^{MN}$, Q_{Min}^{MN} et Q_{Max}^{MN} respectivement) proposées par les différents guidages. Les valeurs entre parenthèses montrent l'amélioration (+) ou la dégradation (−) de la qualité de l'approche face au résultat par l'approche directe.

Comme nous pouvons le constater à partir des résultats du tableau, l'approche multi-niveau utilisant le guidage par dates est bien meilleure, sur les exemples traités. Avec une meilleure moyenne sur tous les lg testées le guidage par dates réussit à améliorer la qualité de l'approche alors que les deux autres guidages dégradent cette moyenne. En termes de valeurs minimales le guidage par dates est également meilleur avec 24% d'amélioration face à l'approche directe, alors que le guidage par contraintes de précédence améliore seulement de 14%. Pour les valeurs maximales nous trouvons des dégradations importantes de la qualité de l'approche pour les guidages par sous-OF et par contraintes de précédence (32% et 41% respectivement).

Type d'Approche	Guidage			
	Indicateur	Dates	Sous-OF	Contraintes de Précédence
Multiniveau	$\bar{Q}^{MN}$	60 (+1.63%)	68 (−11%)	69 (−13%)
	Q_{Min}^{MN}	46 (+24%)	61 (0%)	52 (+14%)
	Q_{Max}^{MN}	77 (−26%)	81 (−32%)	86 (−41%)
Directe	-	61 jours	61 jours	61 jours

TAB. 4.4 – Comparaison entre guidages (qualité de l'approche) (PB_{CF2})

Nous présentons dans le tableau 4.5 un résumé des résultats en fonction de la robustesse associée aux différents types de guidage. Les valeurs contenues dans le tableau sont toutes positives et mesurent l'éloignement à la robustesse parfaite. Nous trouvons que les valeurs sont assez proches pour tous les types de guidage, même si le guidage par dates qui montre un éloignement de la robustesse moins important que celui proposé par les deux autres guidages.

Type d'Approche	Indicateur \ Guidage	Dates	Sous-OF	Contraintes de Précédence
Multiniveau	$\overline{Rob}^{MN}$	6.39%	7.27%	6.99%
	Rob_{Min}^{MN}	0.27%	0.57%	0.29%
	Rob_{Max}^{MN}	19%	17%	19%
Directe	-	61 jours	61 jours	61 jours

TAB. 4.5 – Comparaison entre guidages (robustesse de l'approche) (PB_{CF2})

• Conclusions

Les expérimentations réalisées nous ont permis de constater que guider par contraintes de précédence ou par dates intermédiaires s'avère peu concluant. Il apparaît en effet que les contraintes supplémentaires ainsi imposées au niveau détaillées sont très fortes. La logique du solveur Preactor (heuristique d'ordonnancement sans délai) peut être mal adaptée aux décisions prises par le niveau supérieur et ne conduit pas à une tâche de désagrégation de qualité.

4.2 Amélioration de la robustesse (macro ordonnancement sur-contraint)

La robustesse des décisions est un concept très important pour analyser le comportement de structures décisionnelles multiniveaux. Il a déjà été mentionné que la robustesse, dans notre approche d'ordonnancement multiniveau, est liée au suivi, par le niveau inférieur, du plan (positionnement optimisé des OF) proposé par le niveau supérieur. En d'autres termes, un macro ordonnancement est robuste s'il existe un ordonnancement détaillé compatible avec le positionnement temporel des OF.

Nous avons proposé trois types de guidages pour désagréger les décisions du niveau supérieur. La robustesse dépend nécessairement du type de guidage choisi. Rappelons que le guidage par dates transmet seulement les dates de début et de fin des différents OF. Aucun mécanisme additionnel n'est chargé d'assurer que le positionnement détaillé des opérations respecte le positionnement agrégé (c'est à dire le positionnement sur des périodes). Les deux autres méthodes de guidage sont plus contraignantes pour le niveau inférieur puisqu'elles imposent soit un ordre partiel (séquencement) sur les ressources (guidage par contraintes de précédence) soit des dates intermédiaires pour certaines opérations (guidage par sous-of).

Dans tous les cas, plus la période est longue, plus l'information ignorée par le niveau supérieur est importante (prise en compte d'une capacité globale et "oubli" des

contraintes de gamme entre opérations au sein d'une même période). La longueur de la période peut donc augmenter les risques de non-robustesse. Par exemple, si nous analysons les résultats de la robustesse (tableau 3.11) du problème PB_{CM} présenté au paragraphe 3.4.2 du chapitre 3 nous pouvons remarquer que la robustesse est dégradée de 500%. De même pour le problème PBCF1 la dégradation présentée est de 300%. Pire encore pour le problème à charge très forte la dégradation de la robustesse, quand nous augmentons la période, atteint 1300%.

Plusieurs travaux ont démontré que la robustesse parfaite est difficile à obtenir [Schneeweiss, 1999]. Par contre, dans le cadre d'une agrégation temporelle une étude [Fontan *et al.*, 1994], propose un traitement adéquat des données détaillées et des contraintes sur les variables agrégées pour obtenir des propriétés de robustesse partielles conduisant à un comportement satisfaisant de la structure hiérarchisée considérée.

4.2.1 Principe

Le mécanisme que nous allons utiliser pour améliorer la robustesse des décisions s'appuie sur un principe général mentionné dans [Fontan *et al.*, 2005]. Il s'agit de sur-contraindre le niveau agrégé (ici le module de macro-ordonnancement) de manière à générer de l'autonomie pour le module détaillé. Ceci permet au module détaillé de suivre sa propre logique tout en respectant les décisions du module agrégé.

Ce principe peut être mis en œuvre selon deux voies :

- sous estimation de la longueur de chaque période
- sous-estimation de la capacité agrégée de chaque ressource.

Les nouvelles contraintes du modèle de macro-ordonnancement concernées par les sous-estimations des caractéristiques mentionnées sont les contraintes (4.1) pour la longueur de la période et les contraintes (4.2) pour la capacité (remplaçant les contraintes (2.7) et (2.8) présentées dans le paragraphe 2.2.4. Les coefficients de sous-estimations que nous avons introduits dans ces contraintes sont les coefficients α pour la longueur de la période et β pour la capacité agrégée. Lorsque ces coefficients sont égaux à 1, les contraintes (4.1) et (4.2) ((2.7) et (2.3)) sont équivalentes.

$$\sum_{j=1}^{NOP_i} p_{ij} + X_{ijt} \leq \alpha \times l_{gt} \quad \forall t \in T \quad (4.1)$$

$$\sum_{i=1}^{NOFNOPI} \sum_{j=1} m_{ijr} \times X_{ijt} \leq \beta \times Capa_{rt} + Hrs_Sup_{rt} \quad \forall r \in NR \quad \forall t \in T \quad (4.2)$$

4.2.2 Sous estimation de la longueur de la période

Ce paragraphe présente un exemple simple pour mieux illustrer le phénomène de la sous-estimation de la longueur de la période. Considérons un OF comportant 5 opérations. Les durées des opérations sont 7, 3, 4, 3 et 3 respectivement. La longueur de

discrétisation choisie est de 10. Le macro-ordonnancement que l'on pourrait obtenir est indiqué sur la figure 4.4. D'autre part, le macro-ordonnancement que l'on obtiendrait en sous-estimant la durée avec le coefficient α serait celui montré dans la figure 4.5.

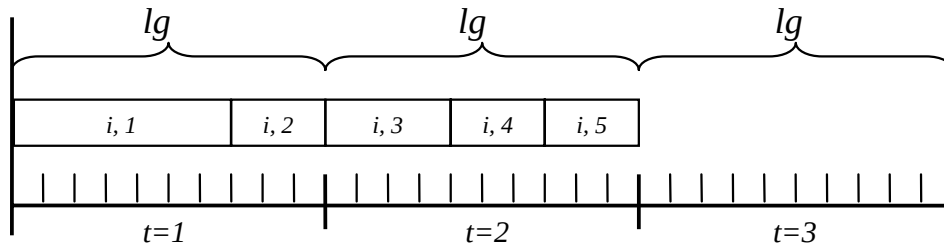


FIG. 4.4 – Macro-ordonnancement à durée réelle

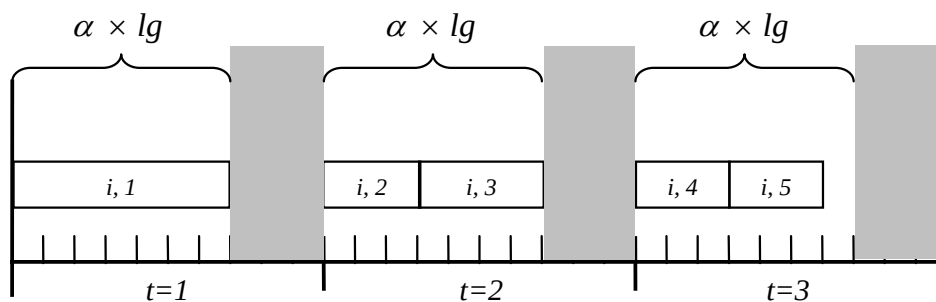


FIG. 4.5 – Macro-ordonnancement associé à une longueur de période sous-estimée ($\alpha = 0,7$)

Comme cela peut s'observer dans la figure 4.4, la planification impose un macro-ordonnancement serré dans le sens de dates de début et de fin : l'OF i doit être terminé dans la période 2. Par contre, l'introduction du coefficient α nous permet d'obtenir un macro-ordonnancement certainement plus facile à désagréger (c.f. figure 4.5), il doit être terminé en période 3.

En effet, comme nous pouvons le constater dans les figures, le macro-ordonnancement de la figure 4.4 positionne plus d'opérations dans une même période. Cela peut entraîner une perte d'information plus importante au niveau des contraintes de gamme. Par contre dans la figure 4.5, le niveau macro-ordonnancement élabore un positionnement répartissant les opérations sur trois périodes (deux opérations maximum par période), entraînant moins de pertes d'information notamment au niveau de contraintes de séquence. De plus, la marge induite par le niveau supérieur nous permet d'avoir de l'autonomie au niveau inférieur et de réduire ainsi de possibles sources de non-robustesse.

Finalement, dans la figure 4.5 nous pouvons constater un des inconvénients de la sous-estimation de la longueur de la période. Le fait de placer moins d'opérations dans une période se traduit effectivement pour la plus part de cas en macro-ordonnements plus tardifs générant ainsi des dates guidantes également plus tardives.

4.2.3 Sous estimation de la capacité

L'introduction du coefficient β est analogue à celle du coefficient α , la sous estimation est fait ici au niveau des capacités par période. Le but est de limiter artificiellement la capacité des ressources considérée au niveau supérieur. Cette limitation induite par l'introduction du coefficient β génèrera une marge au niveau détaillé. Cette marge permet de réduire de possibles situations de non robustesse liées notamment aux disponibilités de ressources requises par les opérations à un instant donné. La flexibilité et l'autonomie ainsi accordées au module d'ordonnancement détaillé permettent d'effectuer des ajustements de charges/capacités de ressources.

Comme nous pouvons le constater dans la figure 4.6 et 4.7, le fonctionnement du coefficient β est similaire à celui du α expliqué dans la partie précédente. Il permet notamment de limiter le nombre d'opérations affectées à une même période et de réduire ainsi les causes de non-robustesse.

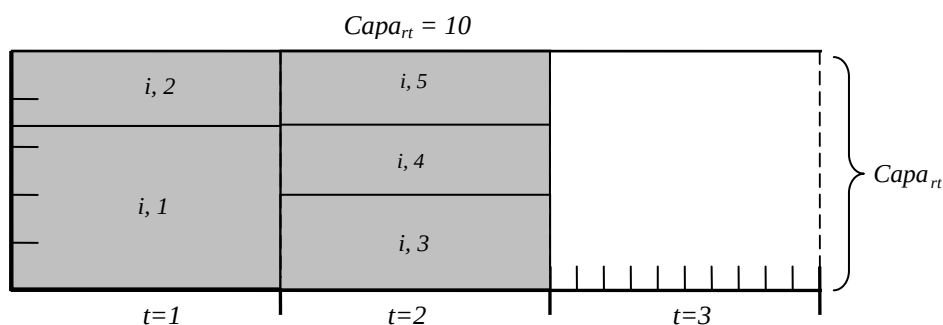


FIG. 4.6 – Macro-ordonnancement à capacité réelle

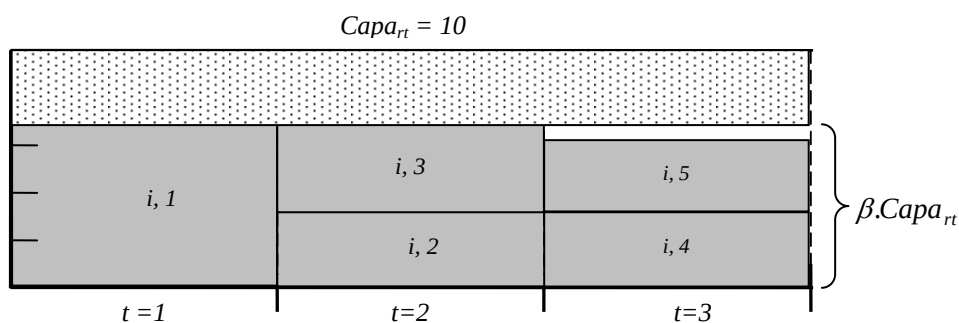


FIG. 4.7 – Sous-estimation de la capacité par ($\beta = 0,7$)

Une remarque doit être impérativement faite avant d'utiliser les coefficients de sous-estimations (soit α ou β). Cette remarque concerne le degré maximal de sous-estimation des coefficients. Il en est de même pour la longueur de la période que pour la capacité. Il n'est pas possible de sous estimer la longueur de la période en-deçà de la durée de la plus grande opération de tous les OF (pour le coefficient α); de même la capacité d'une ressource ne peut être inférieure à la plus forte consommation des opérations qui utilisent cette ressource (pour le coefficient β). Nous devons alors, respecter les contraintes (4.3) et (4.4) liées à l'introduction de coefficients.

$$\alpha \times lg \geq \max(p_{ij}) \quad (4.3)$$

$$\beta \times Capa \geq \max(m_{ijr}) \quad (4.4)$$

La contrainte (4.3) impose que la longueur des périodes modifiées (par α) doit être supérieure ou égale à la plus grande durée des opérations de n'importe quel OF. La contrainte (4.4) également, exprime que la capacité modifiée doit être supérieure ou égale à la plus forte consommation des opérations pour toute ressource r .

4.2.4 Expérimentations

Il s'agit de savoir quel est l'impact de cette politique de surcontrainte du macro-ordonnancement sur la qualité globale de l'approche (ici essentiellement liée à la notion de retards).

Avoir une robustesse "parfaite" signifie que la désagrégation suit exactement ce qui a été planifié par le niveau supérieur. Un bon suivi assure donc d'une part le respect de toutes les contraintes technologiques du problème (grâce au niveau inférieur) et d'autre part optimise la fonction objective (critère) souhaitée par la planification assurée par le niveau supérieur. Nous allons illustrer ces idées par les exemples déjà traités (au chapitre 3) de manière à comparer l'indicateur de robustesse et son évolution. Dans les tableaux 4.6 (résultats avec $\alpha = 1$) et 4.7 ($\alpha = 0.80$), nous montrons les résultats de différents tests pour le problème PB_{CF1} .

- Problème à charge forte (PB_{CF1})

Type d'Approche	lg	Q^{MN} ou Q^D	Rob^G	E^G
Multiniveau	12	31	1	49
	16	30	10	28
	20	32	21	16
	24	75	45	37
	32	64	33	31
	Moyenne	46.4	22	32.2
Directe	-	36	-	-

TAB. 4.6 – Résultats de l'approche ($\alpha = 1$)

Afin d'effectuer une analyse global, nous avons calculé la moyenne des résultats obtenus des différentes longueurs testées. A partir de la moyenne nous pouvons nous apercevoir que pour cet exemple la qualité de l'approche en introduisant alpha est améliorée, 39.8 ($\alpha = 0.8$) face au 46.4 ($\alpha = 1$). Du point de vue de la robustesse nous constatons également qu'elle a été améliorée significativement, d'une valeur moyenne de 22 ($\alpha = 1$) à 10.8 ($\alpha = 0.8$). Nous constatons que pour une longueur de 12, l'approche a réussi à trouver la robustesse parfaite (tableau 4.7).

Type d'Approche	lg	Q^{MN} ou Q^D	Rob^G	E^G
Multiniveau	12	32	0	78
	16	43	2	83
	20	34	4	53
	24	26	15	36
	32	64	33	31
	Moyenne	39.8	10.8	56.2
Directe	-	36	-	-

TAB. 4.7 – Résultats de l'approche ($\alpha = 0.8$)

En ce qui concerne l'indicateur de la qualité du guidage nous constatons qu'effectivement celui-ci est dégradé par rapport aux dates dues initiales passant d'une valeur de 32 jours ($\alpha = 1$) à 56 jours ($\alpha = 0.8$). Cela a été expliqué en fin du paragraphe 4.2.2., qui expliquait que les dates guidantes étaient plus tardives.

En détaille, cet exemple montre des résultats pour lesquels l'introduction du facteur alpha améliore sensiblement la robustesse. Les résultats les plus remarquables sont les valeurs de la robustesse pour les longueurs de 16, 20 et à 24 du tableau 4.7.

- Problème à charge forte (PB_{CF2})

Type d'Approche	lg	Q^{MN} ou Q^D	Rob^G	E^G
Multiniveau	12	47	1	98
	16	59	5	65
	20	62	10	67
	24	72	38	39
	32	77	62	32
	Moyenne	63.4	23.2	60.2
Directe	-	61	-	-

TAB. 4.8 – Résultats de l'approche ($\alpha = 1$)

Si nous comparons les résultats des tableaux 4.8 et 4.9, nous constatons que globalement la robustesse est notablement améliorée. Nous passons d'une valeur moyenne de la robustesse de 23,2 jours avec $\alpha = 1$ à une valeur de 6 jours avec $\alpha = 0.8$. Plus finement, les améliorations de la robustesse avec $\alpha = 0.8$ sont significatives à partir d'une lg de 16. En plus, la valeur moyenne de la qualité de l'approche a été améliorée, même si l'écart n'est pas important (de 63.4 à 63.2). Par contre, en ce qui concerne la valeur moyenne de la qualité du guidage celle-ci a été détériorée comme pour l'exemple précédent.

Nous pouvons observer également que la robustesse se dégrade quand la longueur de la période augmente.

Type d'Approche	lg	Q^{MN} ou Q^D	Rob^G	E^G
Multiniveau	12	70	2	140
	16	64	0	98
	20	59	1	87
	24	58	4	81
	32	65	23	61
	Moyenne	63.2	6	93.4
Directe	-	36	-	-

TAB. 4.9 – Résultats de l'approche ($\alpha = 0.8$)

- Problème à charge très forte (PB_{CTF})

Type d'Approche	lg	Q^{MN} ou Q^D	Rob^G	E^G
Multiniveau	12	48	11	69
	16	52	25	28
	20	43	25	24
	24	44	11	44
	32	50	34	30
	Moyenne	47.4	21.2	39
Directe	-	43	-	-

TAB. 4.10 – Résultats de l'approche ($\alpha = 1$)

Type d'Approche	lg	Q^{MN} ou Q^D	Rob^G	E^G
Multiniveau	12	45	0	107
	16	50	0	104
	20	58	6	56
	24	48	10	41
	32	50	28	37
	Moyenne	50.2	8.8	69
Directe	-	43	-	-

TAB. 4.11 – Résultats de l'approche ($\alpha = 0.8$)

Dans cet exemple, nous trouvons une amélioration de la robustesse pour tous les discrétisations testées quand nous introduisons le facteur alpha. La valeur moyenne de l'approche sans alpha est de 21.2 jours alors que quand nous utilisons alpha (alpha=0.8) nous avons une valeur de 8 jours. En ce qui concerne la qualité de l'approche l'écart entre les valeurs moyennes n'est pas important, d'une valeur de 47.4 (sans alpha) à une valeur de 50.2 (avec alpha).

Finalement, comme nous l'avons observé dans les problèmes précédents, l'introduction d'un facteur alpha n'a pas beaucoup affecté la qualité de l'approche et au contraire a fortement amélioré la robustesse de la solution.

4.3 Diversification du problème global d'ordonnement

Dans ce paragraphe nous étudions deux extensions de l'approche que nous avons traitée, ces deux généralisations sont des problématiques trouvées couramment dans la réalité industrielle. La première extension travaille sur le problème de l'indisponibilité de ressources (calendriers d'ouverture). La deuxième, s'intéresse au problème de la minimisation des encours ou WIP (Work in Process). Comme dans les paragraphes précédents, des exemples sont étudiés pour comparer la performance de l'approche multiniveau face à ces nouvelles caractéristiques.

4.3.1 Prise en compte de calendriers d'ouverture de ressources

Dans ce paragraphe, nous allons aborder le problème de la disponibilité des ressources. Il peut représenter, la maintenance programmée, des changements de configuration des machines, présences des opérateurs, l'indisponibilité de ressources due aux pannes de machines,...

Dans cette partie nous allons appliquer l'approche à deux niveaux en utilisant le guidage par dates. Les expérimentations visent, comme dans les études précédentes, d'une part à comparer les performances face à l'approche directe et d'autre part à étudier les effets de la discrétisation dans ce type de problèmes. Pour évaluer cela un exemple simple est testé avec différentes longueurs de discrétisation, les caractéristiques et les solutions sont indiquées dans les tableaux ci-dessous.

- Problème de calendrier d'ouverture de ressources (PB_{CAL})

Cet exemple comporte 5 OF, 5 OP par OF, 5 Ressources. Comme les exemples précédents, chaque OF passe sur toutes les machines une fois, les OF ne se différenciant alors par leur gamme opératoire et leur date de fin. Tous les OF peuvent commencer à la date 0. Les données temporelles et de gamme associées au problème sont présentées dans les tableaux 4.12, 4.13, 4.14. Chaque ressource a un calendrier d'ouverture connu et indiqué sur les figures associées aux solutions (figures 4.8 et 4.9).

$OF\ i$	rd_i	dd_i
1	0	28
2	0	18
3	0	25
4	0	35
5	0	32

TAB. 4.12 – Fenêtres temporelles initiales du problème

OF \ OP	1	2	3	4	5	$\sum p_{ij}$	Den_i
1	4 R4	3 R1	3 R3	4 R5	5 R2	19	0.67
2	3 R4	3 R5	4 R2	2 R3	2 R1	14	0.77
3	4 R2	3 R4	5 R3	2 R1	2 R5	16	0.64
4	3 R2	3 R4	3 R1	4 R3	3 R5	17	0.48
5	6 R5	5 R1	4 R4	3 R3	4 R2	22	0.68

TAB. 4.13 – Données du problème (vue OF)

$\overline{Den}$	$\overline{p}$	$\overline{Ch}$
0.64	3.48	0.49

TAB. 4.14 – Caractéristiques du problème

Comme nous l'avons fait pour les exemples précédents nous allons traiter cet exemple avec différentes longueurs de discrétisations pour analyser la performance de l'approche face au phénomène de la discrétisation. Ces performances sont également confrontées avec la solution proposée par l'approche directe. La première longueur de période choisie est la discrétisation de valeur 7. Ci-dessous nous avons le macro-ordonnancement et l'ordonnancement détaillé associé (figures 4.8 et 4.9).

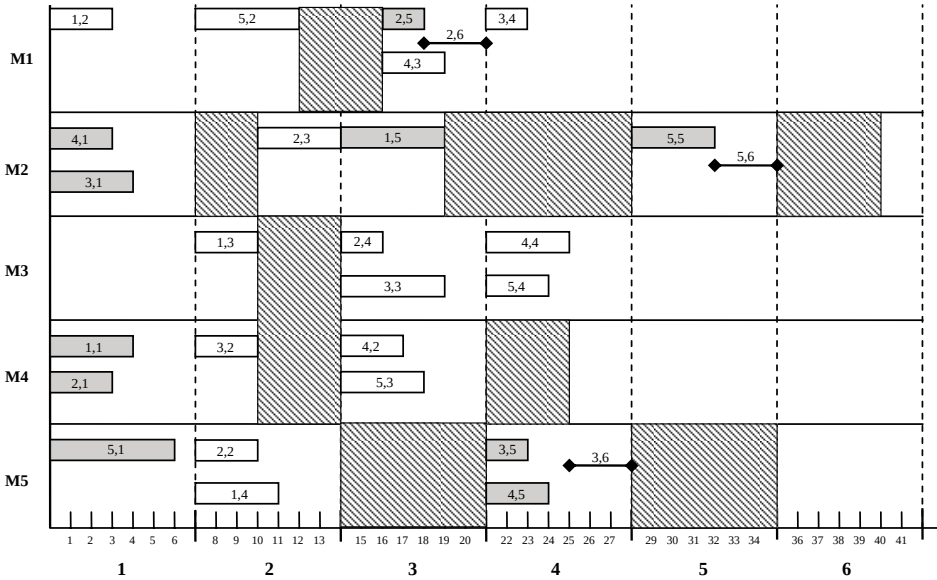


FIG. 4.8 – Macro-ordonnancement avec calendrier des ressources

Le résultat de cette expérimentation est montré par le tableau 4.15, nous avons également testé l'approche avec d'autres longueurs de discrétisation également indiquées dans le tableau.

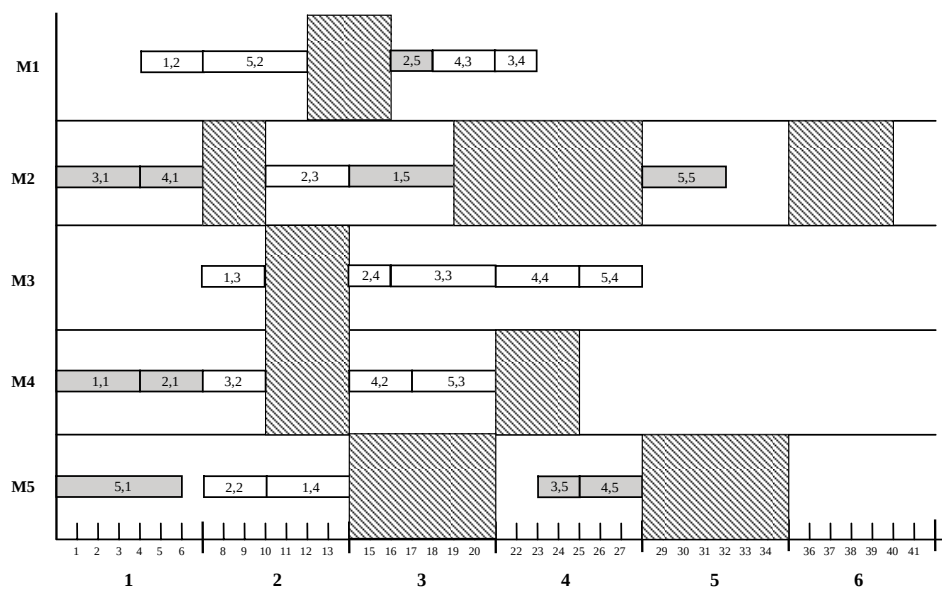


FIG. 4.9 – Ordonnancement détaillé avec calendrier des ressources

Type d'Approche	lg	Q^{MN} ou Q^D	Rob^G	E^G
Multiniveau	7	0	0	0
	10	0	0	13
	12	28	28	19
	16	28	12	16
Directe	-	23	-	-

TAB. 4.15 – Performance de l'approche multiniveaux

Les résultats obtenus avec l'approche multiniveau s'avèrent très intéressants pour les deux premières longueurs de discrétisation ($lg = 7$ et $lg = 10$). En fait l'approche multiniveau réussit à trouver un ordonnancement à 0 jours de retard et une robustesse parfaite pour les longueurs à 7 et 10. Cela est normal car l'introduction d'indisponibilités de ressources demande la prise en compte plus fine des contraintes de séquence ou de capacité, d'où l'intérêt d'utiliser des longueurs de discrétisation petites. Par contre, une représentation grossière de la capacité ou l'omission de contraintes de séquence entre opérations, occasionnée par des discrétisations grandes ne semblent pas être pertinentes.

• Analyse des qualités de l'approche avec calendriers d'ouverture

Le problème testé en utilisant le calendrier d'ouverture a été analysé pour différentes longueurs, les performances globales de l'approche sont présentées dans le tableau 4.16.

Nous pouvons constater que l'approche multiniveau montre une performance intéressante. La valeur moyenne des longueurs testées montrent que l'approche est meilleure de 39% car elle trouve un ordonnancement à 14 jours de retard face aux 28 jours de retard proposés par l'approche directe. La valeur minimale proposée par l'approche multiniveau qui trouve un ordonnancement sans retard.

Type d'Approche	Problème		PB_{CAL}
	Indicateur		
Multiniveau	$\overline{Q}^{MN}$		14 jours (+39%)
	Q_{Min}^{MN}		0 jours (+100%)
	Q_{Max}^{MN}		28 jours (-21%)
Directe	-		23 jours

TAB. 4.16 – Qualité de l'approche PB_{CAL} (retards)

4.3.2 Diversification du critère : Approche centrée minimisation des encours

La deuxième diversification envisagée concerne la prise en compte d'un autre objectif global d'ordonnancement. Cet autre objectif correspond à la minimisation des encours. Ce critère, travaille sur "l'étalement" des opérations d'un OF, c'est à dire sur la minimisation des durées de réalisation d'un OF. Dans le cadre de notre étude basée sur une approche multiniveau, la démarche est de trouver une planification (positionnement) par le module de macro-ordonnancement qui effectue un "compactage" des opérations appartenant à un OF (réduction de la fenêtre de réalisation de l'OF). Le module d'ordonnancement détaillé est chargé comme dans les études précédentes de suivre au mieux le macro-ordonnancement (en respectant les dates associées au positionnement optimisé des OF).

Pour permettre de mettre en œuvre ce nouvel objectif, il a fallu modifier la fonction critère du modèle de macro-ordonnancement (présenté au chapitre 2). Il a été ajouté un poids (coût d'étalement $ctetal_i$) qui pénalise l'étalement d'un OF i .

Le critère du modèle devient alors,

$$\begin{aligned}
 \min \sum_{i=1}^{NOF} Ct_ret_i \times Ret_i + Ct_ava_i \times Ava_i + Ct_st_i \times st_i \\
 + \sum_{r=1}^{NR} \sum_{t=1}^T Ct_hsup_{rt} \times HSup_{rt} + \sum_{i=1}^{NOF} ctetal_i \times \left(\sum_{t=1}^T t \times X_{iNOP_t} - \sum_{t=1}^T t \times X_{i1t} \right)
 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Dans ce paragraphe nous allons mettre en œuvre ces modifications et tester l'approche multiniveaux sur deux exemples.

Les données du problème PB_{WIP1} sont construites à partir du problème PB_{CF2} , en relâchant les dates dues. De la même manière le problème PB_{WIP2} est issu du même problème mais en relâchant davantage les dates dues. L'objectif de cette relaxation est de permettre d'encapsuler (réduction des encours dans des paquets) le plus possible les opérations des OF.

La démarche des expérimentations est la même que pour les exemples précédents en utilisant le guidage par dates. La figure 4.10 rappelle le contexte des expérimentations montrant les deux approches déjà présentées et en intégrant ici l'idée centrée en la minimisation des encours.

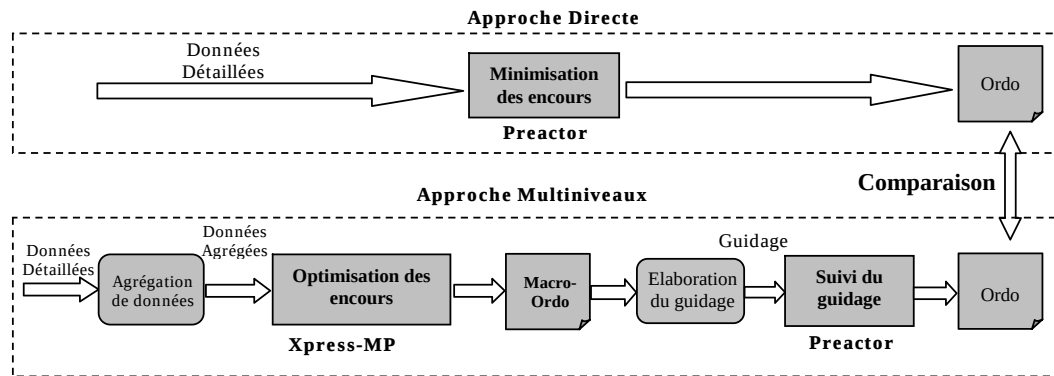


FIG. 4.10 – Les deux approches (centrée minimisation des encours)

Il convient de souligner que le module d'ordonnancement mis en IJuvre ici par PREACTOR est ici utilisé dans 2 contextes différents :

- pour l'approche directe il est chargé de minimiser les en cours avec l'heuristique conseillée : règle de minimisation des encours (minimise WIP).
- pour le suivi du guidage, il est utilisé comme dans les paragraphes précédents pour "tenir les délais" avec la règle conseillée : règle "critical ratio".

● Problème de réduction du WIP (PB_{WIP1})

Les expérimentations sont conduites sur le problème dont les caractéristiques temporelles et de gamme sont décrites par les tableaux 4.17, 4.18, 4.19.

$OF\ i$	rd_i	dd_i
1	0	32
2	0	46
3	0	27
4	0	60
5	0	45
6	0	34
7	0	31
8	0	53

TAB. 4.17 – Fenêtres temporelles initiales du problème

Dans un premier temps, l'approche directe est mise en œuvre. Elle permet d'obtenir un ordonnancement qui donne une valeur des en cours de 288 jours, qui représente en fait, la somme des temps de réalisation de tous les OF. Il convient de remarquer que l'ordonnancement ainsi obtenu génère 26 jours de retard ($Q^D = 26$). Ces valeurs nous allons les confronter avec une série de tests effectués avec différentes discrétisations en utilisant l'approche multiniveau. Il faut rappeler qu'ici l'objectif des approches est de minimiser seulement les encours, la minimisation des retards n'est pas alors cherchée. Ces valeurs du retard sont cependant indiquées à titre d'information complémentaire pour apprécier plus globalement le comportement du système décisionnel.

OF \ OP	1	2	3	4	5	$\sum p_{ij}$	Den_i
1	7 R5	5 R2	5 R4	3 R3	6 R1	26	0.81
2	4 R4	3 R5	4 R1	7 R2	3 R3	21	0.45
3	7 R5	6 R3	2 R1	2 R2	4 R4	21	0.77
4	4 R4	2 R1	2 R5	5 R2	2 R3	15	0.25
5	4 R3	7 R5	8 R2	2 R4	4 R1	25	0.55
6	6 R3	8 R5	3 R1	5 R4	4 R2	26	0.76
7	3 R2	4 R1	8 R4	4 R3	5 R5	24	0.77
8	7 R4	8 R1	7 R5	5 R3	8 R2	35	0.66

TAB. 4.18 – Gammes (durées opératoires et ressources requises)

$\overline{Den}$	$\overline{p}$	$\overline{Ch}$
0.62	4.8	0.64

TAB. 4.19 – Caractéristiques du problème

Type d'Approche	lg	Q^{MN} ou Q^D	Rob^G	E^G	WIP
Multiniveau	8	55	19	49	258
	12	70	25	76	249
	16	40	12	41	271
	20	47	34	13	271
	24	49	28	21	267
	32	41	16	30	250
	Moyenne	50.3	22.3	38.3	261
Directe	-	26	-	-	288

TAB. 4.20 – Performance de l'approche multiniveaux

Comme nous pouvons le constater par les résultats obtenus, nous pouvons dire que pour n'importe quelle discrétisation l'approche multiniveau est meilleure que l'approche directe en ce qui concerne la minimisation des encours. Par exemple, si nous comparons la valeur moyenne du WIP générée par l'approche multiniveau (WIP=261) à celle de l'approche directe (WIP=288), nous trouvons que l'approche multiniveau est améliorée de 27 jours soit plus de 10%. Une autre comparaison peut se faire si nous comparons la valeur de l'approche directe avec la valeur minimale générée par l'approche multiniveau (WIP=249, lg=12) nous constatons que l'amélioration est de 39 jours soit plus de 15%.

- Problème de réduction du WIP (PB_{WIP2})

L'exemple que nous allons traiter maintenant est issu de l'exemple précédent (mêmes gammes), avec des dates dues encore plus relâchées. Le tableau 4.21 présente les nouvelles dates limites considérées et le tableau 4.22 les caractéristiques associées au problème.

$OF\ i$	rd_i	dd_i
1	0	45
2	0	65
3	0	40
4	0	80
5	0	55
6	0	60
7	0	50
8	0	75

TAB. 4.21 – Fenêtres temporelles initiales du problème

$\overline{Den}$	$\overline{p}$	$\overline{Ch}$
0.42	4.8	0.47

TAB. 4.22 – Caractéristiques du problème

Nous avons appliqué également les deux approches sur cet exemple, les résultats obtenus sont montrés dans le tableau 4.23.

Type d'Approche	lg	Q^{MN} ou Q^D	Rob^G	E^G	WIP
Multiniveau	8	0	0	0	268
	12	3	1	9	222
	16	3	8	0	219
	20	5	12	0	258
	24	5	17	0	225
	32	3	24	0	265
	Moyenne	50.3	22.3	38.3	261
Directe	-	0	-	-	306

TAB. 4.23 – Performance de l'approche multiniveaux

Nous trouvons encore des résultats plus concluants concernant l'approche multiniveau face aux performances de l'approche directe. Nous pouvons remarquer des résultats particulièrement intéressants, par exemple celui de la discrétisation à 16 qui donne une valeur du WIP de 219 jours. L'écart observé entre les méthodes est très important pour toute longueur.

Une dernière remarque à faire est qu'ici, la performance, au niveau des retards, de l'approche multiniveau pour la plupart des longueurs testées ne semble pas être très éloignée de l'approche directe. Ceci étant lié à une densité plus faible que celle du problème PB_{WIP1} .

Comme remarque générale de l'approche minimisant les encours, nous pouvons souligner que pour toutes les discrétisations testées, les résultats obtenus ont été satisfaisants. Nous pouvons également remarquer que quand le problème est moins contraint,

l'approche a une tendance à montrer des résultats plus concluants. Cela est dû au fait que quand les délais des OF sont moins contraints, le niveau macro-ordonnancement a assez de souplesse pour pouvoir élaborer de "paquets" d'OF. Cela montre l'efficacité de l'approche multiniveau pour la minimisation des encours sans trop dégrader les retards face à l'approche directe.

- **Analyse des qualités de l'approche en fonction du WIP**

Des expérimentations ont été effectuées sur deux exemples en considérant la minimisation des encours. Le tableau 4.24 présente d'une manière globale, en termes d'amélioration, les résultats (minimisation des encours).

Type d'Approche	Problème Indicateur	PB_{WIP1}	PB_{CAL}
Multiniveau	$\overline{Q}^{MN}$	261 jours (+9%)	242 jours (+15%)
	Q_{Min}^{MN}	249 jours (+13%)	219 jours (+23%)
	Q_{Max}^{MN}	271 jours (+5%)	268 jours (+6%)
Directe	-	288 jours	306 jours

TAB. 4.24 – Qualité de l'approche (minimisation de WIP)

Dans les deux exemples testés les performances de l'approche multiniveau sont intéressantes. Pour le problème PB_{WIP1} l'amélioration est de plus de 10% par rapport à la solution proposée par l'approche directe. Pour le problème PB_{WIP2} l'amélioration est plus remarquable avec un gain de plus de 20%. On peut ainsi indiquer que l'approche multiniveau utilisant le critère de minimisation des encours fonctionne mieux pour des problèmes de densité moyenne.

Conclusion du chapitre 4

Dans ce chapitre nous avons proposé deux types différents de guidage. Le premier guidage proposé est le guidage par sous-OF qui décompose un OF en sous-OF selon le positionnement des opérations sur les périodes. Le deuxième type de guidage proposé est le guidage par contraintes de précédence qui profite des ordres de précédence des opérations affectées sur la même machine dans des périodes successives. Les performances de ces deux nouveaux guidages ont été évaluées et comparées au guidage par dates proposé au chapitre 3. Les résultats des expérimentations numériques ont mis en évidence que le guidage par dates est le meilleur.

Les performances de ces guidages "plus fins" sont moins intéressantes que le guidage par date présenté au chapitre 3. Les contraintes supplémentaires imposées par ces mécanismes de guidage diminuent l'autonomie du module d'ordonnancement détaillé. Cette diminution d'autonomie paraît contrarier la logique heuristique du solveur d'ordonnancement retenu dans cette étude. Il fournit alors des solutions moins performantes lorsqu'on considère comme objectif global la minimisation des retards.

Dans ce chapitre un mécanisme d'amélioration de la robustesse a été proposé, ce mécanisme est basé sur une sous estimation de la durée de la période et sur une sous estimation de la capacité (temps morts). Ceci permet d'introduire des "marges" qui

permettent de faciliter le suivi de plans proposés au niveau macro-ordonnancement. Les expérimentations numériques ont montré qu'en utilisant ce mécanisme on obtient des résultats très intéressants.

Le problème de calendrier de disponibilités de ressources a été également traité. Les expérimentations ont montré que l'approche multiniveau fonctionne bien pour des discrétisations petites et moyennes. Finalement, un critère global autre que la minimisation des retards est abordé : la minimisation des encours. Nous avons proposé une modification du critère de base en intégrant un terme capable de minimiser les encours par la minimisation de l'étalement des opérations appartenant à un OF. Des tests numériques ont été faits. Les résultats obtenus montrent des performances intéressantes notamment pour des problèmes de densités faibles ou moyennes.

Chapitre 5

Macro-ordonnancement et ressources alternatives

Introduction au chapitre 5

Le travail décrit dans ce chapitre élargit la problématique considérée dans les chapitres précédents à la prise en compte de ressources alternatives sous la forme de "pools de ressources". Un pool de ressources est un ensemble de ressources capables d'effectuer la même opération sur un produit avec des performances différentes. Ainsi, il faut choisir la ressource du pool qui effectuera l'opération (problème d'affectation) et réaliser l'ordonnancement de la production dans le temps et sur les ressources.

Dans le contexte de notre approche, cette nouvelle problématique a une incidence sur les fonctionnalités et la modélisation de chacun des deux niveaux décisionnels. Dans le cadre de ce travail, nous nous limitons à la prise en compte de ces nouvelles caractéristiques par le niveau supérieur.

Nous présentons dans un premier temps un modèle de macro-ordonnancement qui définit conjointement une planification des activités et une affectation des ressources aux opérations. Dans un deuxième temps, nous proposons également un mécanisme d'agrégation des pools de ressources et un modèle de macro-ordonnancement "agrégé". Ils permettent ainsi au niveau supérieur d'établir un macro-ordonnancement à moyen terme qui s'affranchit d'une affectation précise des ressources. Les performances des deux modèles sont analysées et comparées au travers de quelques expérimentations numériques.

Le premier paragraphe décrit la notion de pool de ressources et présente le modèle de macro-ordonnancement avec prise en compte de ressources alternatives.

Le deuxième paragraphe propose un mécanisme permettant d'agréger les pools de ressources et associe à cette agrégation un modèle de macro-ordonnancement agrégé.

Le troisième paragraphe décrit les expérimentations numériques qui ont été menées pour caractériser les performances comparées de l'agrégation proposée et du macro-ordonnancement agrégé face à un macro-ordonnancement avec affectation.

5.1 Macro-ordonnancement avec ressources alternatives

5.1.1 Notion de ressources alternatives et de pool de ressources

Il est fréquent dans un contexte industriel que plusieurs ressources puissent effectuer une même opération avec des performances différentes. Ainsi par exemple, une machine récente, aux fonctionnalités étendues, pourra effectuer avec une rapidité accrue, une tâche traditionnellement effectuée par une machine plus ancienne. On parle alors de "ressources alternatives" associées à une opération ou plus globalement de "pools de ressources".

"Un pool de ressources contient des ressources semblables par leurs fonctionnalités mais éventuellement différentes en termes de performances" [Artigues, 1998]. Un pool de ressources peut être constitué de ressources humaines ou matérielles. La taille du pool est déterminée par le nombre d'éléments du pool.

Soit G_{ij} le pool de ressources associé à la j^{me} opération de l' OF i c'est à dire l'ensemble des ressources r susceptibles de réaliser l'opération (ij) . Les caractéristiques de l'opération (durées opératoires et consommation de ressources) dépendent alors de la ressource qui effectue l'opération. Une opération n'utilise qu'une seule ressource du pool.

On note :

- p_{ijr} la durée de l'opération (ij) lorsqu'elle est effectuée par la ressource r du pool G_{ij}
- m_{ijr} la consommation induite par l'opération (ij) sur la ressource r . On a :

$$m_{ijr} \neq 0 \quad si \quad r \in G_{ij} ; \quad m_{ijr} = 0 \quad si \quad r \notin G_{ij}$$

La figure 5.1 illustre cette notion de pool. On considère deux opérations successives d'un OF . Le pool de l'opération (ij) est composé des ressources r_1, r_2 et r_3 . Le pool de l'opération $(i, j+1)$ est composé des ressources r_1, r_5 et r_6 .

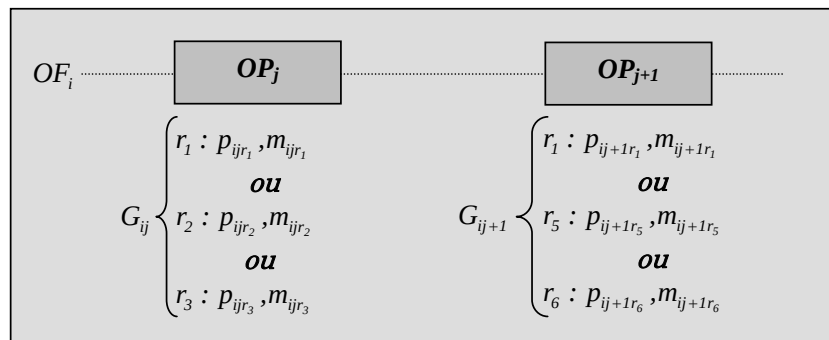


FIG. 5.1 – Notion de Pool

Il est important de noter qu'une même ressource peut appartenir à différents pools (par exemple ici la ressource r_1 qui appartient à G_{ij} et à G_{ij+1}) mais que toutes les ressources de pools ayant une ressource commune ne sont pas forcément communes aux deux pools.

Dans ce contexte, le niveau supérieur doit affecter à chaque opération une ressource choisie dans le pool et proposer un macro-ordonnancement cohérent avec cette affecta-

tion. Cette caractéristique importante nécessite de définir un nouveau modèle de macro-ordonnancement. Elle augmente la combinatoire des modèles, comme nous allons le voir ultérieurement, mais permet de satisfaire certains aspects de la réalité industrielle.

5.1.2 Modèle de macro-ordonnancement avec affectation de ressources

5.1.2.1 Les variables

Soit X_{ijrt} la variable binaire qui indique simultanément quelle ressource r est affectée à l'opération (ij) et dans quelle période est planifiée cette opération.

$X_{ijrt} = 1$ si l'opération (ij) est effectuée en période t avec la ressource r du pool G_{ij} ; $X_{ijrt} = 0$ autrement.

Les autres variables du modèle de macro-ordonnancement présentées au chapitre 2 telles que Ret_i (retard de l' OF_i), Ava_i (avance de l' OF_i), St_i (sous-traitance de l' OF_i) et $HSup_{rt}$ (volume d'heures supplémentaires) sont conservées.

L'ajout d'un nouvel indice dans la variable binaire X augmente la taille du modèle.

5.1.2.2 Les contraintes

Les contraintes modélisant le problème évoluent par rapport au modèle de base du chapitre 2 de manière à prendre en compte le problème de l'affectation des ressources.

$$\sum_{i=1}^T \sum_{r \in G_{ij}} X_{ijrt} + St_i = 1 \quad \forall i \in 1 \dots NOF, \quad \forall j \in 1 \dots NOP_i \quad (5.1)$$

$$\sum_{n=1}^t \sum_{r \in G_{ij}} X_{ijrn} \geq \sum_{n=1}^t \sum_{r \in G_{ij}} X_{ij+1rn} \quad \forall i \in 1 \dots NOF, \quad \forall j \in 1 \dots NOP_i, \quad \forall t \in 1 \dots T \quad (5.2)$$

$$\sum_{i=1}^{NOF} \sum_{j=1}^{NOP_i} m_{ijr} \times X_{ijrt} \leq Capa_{rt} + HSup_{rt} \quad \forall r \in 1 \dots NR, \quad \forall t \in 1 \dots T \quad (5.3)$$

$$\sum_{t=RP_i}^T \sum_{r \in G_{iNOP_i}} t \times X_{iNOP_i rt} - DP_i(1 - St_i) = Ret_i - Ava_i \quad \forall i \in 1 \dots NOF \quad (5.4)$$

$$\sum_{t=1}^{RP_i-1} \sum_{r \in G_{ij}} X_{ijrt} = 0 \quad \forall i \in 1 \dots NOF, \quad \forall j \in 1 \dots NOP_i \quad (5.5)$$

$$HSup_{rt} \leq Hrs_Max_{rt} \quad \forall r \in 1 \dots NR, \quad \forall t \in 1 \dots T \quad (5.6)$$

$$\sum_{j=1}^{NOP_i} \sum_{r \in G_{ij}} p_{ijr} \times X_{ijrt} \leq lg \quad \forall i \in 1 \dots NOF, \quad \forall t \in T \quad (5.7)$$

$$X_{ijrt}, St_i \in \{1, 0\} \quad \forall i \in 1 \dots NOF, \quad \forall j \in 1 \dots NOP_i, \quad \forall t \in T \quad (5.8)$$

$$Ret_i, Ava_i, HSup_{rt} \geq 0 \quad \forall i \in 1 \dots NOF, \quad \forall r \in NR, \quad \forall t \in T \quad (5.9)$$

Comme nous pouvons le constater pour pouvoir prendre en compte les nouvelles caractéristiques du problème (affectation de ressources) nous avons modifié les contraintes 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 et 5.7.

5.1.2.3 Le critère

Dans le contexte de la recherche d'un macro-ordonnancement qui minimise les retards par rapport aux périodes dues, le critère reste inchangé et se formule de la même manière que dans le modèle de macro-ordonnancement de base (c.f. paragraphe 2.2.5).

$$\sum_{i=1}^{NOF} (Ct_ret_i \times Ret_i + Ct_ava_i \times Ava_i + Ct_st_i \times St_i) + \sum_{r=1}^{NR} \sum_{t=1}^T Ct_Hsup_{rt} \times HSup_{rt} \quad (5.10)$$

5.2 Agrégation des pools de ressources et modèle de macro-ordonnancement agrégé

Compte tenu des objectifs du niveau supérieur qui vise à établir sur un horizon moyen terme un positionnement grossier (discrétisation de l'horizon) mais optimisé des opérations des *OF*, il peut être intéressant d'établir un macro-ordonnancement qui s'affranchisse d'une affectation précise des ressources aux opérations. Il est cependant indispensable, pour que le macro-ordonnancement obtenu soit réaliste, de tenir compte de la charge induite par les opérations sur les ressources (contrainte de capacité). Ce calcul de charge est délicat dans le contexte de ressources alternatives si l'affectation des opérations aux ressources n'est pas définie. Nous proposons donc de prendre en compte la charge induite par les opérations sous une forme "agrégée" indépendamment de toute affectation en répartissant la charge sur toutes les ressources du pool. Ceci conduit à un problème de macro-ordonnancement dans lequel les opérations consomment simultanément (en consommation moindre) les ressources du pool. Le problème de macro-ordonnancement devient ainsi un problème multiresource. Cette idée d'agrégation paraît justifiée dans l'hypothèse d'une utilisation variée de ces ressources par de nombreuses opérations. Cette

forme d'agrégation des pools permet de limiter la combinatoire du modèle associé au niveau supérieur de la structure. Comme toute agrégation, elle induit une perte d'information dans le modèle agrégé qui peut entraîner des incohérences dans la structure décisionnelle.

5.2.1 Mécanisme d'agrégation des pools de ressources

Le processus d'agrégation que l'on propose consiste à ignorer le problème d'affectation (utilisation d'une ressource unique d'un pool) en considérant que toutes les ressources du pool sont utilisées par l'opération (problème multiressource) avec une consommation réduite.

Dans ce travail la consommation "agrégée" M_{ijr} d'une opération (ij) sur chaque ressource r du pool G_{ij} est évaluée de la manière suivante :

$$M_{ijr} = \frac{m_{ijr}}{\text{card}(G_{ij})} \quad \forall r \in G_{ij} \quad (5.11)$$

$$M_{ijr} = 0 \quad \text{si } r \notin G_{ij}$$

Sur un principe analogue, la durée opératoire agrégée P_{ij} de l'opération (ij) correspondra à la moyenne des durées opératoires associées aux ressources du pool.

$$P_{ij} = \frac{\sum_{r \in G_{ij}} P_{ijr}}{\text{card}(G_{ij})} \quad (5.12)$$

La figure 5.2 schématise l'agrégation des caractéristiques du problème de macro-ordonnancement avec affectation de ressources.

5.2.2 Exemple d'application du mécanisme d'agrégation des pools

Exemple : A titre d'exemple, considérons les opérations 1 et 2 d'un *OF i*. Le tableau 5.1 montre les deux opérations et les pools associés aux opérations.

Le tableau 5.1 montre la consommation respective des opérations sur les ressources appartenant au pool associé à cette opération, il faut remarquer que dans ce cas l'opération choisira une seule ressource du pool (relation ou). Il montre également les durées opératoires des différentes opérations sur les différentes ressources, la durée de chaque opération dépend de la ressource utilisée dans son pool.

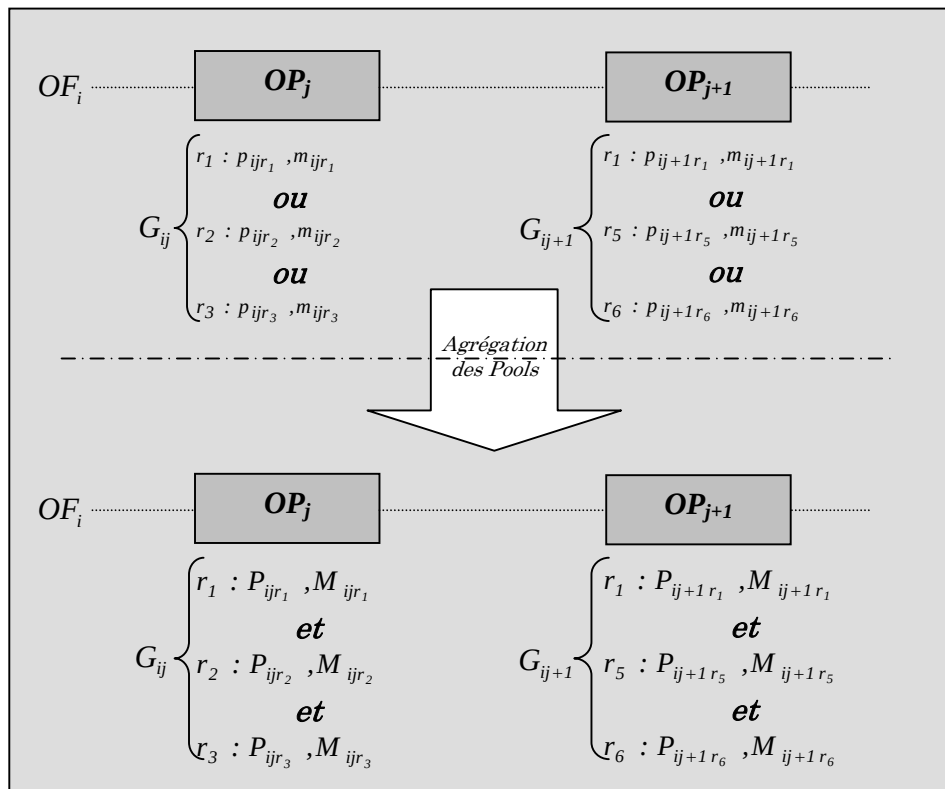


FIG. 5.2 – Notion de pool agrégé

	Caractéristiques avec ressources alternatives			
$OP(i, j)$	Pool de ressources alternatives	$r \in G_{ij}$	m_{ijr}	p_{ijr}
(1, 1)	{r1, r2, r3}	r1 ou	120	12
		r2 ou	90	9
		r3	60	6
(1, 2)	{r1, r5, r6}	r1 ou	180	18
		r5 ou	150	15
		r6	120	12

TAB. 5.1 – Données des opérations avant agrégation

En appliquant le mécanisme d'agrégation proposée par les formules 5.11 et 5.12 nous obtenons les données agrégées du tableau 5.2.

Les données des tableaux 5.2 se caractérisent par l'utilisation d'une consommation réduite et une durée moyenne pour chaque ressource. Effectivement, les relations ne se caractérisent plus avec une affectation sur une ressource spécifique (relation ou) mais par l'utilisation de toutes les ressources (relation et).

	Caractéristiques avec agrégation de ressources			
$OP(i, j)$	Utilisation des ressources (multiresources)	$r \in G_{ij}$	m_{ijr}	P_{ijr}
(1, 1)	$\{r1, r2, r3\}$	$r1$ et $r2$ et $r3$	40 30 20	9
(1, 2)	$\{r1, r5, r6\}$	$r1$ et $r5$ et $r6$	60 50 40	15

TAB. 5.2 – Caractéristiques agrégées (agrégation des pools)

5.2.3 Modèle de macro-ordonnancement agrégé

Ce mécanisme d'agrégation conduit donc à un problème de macro-ordonnancement agrégé multi-ressources qui ne nécessite pas d'affectation. Le modèle associé correspond alors au modèle de base présenté dans le chapitre 2 dans lequel les durées opératoires et les consommations sont remplacées par les durées opératoires et consommations agrégées obtenues selon les mécanismes présentés dans le paragraphe précédent. Ce modèle est présenté ci-dessous.

$$\sum_{t=1}^T X_{ijt} + St_i = 1 \quad \forall i \in 1 \dots NOF, \quad \forall j \in 1 \dots NOP_i \quad (5.13)$$

$$\sum_{n=1}^t X_{ijn} \geq \sum_{n=1}^t X_{ij+1n} \quad \forall i \in 1 \dots NOF, \quad \forall j \in 1 \dots NOP_i, \quad \forall t \in T \quad (5.14)$$

$$\sum_{i=1}^{NOF} \sum_{j=1}^{NOP_i} M_{ijr} \times X_{ijt} \leq \text{Capa}_{rt} + \text{HSup}_{rt} \quad \forall r \in NR, \quad \forall t \in T \quad (5.15)$$

$$\sum_{t=RP_i}^T t \times X_{iNOP_i t} - DP_i(1 - St_i) = Ret_i - Ava_i \quad \forall i \in 1 \dots NOF \quad (5.16)$$

$$\sum_{t=1}^{RP_i-1} X_{ijt} = 0 \quad \forall i \in 1 \dots NOF, \quad \forall j \in 1 \dots NOP_i \quad (5.17)$$

$$\text{HSup}_{rt} \leq \text{Hrs_Max}_{rt} \quad \forall r \in NR, \quad \forall t \in T \quad (5.18)$$

$$\sum_{j=1}^{NOP_i} P_{ij} \times X_{ijt} \leq lg \quad \forall i \in 1 \dots NOF, \quad \forall t \in T \quad (5.19)$$

$$X_{ijt}, St_i \in \{1, 0\} \quad \forall i \in 1 \dots NOF, \quad \forall j \in 1 \dots NOP_i, \quad \forall t \in T \quad (5.20)$$

$$Ret_i, Ava_i, HSup_{rt} \geq 0 \quad \forall i \in 1 \dots NOF, \quad \forall r \in NR, \quad \forall t \in T \quad (5.21)$$

Comme nous pouvons le constater dans le modèle, les caractéristiques agrégées ont été introduites. La contrainte 5.15 introduit le terme de consommation agrégée (M_{ijr}) qui exprime que la consommation sur toutes les ressources du pool associées à l'opération ij ne doit pas dépasser la capacité attribuée à la période. La contrainte 5.19 exprime que la durée agrégée d'une opération utilisant son pool ne doit pas dépasser la longueur de la période. Le critère qui a été déjà présenté au paragraphe 2.2.5 ne change pas, il minimise la somme des retards des OF .

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^{NOF} (Ct_ret_i \times Ret_i + Ct_ava_i \times Ava_i + Ct_st_i \times St_i) \\ + \sum_{r=1}^{NR} \sum_{t=1}^T Ct_Hsup_{rt} \times HSup_{rt} \end{aligned} \quad (5.22)$$

5.3 Expérimentations numériques

5.3.1 Objectifs des expérimentations

Il s'agit ici d'étudier l'impact de la procédure d'agrégation et du modèle agrégé associé, sur d'une part la qualité du macro-ordonnancement obtenu et d'autre part sur le temps de résolution du modèle considéré. La qualité sera appréciée en comparant la valeur du critère associé au macro-ordonnancement agrégé avec la valeur de celui obtenu en résolvant le problème de macro-ordonnancement avec affectation explicite des ressources. Le temps calcul est en général lié à la taille du problème. On peut donc s'attendre à obtenir des temps de calcul réduits dans le cas où l'on n'effectue pas une affectation explicite des ressources c'est à dire lorsqu'on utilise un modèle agrégé.

La figure 5.3 schématise la démarche utilisée dans ces expérimentations.

Les expérimentations que nous avons envisagé d'effectuer permettent d'étudier l'influence de deux caractéristiques clés dans le mécanisme d'agrégation : la charge globale des ressources et le nombre d'opérations à planifier.

Les expérimentations conduites sur le modèle de macro-ordonnancement de base [Hernandez Silva, 2004] à partir du logiciel XpressMP ont montré que la performance du solveur est liée à la nature du problème, notamment au niveau de contrainte (charge globale des ressources), se traduisant notamment par la consommation de ressources par les différentes OP , par la fenêtre de réalisation d'un OF , par la quantité des OP sur une période donnée, ...

Dans ce contexte, il paraît indispensable de formaliser le niveau de contrainte d'un problème afin de pouvoir analyser les performances observées lors de la mise en oeuvre du logiciel sur les différents jeux de données qui seront générées.

Pour un problème sans affectation de ressources (monoressource ou multiressource) les indicateurs associés à la définition du niveau de contrainte peuvent être définis sur les *OF* et les ressources avec une grande précision. Dans le cas d'un problème avec des ressources alternatives ce type d'indicateurs est plus délicat à concevoir.

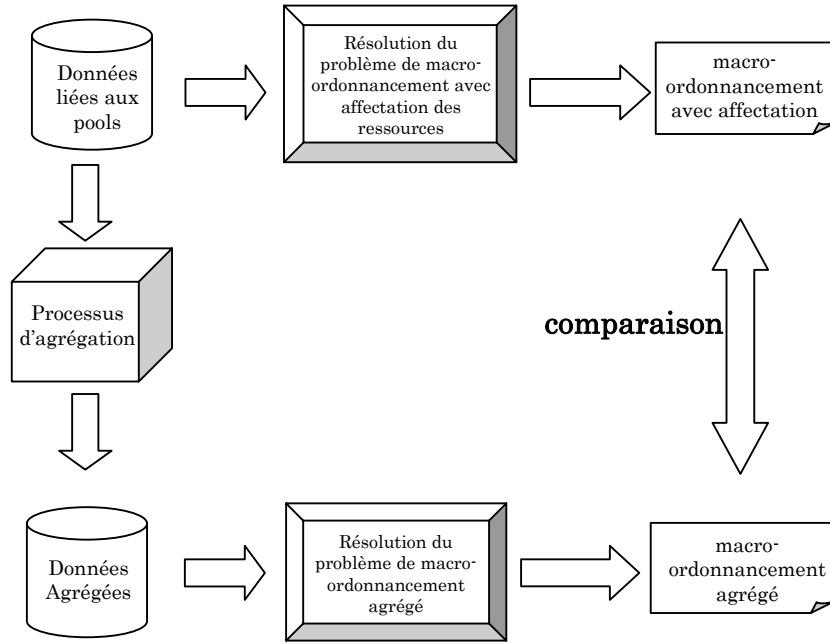


FIG. 5.3 – Comparaison des deux approches

5.3.2 Indicateurs et génération de données

La quantification du niveau de contrainte d'un problème de macro-ordonnancement avec ressources alternatives nécessite une attention particulière, car les éléments à considérer sont souvent en interaction mutuelle.

Ainsi pour mieux différencier les facteurs qui peuvent apparaître dans le niveau de contrainte d'un problème, nous proposons l'indicateur "Taux de Sollicitation Reparti (TSR)". Cet indicateur nous permet d'évaluer la sollicitation globale des opérations pour une ressource. Il représente la consommation globale des opérations sollicitant une ressource r divisée par la capacité totale de la ressource r sur l'horizon. L'indicateur de sollicitation s'écrit donc,

$$TSR_r = \frac{\sum_{i=1}^{NOF} \sum_{j=1}^{NOP_i} m_{ijr}}{\sum_{t=1}^T Capa_{rt}} \quad (5.23)$$

Pour les expérimentations que nous allons effectuer, la valeur pour caractériser le niveau de contrainte d'un problème est la valeur moyenne de TSR sur l'ensemble des ressources considérées.

Afin de maîtriser le taux de sollicitation répartie et la taille des problèmes à traiter, nous avons développé un générateur automatique de problèmes. Ce générateur est capable de créer aléatoirement des problèmes à différents niveaux de contrainte et tailles souhaitées à partir de données telles que le nombre d' OF et d'opérations par OF , le nombre de ressources et la capacité des ressources entre autres [Hernandez-Silva *et al.*, 2005].

5.3.3 Expérimentations

Des expérimentations numériques ont été conduites de manière à apprécier le comportement du processus d'agrégation que nous avons développée. Les performances du modèle avec affectation explicite de ressources (modèle à 4 indices) sont confrontées à celles montrées par le modèle avec agrégation de ressources (modèle à 3 indices). Les performances sont mesurées notamment au niveau de la qualité des solutions (critère) et au niveau du temps de calcul.

a) Expérimentations en fonction de la taille du problème (nombre total d'opérations)

Une première série de tests a été réalisée sur des exemples se différenciant par leur taille au niveau du nombre d'opérations total d'où l'on déduit le TSR .

Les exemples testés comportent 35, 50, 75, 100, 125 et 150 opérations. Les tableaux ci-dessous résument les résultats.

Nombre d'OP/OF	35	50	75	100	125	150
Nbre. d'OP	35	50	75	100	125	150
$\overline{TSR}$	0.25	0.36	0.54	0.70	0.89	1.08
Modèle avec affectation	0	0	50	160	460	830
Modèle agrégé	0	0	80	200	490	860

TAB. 5.3 – Critère en fonction du nombre total d'OP

Nombre d'OP/OF	35	50	75	100	125	150
Nbre. d'OP	35	50	75	100	125	150
$\overline{TSR}$	0.25	0.36	0.54	0.70	0.89	1.08
Modèle avec affectation	0	0	13	109	502	1694
Modèle agrégé	0	0	1	50	905	1946

TAB. 5.4 – Temps CPU en fonction du nombre total d'OP(en secondes)

Comme on pouvait l'imaginer, la valeur du taux de sollicitation augmente quand le nombre d'opérations d'un problème augmente, En effet, en augmentant le nombre

d'opérations sur l'horizon considéré, leur sollicitation sur les ressources va également augmenter.

Une analyse sur les valeurs du critère obtenues à partir des deux modèles montre que les valeurs sont proches. Les valeurs du critère obtenues par le modèle agrégé montrent une faible dégradation qui ne semble pas être très significative pour des taux de sollicitation supérieure à 0.50.

En ce qui concerne le temps de calcul, le modèle agrégé montre de bons résultats pour des taux de sollicitations inférieures à 0.89 avec une taille du problème de 100 opérations. Au delà de ces valeurs la résolution devient difficile pour le modèle agrégé.

Les dégradations constatées en temps et en qualité lorsque les charges sont fortes peuvent s'expliquer par la difficulté de trouver une solution au problème multi-ressource généré. En effet lorsque les moyens sont très chargés il est délicat de positionner toute opération à partir du moment où elle requiert la disponibilité simultanée de toutes les ressources du pool.

b) Expérimentations avec tailles et TSR différents

Finalement, une série de tests plus complète est traitée pour permettre une meilleure compréhension des résultats obtenus. Les résultats montrés aux tableaux sont la moyenne des 5 résolutions du même problème. Les tailles des problèmes sont respectivement de : 35, 75, 150 et 300 opérations. Dans ces différentes tailles, nous avons limité notre étude à 3 niveaux de contrainte du TSR (0.25, 0.50, 0.75), qui correspondent à des charges faibles, moyennes et fortes respectivement.

$\frac{NOF \times \Sigma NOP_i}{TSR}$	35		75		150		300	
	Critère avec affectation	Critère Agrégé	Critère avec affectation	Critère Agrégé	Critère avec affectation	Critère Agrégé	Critère avec affectation	Critère Agrégé
0.25	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	12.5	12.5	31.25	70	180	196	296	300
0.70	110	33	181	217	510	460	730	694

TAB. 5.5 – Valeurs du Critère

$\frac{NOF \times \Sigma NOP_i}{TSR}$	35		75		150		300	
	CPU avec affectation	CPU Agrégé	CPU avec affectation	CPU Agrégé	CPU avec affectation	CPU Agrégé	CPU avec affectation	CPU Agrégé
0.25	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	18	0.25	58.25	1.25	95.8	60.2	120.4	92.4
0.70	72.4	19	96.4	65.6	87.2	96	137	102

TAB. 5.6 – Temps CPU (seconds)

Dans un premier temps nous analysons les valeurs du critère obtenu avec les deux modèles. Nous constatons que pour des charges faibles ($TSR = 0.25$) les valeurs du critère sont identiques, pour des problèmes moyennement chargés ($TSR = 0.50$), les solutions sont assez proches, mais nous remarquons quand même des petites dégradations du modèle agrégé. Finalement, pour des problèmes fortement chargés ($TSR = 0.70$) les critères fournis par le modèle agrégé sont de moins bonnes qualités relativement aux critères établis par le modèle avec affectation.

Nous analysons également les résultats au niveau des temps CPU générés par les deux modèles. Nous observons que pour des charges testées le modèle agrégé trouve des solutions en moins de temps, sauf pour un $TSR = 0.70$ avec 150 opérations, mais l'écart n'est pas important. Finalement nous pouvons constater qu'au fur et à mesure que le nombre d'opérations augmente pour les charges moyennes et faibles, l'écart de temps cpu semble diminuer entre les deux modèles.

5.3.4 Conclusions des expérimentations

Les points sur lesquels nous pouvons conclure sont :

- **Au niveau du temps CPU**

Nous pouvons noter que pour la même taille du problème (même nombre d'opérations) le temps de calcul augmente fortement avec le niveau de contrainte (valeur moyenne du TSR) pour les deux types de modèles. Pour des niveaux de contrainte faibles, les deux modes de résolution sont très facilement effectuées par le logiciel (temps de calcul réduits).

Le modèle agrégé donne des temps de calcul inférieurs ; les réductions de la durée sont importantes pour des niveaux de contraintes forts ($TSR = 0.50$). Ces réductions deviennent moins importantes pour des problèmes très chargés ($TSR = 0.70$).

- **Au niveau de la valeur du critère**

Pour pouvoir faire l'analyse des deux approches, il est recommandé de séparer les données en deux classes liées à la validité du modèle.

La première classe inclut des données correspondant à la validité du modèle : Cela signifie que la quantité de ressource requise par une opération dans une période est beaucoup plus petite que la capacité de la ressource sur cette période. Dans les expérimentations cette hypothèse est vérifiée si TSR est inférieur à 0.6.

Dans cette classe des données, les valeurs du critère sont très proches, légèrement supérieures pour le modèle agrégé, montrant une caractéristique de "sur-contrainte" associée au modèle agrégé. Ceci est expliqué par l'aspect de multi-ressources qui consomme simultanément toutes les ressources du pool. Cette approche exige toute la disponibilité des ressources du pool et de ce fait le problème devient contraint. Il convient néanmoins de remarquer que cette caractéristique améliore l'autonomie qui est accordée au niveau détaillé qui s'occupe de l'affectation et l'ordonnancement fin sur les ressources. Avec ces niveaux de contrainte, la robustesse du modèle agrégé peut être considérée comme meilleure à partir de la comparaison avec les résultats fournis par le modèle avec affectation de ressources.

La deuxième classe correspond aux données où la validité du modèle s'avère douteuse. Il n'est pas toujours possible d'effectuer plusieurs opérations dans la même période parce que la capacité et la consommation d'une ressource sont très proches. Dans nos expérimentations ceci correspond aux problèmes très fortement chargés ($TSR = 0.7$).

Dans la deuxième classe des données, les valeurs respectives du critère sont certainement plus "chaotiques" dû aux limites de la validité du modèle mentionnée ci-dessus. Dans un tel contexte la robustesse n'est pas assurée.

Conclusions du chapitre 5

Ce chapitre a permis d'introduire une nouvelle caractéristique au problème d'ordonnancement global considéré. Elle concerne essentiellement la prise en compte de ressources alternatives. Il s'agit donc d'affecter une ressource du pool pour réaliser une opération puis d'ordonnancer les opérations.

La possibilité de choisir la ressource affectée à une opération augmente considérablement la combinatoire intrinsèque de ce type de problème. Cela est souvent associé à une augmentation de la taille du modèle et par conséquent à une augmentation du temps de calcul nécessaire à sa résolution.

L'agrégation des pools est imaginée à partir d'une répartition de la consommation sur toutes les ressources du pool. La qualité du mécanisme d'agrégation proposé dans ce chapitre paraît donc fortement liée à la consommation des ressources ainsi qu'à la diversité de la composition des pools.

Il est donc indispensable d'étudier l'influence de ces deux éléments sur la qualité du macro-ordonnancement agrégé vis à vis des performances du macro-ordonnancement avec affectation. Dans le contexte de ressources alternatives, la caractérisation de la charge globale des ressources est une démarche délicate. Le taux de sollicitation réparti permet de caractériser les jeux de données quant à l'utilisation potentielle des ressources (sollicitation). La diversité de la composition des pools peut être reliée à la taille du problème.

Les expérimentations numériques montrent que le mécanisme d'agrégation des pools et le modèle associé se comportent de manière tout à fait satisfaisante pour des TSR inférieurs à 0,7 et pour des tailles de problèmes très différentes. Ceci est vrai au niveau du gain en temps de calcul comme au niveau des valeurs des critères. De plus, des valeurs légèrement dégradées du critère agrégé peuvent être appréciables d'un point de vue de la robustesse : en effet, des dates guidantes moins contraignantes conduisent à une autonomie supérieure du niveau détaillé et facilitent la recherche de solutions détaillées faisables cohérentes avec le guidage.

Pour des TSR supérieur à 0,7 (ressources très chargées) l'agrégation proposée conduit à un problème multiressource très (trop) contraint, les performances obtenues sont alors dégradées.

Conclusions et perspectives

Le bilan

Dans ces travaux de thèse, l'objectif que nous avons poursuivi est de concevoir une approche multiniveau d'aide à la décision pour l'ordonnancement de tâches dans un contexte de la production à la commande. Ce type de structure décisionnelle permet d'ordonnancer finement des opérations sur le court terme tout en optimisant des politiques de gestion à moyen terme. Au delà de la finalité de la structure (proposition d'un ordonnancement détaillé), chaque niveau de la structure correspond à un souci de gestion spécifique et peut correspondre à une catégorie de décideurs différents. En plus des intérêts techniques, ce type de structure peut correspondre au fonctionnement traditionnel de bon nombre d'entreprises.

Le marché propose aux décideurs de nombreux outils logiciels d'ordonnancement. Dans leur très grande majorité, ces outils ne proposent pas de vision à moyen-terme pour l'optimisation de critères associées à des politiques de gestion de production.

La structure décisionnelle

A partir de ce constat, nous nous sommes attachés à proposer une approche capable de pallier les problèmes souvent rencontrés dans les logiciels classiques d'ordonnancement. Cette approche repose sur une structure d'ordonnancement à deux niveaux. Chaque niveau apporte ses propres qualités à l'ordonnancement final. En effet le niveau supérieur (macro-ordonnancement) est capable d'optimiser des politiques de gestion par l'élaboration d'une planification par période des *OF*. Le niveau inférieur est chargé de réaliser un ordonnancement fin (satisfaisant toutes les contraintes détaillées) tout en respectant le guidage établi à partir des décisions agrégées optimisées construites au niveau du macro-ordonnancement.

La proposition d'une telle structure nécessite d'une part, la spécification des modèles et des outils à utiliser dans chaque niveau de la structure décisionnelle et d'autre part, l'évaluation de ses qualités. Au niveau supérieur (macro-ordonnancement) nous avons proposé une modélisation du problème d'ordonnancement par un programme linéaire en variables mixtes. La résolution de tels modèles permet de positionner les opérations appartenant à un ensemble d'*OF* sur un horizon moyen-terme discrétisé en périodes. Ce positionnement temporel optimise les critères souhaités par le décideur représentant la politique de gestion retenue. Pour construire les données (en temps discrétisé) du modèle de macro-ordonnancement, nous avons proposé des mécanismes d'agrégation temporels qui transforment les caractéristiques initiales du problème exprimées en temps continu en des caractéristiques temporelles en temps discret. De manière à limiter les pertes d'informations associées à tout phénomène d'agrégation, nous avons défini un mécanisme

de correction de dates basé sur l'introduction d'opérations fictives dans les gammes des *OF*.

Le guidage

Le niveau inférieur (ordonnancement détaillé) est chargé de désagréger les décisions prises par le niveau de macro-ordonnancement. La désagrégation effectuée doit suivre au mieux le positionnement temporel optimisé des *OF* proposé par le niveau supérieur. Ce niveau peut être construit à l'aide de tout module d'ordonnancement chargé de tenir les délais. De manière à faire communiquer les deux niveaux décisionnels nous avons proposé trois types de "guidages". Ils prennent l'information (positionnement des *OF*) dans la planification agrégée optimisée et se différencient par la façon d'interpréter cette information. Le premier type de guidage ("guidage par dates") considère d'une manière globale le positionnement en spécifiant les périodes de début et de fin des *OF*. Le deuxième type ("guidage par sous-*OF*") considère plus finement le positionnement des opérations sur les périodes. Enfin, le troisième guidage ("guidage par contraintes de précédence") s'intéresse au positionnement par ressource et par période des opérations et fournit des contraintes de précédence entre opérations de différents *OF* appartenant à une même ressource.

L'évaluation et les expérimentations

Des expérimentations numériques ont été mises en IJuvre pour évaluer les performances de l'approche proposée. L'objectif global retenu dans ce cadre est classique, il consiste à minimiser les retards. Le niveau macro-ordonnancement a été construit à partir du solveur Xpress et le niveau ordonnancement à partir du solveur Préactor (avec la règle "tenue des délais" conseillée). Ces expérimentations ont permis d'illustrer les performances des deux approches : approche directe traditionnelle (Préactor), approche multiniveau (Xpress et Préactor). Ces performances sont mises en évidence par trois indicateurs : qualité globale, robustesse et efficacité du guidage. Les tests ont été conduits de manière à mettre en évidence l'impact de différents éléments : soit des paramètres du module de macro-ordonnancement (longueur des périodes de discrétisation), soit des caractéristiques des problèmes considérés (taux de charge des ressources, densité des *OF*, ...). Le premier point à souligner est que, dans un tel contexte d'expérimentation, le guidage par date donne des résultats intéressants pour des périodes de discrétisation dont la longueur est inférieure à quatre ou cinq fois la durée opératoire moyenne et pour des taux de charge raisonnables (inférieur à 0.70). Le deuxième point à souligner est que ce guidage montre globalement des performances supérieures aux deux autres guidages. Cette supériorité est très certainement liée au compromis "consigne-autonomie" que permet ce type de guidage face au comportement heuristique du module d'ordonnancement détaillé. Les autres guidages fournissent des consignes trop strictes à cette heuristique (analyse probablement valable pour tout module heuristique de cette même classe).

La robustesse

La robustesse du macro-ordonnancement est également une qualité importante que l'on doit associer à ce type de structure. En effet il convient de voir si la solution agrégée peut être suivie par le niveau inférieur. Dans le cas contraire, cela poserait un réel problème pour le fonctionnement et pour la crédibilité de ce type d'approche. Pour cela nous proposons une amélioration de la robustesse du macro-ordonnancement en "sur-

contraignant" ce niveau supérieur par l'élaboration de caractéristiques agrégées pertinentes, au niveau de la longueur des périodes de discrétisation et/ou de la capacité agrégée des ressources. Les expérimentations montrent tout l'intérêt de cette démarche pour améliorer très fortement les indicateurs de robustesse sans significativement dégrader la qualité globale de l'approche liée à la politique de gestion retenue.

Les extensions

Trois extensions de l'approche visant à se rapprocher au mieux de problématiques industrielles ont été étudiées. Comme dans les autres études, des expérimentations numériques sur des problèmes académiques ont permis d'apprécier le comportement des outils proposés.

La première extension consiste à considérer, dès la vision à moyen terme de la gestion, la prise en compte de calendriers de fonctionnement des ressources. L'approche multiniveau montre alors des résultats satisfaisants en permettant une forme d'anticipation des décisions face à une approche directe qui travaille à plus courte vue.

La deuxième extension travaille sur un nouvel objectif assigné au problème global d'ordonnancement, celui de la minimisation des encours de fabrication. Le macro-ordonnancement travaille avec un critère complété prenant en considération l'étalement des *OF*. Le niveau détaillé est toujours chargé de suivre au mieux les consignes temporelles fournies par le guidage. L'approche directe est alors constituée par un module d'ordonnancement traditionnel mis en IJuvre avec la règle conseillée pour la minimisation des encours. Par comparaison avec les résultats fournis par l'approche directe, l'approche multiniveau donne de bons résultats pour limiter les encours en répartissant judicieusement les fenêtres de réalisation des *OF*.

Enfin la troisième extension s'intéresse à une problématique différente d'utilisation des ressources basée sur la prise en compte de pool de ressources (ou ressources alternatives). Cette partie de l'étude est limitée à la structuration et à la modélisation du macro-ordonnancement. Deux modèles sont proposés. L'un prend explicitement en compte la notion de ressources alternatives et résout simultanément un problème d'affectation de ressources et d'ordonnancement. L'autre modèle agrège chaque pool de manière à considérer implicitement cette notion de ressources alternatives permettant ainsi une réduction du nombre de variables et de contraintes. En comparant sur des expérimentations les solutions fournies par ces deux modèles, on peut constater le bon comportement du modèle de macro-ordonnancement agrégé qui fournit des temps de calculs réduits et des performances proches de celles données par le modèle de macro-ordonnancement avec affectation.

Les perspectives

Ce travail et les expérimentations associées donnent une première appréciation globalement favorable à l'approche multiniveau proposée. Ces premières études et les premières analyses sur des expérimentations numériques académiques permettent d'envisager des perspectives de travail intéressantes.

Approfondissement de l'étude expérimentale

En premier il conviendrait de renforcer l'étude expérimentale et les analyses associées,

en traitant des problèmes avec une réalité industrielle plus forte, comme par exemple au niveau de la taille, au niveau de la structure et des données associées au gammes, de la valeur des horizons pris en compte au niveau moyen terme et au niveau court terme, au niveau de la prise en compte d'un ordonnancement dynamique (horizon glissant sur le court terme par exemple,...).

La nature du niveau détaillé

Il serait également intéressant d'apprécier l'influence du solveur associé au niveau détaillé sur les performances de l'approche globale. Nous avons considéré ici un solveur traditionnel utilisé avec des heuristiques de base. Il conviendrait d'analyser l'influence d'un solveur plus sophistiqué s'attachant par exemple à élaborer des ordonnancements détaillés optimaux par rapport aux guidages proposés dans cette étude. Il serait alors indispensable d'étudier le comportement du "couple" : mécanismes de guidage-module d'ordonnancement détaillé vis à vis de la performance globale de la structure.

Dans le cadre de la prise en compte de pool de ressources, seul le niveau macro-ordonnancement a été structuré et analysé. Il conviendrait également de mettre en IJuvre et d'apprécier le comportement de toute la structure en la complétant par un module d'ordonnancement associé au niveau inférieur, chaque niveau étant alors chargé de résoudre un problème conjoint d'affectation et de planification.

Une analyse plus fine des résultats

Certains phénomènes de "chaos" constatés lors des expérimentations numériques devraient être analysés plus profondément. Ceux-ci pourraient avoir deux origines éventuellement complémentaires. L'une pourrait être liée à l'utilisation d'une heuristique de résolution au niveau inférieur (cf. intérêt de l'étude d'une diversification des solveurs associés à ce niveau évoquée dans le point précédent). L'autre pourrait être liée à la notion de solutions optimales équivalentes. En effet, plusieurs solutions optimales équivalentes peuvent exister au niveau supérieur. Bien qu'équivalentes sur le plan du critère, ces solutions équivalentes peuvent correspondre à des macro-ordonnements très différents sur le plan du positionnement des opérations et conduire donc à des guidages très différents. Selon la nature de l'heuristique de désagrégation mise en IJuvre, le niveau inférieur peut réagir plus ou moins bien au macro-ordonnement et guidage choisis et conduire à des résultats parfois chaotiques. Il serait pertinent alors d'affiner le critère agrégé de manière à générer le macro-ordonnement le plus adapté à l'heuristique de désagrégation.

Le paramétrage du macro-ordonnement

Cette étude pourrait également être le point de départ d'une réflexion plus structurée pour déterminer la longueur de discrétisation du module de macro-ordonnement. Cette réflexion pourrait fournir des indications précieuses pour déterminer ce paramètre face à aux caractéristiques des données de la fabrication (durées opératoires, consommation des ressources, charge des ressources, calendriers,...).

Bibliographie

- [Ait-Hssain, 2005] AIT-HSSAIN, A. (2005). *Optimisation des flux de production*. Dunod.
- [Aloulou, 2002] ALOULOU, M. A. (2002). *Structure flexible d'ordonnancements à performances contrôlées pour le pilotage d'atelier en présence de perturbations*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France.
- [Alvarez-Valdés, 1993] ALVAREZ-VALDÉS, R. (1993). The project scheduling polyhedron : dimension facets and lifting theorems. *European Journal of Operations Research*, (67):204–220.
- [Anthony, 1965] ANTHONY, R. (1965). *Planning and control systems : a framework for analysis*. Harvard University Press.
- [Araujo et al., 1995] ARAUJO, E., DAKIN, G., HUBER, M. et GRUPEN, R. (1995). Hierarchical scheduling of robotic assembly operations in a flexible manufacturing system. *International Journal of Flexible Automation and Integrated Manufacturing*, (3):301–316.
- [Artigues, 1998] ARTIGUES, C. (1998). *Ordonnancement en temps réel d'atelier avec prise en compte des temps de preparation des ressources*. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [Ashayeri et Selen, 2003] ASHAYERI, J. et SELEN, W. (2003). A production planning model and a case study for the pharmaceutical industry in the netherlands. *International Journal of logistics : Research and applications*, (6):37–49.
- [Axsater et Jönsson, 1984] AXSATER, S. et JÖNSSON, H. (1984). Agregation and disaggregation in hierarchical production planning. *European Journal of Operational Research*, (17):338–350.
- [Baker, 1974] BAKER, K. (1974). *Introduction to sequencing and scheduling*. John Wiley.
- [Balas, 1970] BALAS, E. (1970). *Project scheduling with resource constraints*. Applications of Mathematical Programming Techniques. America Elsevier.
- [Baptiste et al., 2005] BAPTISTE, P., GIARD, V., HAÏT, A. et SOUMIS, F. (2005). *Gestion de production et ressources humaines*. Presses Internationales Polytechnique.
- [Baptiste et al., 2001] BAPTISTE, P., LE PAPE, C. et NUIJTEN, W. (2001). *Constraint-Based Scheduling : Applying Constraint Programming to Scheduling Problems*. Kluwer's International Series.
- [Belvaux et Wolsey, 2001] BELVAUX, G. et WOLSEY, L. (2001). Modelling practical lot-sizing problems as mixed-integer programs. *Management Science*, (47):993–1007.
- [Bitran et al., 1981] BITRAN, G., HAAS, E. et HAX, A. (1981). Hierarchical production planning : A single stage system. *Operations research*, (29):717–743.

- [Bitran et Hax, 1977] BITRAN, G. et HAX, A. (1977). On the design of hierarchical production planning systems. *Decision Sciences*, (8):28–55.
- [Bitran et Tirupati, 1993] BITRAN, G. et TIRUPATI, D. (1993). Hierarchical production planning, logistics of production and inventory. *Handbooks in operations research and management science*, (4).
- [Blazewicz *et al.*, 1994] BLAZEWICZ, J., ECKER, K., SCHMIDT, G. et WEGLARZ, J. (1994). *Scheduling in computer and manufacturing systems*. Springer-Verlag.
- [Blodel, 2002] BLODEL, F. (2002). *Gestion de la production*. Dunod.
- [Bénassy, 1987] BÉNASSY, J. (1987). *La gestion de la production*. Hermès.
- [Bowers et Jarvis, 1992] BOWERS, M. et JARVIS, J. (1992). Hierarchical production planning scheduling model. *Decisions sciences*, (23):144–159.
- [Bruker, 1998] BRUKER, P. (1998). *Scheduling algorithms*. Springer-Verlag.
- [Burkard et Hatzl, 2006] BURKARD, R. et HATZL, J. (2006). A complex time based construction heuristic for batch scheduling problems in the chemical industry. *European Journal of Operational Research*, (174):1162–1183.
- [Caravilla et De Souza, 1995] CARAVILLA, M. et DE SOUZA, J. (1995). Hierarchical production planning in a make-to-order company : A case study. *European Journal of Operational Research*, (86):43–56.
- [Carlier et Chrétienne, 1988] CARLIER, J. et CHRÉTIENNE, P. (1988). *Problèmes d'ordonnancement*. Masson.
- [Chen et Ji, 2007] CHEN, K. et JI, P. (2007). A mixed integer programming model for advanced planning and scheduling (aps). *Journal of Operational Research*, (181):515–522.
- [Conway *et al.*, 1967] CONWAY, R., MAXWELL, W. et MILLER, L. (1967). *Theory of scheduling*. Dover Publications Inc.
- [Courtois *et al.*, 2006] COURTOIS, A., PILLET, M. et MARTIN-BONNEFOUS, C. (2006). *Gestion de la production*. Eyrolles.
- [Cowling, 2003] COWLING, P. (2003). A flexible decision support system for steel hot rolling mill scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, (45):307–321.
- [Crouhy et Greif, 1991] CROUHY, M. et GREIF, M. (1991). *Gérer simplement la gestion de production : du plan directeur au suivi des ateliers*. Editions du Moniteur.
- [Das *et al.*, 2000] DAS, B., RICKARD, J., SHAH, N. et MACCHIETTO, S. (2000). An investigation on integration of aggregate production planning, master production scheduling and short-term production scheduling of batch process operations through a common data model. *Computers & Chemical Engineering*, (24):1625–1631.
- [Dauzère-Pérès et Lasserre, 2002] DAUZÈRE-PÉRÈS, S. et LASSERRE, J. (2002). On the importance of sequencing decisions in production planning and scheduling. *International Transactions in Operational Research*, (9):779–793 month=.
- [Demasse, 2003] DEMASSEY, S. (2003). Méthodes hybrides de programmation par contraintes et programmation linéaire pour le problème d'ordonnancement de projet à contraintes de ressources. *Thèse de Doctorat, Université d'Avignon, Avignon, France*.

- [Demirkol *et al.*, 1998] DEMIRKOL, E., MEHTA, S. et UZSOY, R. (1998). Benchmarks for shop scheduling problems. *European Journal of operational Research*, (109):137–141.
- [Dempster *et al.*, 1981] DEMPSTER, M., FISHER, M., JANSEN, L., LAGEWEB, B., LENS-TRA, J. et RINNOOY, A. (1981). Analytical evaluation of hierarchical planning systems. *Operations Research*, (29):707–716.
- [Deschamps, 1994] DESCHAMPS, J. (1994). Gestion hiérarchisée de cellules flexibles d'assemblage : concepts, modèles et simulation. *Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, France*.
- [Despontin-Monsarrat, 2004] DESPONTIN-MONSARRAT, E. (2004). Aide à la décision pour une coopération inter-entreprises dans le cadre de la production à la commande. *Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, Toulouse, France*.
- [Dolgui et Proth, 2006] DOLGUI, A. et PROTH, J. (2006). *Les systèmes de production modernes*, volume 1. Lavoisier.
- [Dréo *et al.*, 2003] DRÉO, J., PÉROWSKI, A., SIARRY, P. et TAILLARD, E. (2003). *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*. Eyrolles.
- [Entrup *et al.*, 2005] ENTRUP, M., GÜNTHER, H., VAN BEEK, P., GRUNOW, M. et SEILER, T. (2005). Mixed-integer linear programming approaches to shelf-life-integrated planning and scheduling in yaourt production. *International Journal of Production Research*, (43):5071–5100.
- [Erschler et De Terssac, 1988] ERSCHLER, J. et DE TERSSAC, G. (1988). Flexibilité et rôle de l'opérateur humain dans l'automatisation intégrée de production. *LAAS-CNRS, Toulouse, France*.
- [Erschler *et al.*, 1985] ERSCHLER, J., FONTAN, G. et MERCÉ, C. (1985). Consistency of the disaggregation process in hierarchical planning. *Operations Research*, (14).
- [Esquirol et Lopez, 1999] ESQUIROL, P. et LOPEZ, P. (1999). *L'ordonnancement*. Economica.
- [Fei *et al.*, 2006] FEI, H., MESKENS, N., COMBES, C. et CHU, C. (2006). Planification et ordonnancement de l'activité d'endoscopie. *7ème congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF '06), Lille, France*.
- [Fontan *et al.*, 1994] FONTAN, G., HETREUX, G. et MERCÉ, C. (1994). Consistency of decisions in multi-level production planning :analysis and implementation. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2:1183–1188.
- [Fontan et Imbert, 1985] FONTAN, G. et IMBERT, S. (1985). Interaction between the two-levels of decision making in a job shop. *Congre's EURO VI, Bologne*.
- [Fontan *et al.*, 1997] FONTAN, G., MERCÉ, C. et LASSERRE, J. (1997). *Concepts et outils pour les systèmes de production, Chapitre 3 de l'ouvrage collectif coordonné par J.C. Hennet*. Cépaduès Editions.
- [Fontan *et al.*, 2005] FONTAN, G., MERCÉ, C., LASSERRE, J. et HENNET, J. (2005). Hierarchical scheduling for decision support. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 16:235–242.
- [Galasso, 2007] GALASSO, F. (2007). Aide à la planification dans les chaînes logistiques en présence de demande flexible. *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France*.

- [Gfrerer et Zäpfel, 1995] GFRERER, H. et ZÄPFEL, G. (1995). Hierarchical model for production planning in the case of uncertain demand. *European Journal of Operational Research*, (86):142–161.
- [Giannelos et Georgiadis, 2003] GIANNELOS, N. et GEORGIADIS, M. (2003). Efficient scheduling of consumer goods manufacturing processes in the continuous time domain. *Computers & operations research*, (30):1367–1381.
- [Giard, 2003] GIARD, V. (2003). *Gestion de la production et des flux*. Economica.
- [Günther, 1986] GÜNTHER, H. (1986). *The design of an hierarchical model for production planning and scheduling*. Lecture notes in economic and mathematical systems. Springer-Verlag.
- [GOTHA, 1993] GOTHA (1993). *Les problèmes d'ordonnancement*. RAIRO-Recherche opérationnelle/Operation research.
- [Grangeon, 2001] GRANGEON, N. (2001). Métaheuristiques et modèles d'évaluation pour le problème du flow-shop hybride hierarchies : contexte déterministe et contexte stochastique. *Thèse de Doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II*.
- [Grunow et al., 2004] GRUNOW, M., GÜNTHER, H. et YANG, G. (2004). Development of a decision support model for scheduling clinical studies and assigning medical personnel. *Health Care Management Science*, (7):305–317.
- [Guenin et al., 2007] GUENIN, P., THOMAS, A. et LAMOURI, S. (2007). How to manage robust tactical planning with an aps. *Journal of Intelligent Manufacturing*, (18):209–221.
- [Guinet et Chaabane, 2003] GUINET, A. et CHAABANE, S. (2003). Operating theatre planning. *International Journal of Production Economics*, (85):69–81.
- [Hans et al., 2007] HANS, E., HERROELEN, W., LEUS, R. et WULLINK, G. (2007). A hierarchical approach to multi-project planning under uncertainty. *The International Journal of Management Science*, (35):563–577.
- [Haskose et al., 2004] HASKOSE, A., KINGSMAN, B. et WORTHINGTON, D. (2004). Performance analysis of make-to-order manufacturing systems under different workload control regimes. *International Journal of Production Economics*, (90):169–186.
- [Hax et Golovin, 1978] HAX, A. et GOLOVIN (1978). *Hierarchical production planning systems*. Studies in operations management. North Holland.
- [Hernandez Silva, 2004] HERNANDEZ SILVA, J. (2004). Ordonnancement agrégé avec ressources alternatives. *Rapport DEA, LAAS-CNRS*.
- [Hernandez-Silva et al., 2005] HERNANDEZ-SILVA, J., FONTAN, G., MERCÉ, C. et GHARBI, H. (2005). Macro-scheduling with alternative resources. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management. Marrakech, Morocco*.
- [Hernandez-Silva et al., 2007] HERNANDEZ-SILVA, J., MERCÉ, C. et FONTAN, G. (2007). A multilevel approach for scheduling and capacity management. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management. Beijing, China*.
- [Hétreux, 1996] HÉTREUX, G. (1996). Structures de décision multiniveaux pour la planification de la production : robustesse et cohérence des décisions. *Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France*.

- [Huang *et al.*, 2003] HUANG, G., K.LAU, J. et MAK, K. (2003). The impacts of sharing production information on supply chain dynamics : a review of the literature. *International Journal of Production Research*, (41):1483–1517.
- [Huguet, 1994] HUGUET, M. (1994). Approche par contrainte pour l'aide à la décision et à la coopération en gestion de production. *Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, France*.
- [Ichimura, 1996] ICHIMURA, T. (1996). The elements and functions of hierarchical scheduling system of order production. *International Journal of Production Economics*, (44):73–81.
- [Jebali *et al.*, atre] JEBALI, A., ALOUANE, A. et LADET, P. (A apparaître). Customer driven production planning. *International Journal of Production Economics*.
- [Jodlbauer, atre] JODLBAUER, H. (A apparaître). Customer driven production planning. *International Journal of Production Economics*.
- [Kang et Lee, 2007] KANG, K. et LEE, Y. (2007). Make-to-order scheduling in foundry semiconductor fabrication. *International Journal of Production Research*, (45):615–630.
- [Katayama, 1996] KATAYAMA, H. (1996). On a two-stage hierarchical production planning system for process industries. *International Journal of Production Economics*, (44):63–72.
- [Lasserre, 1992] LASSERRE, J. (1992). An integrated model for job-shop planning and scheduling. *Management Science*, (38):1201–1211.
- [Lee *et al.*, 1993] LEE, H., BILLINGTON, C. et CARTER, B. (1993). Hewlett-packard gains control of inventory and service through design for localization. *Interface*, (23):1–11.
- [MacCarthy et Fernandes, 2000] MACCARTHY, B. et FERNANDES, F. (2000). A multi-dimensional classification of production systems for the design and selection of production planning and control systems. *Production Planning and Control*, 11.
- [Mahmoudi *et al.*, 2005] MAHMOUDI, J., GALASSO, F. et FRANÇOIS, J. (2005). Cadre de classification des publications en supply chain management. *Rapport interne Ecole des mines d'Albi Carmaux DR/GI-Nr05.02*.
- [Mehra *et al.*, 1996] MEHRA, A., MINIS, I. et PROTH, J. (1996). Hierarchical production planning for complex manufacturing systems. *Advances in Engineering Software*, (26):209–218.
- [Melèse, 1984] MELÈSE, J. (1984). *La gestion par les systèmes*. Editions Hommes et Techniques.
- [Mendez *et al.*, 2006] MENDEZ, C., CERDÁ, J., GROSSMANN, I., HARJUNKOSKI, I. et FAHL, M. (2006). State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes. *Computers & Chemical Engineering*, (30):913–946.
- [Mentzer *et al.*, 2001] MENTZER, J., DEWITT, W., KEEBLER, J., MIN, S., NIX, N., SMITH, C. et ZACHARIA, Z. (2001). Defining the supply chain management journal of business logistics. *Journal of business logistics*, (22).
- [Mercé et Fontan, 2001] MERCÉ, C. et FONTAN, G. (2001). *Hiérarchisation de la fonction planification, Chapitre 3 de l'ouvrage Organisation et gestion de la production*. Hermes Science.

- [Monteiro, 2001] MONTEIRO, T. (2001). Conduite distribuée d'une coopération entre entreprises : le cas de la relation donneurs d'ordres-fournisseurs. *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France.*
- [Neureuther et al., 2004] NEUREUTHER, B., POLAK, G. et SANDERS, N. (2004). A hierarchical production plan for a make-to-order steel fabrication plant. *Production planning & Control*, (15):324–335.
- [Omar et Teo, 2007] OMAR, M. et TEO, S. (2007). Hierarchical production planning and scheduling in a multi-product, batch process environment. *International Journal of Production Research*, (45):1029–1047.
- [Panwalkar et Iskander, 1977] PANWALKAR, S. et ISKANDER, W. (1977). A survey of scheduling rules. *Operations research*, (25):45–61.
- [Pinedo, 2005] PINEDO, M. (2005). *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*. Springer.
- [Pochet et Wolsey, 2006] POCHET, Y. et WOLSEY, L. (2006). *Production planning by mixed integer programming*. Springer.
- [Prisker et al., 1969] PRISKER, A., WATTERS, A. et WOLFE, P. (1969). Multi-project scheduling with limited resources : a zero-one programming approach. *Management Science*, (44):93–108.
- [Qiu et Burch, 1997] QIU, M. et BURCH, E. (1997). Hierarchical production planning and scheduling in a multi-product, multi-machine environment. *International Journal of Production Research*, (35):3023–3042.
- [Qiu et al., 2001] QIU, M., FREDENDALL, L. et ZHU, Z. (2001). Application of hierarchical production planning in a multiproduct, multimachine environment. *International Journal of Production Research*, (39):2803–2816.
- [Robert et al., 2006] ROBERT, A., LE PAPE, C. et SOURD, F. (2006). Lot streaming et pegging pour l'intégration de la planification et de l'ordonnancement de production. *7ème congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF '06), Lille, France.*
- [Rodammer et White, 1988] RODAMMER, F. et WHITE, K. (1988). A recent survey of production scheduling. *IEEE transaction on systems, man and cybernetics*, (6).
- [Rota-Franz et al., 2001] ROTA-FRANZ, K., BEL, G. et THIERRY, C. (2001). *Gestion des flux dans les chaînes logistiques. Dans performance industrielle et gestion des flux*. Hermès Science.
- [Roux, 1997] ROUX, W. (1997). Une approche cohérente pour la planification et l'ordonnancement de systèmes de production complexes. *Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, France.*
- [Rutten, 1993] RUTTEN, W. (1993). Hierarchical mathematical programming for operational planning in a process industry. *European Journal of Operational Research*, (64):363–369.
- [Sawik, 2002] SAWIK, T. (2002). Monolithic vs. hierarchical balancing and scheduling of a flexible assembly line. *European Journal of Operational Research*, (143):115–124.
- [Sawik, 2005] SAWIK, T. (2005). Integer programming approach to production scheduling for make-to-order manufacturing. *Mathematical and computer modeling*, (41):99–118.

- [Sawik, 2006] SAWIK, T. (2006). Hierarchical approach to production scheduling in make-to-order assembly. *International Journal of Production Research*, (44):801–830.
- [Sawik, 007a] SAWIK, T. (2007a). Multi-objective master production scheduling in make-to-order manufacturing. *International Journal of Production Research*, (45):2629–2653.
- [Sawik, 007b] SAWIK, T. (2007b). Integer programming approach to reactive scheduling in make-to-order manufacturing. *Mathematical and computer modelling*, (46):1373–1387.
- [Schneeweiss, 1995] SCHNEEWEISS, C. (1995). Hierarchical structures in organizations : A conceptual framework. *European Journal of Operational Research*, (86):4–31.
- [Schneeweiss, 1999] SCHNEEWEISS, C. (1999). *Hierarchies in distributed decision making*. Springer.
- [Schneeweiss, 2003] SCHNEEWEISS, C. (2003). Distributed decision making - a unified approach. *European Journal of Operational Research*, (150):237–252.
- [Selçuk et al., 2006] SELÇUK, B., FRANSOO, J. et A.G., D. K. (2006). The effect of updating lead times on the performance of hierarchical planning systems. *International Journal of Production Economics*, (104):427–440.
- [Soman et al., 2004] SOMAN, C., VAN DONK, D. et GAALMAN, G. (2004). Combined make-to-order and make-to-stock in a food production system. *International Journal of Production Economics*, (90):223–235.
- [Subramaniam et al., 2000] SUBRAMANIAM, V., LEE, G., HONG, G., WONG, Y. et RAMESH, T. (2000). Dynamic selection of dispatching rules for job shop scheduling. *Production Planning and Control*, (11):73–81.
- [Tang et Liu, 2007] TANG, L. et LIU, G. (2007). A mathematical programming model and solution for scheduling production orders in shanghai baoshan iron and steel complex. *European Journal of Operational Research*, (182):1453–1468.
- [Tayur et al., 1999] TAYUR, S., GANESHAN, R. et MAGAZINE, M. (1999). *Quantitative model for supply chain management*. Kluwer Academic Publishers.
- [Toivonen et al., 2006] TOIVONEN, V., IKKALA, K. et NIEMI, E. (2006). Planning and scheduling system for make-to-order production. *CIRP Annals-Manufacturing technology*, (55):493–496.
- [Tsubone et al., 2002] TSUBONE, H., ISHIKAWA, Y. et YAMAMOTO, H. (2002). Production planning system for a combination of make-to-stock and make-to-order products. *International Journal of Production Research*, (40):4835 – 4851.
- [Tsukiyama et al., 1996] TSUKIYAMA, M., MORI, K. et FUKUDA, T. (1996). Hierarchical distributed algorithm for large scale manufacturing systems. *IFAC IFORMS IMACS IFIP Symposium on large scale systems : theory and applications, Patras, Greece*.
- [Tung et al., 1999] TUNG, L., LIN, L. et NAGI, R. (1999). Multiple-objective scheduling for the hierarchical control of flexible manufacturing systems. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, (11):379–409.
- [Wolf et Chen, 1995] WOLF, J. et CHEN, M. (1995). A hierarchical approach to parallel multiquery scheduling. *IEEE Transaction on parallel and distributed systems*, (6):578–590.

- [Wolsey et Chen, 2002] WOLSEY, L. et CHEN, M. (2002). Solving multi-item lot-sizing problems with an mip solver using classification and reformulation. *Management Science*, (48):1587–1602.
- [Yan et al., 2004] YAN, H., ZHANG, X. et JIANG, M. (2004). Hierarchical production planning with demand constraints. *Computers & industrial engineering*, (46):533–551.
- [Yanpin et al., 1997] YANPIN, R., ZUO, Z. et QIUFENG, W. (1997). An analysis of scheduling rules. *IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems*, pages 1351–1355.
- [Özdamar et al., 1998] ÖZDAMAR, L., BOZYEL, M. et BIRBIL, S. (1998). A hierarchical decision support system for production planning (with case study). *European Journal of Operational Research*, (104):403–422.
- [Özdamar et al., 1997] ÖZDAMAR, L., NÜKET, Y. et ATLI, A. (1997). A modified hierarchical production planning system integrated with mrp : a case study. *Production Planning & Control*, (8):72–87.
- [Özdamar et Yazgaç, 1999] ÖZDAMAR, L. et YAZGAÇ, T. (1999). A hierarchical planning approach for a production-distribution system. *International Journal of Production Research*, (37):3759–3772.

Auteur : José Fernando HERNANDEZ SILVA

Titre : Approche multiniveau et ordonnancement d'activités dans un contexte de production à la commande.

Directeurs de thèse : Colette MERCE et Gérard FONTAN

Lieu et date de soutenance : LAAS-CNRS, 25 janvier 2008

Résumé : Cette thèse se situe dans le cadre de la planification de la production à moyen et court terme dans un environnement de production à la commande et s'intéresse plus particulièrement à une problématique d'ordonnancement de tâches. Elle propose une approche décisionnelle à deux niveaux permettant conjointement l'ajustement charge-capacité des ressources et l'ordonnancement des opérations appartenant à un ensemble d'Ordres de Fabrication (OF).

Le niveau supérieur (macro-ordonnancement) positionne les OF sur un horizon moyen-terme discrétisé en périodes et aide le décideur à élaborer une planification agrégée optimisée compte tenu de la politique de gestion retenue (heures supplémentaires, sous-traitance, retards, etc.). Ce niveau est modélisé par un programme linéaire en variables mixtes. Des mécanismes d'agrégation sont proposés. Ils permettent d'associer au niveau supérieur des données agrégées (par macro-périodes) obtenues à partir des données détaillées (définies sur le temps continu). L'étude s'intéresse également à des extensions du modèle de macro-ordonnancement dans le cas de la prise en compte de différents types de leviers décisionnels, de la prise en compte de ressources alternatives,...

Le niveau inférieur (ordonnancement) positionne finement (en temps continu, horizon court-terme) les opérations sur les ressources pouvant être utilisées. Il est chargé de "suivre" le macro-ordonnancement ayant optimisé le positionnement grossier des OF .

Afin d'intégrer les deux niveaux décisionnels, différents mécanismes de "guidage" sont proposés. Ces mécanismes permettent de désagréger les décisions prises au niveau supérieur. Ces mécanismes permettent l'utilisation de logiciel d'ordonnancement standard au niveau inférieur.

Des expérimentations numériques sont effectuées afin d'étudier les performances de la structure multiniveau. Ces expérimentations permettent d'apprécier le comportement de la structure décisionnelle face à différents grandeurs d'éléments caractéristiques de l'approche : pas de discrétisation, mécanismes de guidage, taux de contraintes,...

Mots clés : Planification, Ordonnancement, Macro-ordonnancement, Optimisation, Structures multiniveau, agrégation, robustesse.

Discipline : Systèmes Industriels

Multilevel approach and scheduling of activities in a make-to-order production framework.

Abstract : This thesis is within the framework of mid-term production planning in a make-to-order production environment and more particularly on scheduling problems. It proposes a two-level decisional approach allowing the load-capacity adjustment of resources and the scheduling of the operations belonging to a whole of production orders (*PO*).

The higher level (macro-scheduling) positions *PO* on a mid-term horizon discretized in periods and aids the decision maker to elaborate an optimized aggregate planning taking into account the selected management policy (overtime, subcontracting, delays, etc). This level is modelled by a linear program in mixed variables. Aggregation mechanisms are proposed. They allow associate at the higher aggregate level data (associated with macro periods) obtained from detailed data (defined over continuous time). The study is also interested on the extensions of the macro-scheduling model in the case of the taking into account of various types of decisional levers, of the taking into account of alternative resources, etc.

The lower level (scheduling) finely positions (in continuous time, short-term horizon) the operations on resources. It is charged "to follow" the macro-scheduling having optimized the positioning of *PO*.

In order to integrate the two decisional levels, different mechanisms of "guidance" are proposed. These mechanisms make it possible to disaggregate the decisions taken at the higher level. These mechanisms accept the use of standard scheduling software at the lower level.

Numerical experiments are carried out in order to study the performances of the multilevel structure. These experiments allow appreciate the behaviour of the decisional structure face to different sizes of characteristic elements of the approach : discretization length, guidance mechanisms, constraints rate.

Keywords : Planning, Scheduling, Macro-scheduling, Optimization, Multi-level structures, aggregation, robustness.

