

HABILITATION

A DIRIGER DES RECHERCHES

Discipline : SCIENCES PHYSIQUES

Présentée et soutenue publiquement

le 18 décembre 2003

par

Ouajdi KORBAA

Ingénieur de l'Ecole Centrale de Lille

Docteur de l'Université des Sciences et Technologies de Lille

**Contribution à la Conception et l'Optimisation des
Systèmes de Transport et de Production**

Directeur de recherche :

M. J.-C. GENTINA Professeur à l'Ecole Centrale de Lille

Jury :

M. Y. DALLERY	Président, Professeur à l'Ecole Centrale de Paris
M. Y. FREIN	Rapporteur, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble
M. J.-J. LESAGE	Rapporteur, Professeur à l'Ecole Normale Supérieure Cachan
M. Ch. PROUST	Rapporteur, Professeur à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours
M. A. ARTIBA	Examineur, Professeur à la Faculté Universitaire Catholique de Mons
M ^{me} M. BAYART	Examineur, Professeur à l'Université de Lille I
M. Ph. CHRETIENNE	Examineur, Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris.
M. P. YIM	Examineur, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille

La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne.
La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi.

Victor Hugo

A mes parents.
A tous ceux que j'aime.

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille (LAIL) au sein de l'équipe Systèmes à Evènements Discrets, sous la direction scientifique du Professeur Jean-Claude Gentina. Je tiens à le remercier très vivement pour ses précieux conseils et son soutien dont j'ai bénéficié tout au long de notre collaboration.

Pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'examiner ce travail et d'en être les rapporteurs je remercie vivement Messieurs Yannick Frein, Jean-Jacques Lesage et Christian Proust.

Je tiens également à remercier Madame Mireille Bayart ainsi que Messieurs Abdelhakim Artiba, Philippe Chrétienne, Yves Dallery et Pascal Yim pour l'honneur qu'ils me font en examinant ce travail et en acceptant de participer à mon jury.

Ce travail n'aurait pu se faire sans la participation et l'aide (sur les plans recherche, enseignement, administratif et privé) d'un certain nombre de proches, d'amis et de collègues. Ainsi, je suis fier d'exprimer ma gratitude à Emmanuel, Etienne, Philippe et Yves pour leurs conseils avisés, à Nathalie pour son aide et soutien illimités, à Armand, Pascal, Michel et Samir pour leur collaboration fructueuse et amitié sincère, à Abdelkarim, Moncef, Rim, Walid et Wided pour leur soutien moral et affection, à Benoît et Thomas pour leur collaboration et bonne ambiance.

J'ai aussi eu le plaisir d'encadrer les travaux de thèse de Imen et Jong Kun et en ce moment de Olfa et Meriem. Je leur souhaite une bonne continuation et de la réussite dans leurs carrières professionnelles.

J'adresse également une pensée particulière à tous les membres et personnel technique et administratif de l'Ecole Centrale de Lille, du Laboratoire d'Automatique et Informatique industrielle Lille, de l'équipe de Recherche en Génie Industriel et du Laboratoire de Génie Industriel pour leur gentillesse, aide et disponibilité.

Table des matières

A.	Trajectoire Personnelle	1
I.	Recherche	3
II.	Enseignement et responsabilités	10
B.	Activités d'enseignement.....	13
I.	Introduction.....	15
II.	Enseignements dispensés	16
1.	<i>Systèmes à Evénements Discrets</i>	<i>16</i>
2.	<i>Génie Logiciel.....</i>	<i>17</i>
3.	<i>Réseaux Informatiques et NTIC.....</i>	<i>17</i>
4.	<i>Stages et Projets.....</i>	<i>18</i>
III.	Charge annuelle d'enseignement.....	18
IV.	Conclusion.....	19
C.	Activités de Recherche	21
I.	Introduction.....	23
II.	Conception des systèmes de transport et de production	25
1.	<i>Contexte du travail.....</i>	<i>25</i>
2.	<i>Formulation du problème</i>	<i>27</i>
3.	<i>Prise en compte des flexibilités.....</i>	<i>28</i>
III.	Exploitation des systèmes de production et de transport	34
1.	<i>Planification.....</i>	<i>35</i>
a.	<i>Contexte.....</i>	<i>35</i>
b.	<i>Formulation.....</i>	<i>36</i>
c.	<i>Résolution</i>	<i>38</i>
2.	<i>Evaluation des performances</i>	<i>40</i>
3.	<i>Ordonnancement cyclique.....</i>	<i>42</i>
a.	<i>Nouvelle approche.....</i>	<i>44</i>
b.	<i>Collaborations et Benchmarks</i>	<i>54</i>
4.	<i>Régimes transitoires</i>	<i>54</i>
a.	<i>Contexte.....</i>	<i>54</i>
b.	<i>Production isolée</i>	<i>56</i>
c.	<i>Transitoire inter-productions</i>	<i>57</i>
5.	<i>Surveillance et diagnostic</i>	<i>60</i>
a.	<i>Contexte.....</i>	<i>61</i>
b.	<i>Hypothèses</i>	<i>62</i>
c.	<i>Détection.....</i>	<i>63</i>
d.	<i>Diagnostic</i>	<i>64</i>
e.	<i>Résolution</i>	<i>65</i>
IV.	Contrats de recherche	68
1.	<i>3 Suisses.....</i>	<i>68</i>
2.	<i>Port Fluvial de Lille.....</i>	<i>69</i>
V.	Conclusion.....	70
D.	Responsabilités.....	75
I.	Recherche	77
II.	Enseignement	78
III.	Responsabilités collectives	79
E.	Conclusion & Perspectives	81

F.	Annexes.....	87
I.	Curriculum Vitae	89
1.	<i>Etat civil</i>	89
2.	<i>Formation</i>	89
3.	<i>Titres universitaires</i>	89
4.	<i>Fonctions exercées</i>	90
5.	<i>Encadrements</i>	90
a.	Diplômes d'Etudes Approfondies.....	90
b.	Thèses de Doctorat	90
6.	<i>Publications</i>	92
II.	Liste des Publications	94
1.	<i>Revue à audience internationale</i>	94
2.	<i>Revue à audience nationale</i>	94
3.	<i>Ouvrages de Synthèse</i>	94
4.	<i>Conférences Plénières</i>	95
5.	<i>Conférences Internationales</i>	95
6.	<i>Conférences Nationales</i>	95
III.	Bibliographie	97
IV.	Notations et Abréviations	101
V.	Index Alphabétique	103
VI.	Description des matières enseignées	104
1.	<i>Systèmes à Evénements Discrets</i>	104
2.	<i>Génie Logiciel</i>	105
3.	<i>Réseaux Informatiques et NTIC</i>	106

Table des figures

Figure A-1 : Points d'intérêt du groupe Evaluation des performances en 1995.....	4
Figure A-2 : Différentes phases de résolution (Camus, 1997)	4
Figure A-3 : Productivité, Flexibilité et Coût (Kermad, 1996)	5
Figure A-4 : Différentes phases de résolution (Korbaa, 1998).....	6
Figure A-5 : Axes de recherche étudiés.....	6
Figure A-6 : Nouveaux axes de recherche	8
Figure A-7 : Retours d'expérience	9
Figure A-8 : Positionnement des travaux encadrés et menés	9
Figure B-1 : Répartition des enseignements par thème	16
Figure C-1 : Flux en fonction de l'en-cours (Ausfelder, 1994)	24
Figure C-2 : Différentes phases de la conception d'un atelier, (Chaieb, 2002).....	26
Figure C-3 : Affectation d'une même position aux machines identiques.....	28
Figure C-4 : Considération des machines identiques	29
Figure C-5 : Exemple illustratif	32
Figure C-6 : Gammes opératoires linéaires	32
Figure C-7 : Gammes opératoires flexibles à machines simples.....	33
Figure C-8 : Positionnement optimal des machines autour du convoyeur	34
Figure C-9 : Résolution du problème de planification	39
Figure C-10 : Gamme flexible.....	41
Figure C-11 : Gammes linéaires.....	42
Figure C-12 : Structure de l'approche d'ordonnancement.....	44
Figure C-13 : Exemple	45
Figure C-14 : Exemple illustratif	46
Figure C-15 : BUC correspondant à M_1	47
Figure C-16 : BUC correspondant à M_2	47
Figure C-17 : Relations de conflit et de concurrence	49
Figure C-18 : Partage de ressource	51
Figure C-19 : Réseaux de dépliage	51
Figure C-20 : Séquences obtenues.....	52
Figure C-21 : Procédure d'ordonnancement.....	53
Figure C-22 : Positionnement des transitoires inter-productions	57
Figure C-23 : Architecture Multi-Agent	59
Figure C-24 : Régime permanent cyclique	61
Figure C-25 : Pert cyclique	62
Figure C-26 : Sémantique des nœuds et arcs	65
Figure C-27 : Génération d'hypothèses.....	66
Figure C-28 : Arbre de résolution	67
Figure C-29 : Réfutation d'une hypothèse en chaînage arrière.....	67
Figure C-30 : Réfutation par chaînage mixte et prédiction de symptômes.....	68
Figure C-31 : Description du premier niveau de hiérarchie	72

A. *TRAJECTOIRE PERSONNELLE*

Dans le but de présenter mes travaux de recherche et d'enseignement, il m'a paru utile de présenter la dynamique générale de ma démarche. Ainsi, ce chapitre résume mes axes de recherche actuels, mes domaines d'enseignement ainsi que mes responsabilités administratives. Il détaille, également, l'évolution de ces différents points depuis mon recrutement comme maître de conférences. Ce chapitre est organisé en deux parties. La première partie est dédiée à mes activités de recherche alors que la seconde est consacrée à l'enseignement et aux responsabilités collectives. Par la suite, un chapitre sera consacré à chacune de ces parties. En effet, le second chapitre détaillera mes activités d'enseignement. Le chapitre suivant explicitera les travaux de recherche et précèdera le chapitre dédié aux responsabilités administratives. Une conclusion générale clôturera ce mémoire.

I. Recherche

L'année scolaire 1994-1995 peut être considérée comme un moment important de ma carrière professionnelle. En effet, cette année a coïncidé avec ma 3^{ème} année à l'Ecole Centrale de Lille et avec mon choix de spécialité (ou plutôt d'option d'approfondissement). Ce choix fut l'option Informatique Industrielle pour l'intérêt que je portais, et qui ne s'est pas altéré depuis, pour les systèmes de production. Cette période correspond également à ma découverte du domaine de la recherche à travers les cours de DEA de « Productique et Informatique Industrielle ». Ces enseignements théoriques m'ont tout de suite intéressé et j'ai souhaité approfondir mes connaissances dans ce domaine. C'est ainsi que mon premier contact avec la recherche fut à travers la réalisation d'un mini projet de 3^{ème} année qui a consisté en l'implémentation d'un algorithme de diagnostic basé sur les Signatures Temporelles Causales (Toguyeni, 1992). Par la suite, j'ai effectué mon stage de DEA au sein du LAIL dont le sujet concernait l'analyse et la détermination des circuits élémentaires dans un graphe d'événements. L'analyse de ces circuits permet leur marquage pour garantir la vivacité et le fonctionnement à vitesse maximale du système.

Fort de ces deux expériences dans deux sous équipes différentes du LAIL (Surveillance / supervision d'une part et Evaluation de performances d'autre part), j'ai décidé de me lancer dans la préparation d'une thèse de doctorat que j'ai choisie dans le domaine de l'optimisation discrète et l'ordonnancement sous la direction du professeur Jean-Claude Gentina. L'équipe Systèmes à Evénements Discrets (SED)¹ du LAIL s'intéresse aux Systèmes Flexibles de Production Manufacturière, depuis la spécification et la modélisation jusqu'à l'exploitation en passant par l'optimisation des performances et l'ordonnancement. Ces deux derniers points sont étudiés par le groupe « Evaluation de Performances ». En effet, à partir d'une demande initiale, exprimée en nombre et type de pièces à réaliser, il s'agit de déterminer une commande déterministe et cyclique tout en optimisant deux critères : le flux de production et l'en-cours utilisé, cf. Figure A-1.

Pour résoudre ce problème, cette équipe a mis en place une approche hiérarchisée de résolution en plusieurs étapes où les solutions données par une étape constituent les hypothèses de départ de la suivante. En effet, étant donnée la très grande complexité du problème, il n'est pas envisageable d'en exprimer une problématique synthétique complète en une seule phase ni même de résoudre l'ensemble des variables et inconnues du système synthétique global sans décomposer le problème en sous problèmes de moindre complexité.

¹ Anciennement appelée Production Flexible Manufacturière (PFM)

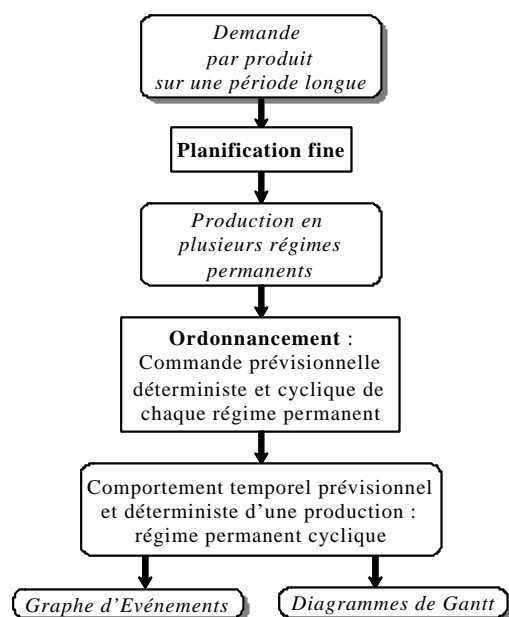


Figure A-1 : Points d'intérêt du groupe Evaluation des performances en 1995.

Ainsi, la première étape est chargée de décomposer la demande initiale en plusieurs productions cycliques. Chacune de ces productions est caractérisée par un ensemble réduit de pièces (formant un cycle) et le nombre de répétitions de ce cycle. La seconde étape se charge de déterminer les meilleures performances de chaque cycle. En fait, même si on connaît la composition d'un cycle, il reste encore à fixer certains paramètres dont l'affectation des machines identiques ainsi que du chemin à emprunter parmi l'ensemble des possibilités offertes par la flexibilité de gamme. Cette phase détermine donc le temps de cycle minimal, sous l'hypothèse d'en-cours suffisant (très grand), et fixe lesdites inconnues afin de l'atteindre. De plus, elle détermine une borne inférieure d'en-cours pour atteindre cette performance optimale. Cette borne inférieure constitue une condition nécessaire mais non suffisante car elle n'est pas toujours atteignable. Enfin, la dernière étape se charge d'ordonner les gammes de production obtenues par la phase précédente en respectant le temps de cycle optimal, précédemment déterminé, tout en minimisant l'en-cours nécessaire. Le résultat final est une commande cyclique représentée par un diagramme de Gantt et modélisée par un graphe d'événements marqué. Quant aux méthodes utilisées, pour résoudre les différentes phases, elles sont toutes des heuristiques dédiées, étant donné le caractère NP-difficile (Serafini, Ukovich, 1998) des problèmes étudiés.

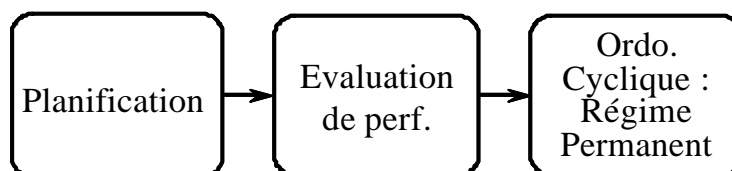


Figure A-2 : Différentes phases de résolution (Camus, 1997)

C'est dans ce contexte que j'ai effectué mes travaux de recherche, dans la continuité des travaux de *H. Ohl* et de *H. Camus*, dans le but de poursuivre l'étude et d'améliorer les méthodes de résolutions et par conséquent les résultats obtenus. Dans cette étude, je me suis intéressé à l'optimisation des Systèmes Flexibles de Production Manufacturière (SFPM) et plus particulièrement à la construction d'une commande cyclique optimisée hors ligne. Ainsi, j'ai particulièrement étudié les deux dernières phases de l'approche, cf. Figure A-2.

En ce qui concerne la phase d'évaluation de performances, j'ai effectué une analyse mathématique de la combinatoire inhérente au passage des gammes de production « brutes », c'est-à-dire flexibles (dont il faut choisir les chemins déterministes à emprunter) et / ou avec des machines identiques (dont il faudra préciser la charge et les opérations affectées), à des gammes à ordonnancer, c'est-à-dire linéaires (sans flexibilité) utilisant des ressources simples (machines affectées). Cette analyse a permis d'exhiber la très grande combinatoire de cette phase et de mettre en place des méthodes pour la détermination de solutions. Quant à la phase d'ordonnancement, elle a été étudiée en vue de formaliser un algorithme d'ordonnancement cyclique permettant d'approcher au mieux la solution optimale. Pour cela, je me suis inspiré des algorithmes déjà existants : placement progressif (Hillion, 1989), résultat admissible en un tour du programme (Ohl, 1995), intervalles de disponibilité (Valentin, 1994) tout en ajoutant des aspects jusque là non exploités : chevauchements de cycles, politiques de placement des opérations diversifiées, ...

Le résultat obtenu est donc un ordonnancement cyclique qui représente le régime permanent d'une production. Cependant, il restait à définir le moyen d'atteindre ce régime permanent (régime transitoire de lancement de la production) et d'en sortir (régime transitoire d'arrêt de la production) (Munier, 1991 ; Hanen, 1994 ; Varnier ; 1996 ; Erschler, 1982). Ce type de régime de production a été très peu étudié dans la littérature à cause de l'hypothèse d'horizon de production infini (ou presque) adoptée par la plupart des intéressés (Hillion, 1989 ; Valentin, 1994 ; Ohl, 1995 ; ...) c'est-à-dire que le régime permanent est supposé très (assez) grand pour négliger le régime transitoire ou du moins ne pas avoir à l'étudier. Cette hypothèse se justifie dans le contexte d'ordonnancement d'instructions dans un microprocesseur, par exemple. Ceci n'a pas empêché ceux qui s'y intéressent de résoudre le transitoire sans toutefois un grand effort d'optimisation étant donné qu'il est réellement de taille très réduite par rapport au nombre d'instructions du régime permanent (Munier, 1991 ; Hanen, 1994). Dans le contexte de production manufacturière, cette hypothèse devient quelque peu erronée étant donné que les Systèmes Flexibles de Production Manufacturière sont utilisés pour des productions de petite et moyenne série, cf. Figure A-3.

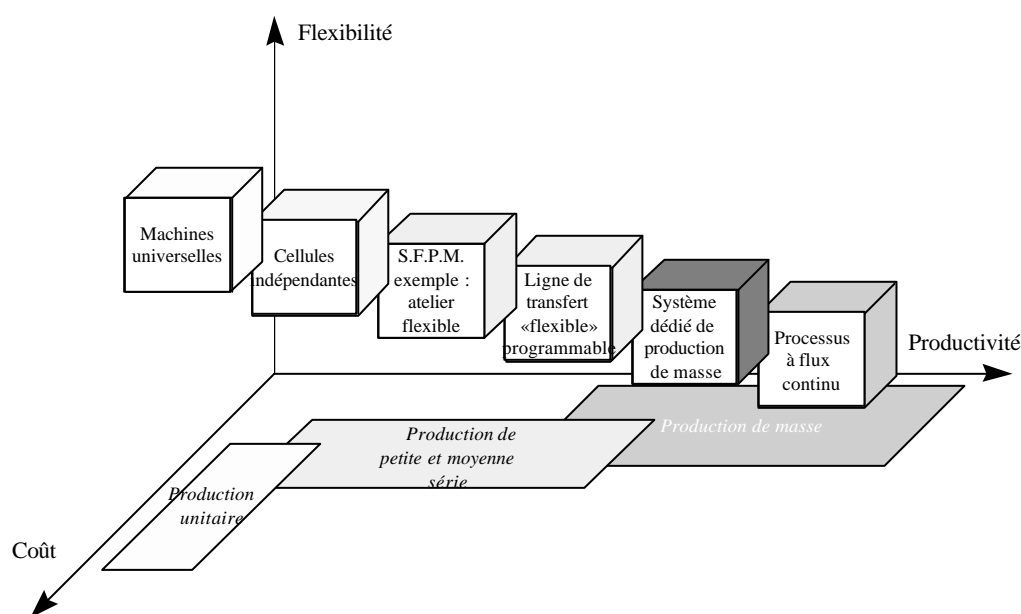


Figure A-3 : Productivité, Flexibilité et Coût (Kermad, 1996)

Ainsi, j'ai décidé de m'intéresser à l'étude des régimes transitoires en vue de leur optimisation. Cette étude a donné des résultats fort intéressants notamment dans la garantie de l'optimalité des

résultats sous l'hypothèse de non production de pièces entières durant le transitoire de lancement de la production. Elle a également donné la possibilité d'arrêter la production une fois par cycle en utilisant le même transitoire optimisé pour la fin de la production ce qui permet d'arrêter « proprement » la production à chaque cycle afin d'introduire des productions prioritaires ou des opérations de maintenance urgentes. L'approche de résolution comporte donc 4 phases de résolution, cf. Figure A-4.

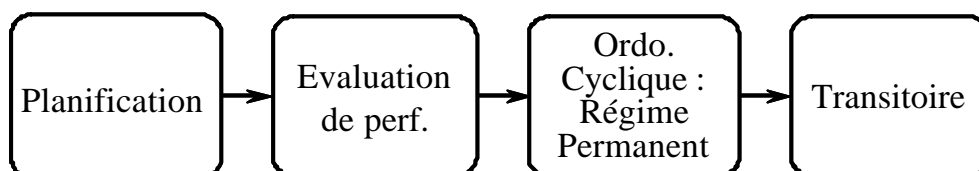


Figure A-4 : Différentes phases de résolution (Korbaa, 1998)

Depuis mon recrutement comme Maître de Conférences à l'Ecole Centrale de Lille, et étant donné que je suis resté dans la même équipe de recherche, j'ai naturellement **poursuivi les axes de recherche** précédemment entrepris en plus de l'élargissement de ces axes, cf. Figure A-5. Les pistes continuées concernent principalement la planification de production (thèse *I. Chaieb*) à travers la proposition d'algorithmes de résolution et leur implémentation (Chaieb, Korbaa, Camus, 2001). En effet, *H. Camus* avait jusque là proposé un modèle mathématique multi objectifs, non linéaire, ... difficilement codable en l'état. De plus, les résultats jusque là obtenus en transitoire se limitent à l'étude des régimes de lancement et d'arrêt d'une seule production isolée (sans prise en compte des autres productions amont et aval). Dans ce contexte, la thèse *O. Belkahla Driss* (que je codirige) étudie les régimes transitoires et cherche à optimiser les régimes inter-productions permettant de vider le système de la production en cours et de lancer le nouveau régime permanent (Belkahla, et al., 2003). Ceci d'autant plus qu'au cours de la phase de planification on est amené à découper la demande initiale en plusieurs régimes permanents. Il fallait donc garder l'homogénéité et surtout la concordance des différentes phases d'une seule et même approche de résolution.

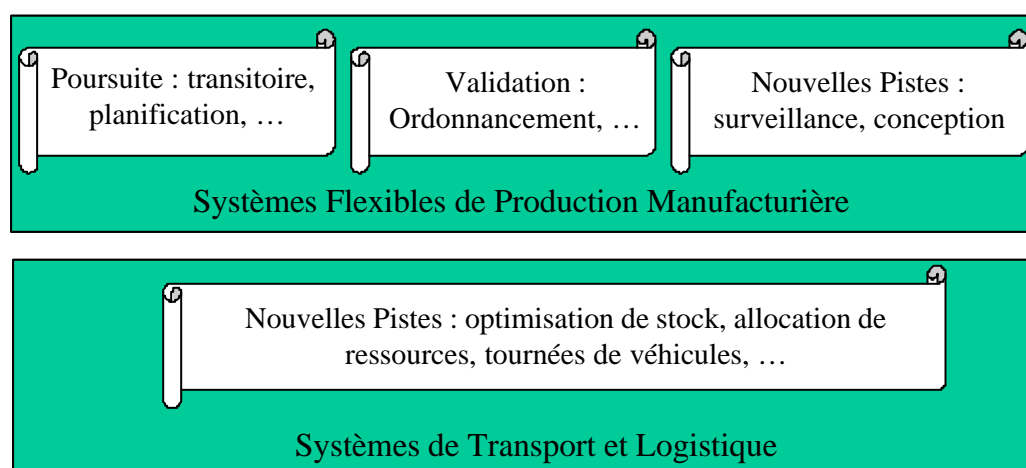


Figure A-5 : Axes de recherche étudiés

Cette suite logique des travaux entrepris par l'équipe m'a également donné l'opportunité de lancer de **nouveaux axes** ou pistes de recherche qui ont, pour certains, ouvert de nouveaux horizons à l'équipe et apporté de nouveaux savoir-faire. En effet, si les ressources de transport (palettes) sont prises en compte et optimisées dans l'approche de résolution, les durées de transfert proprement dites ont été négligées et les opérations de transport d'une pièce, d'une machine vers

une autre, ont toujours été supposées se faire en temps masqué. Ceci est principalement dû à la difficulté de la prise en compte des opérations et ressources de transport qui, contrairement aux ressources de transformation, sont cumulatives et interruptibles d'où une grande difficulté de les considérer selon les mêmes hypothèses que l'algorithme d'ordonnancement des machines. Dans ce cadre, j'ai codirigé les travaux de *I. Chaieb* qui ont conduit à l'introduction des opérations de transfert dès la phase d'évaluation des performances pour obtenir un ordonnancement final contenant les opérations de transformation, de transfert et de stockage (Chaieb, et al., 2002).

De plus, je me suis intéressé à la **validation des résultats** jusque là obtenus par l'équipe. Ainsi, j'ai cherché à confronter les méthodes d'optimisation aux autres approches développées dans d'autres laboratoires et à en développer de nouvelles plus performantes (soit en terme de qualité du résultat soit en terme de durée de calcul) principalement pour l'ordonnancement cyclique. Dans ce sens, la thèse de *J. K. Lee* a proposé une nouvelle approche d'ordonnancement cyclique basée sur l'analyse des réseaux de Petri pour obtenir un résultat « satisfaisant » très rapidement à l'opposé de l'algorithme initialement développé qui donnait des résultats très proches de l'optimum mais avec des durées de calcul assez grandes (Lee, et al., 2001a, b et c ; Lee, Korbaa, 2004).

J'ai également cherché à **créer une dynamique** entre laboratoires s'intéressants à ce type de problèmes. Ceci afin de constituer à terme une bibliothèque de benchmarks et de jeux d'essais largement diffusés permettant aux futurs chercheurs dans ce domaine d'avoir des exemples « type » à l'instar de ce qui existe dans la communauté d'ordonnancement acyclique avec la librairie « OR-Library »¹. Ainsi, je **co-anime**² l'axe « ordonnancement cyclique et problèmes avec blocage »³ dans le cadre du projet régional « Modélisation et Optimisation des Systèmes de Transport » (MOST). De plus, j'ai organisé une session invitée « *cyclic scheduling : methods and benchmarks* » au congrès IEEE SMC'02 qui a regroupé 5 articles de 5 laboratoires différents ce qui a permis de nouer des liens et de créer une première dynamique qui s'est poursuivie à travers la **co-signature** d'articles (Hsu et al., 2003 ; Fournier et al., 2003). Une tentative « encore très jeune » pour normaliser la définition des problèmes d'ordonnancement cycliques grâce à un langage « universel » (langage XML) est également en cours. Elle permettra, en cas de succès, d'éviter la profusion des modèles de définition de ce genre de problèmes (RdP, graphes, mathématiques, recherche opérationnelle, ...) et proposera en même temps de visualiser graphiquement le problème grâce à la puissance de ce langage et outils déjà existants.

L'imbrication des résultats obtenus dans « l'édifice » des travaux de l'équipe constitue également une partie de leur validation. Cette validation passe par l'**intégration** des modèles utilisés dans le « référentiel » qui est un système d'information développé par la sous équipe portant le même nom (actuellement membre de l'Equipe de Recherche en Génie Industriel). En effet, la mise en commun de l'ensemble des données manipulées dans le même système d'information nous permet de nous affranchir de la compréhension, pas toujours évidente, des modèles utilisés par les autres modules et garantit une meilleure cohérence entre les différentes phases. Cette étude menée en collaboration avec *M. Bigand* et *J.-P. Bourey* a permis la publication de deux articles de revues (Bigand, et al., 2004a ; Bigand, et al., 2004b).

¹ <http://mscmga.ms.ic.ac.uk/info.html>

² Avec *R. Dupas* du Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois (LGI2A), anciennement LabOGP.

³ Egalement appelé MOST2.

Enfin, toujours dans l'optique de **valider les résultats**, je me suis intéressé à l'implémentation à travers l'observation du bon fonctionnement de la commande déterministe établie. En effet, nous avons toujours «prédit» qu'un ordonnancement cyclique est assez simple à observer et facilite donc la détection des défaillances. Cette étude, de surveillance indirecte par le flux, que j'ai menée de concert avec *A. Toguyeni* de la sous équipe surveillance/supervision a permis d'obtenir des résultats intéressants dont principalement la justification, a posteriori, de l'intérêt d'un ordonnancement cyclique optimisé hors ligne pour la détection et le diagnostic des défaillances (Toguyeni, Korbaa, 2001).

En plus du thème de recherche concernant la validation des résultats, je me suis également intéressé à deux hypothèses couramment utilisées dans l'ordonnancement cyclique qui consistent à supposer le système de transport non critique ainsi que l'existence d'en-cours suffisant. Cet intérêt m'a conduit à étudier le problème de conception de l'atelier de production afin de mieux comprendre ces aspects mais également à garantir le bien-fondé de ces hypothèses. J'ai donc cherché, dans la thèse de *I. Chaieb*, à optimiser l'agencement des machines dans l'atelier afin de minimiser les distances parcourues par les pièces ce qui minimise la charge des ressources de transfert (et les rend moins critiques) mais également diminue les durées totales des gammes de production et par conséquent minimise le nombre d'en-cours nécessaires pour atteindre le temps de cycle minimal (Chaieb, Korbaa, Gentina, 2001 ; Chaieb, Korbaa, 2001 ; Chaieb, Korbaa, 2003). Le schéma des axes de recherche de l'équipe se trouve donc enrichi de deux nouvelles phases, cf. Figure A-6.

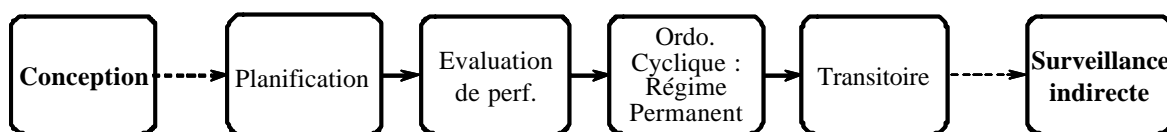


Figure A-6 : Nouveaux axes de recherche

J'ai également cherché à ce que les différentes phases de résolution interagissent entre elles malgré leurs relatives indépendances les unes par rapport aux autres, cf. Figure A-7. Par exemple, les travaux sur les régimes transitoires peuvent faire un retour d'expérience intéressant sur la planification qui décompose la demande en plusieurs régimes permanents (flèche 1 de la Figure A-7) :

- Faut-il introduire peu ou beaucoup de régimes permanents ?
- Si nous avons le choix entre plusieurs configurations différentes ?
- Faut-il préférer des régimes permanents avec peu ou beaucoup de pièces à produire par cycle ?
- ...

De même, les travaux sur la surveillance indirecte nous donnent des renseignements concernant l'ordonnancement cyclique (flèche 5 de la Figure A-7) afin d'améliorer la détection et le diagnostic : utilisation des marges, minimisation de l'en-cours, ... Ces retours d'expériences sont en cours d'étude et la Figure A-7 en recense les principaux éléments.

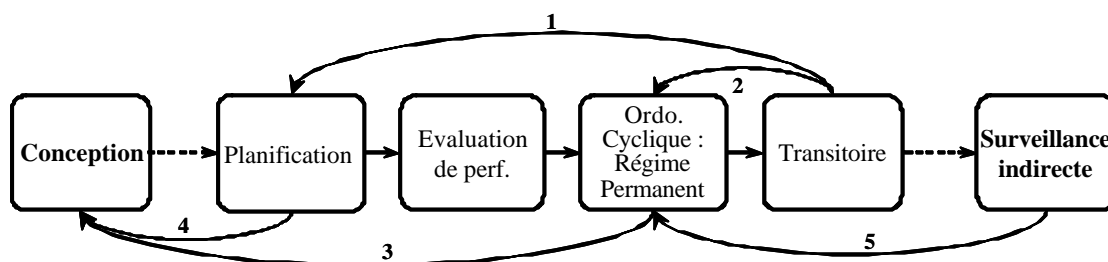


Figure A-7 : Retours d'expérience

Enfin, j'ai voulu **utiliser de nouvelles méthodes de résolution** telles que la programmation en nombres entiers (agencement des machines et planification dans la thèse de *I. Chaieb*) et les Systèmes Multi-Agents pour les transitoires inter production dans la thèse de *O. Belkahla Driss*. La collaboration avec d'autres collègues m'a également permis d'utiliser et de mieux comprendre d'autres méthodes d'optimisation tels que la Programmation Logique sous Contraintes (Korbaa, Yim, Gentina, 2000 ; Korbaa, Benasser, Yim, 2003), les algorithmes génétiques (Hsu, et al., 2003), les algorithmes de fourmis (Fournier et al., 2003).

Le positionnement des travaux que j'ai personnellement menés et que j'ai encadrés et animés est résumé Figure A-8. Ces derniers sont identifiés par rapport aux précédents travaux de l'équipe (en rectangles blancs). On y distingue l'encadrement de DEA (en rectangles pointillés), l'encadrement de thèses (en rectangles pleins) ainsi que les travaux de collaboration (entre parenthèses). Les nouveaux axes de conception et de surveillance indirecte sont identifiés ainsi que les travaux annexes à l'approche globale de résolution (benchmarks et alternatives).

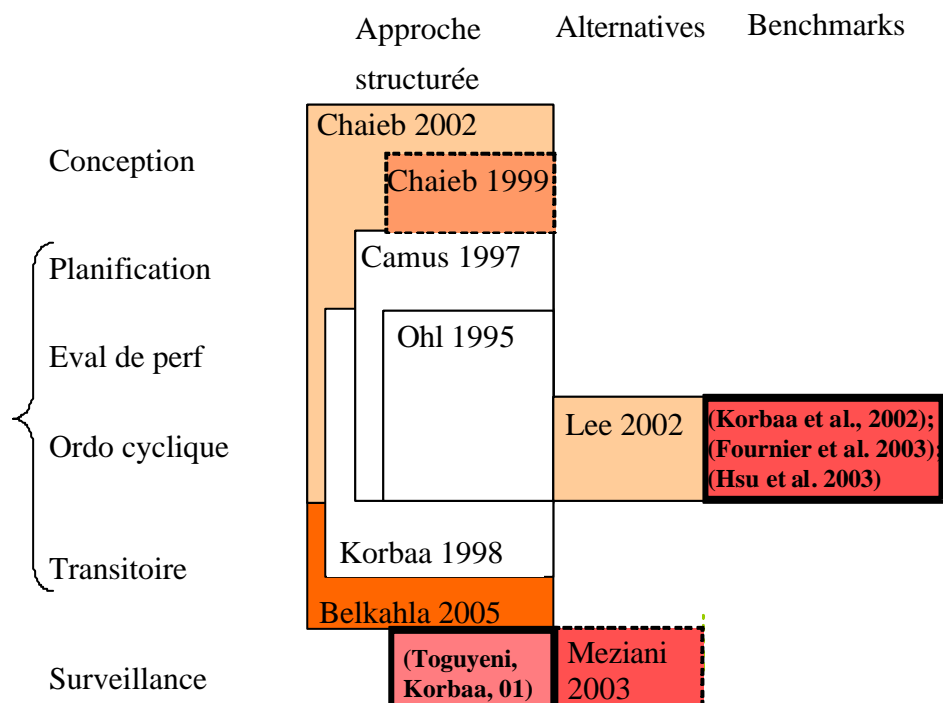


Figure A-8 : Positionnement des travaux encadrés et menés

L'étude des phases de planification et de conception de l'atelier de production ainsi que la prise en compte des opérations de transfert m'ont également permis d'**élargir le domaine d'application** aux systèmes de transport et logistique. En effet, les techniques d'optimisations et les problématiques

sont très proches. De plus, le secteur «transport et logistique » tient une part importante et sans cesse croissante dans l'économie régionale à travers les secteurs : vente à distance, transport multimodal, ... Ainsi, j'ai participé à deux contrats de recherche (avec les «3 Suisses » et le Port Fluvial de Lille comme partenaires). Ces projets sont, en plus des benchmarks et les travaux de collaboration, une occasion d'utiliser l'expertise acquise grâce aux résultats théoriques dans des **applications industrielles**. Ils permettent également d'établir de nouveaux résultats et de nouveaux axes de recherche. Par exemple, le projet avec le Port Fluvial de Lille a permis le lancement de la thèse de *M. El Kefi* à partir de septembre 2003 sur la « conception et exploitation d'un port ». Des collaborations fort intéressantes sont également en cours avec l'Equipe de Recherche en Génie Industriel (EC Lille) et le Laboratoire de Génie Industriel (Ecole Centrale de Paris) elles portent principalement sur cette thématique de Transport et Chaîne Logistique.

II. Enseignement et responsabilités

L'année scolaire 1994-1995 a également joué un rôle important dans les choix de mes thèmes d'enseignements. En effet, elle a coïncidé avec l'apparition (ou plutôt l'arrivée en Europe) de bon nombre de technologies, langages, outils, ... relatifs à Internet qui commençait à peine à se développer en France. Parmi ces nouveautés, nous pouvons citer la création du consortium « World Wide Web » (octobre 94), l'arrivée du navigateur Netscape (courant 94) et avec lui l'apparition des premiers langages de script permettant une interactivité avec l'utilisateur (Javascript), l'arrêt de développement du serveur Web NCSA (avril 95) et le lancement de serveur Apache (première version stable en décembre 95) qui n'est autre que le premier serveur au monde en terme d'utilisation. Cette activité débordante m'a fortement attiré et suscité mon intérêt pour les nouvelles technologies d'Internet.

Ainsi, en plus des enseignements « classiques », par rapport à ma formation initiale et mon domaine de recherche, d'informatique industrielle, génie industriel et génie informatique, les réseaux informatiques et nouvelles technologies d'Internet tiennent une part importante dans ma charge d'enseignement. D'ailleurs, je continue, aujourd'hui encore, à m'intéresser aux technologies émergentes et à me former aux nouveaux langages et outils afin d'incorporer les plus intéressants dans la formation initiale (près de 10 nouveaux cours créés depuis 1999) et la formation continue. Ces technologies occupent également une part importante de mes activités administratives : responsabilité des enseignements de réseaux informatiques à l'Institut de Génie Informatique et Industriel (IG2I), mise en place du programme de cours des enseignements de réseaux informatiques pour la licence et maîtrise d'informatique à l'Université Catholique de Lille, interventions au DESS Technologies de l'Information et de la Communication Electronique (TICE) de l'Institut des Hautes Etudes Commerciales de Tunis (IHEC Tunis). Plus récemment, je me suis vu confier la direction du Centre de Ressources Informatiques de l'Ecole Centrale de Lille.

Toutefois, mes activités administratives et responsabilités ne sont pas uniquement le fruit d'un investissement en enseignement mais également en recherche à travers la participation à l'organisation de différentes conférences (CIFA, SMC, CESA) en plus des sollicitations pour évaluation des articles pour le compte de conférences ou revues. Cette activité me permet de nouer de nouveaux contacts au sein de la communauté afin de favoriser les collaborations en recherche et en enseignement. De plus, la collaboration avec *J. K. Lee* durant sa thèse a permis de nouer des

contacts solides avec son université (*Changwon National University*) qui ont débouché sur l'instauration de collaborations en recherche :

- Deux étudiantes coréennes préparent actuellement leurs thèses au LAIL,
- Séjours en Corée comme professeur invité,
- Convention d'échange de professeurs et d'étudiants en double diplôme entre les deux établissements,
- Obtention de subventions pour financer les échanges

De même, la collaboration avec *O. Belkahla Driss* (en cours de thèse de cotutelle) a permis d'établir des collaborations avec le Prof. *Kh. Ghédira* (co-encadreur de la thèse) et le lancement d'une seconde thèse (celle de *M. El Kefi*) et la mise en place d'une convention d'échange d'étudiants en double diplôme avec l'Ecole Nationale des Sciences de l'Informatique (Tunis). Mon implication dans la vie de l'Ecole et du Laboratoire est significative puisque je participe à différents conseils (conseil de perfectionnement du Centre des Ressources Informatiques, conseil d'administration de l'EC Lille, ...) et associations (association du personnel, association des chercheurs) et ce depuis mon arrivée dans l'établissement.

B. ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

I. Introduction

En raison de ma formation initiale (Option informatique industrielle, DEA en Productique et Informatique Industrielle, Doctorat en Productique : Automatique et Informatique Industrielle), il était naturel qu'une grande partie de mes enseignements soit orientée vers les Systèmes à Evènements Discrets et le génie Informatique. Ainsi, j'interviens en DEA GSI¹ pour y enseigner les réseaux de Petri et les problèmes d'ordonnancement. De plus, j'enseigne la théorie des graphes en 3^{ème} année de l'Ecole Centrale de Lille option informatique industrielle. Ces enseignements me permettent d'avoir un **nouvel éclairage** sur mes recherches étant donné qu'il faut **adapter des connaissances** très techniques, dans lesquelles je m'investis comme chercheur, à un public d'étudiants. Ceci permet de prendre un recul supplémentaire et me pousse à chercher systématiquement la meilleure façon de présenter et « vulgariser » des notions souvent non triviales pour éviter le « décrochage » de l'audience mais également et surtout **intéresser les élèves** au métier de la recherche. Ce recul a été encore plus prononcé et intéressant lorsque j'ai eu à donner des cours, en anglais, à *Changwon National University* (Corée du Sud) où j'ai été invité à séjourner près d'un mois (Avril 2003). En effet, lors de ce séjour, j'ai donné 3 cours de 3 heures chacun :

- « Design and Planning of FMS » : pour des élèves en Undergraduate School²
- « FMS Cyclic Scheduling » : pour des élèves en Graduate School³
- « Petri nets contribution to FMS performance optimization and cyclic scheduling » : pour des étudiants en thèse.

Ces enseignements m'incitent toujours à améliorer la pédagogie et l'utilisation des outils de présentation ce qui est fort bénéfique pour mes enseignements en formation initiale ainsi qu'aux différentes présentations et séminaires de recherche.

En parallèle, je me suis passionné pour les nouvelles technologies d'Internet et j'y ai investi un temps et une énergie non négligeables pour m'y former. Cet intérêt a commencé par l'apprentissage puis l'enseignement de la programmation de sites Internet statiques (langage HTML). Ensuite, je me suis lancé dans le Web dynamique avec différents langages. De plus, afin de mieux appréhender ces mécanismes, j'ai étudié le fonctionnement interne, l'installation et la configuration des serveurs Web ce qui m'a amené naturellement à m'intéresser à l'échange des données (réseaux locaux, services Internet) ainsi qu'à leur sécurisation. Plus récemment, je n'ai pas manqué de suivre de près, depuis son début, la vague de la standardisation des échanges de données à travers les différents développements autour du langage XML. Cet intérêt m'a également servi en recherche puisqu'il m'a inspiré l'idée de vouloir normaliser la définition des problèmes d'ordonnancement cyclique grâce à ce langage.

Ces trois grandes thématiques regroupent donc l'ensemble de mes enseignements. La répartition du volume horaire, par rapport au volume horaire global enseigné depuis 1999, est donnée Figure B-1. On y trouve également qu'une part importante est consacrée au suivi des stages et des projets.

¹ DEA de Génie des Systèmes Industriels dont le tronc commun est dispensé à l'Ecole Centrale de Paris et les options sont réparties dans les 4 Ecoles Centrale

² Niveau Maîtrise

³ Niveau DEA

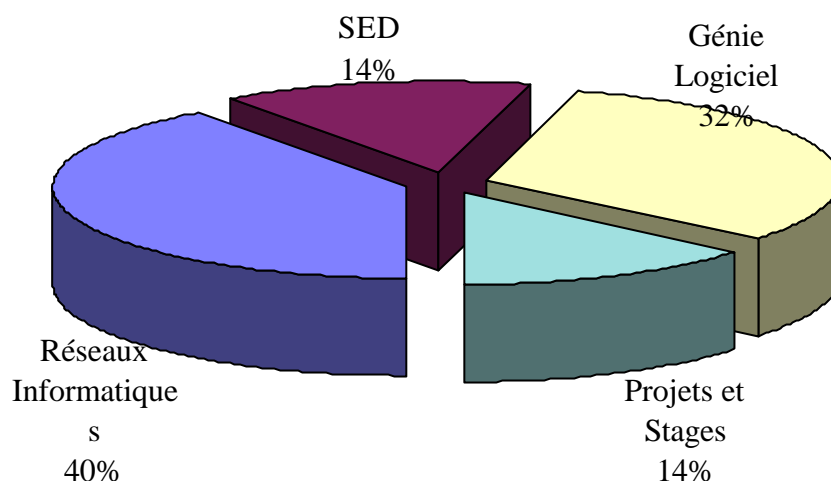


Figure B-1 : Répartition des enseignements par thème

Parmi les différentes matières enseignées, plusieurs sont totalement nouvelles dans la formation proposée à l'Ecole Centrale de Lille. Ainsi, j'ai créé, depuis mon arrivée à l'école, 10 nouveaux cours qu'il faut adapter chaque année pour suivre l'évolution de la technologie. De plus, je veille à suivre, de temps en temps, des cours ou des formations concernant des thématiques annexes ou connexes à mes domaines d'enseignement (Administration système, Web services, Java, Commande distribuée d'automates, Conception de systèmes d'information, Langage Ada, ...) afin d'élargir mon champ de compétences et avoir une meilleure maîtrise de mes enseignements. Egalement, je suis amené à former des collègues enseignants aux technologies d'Internet. Ceci afin de leur permettre d'utiliser ces technologies soit en recherche (XML) soit en enseignement (formation des nouveaux enseignants, encadrement de moniteurs et d'ATER).

II. Enseignements dispensés

Comme mentionné dans le paragraphe précédent, mes enseignements concernent 3 thématiques différentes. Cette partie détaille l'ensemble des enseignements dispensés depuis mon recrutement comme Maître de Conférences. Les détails concernant ces cours (public concerné, volume horaire, type d'enseignement, descriptif, existence d'un support de cours) sont donnés en Annexe. Il est à noter que tous ces enseignements ne sont pas dispensés sur une même année. En effet, j'ai enseigné certaines matières durant une année ou deux avant d'arrêter soit pour laisser à d'autres collègues cet enseignement soit pour cause d'arrêt de la matière (reformulation d'enseignement, changement d'objectifs de la formation, ...).

1. Systèmes à Evénements Discrets

Les enseignements de cette thématique sont tous dispensés en 3^{ème} année de l'Ecole Centrale de Lille ou en DEA de Génie des Systèmes Industriels. On y trouve 3 cours magistraux nouveaux (définition du contenu, création support, ...) :

- Théorie des graphes
- Introduction aux réseaux de Petri

- Evaluation de performances et Ordonnement

En plus des cours magistraux, deux enseignements, sous forme de travaux pratiques, permettent de mieux étayer les cours magistraux à travers la simulation des réseaux de files d'attente et la commande des automates programmables industriels. Ces enseignements sont l'occasion de mettre en pratique les connaissances acquises en cours et de sensibiliser les élèves aux problèmes pratiques de modélisation, de passage de la simulation à la pratique (horizon de simulation, générateurs de variables pseudo aléatoires), d'imperfection des capteurs et actionneurs du système réel, ...

2. Génie Logiciel

Les enseignements de génie logiciel concernent principalement les langages de programmation et l'algorithmique. Ils sont tous dispensés sous forme de travaux pratiques ou de séminaires (travaux dirigés dans des salles informatiques pour alterner théorie et pratique). Ces langages appartiennent à différentes familles tels que les langages orientés objet, programmation procédurale, l'intelligence artificielle, les langages de scripts :

- Introduction à l'algorithmique et Langage Pascal
- Langage C
- Langage Java
- Introduction à l'Intelligence Artificielle et Langage Prolog
- Langage Perl
- Programmation Shell

3. Réseaux Informatiques et NTIC

Cette thématique est celle qui détient le plus de nouveaux cours étant donné qu'elle n'existait pas encore à mon arrivée. Plusieurs d'entre eux ont été préparés en **collaboration** avec d'autres collègues (S. El Khattabi, A. Toguyeni, N. Dangoumau, ...). Cependant, les nouvelles technologies requièrent un effort important en temps et en énergie pour ne pas décrocher du progrès technologique. Ceci pose le problème des choix à faire dans la profusion des langages et environnements, qui apparaissent chaque année, afin d'être efficace dans cette investigation. En effet, nombre de technologies se sont avérées éphémères et tout investissement vain. Dans ce contexte, l'encadrement des stages en entreprises permet de mieux sonder le besoin du marché et son évolution sans toutefois en être dépendant.

Ceci n'est pas la seule difficulté inhérente aux nouvelles technologies. En effet, pour se tenir informé des dernières nouveautés en la matière, il faut, sans cesse, visiter les sites des constructeurs et des consortiums ainsi que les groupes de discussion. De plus, lorsqu'une technologie est très (trop) récente, il est très difficile de trouver la documentation accessible en dehors des manuels de référence ce qui nécessite un travail de synthèse pour en tirer les points essentiels. Egalement, l'évolution des technologies est parfois tellement rapide (notamment en ce qui concerne le langage XML et ses dérivés) qu'on voit apparaître plusieurs versions la même année. Les supports de cours sont donc parfois amenés à évoluer plusieurs fois par an. Ceci rend les supports de cours et les transparents obsolètes d'un cours à un autre. C'est la raison pour laquelle j'ai opté pour la vidéo

projection des supports et aussi de mettre ces supports à disposition des élèves sur mon site Internet¹ afin de leur permettre de télécharger les dernières versions lorsqu'ils ont en besoin.

Pour terminer sur ce point, il est à noter qu'un débat est toujours d'actualité et concerne le choix de l'environnement Microsoft ou d'Unix pour les enseignements. En effet, même si l'ensemble de l'équipe pédagogique des enseignements de réseaux penche plutôt pour les logiciels et environnements libres (pour plusieurs raisons dont principalement le coût et la transparence de fonctionnement), nous tenons à utiliser systématiquement les deux environnements afin de bien préparer les élèves à être confrontés à l'un ou l'autre des environnements.

4. Stages et Projets

Les projets constituent une part importante dans la formation de l'EC Lille. Ils permettent de mettre en pratique l'ensemble des connaissances acquises, de travailler en groupe (communiquer, se répartir les tâches, ...), d'être confronté à des problèmes pluridisciplinaires, de répondre aux demandes (cahier des charges) et exigences (délais, coûts, ...) d'un client réel et également à formaliser les différents phases du projet (analyse fonctionnelle, analyse détaillée, ...). Ainsi, faire partie des équipes pédagogiques de suivi et d'encadrement des projets revient à participer à la formation des élèves et permet d'avoir un éclairage supplémentaire sur le degré d'assimilation des enseignements aussi bien qu'acquérir de nouvelles formes de pédagogie.

En particulier, les élèves de l'EC Lille doivent réaliser, par groupe de 5 ou 6 élèves, un projet² pluridisciplinaire, avec un prototype à la clé, sur les deux premières années de formation. Les élèves ont alors libre choix dans la définition du sujet du projet et sont encadrés par un pilote (garant de la bonne gestion du projet) et d'un directeur scientifique (garant du contenu scientifique et des choix technologiques) en plus de consultants qui interviennent ponctuellement dans leurs domaines de compétence. Dans ce cadre, j'ai souvent été consultant en informatique et réseaux pour nombre de projets. Plus récemment, j'ai pris la direction du groupe de projet « Réveil » dont l'objectif est de réaliser un réveil « agréable » pouvant cibler une seule personne. Outre l'originalité de sujet de ce projet, cette expérience me permet de voir autrement ces projets puisqu'il ne s'agit pas de conseiller les élèves dans mes domaines de compétences mais plutôt d'aider les élèves à prendre des décisions et à faire des choix dans les différents domaines que comporte le projet (design, acoustique, électronique, mécanique, ...). De plus, j'encadre des projets informatiques³ en 2^{ème} année de l'EC Lille et 2^{ème} année à l'IG2I. Ces projets ont permis d'utiliser le contenu de certaines matières enseignées en 1^{ère} et 2^{ème} années de l'IG2I afin de les adapter au fonctionnement du projet (programmation dans l'année, contenu, pédagogie, ...).

III. Charge annuelle d'enseignement

A titre d'exemple, voici ma charge d'enseignement pour l'année scolaire 2002/2003.

¹ <http://www.ec-lille.fr/korbaa/cours/>

² Dit projet G1-G2

³ Projet en systèmes d'informations avec utilisation de Visual Basic et Access

Année	Titre du cours	type	Volume (heures)
<i>DEA GSI</i>	Evaluation de Performances	cours	8
<i>G3 Info. Indus</i>	Théorie des Graphes	cours	6
<i>G3 Info. Indus</i>	XML	cours	6
<i>L4</i>	Serveurs Web dynamiques	cours	6
<i>G1</i>	Introduction aux syst. informatiques	TD	2*12
<i>G2</i>	Réseaux informatiques	TD	2*24
<i>G2</i>	Eléments de programmation	Séminaire	2*26
<i>G3 Génie Info</i>	Génie Logiciel	TD	12
<i>G3 Info. Indus</i>	Simulation des syst. de production	TD	12
<i>L2</i>	Réseau et Multimédia	Séminaire	12
<i>L4</i>	Serveurs Web dynamiques	Séminaire	2*12
<i>L4 Génie Info</i>	Serveurs Web dynamiques	Séminaire	12
<i>L5 Génie Info</i>	Sécurité réseaux	Séminaire	24
<i>G3 Produc Indus</i>	Automates programmables	TP	2*12
<i>L3</i>	Réseaux locaux	TP	8
	Total équivalent TD (heures)		258

IV. Conclusion

Dans le domaine de l'enseignement, j'ai la chance d'enseigner des matières qui m'intéressent particulièrement que ce soit en SED ou en réseaux informatiques. Je cherche donc à transmettre ma passion aux élèves et à partager avec eux cet intérêt pour ces domaines. Si les nouvelles technologies sont de nature à attirer les élèves, les Systèmes à Evénements Discrets ainsi que le génie logiciel ne sont pas toujours aussi attractifs a priori. Les travaux pratiques sont alors un moyen efficace pour approfondir les connaissances notamment lorsque les sujets sont à la fois intéressants et ludiques (commande de circuit de trains, simulation de caisses d'un magasin, simulation d'un atelier de production, ...).

Les stages sont également l'un des piliers de la formation de nos élèves. Si l'on met de côté l'aspect académique dans l'encadrement des stages (correction de rapports, évaluation), ces stages sont fort bénéfiques aussi bien pour les élèves que pour les enseignants. En effet, les élèves sont exposés à des problèmes réels avec les contraintes classiques de qualité, délais, coûts, ... et découvrent ainsi leur futur métier d'ingénieur. Le stage est également l'occasion, pour l'enseignant, de nouer des contacts industriels, d'avoir un retour d'expérience sur la formation dispensée, sur les attentes des entreprises, ... Ainsi, je m'intéresse de près à l'encadrement des stages en 2^{ème} année de l'EC Lille, en 4^{ème} et 5^{ème} année de l'IG2I (principalement en réseaux et nouvelles technologies) ainsi qu'en 3^{ème} année de l'EC Lille (production industrielle). Ce suivi de stage interagit fortement avec mes enseignements en nouvelles technologies d'Internet. En effet, l'expertise dans ces technologies me permet de suivre de prêt les stagiaires dans ce domaine et de leur donner les

conseils et aide dont ils ont besoin. En même temps, il permet de mieux saisir la demande du marché et les directions de son évolution.

De plus, la **participation** aux différents réflexions autour des réformes d'enseignements, permettent de **s'impliquer** d'avantage dans les **prises de responsabilité** au sein de l'école (responsabilité des enseignements réseaux à l'IG2I, animation de la filière Logistique Commerciale et Industrielle à l'EC Lille) mais aussi de se tenir au courant de ce qui se fait dans les autres thématiques afin de mieux articuler les cours entre eux, d'éviter la redite, ...

Pour terminer, même si je compte continuer à enseigner les mêmes matières qui me passionnent, je souhaite poursuivre la vague XML avec ses nouveaux langages et les technologies dérivées (XML Query, SOAP, ...). J'envisage également de suivre des formations pour approfondir mes compétences dans le domaine de l'administration réseau (principalement avec la technologie CISCO) et de m'initier au cryptage des données pour enrichir les enseignements concernant la sécurité réseaux et les serveurs Web. Les réseaux sans fil devraient également prendre une part importante de mes prochaines formations et autoformation notamment avec l'échange de données Multimédia sans fil avec l'arrivée très prochaine de l'UMTS.

C. ACTIVITES DE RECHERCHE

I. Introduction

Les trois phases classiques de spécification, de conception et d'exploitation d'un système de production relèvent en général de savoir-faire exercé au cours d'étapes bien différenciées par des personnes le plus souvent différentes et de compétences également différentes. Les modélisations effectuées sont diverses selon les phases de développement d'un projet et induisent de ce fait un risque d'erreur dans la transcription de chaque nouveau modèle et dans l'interprétation des résultats d'analyse qui en résultent. La complexité inhérente au système, au cours de sa conception, peut donc être sensiblement amplifiée par la diversité des approches et la grande difficulté qui peut apparaître dans le maintien d'une démarche rigoureuse globalement cohérente. Dans ce contexte, les réseaux de Petri sont à ce jour l'un des outils les mieux adaptés pour concevoir, estimer les performances, ordonnancer et exploiter les systèmes flexibles de production manufacturière (SFPM) (Korbaa, Gentina, 2003 ; Gentina, Korbaa, 2000). Les Systèmes Flexibles de Production Manufacturière (SFPM) représentent une large classe des systèmes de production. Le contenu exact du terme « flexibilité » est sujet à différentes interprétations. Pour être plus précis, les SFPM correspondent à des systèmes de production de petites à moyennes séries disposant d'un assez grand nombre de degrés de liberté.

L'équipe production flexible manufacturière (aujourd'hui Systèmes à Événements Discrets) du LAIL a opté pour une commande cyclique essentiellement pour deux raisons. La première concerne la taille de la demande initiale. En effet, de la définition même des SFPM, il découle que la demande est de petite à moyenne série, ceci veut dire que nous excluons, de ces travaux, la production unitaire ou de très petite taille. Dans ce sens, utiliser une commande cyclique, permet de limiter le nombre de pièces, à produire pour un horizon donné, pour en optimiser la performance de production sur un « cycle » puis à répéter suffisamment pour satisfaire la demande initiale. Une seconde justification de cette stratégie cyclique concerne la nécessaire maîtrise de la complexité. Bien entendu, malgré l'optimisation du cycle, la production totale reste sous optimale en terme de performances. Cependant, n'oublions pas que le problème est Non déterministe Polynomial au sens fort et que chercher l'optimum dans le cas général est inconcevable à cause d'une très grande complexité combinatoire. L'ordonnancement cyclique est d'autant plus intéressant qu'il permet d'optimiser à la fois le flux (minimiser le temps de cycle) et l'en-cours du système (Gentina, Korbaa, Camus, 2000).

Afin d'optimiser les performances du système et étant donnée la forte complexité de la résolution (maximiser le flux et minimiser l'en-cours), une approche a été proposée pour découpler le problème général d'optimisation en deux sous problèmes prenant en compte successivement d'une part les ressources de production et d'autre part les ressources de transport affectées au routage des pièces. La dynamique de transformation des produits est ainsi caractérisée par une gamme précisant à la fois l'enchaînement et la durée des tâches. En effet, nous supposons dans un premier temps disposer de suffisamment de ressources de transport pour considérer que le flux du système est régi par la (les) machine(s) les plus lentes. Cette phase permet d'obtenir le flux et temps de cycle optimaux. Ensuite, il s'agit de déterminer la commande cyclique permettant de fonctionner avec ce flux optimal. Ainsi, nous calculons l'en-cours minimal ad hoc ainsi que les régimes transitoires de lancement et d'arrêt du fonctionnement cyclique (régime permanent).

La minimisation du temps de cycle est motivée par l'amélioration de la productivité de l'atelier alors que celle de l'en-cours est justifiée par la minimisation des coûts de stockage ainsi que la

volonté d'éviter le blocage par saturation. La Figure C-1 explique la relation entre en-cours et flux de production.

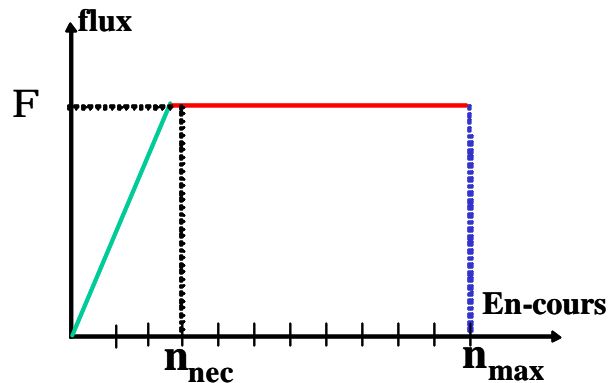


Figure C-1 : Flux en fonction de l'en-cours (Ausfelder, 1994)

Dans un premier temps, le flux est croissant en fonction de l'en-cours (quasi-linéaire). Une fois que la ressource principale est saturée (elle fonctionne à 100% du temps), le système atteint son régime nominal et l'addition d'en-cours ne modifie plus la vitesse de production. Enfin, un point limite représente le blocage du système par saturation (trop de pièces dans le système) et la performance chute brutalement. Afin de résoudre ce problème avec ces deux critères antagonistes en-cours et flux nous avons opté pour leur hiérarchisation pour maximiser le flux indépendamment de l'en-cours, c'est-à-dire déterminer la ou les machines les plus lentes, et se placer ainsi sur le palier de la courbe Figure C-1. Ensuite, cette performance est considérée comme une contrainte forte sous laquelle il faut minimiser l'en-cours, c'est-à-dire déterminer l'en-cours nécessaire pour atteindre cette performance, et se déplacer ainsi sur le palier de la courbe Figure C-1 le plus possible vers la gauche pour atteindre de fonctionnement idéal (n_{nec}, Φ).

Cette optimisation des performances des SFPM impose une hypothèse de départ qui est l'atteignabilité de la vitesse maximale de production dictée par la ressource la plus lente. Cette hypothèse est équivalente ici à la non criticité du système de transport. En effet, si les opérations de transfert sont lentes (pour cause d'éloignement des machines, de mauvaise conception du système de transport, ...), elles peuvent devenir critiques voire même nécessiter une grande quantité d'en-cours ce qui risque de saturer le système. Ce constat nous a amené logiquement à nous intéresser dans un premier temps à l'étude du système de transport pour l'ordonnancer et l'optimiser et dans un second, d'étudier en amont la conception de l'atelier pour mieux garantir cette hypothèse de non criticité du système de transport. Cette étude a concerné particulièrement le problème d'agencement des machines dans un atelier de production et a permis de prendre en compte des aspects, qui jusque là ont été peu voire pas étudiés dans la littérature, tels que les flexibilités de gamme, les machines identiques ainsi que différentes configuration du système de transport.

Le choix de la production cyclique est, comme indiqué précédemment, justifié par la réduction de la complexité tout en cherchant à optimiser un certain nombre de critères. Il nous semblait également que ce type de production présentait de caractéristiques fort intéressantes en terme de possibilité de réaction en cas de défaillance ou de nouvelles productions prioritaires. Il ne s'agit pas de prétendre qu'un ordonnancement cyclique, et par conséquent déterministe, a quelque chose à voir avec un ordonnancement réactif mais plutôt que parmi les ordonnancements hors-ligne il est de ceux qui présentent les meilleurs atouts pour permettre une meilleure réactivité par la suite. Dans ce sens, nous

avons étudié les régimes transitoires de lancement et d'arrêt des régimes permanent cycliques ce qui permet de pouvoir interrompre et relancer une production «proprement» en toute maîtrise des phases transitoires. Egalement, nous nous sommes intéressés à la planification de la production afin de mieux préparer l'ordonnancement cyclique.

Par conséquent, l'étude comportera 6 phases comme indiqué Figure A-6 : conception, planification, évaluation de performances, ordonnancement cyclique, ordonnancement du transitoire et surveillance du système. De plus, dans l'objectif d'intégrer ces travaux dans l'ensemble des travaux de l'équipe, j'ai pris part aux travaux sur le référentiel permettant la mise en place d'un système d'information pour l'interfaçage des modèles des différents experts. Ces travaux ont donc consisté à l'intégration du point de vue évaluation de performances et ordonnancement dans l'application «CASPAIM Soft», (Bigand, et al., 2002 ; Bigand, et al., 2004a ; Bigand, et al., 2004b). En parallèle avec cette étude, je me suis intéressé aux systèmes de transport et logistiques. En effet, dans un premier temps, j'ai cherché à intégrer le système de transport et ses tâches dans l'étude afin de commander également le routage des pièces. Ensuite, je me suis intéressé à la conception de ce système de transport et plus particulièrement à l'agencement des machines dans l'atelier. Enfin, deux contrats industriels avec les «3 Suisses» et le Port Fluvial de Lille m'ont permis de traiter des applications relevant des systèmes logistiques à travers la planification et optimisation du stock et la réorganisation des tournées des fournisseurs pour le premier ainsi que la conception et exploitation du stockage des containers pour le second.

Dans l'objectif de décrire et d'illustrer l'orientation des travaux de recherche que j'ai pu animer, je propose d'organiser ce chapitre comme suit : dans un premier temps, je décrirai l'étude de la conception des systèmes de transport et de production effectuée dans la thèse de *I. Chaieb*. Ensuite, je présenterai les travaux concernant l'exploitation de ces systèmes à travers la planification et l'évaluation de performances (thèse *I. Chaieb*) suivi de l'ordonnancement cyclique (Thèse *J. K. Lee*, étude personnelle et coopérations) puis de l'ordonnancement des régimes transitoires (thèse de *O. Belkahla Driss*) et enfin la surveillance (collaboration avec *A. Toguyéni*).

II. Conception des systèmes de transport et de production

1. Contexte du travail

La conception de l'atelier de production est une étape essentielle de son cycle de vie puisqu'elle en conditionne son exploitation. En effet, elle détermine le nombre d'exemplaires des machines et par conséquent la possibilité ou non de redondance en cas de défaillance ou panne. Elle fixe également le type de système de transport (configuration, capacité, vitesse, ...) ainsi que la disposition des machines (temps de transfert, flexibilité de routage, risque de blocage, ...). Cette opération nécessite l'accomplissement de plusieurs phases, cf. Figure C-2. Dans un premier temps, il faut déterminer, pour chaque type de ressources de transformation, le nombre d'exemplaires nécessaires de machines. Pour cela, on peut utiliser le pré dimensionnement de l'atelier basé sur des techniques stochastiques et de simulation (Feigin, Proth, 1989 ; Xie, 1989 ; Bouhchouch, et al., 1996), l'étude fonctionnelle de l'atelier permettant de déceler les ressources critiques en terme d'accessibilité (Berruet, et al., 1998).

Dans un second temps, il s'agit de regrouper les machines en îlots ou cellules de fabrication afin de limiter les déplacements entre cellules. Parmi les approches traitant de ce sujet, nous trouvons l'utilisation du recuit simulé ou l'approche évolutionniste multicritères d'îlots de fabrication (Harhalakis, Proth, Xie, 1990; Proth, Souilah, 1992; Plaquin, 1998 ; Plaquin, et al., 1998). (Harhalakis, Nagi, Proth, 1990) a étudié le regroupement des machines en cellules en minimisant le trafic inter cellules et en respectant la contrainte de taille maximale des cellules. Il a également proposé une méthode de résolution utilisant le recuit simulé. Dans (Souilah, 1990), la construction de familles de machines passe par la recherche d'une séquence globale minimale (cette séquence constitue la plus petite séquence de machines telle que tout processus de fabrication de pièces puisse être déduit par suppression d'un ou plusieurs éléments de la séquence) déterminée en un premier temps à l'aide d'une heuristique, et dans un second temps par une méthode exacte permettant d'évaluer l'heuristique développée.

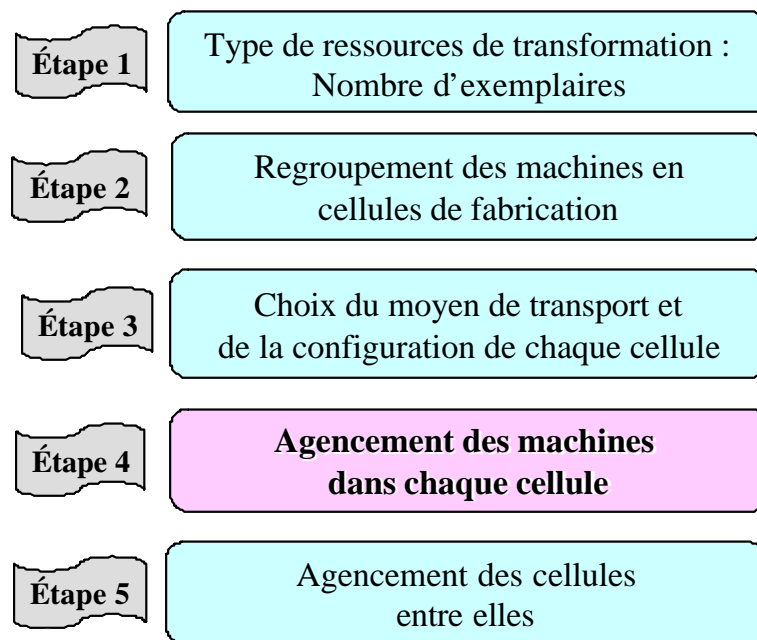


Figure C-2 : Différentes phases de la conception d'un atelier, (Chaieb, 2002)

L'étape suivante concerne le choix du moyen de transport et d'une configuration à implanter dans chaque cellule. Le choix d'un système de transport approprié aux dimensions d'une cellule (Hamann, 1992) peut être élaboré à l'aide de systèmes experts tels que SMECI¹ ou par un système basé sur la méthodologie KADS² (Deville, Pierreval, 1996). Ce choix dépend de plusieurs données telles que les caractéristiques de l'atelier et celles de la production, la nature des éléments à manutentionner (dimensions, nécessité de palettisation, ...) ainsi que d'autres contraintes industrielles.

Vient ensuite l'étape d'agencement intra-cellulaire des machines. Elle consiste à affecter des sites aux machines. (Hamann, 1992) présente différents modèles mathématiques utilisés pour la recherche d'agencements. Ces modèles sont l'affectation quadratique (les algorithmes de résolution sont du type « Branch & Bound » et « Cutting Plane »), les approches basées sur la théorie des graphes, les approches basées sur les langages de programmation par contrainte et l'IA, sur les systèmes experts ainsi que l'utilisation du recuit simulé (proposé par l'auteur lui-même). Toutes ces approches

¹ software methodology for rule-based systems

² Knowledge Acquisition and Design Support

supposent que les cellules de fabrication ne contiennent pas des machines identiques, que les gammes opératoires sont linéaires et que le système de transport ne comporte pas de flexibilités.

La dernière étape de la démarche de conception consiste à agencer les cellules dans l'espace imparti de l'atelier. Dans ce sens, (Proth, Souilah, 1992 ; Souilah, 1994 ; Souilah, 1993), utilisent le recuit simulé pour obtenir une disposition des cellules dans la surface disponible de l'atelier satisfaisant le critère de minimisation du trafic inter-cellulaire. (Mahdi, 1997) présente deux algorithmes, le premier basé sur le recuit simulé et permet de placer les cellules, quant au second, c'est un algorithme génétique qui définit le meilleur choix des moyens de manutention et leur affectation.

2. Formulation du problème

A travers la thèse de I. Chaieb, je me suis intéressé à l'agencement intra-cellulaire des machines (étape 4 de la Figure C-2). Nous avons donc (Chaieb, 2002) supposé que les étapes précédentes sont achevées. Le nombre d'exemplaires de chaque type de machines est par conséquent défini et les machines sont regroupées dans les cellules de fabrication. Le nombre de machines par cellule étant réduit, nous pouvons émettre l'hypothèse de ne considérer qu'un seul moyen de transport. Le choix de la configuration et du moyen de transport adaptés aux dimensions de la cellule et aux produits à manutentionner est aussi supposé déjà réalisé. Le problème traité peut être défini au sens de (Hamann, 1992) : « *L'agencement est une procédure visant à obtenir une disposition optimale des postes de travail dans une unité de production* ». Pour la résolution de ce problème, nous avons privilégié d'établir une formulation mathématique générique à résoudre à l'aide d'un solveur (en l'occurrence, nous avons choisi CPLEX), (Chaieb, 2002). Ceci permettra d'éviter les différents paramétrages pour chacun des problèmes spécifiques traités.

Nous cherchons à concevoir un atelier pour lequel la production est donnée. Ainsi, nous connaissons les ressources de transformation, des gammes opératoires des différents produits et les ratios moyens de production. Il ne s'agit encore que d'estimations étant donné que nous sommes en phase de conception. Quant aux critères à optimiser, nous avons opté pour la minimisation des distances moyennes parcourues par les pièces puisqu'elles influencent directement l'ordonnancement, l'en-cours, la criticité du système de transport, ... La fonction de coût est donc la suivante (Chaieb, Korbaa, Gentina, 2001) :

$$\min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1, j \neq i}^M f_{ij} d_{ij}$$

- d_{ij} représente la distance séparant les machines i et j
- f_{ij} le trafic des pièces entre les machines i et j
- M représente le nombre de machines

Les configurations étudiées sont :

- linéaire unidirectionnelle,
- linéaire bidirectionnelle,
- circulaire unidirectionnelle

- circulaire bidirectionnelle.

Bien entendu, l'expression de la distance d_{ij} dépend étroitement de cette configuration. Par exemple, dans une configuration circulaire unidirectionnelle, cette distance s'exprime sous la forme suivante :

$$d_{ij} = \begin{cases} P_j - P_i & \text{si } P_j > P_i \\ P + P_j - P_i & \text{sinon} \end{cases} \quad i, j = 1..M, i \neq j$$

Où P est la circonférence de l'anneau de production et P_i, P_j les positions des machines i et j . Cette écriture mathématique n'est pas de nature à être implémentée dans un solveur étant donné qu'elle est non linéaire. Nous devons donc linéariser cette écriture sous la forme :

$$\begin{aligned} d_{ij} &= P_j - P_i + K_{ij} * P \quad i, j = 1..M, i \neq j \\ K_{ij} &\in \{0,1\} \\ 0 < d_{ij} < P \end{aligned}$$

En fait, si $P_j > P_i$ alors $P_j - P_i$ est bien compris entre 0 et P . Dans ce cas, K_{ij} est donc égal à zéro. Dans le cas contraire, $P_j - P_i$ est bien compris entre $-P$ et 0. Alors, K_{ij} vaut 1 et d_{ij} est compris entre 0 et P .

3. Prise en compte des flexibilités

Dans cette étude, nous avons principalement voulu introduire des aspects jusque là non abordés dans la littérature. En effet, nous avons cherché à prendre en compte les flexibilités dans le système tel que les machines identiques, les flexibilités de gammes et les flexibilités dans le système de transport. Concernant les machines identiques, deux manières de les positionner peuvent être envisagées. La première consiste à les placer en parallèle, cf. Figure C-3. D'un point de vue agencement de machines, cette configuration revient à considérer ces machines comme étant équivalente à une seule machine, de capacité augmentée, à placer dans la cellule. La deuxième technique tente de profiter au maximum de l'avantage qu'offrent ces machines en les répartissant au mieux dans la cellule (Chaieb, Korbaa, 2001).

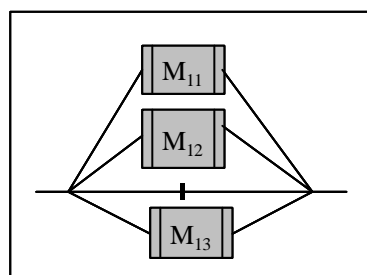


Figure C-3 : Affectation d'une même position aux machines identiques

Afin d'affecter ces machines identiques à des positions différentes, nous devons les distinguer les unes des autres. Pour cela, nous considérons le problème de machines identiques comme un problème de gammes flexibles. Une gamme linéaire contenant une ressource existant en n exemplaires donnera lieu à une gamme flexible ayant n branches. En appliquant ce principe à notre exemple à trois machines identiques, nous obtenons trois processus différents, cf. Figure C-4. La

transformation effectuée génère des indéterminismes qu'il faudrait résoudre. Pour cela, nous introduisons de nouvelles variables au problème. Ces variables, vérifient l'équation suivante :

$$\sum_i a_i = 1$$

Les paramètres α_i correspondent aux pourcentages de produits, d'une seule gamme, qui seront réalisés par chacune des machines identiques M_i . Par exemple, la Figure C-4 présente une gamme linéaire avec 3 opérations dont deux qui sont effectuées par des machines en exemplaire unique et une nécessitant une ressource de transformation en 3 exemplaires. Ainsi, la gamme linéaire se transforme en gamme flexible à 3 branches (une par exemplaire de R2). Les variables de routage a_i vérifient bien entendu l'équation précédente.

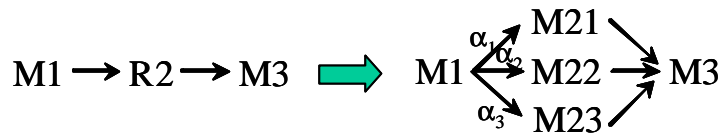


Figure C-4 : Considération des machines identiques

En conséquence, les trafics entre les machines constituent eux aussi, avec les distances séparant les machines, des inconnues du problème. La minimisation de la fonction de coût consiste alors à résoudre un problème non linéaire.

Lemme 1 : Soit une ressource R en n exemplaires et une pièce P nécessitant cette ressource. Les coefficients de routage $a_{R_i} / i \in \{1, \dots, n\}$ représentent les variables associées aux différents exemplaires de la ressource R dans la gamme de la pièce P : $\sum_{i=1}^n a_{R_i} = 1$.

Soit F la fonction de coût relative à la gamme de la pièce P. F est optimale si et seulement si les coefficients a_{R_i} vérifient : $\forall i \in \{1, \dots, n\} a_{R_i} \in \{0, 1\}$.

$$\text{Autrement dit : } \exists i \in \{1, \dots, n\} / \begin{cases} a_{R_i} = 1 \\ \forall j \in \{1, \dots, n\}, j \neq i, a_{R_j} = 0 \end{cases}$$

Preuve : Considérons une disposition donnée des machines. Les variables de routage $a_{R_i} / i \in \{1, \dots, n\}$ sont liées entre elles mais indépendantes des autres variables de routage du problème. En effet, elles traduisent les proportions de P utilisant chaque exemplaire de la ressource R. Comme énoncé précédemment, différencier les n exemplaires de R revient à remplacer la gamme linéaire par une gamme flexible à n branches B_i . Soit T_i la somme des durées de transfert de la branche B_i . La fonction de coût relative à P est : $F(P) = \sum_{i=1}^n a_{R_i} * T_i$.

Soit j l'indice de la branche vérifiant : $T_j = \text{Min}_i(T_i)$. Nous avons alors : $\sum_{i=1}^n (a_{R_i} * T_i) \geq \sum_{i=1}^n (a_{R_i} * T_j) = T_j * \sum_{i=1}^n (a_{R_i}) = T_j$. Par conséquent, toute combinaison des $a_{R_i} / i \in \{1, \dots, n\}$ autre que

$a_{Rj=1}, a_{Ri=0}, i \in \{1, \dots, n\}, j$ est sous optimale. Le même raisonnement est applicable à toutes les dispositions possibles, CQFD ■

Chaque exemplaire d'une ressource est donc affecté à une ou plusieurs branches des gammes flexibles. Il est important de noter que cette affectation n'est pas définitive et qu'elle peut être modifiée par la phase d'exploitation. Néanmoins, la solution fournie optimise bien les temps de transport dans l'atelier (Chaieb, Korbaa, Gentina, 2001).

Le deuxième type de flexibilité que nous avons étudié, cf. (Chaieb, Korbaa, 2003), concerne les processus de fabrication des produits : différents processus permettent de fabriquer un même produit. Les gammes opératoires sont par conséquent flexibles (non linéaires, c'est le cas des ateliers à cheminement multiple (job-shop) généralisés) (Korbaa, 1998). Parmi les types de flexibilités, nous citons :

- La flexibilité d'affectation : une même opération peut être affectée à des ressources de types différents (la durée de l'opération varie selon la ressource).
- La flexibilité de procédé : « ce type représente la possibilité de substituer une opération ou une suite d'opérations par une autre opération ou une autre suite d'opérations, éventuellement sur des ressources de types différents » (Camus, 1997).

Le problème de gammes flexibles étant identique à celui de machines multiples, le solveur procéderait de la même manière pour le résoudre : parmi les branches de la gamme flexible, il ne retient que celle correspondant au trajet le plus court pour transférer les produits entre les machines. Or, dans une gamme flexible, choisir un processus de fabrication plutôt qu'un autre peut modifier complètement le temps de séjour du produit dans la gamme. Une solution optimisant les temps de transport peut alors s'avérer pénalisante en terme de flux de production. C'est la raison pour laquelle nous avons évité de choisir ce type de résolution. Du coup, nous résolvons le problème de flexibilité de gammes opératoires de la manière suivante : à partir de la production prévisionnelle et des durées opératoires, nous déterminons les ratios de routage qui optimisent le flux de production. Cette opération est une procédure classique de recherche du flux optimal, cf. (Bouhchouch, et al., 1996). Procéder ainsi présente deux avantages : en optimisant le flux, nous garantissons un minimum de compatibilité entre la phase de conception et celle d'exploitation de l'atelier. En outre, lorsque nous passons ensuite à la résolution du problème d'agencement, avec gammes flexibles et machines identiques, nous garantissons que ce problème est au pire quadratique (ce qui représente la limite de la plupart des solveurs) (Chaieb, 2002).

Nous présentons ci-après les notations que nous adoptons dans cette partie :

- N_p nombre de types de produits
- r_i ratio moyen de production du produit i , $i = 1.. N_p$
- M nombre de machines
- N_g nombre de gammes linéaires à machines simples et multiples
- P longueur (périmètre dans le cas circulaire) du système de transport
- d_{\min} distance minimale séparant les extrémités adjacentes de deux machines
- l_i largeur de la machine i , $i = 1.. M$

- B_i nombre de branches de la gamme i , $i = 1.. N_g$
- f_{ij} quantité de pièces qui seront transférées de la machine i vers la machine j , $i, j = 1.. M$
- α_{ij} variable de routage du conflit j de la gamme i , $j = 1.. B_i$, $i = 1.. N_g$
- X_i position de la machine i , $i = 1.. M$
- d_{ij} distance séparant les machines i et j , $i, j = 1.. M$

Déterminer un agencement des machines qui minimise les temps de transport revient donc à résoudre un problème non linéaire à variables mixtes (entières et continues) :

$\min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M f_{ij} d_{ij}$, Sous les contraintes :

$$d_{ij} = f(X_i, X_j) \quad i, j \in \{1, \dots, M\}, i \neq j \quad (1)$$

$$0 < d_{ij} < P \quad i, j \in \{1, \dots, M\}, i \neq j \quad (2)$$

$$0 \leq X_i < P \quad i \in \{1, \dots, M\} \quad (3)$$

$$|X_j - X_i| \geq \frac{l_i + l_j}{2} + d_{\min} \quad i, j \in \{1, \dots, M\}, i \neq j \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^{B_i} a_{ik} = 1 \quad i \in \{1, \dots, N_p\} \quad (5)$$

Les contraintes de type (1) et (2) définissent l'expression de la distance séparant la sortie d'une machine i de l'entrée de la machine j (notée d_{ij}). Pour simplifier, nous supposons que l'entrée et la sortie d'une machine correspondent toutes les deux au centre géométrique de cette machine. La distance d_{ij} s'exprime alors en fonction des positions des machines (X_i, X_j) et son expression dépend de la configuration du système de transport (linéaire bidirectionnelle, circulaire unidirectionnelle ou circulaire bidirectionnelle). Par exemple, pour une cellule de production où les machines sont disposées en forme d'anneau (configuration circulaire unidirectionnelle). P représente alors le périmètre de l'anneau et la distance (d_{ij}) est donnée par l'équation :

$$d_{ij} = X_j - X_i + K_{ij} * P \quad i, j \in \{1, \dots, M\}, i \neq j \quad (6)$$

$$\text{avec : } K_{ij} \in \{0, 1\} \quad i, j \in \{1, \dots, M\}, i \neq j \quad (7)$$

Les contraintes de type (3) limitent les valeurs des positions des machines. Les contraintes de type (4) sont des contraintes de non chevauchement entre les machines. Les contraintes de type (5) traduisent le lemme 1. La formulation du problème reste applicable aux autres types de configurations, il suffit de modifier l'expression de la distance et l'adapter à la configuration choisie. Notons que la non linéarité du problème résulte du fait qu'on multiplie les distances entre les machines –qui sont inconnues– par les trafics qui sont eux aussi inconnus, (Chaieb, 2002).

Pour illustrer cette étude, nous appliquons le modèle proposé à l'exemple de cellule de fabrication suivant. La cellule comporte six ressources de transformation : R_1 (existe en trois exemplaires : M_{11} , M_{12} et M_{13}), R_2 , R_3 , R_4 , R_5 et R_6 permettant d'usiner trois types de produits : P_A , P_B et P_C . Les ratios moyens de production sont respectivement : 43%, 28.5% et 28.5%. Chaque opération est

définie par sa durée et la ressource qui l'effectue. Sur la Figure C-5, sont représentées les trois gammes opératoires flexibles.

Avant de déterminer le positionnement des machines dans la cellule, nous devons lever les indéterminismes dus à la flexibilité des gammes opératoires de manière à obtenir les meilleures performances du système de production en terme de flux. Sachant que le flux optimal de production est celui de la machine critique, cette méthode consiste à déterminer les ratios de routage minimisant le maximum des charges des machines. Afin de résoudre ce problème, nous avons utilisé le solveur CPLEX pour obtenir le résultat suivant :

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{a}_{111} = 0.429, \mathbf{a}_{112} = 0.127, \mathbf{a}_{113} = 0.444 & \mathbf{a}_{221} = 1, \mathbf{a}_{222} = 0 \\
 & \mathbf{a}_{121} = 0.08, \mathbf{a}_{122} = 0.92 & \mathbf{a}_{311} = 0.9, \mathbf{a}_{312} = 0.1
 \end{aligned}$$

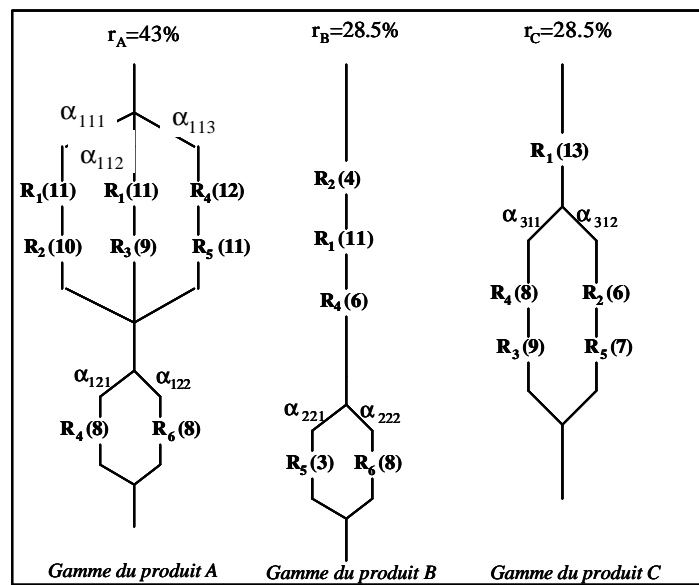


Figure C-5 : Exemple illustratif

Les ratios de routage obtenus permettent de déduire les gammes linéaires, cf. Figure C-6.

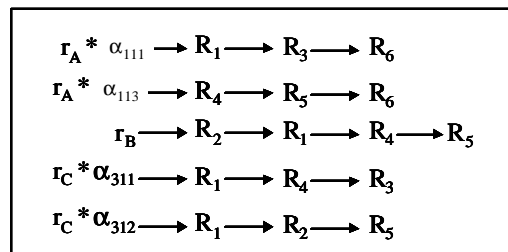


Figure C-6 : Gammes opératoires linéaires

Chaque gamme linéaire, contenant la ressource R_1 , génère une gamme flexible à trois branches ne comportant chacune qu'un seul exemplaire de la ressource, cf. Figure C-7. Le trafic entre chaque paire de machines est égal au produit du ratio de production et des variables $a_1, a_2, a_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \gamma_1, \dots$ d'où l'expression, par exemple, du trafic entre les machines M_{11} et R_4 : $(r_B * \beta_1 + r_C * a_{311} * \gamma_1)$. La fonction objectif est exprimée comme suit :

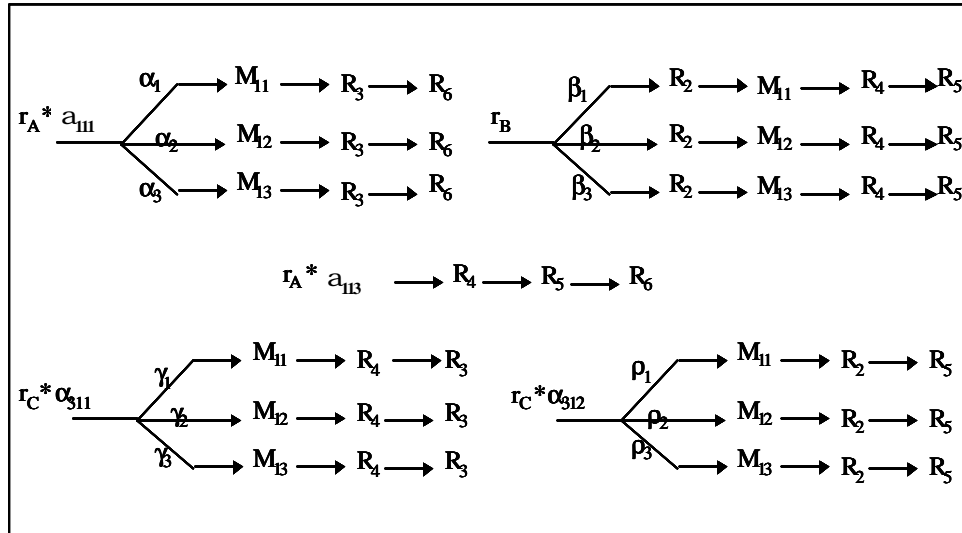


Figure C-7 : Gammes opératoires flexibles à machines simples

$$F = \left\{ \begin{array}{l} [r_A^* a_{111}^* a_1]^* d_{M_{11}M_3} + [r_A^* a_{111}^* a_2]^* d_{M_{12}M_3} + \\ [r_A^* a_{111}^* a_3]^* d_{M_{13}M_3} + r_A^* a_{111}^* d_{M_3M_6} + \\ (r_A^* a_{113} + r_B^* a_{221})^* d_{M_4M_5} + (r_A^* a_{113})^* d_{M_5M_6} + \\ [r_B^* a_{221}^* b_1]^* d_{M_2M_{11}} + [r_B^* a_{221}^* b_2]^* d_{M_2M_{12}} + \\ [r_B^* a_{221}^* b_3]^* d_{M_2M_{13}} + [r_B^* a_{221}^* b_1 + r_C^* a_{311}^* g_1]^* d_{M_{11}M_4} + \\ [r_B^* a_{221}^* b_2 + r_C^* a_{311}^* g_2]^* d_{M_{12}M_4} + \\ [r_B^* a_{221}^* b_3 + r_C^* a_{311}^* g_3]^* d_{M_{13}M_4} + r_C^* a_{311}^* d_{M_4M_5} \\ + r_C^* a_{312}^* r_1^* d_{M_1M_2} + r_C^* a_{312}^* r_2^* d_{M_{12}M_2} + \\ r_C^* a_{312}^* r_3^* d_{M_{13}M_2} + r_C^* a_{312}^* d_{M_2M_5} \end{array} \right.$$

La résolution du problème non linéaire quadratique d'agencement des machines a été également effectuée avec le logiciel CPLEX. Pour cet exemple, les longueurs des machines ont toutes été fixées à 5. Nous avons supposé que le périmètre du convoyeur était inconnu. Pour déterminer sa valeur nous pouvons le considérer comme étant une variable du problème ; on peut aussi lui affecter une valeur assez grande pour la minimiser ensuite. La valeur minimale de ce périmètre est de 40, cf. Figure C-8.

Nous constatons également, après évaluation, que les machines identiques M_{11} , M_{12} et M_{13} sont harmonieusement réparties autour du convoyeur afin d'optimiser les distances séparant R_1 de M_3 , R_1 de M_4 et R_1 de M_2 . Ceci confirme la nécessité d'employer des machines identiques dans la cellule. Cependant, répartir des machines identiques peut présenter quelques inconvénients lorsqu'une de ces machines tombe en panne. Supposons que les machines identiques aient la disposition décrite dans la Figure C-3 et que l'une d'elles tombe en panne, les temps de transport ne sont pas modifiés. Il faut donc choisir entre maintenir une redondance (soit passive soit active) entre les machines identiques soit les répartir et minimiser ainsi les temps de transfert (et par la même occasion, l'en-cours dans le système).

En plus de ces deux flexibilités, nous avons étudié l'utilisation de la flexibilité dans le système de transport lui-même en introduisant des « raccourcis », sous forme de tronçons de transport permettant de relier certaines partie du système sans avoir à faire le tour entier de l'anneau par

exemple. Deux solutions s'offrent alors à nous pour résoudre ce problème. La première consiste à réaliser le placement comme précédemment puis à ajouter le raccourci. Cette solution a très vite été écartée car elle ne représente aucun intérêt pour l'optimisation : le placement est optimisé sans prise en compte de cette flexibilité donc l'ajout de ce tronçon peut être totalement inutile.

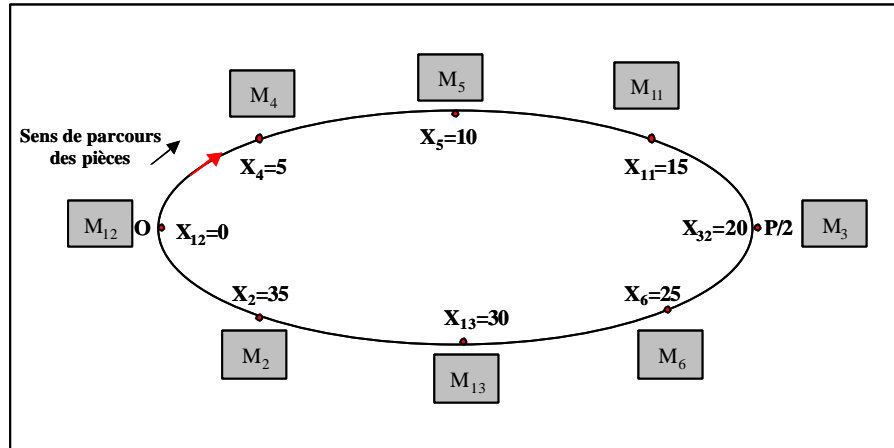


Figure C-8 : Positionnement optimal des machines autour du convoyeur

La seconde possibilité réside dans le fait d'intégrer ce placement dans le problème à résoudre. Il reste alors à trouver un moyen d'intégrer, dans le système d'équations, l'expression de la distance entre deux machines. En effet, cette distance devient le minimum entre deux distances (distance directe et distance avec le raccourci) sachant que l'opérateur \min n'est pas linéaire. Une façon de simplifier le problème consiste à figer le raccourci en le plaçant au préalable puis de chercher à placer les machines. Cette solution est bien entendu sous optimale car elle suppose connaître le nombre de machines et l'emplacement du raccourci. Nous avons donc écarté cette solution également. Ainsi, nous avons formulé le problème dans son cas le plus général en adoptant un artifice permettant de prendre en compte le raccourci. En effet, nous considérons les deux extrémités de ce raccourci comme deux machines virtuelles $V1$ et $V2$. De ce fait, il existe une distance directe D_d entre elles et une distance égale à la longueur du raccourci D_{ind} . La distance entre deux machines M_i et M_j est alors égale à $\min.(d(M_i, M_j), d(M_i, V1) + D_{ind} + d(V2, M_j))$. Cet artifice permet donc de formaliser, sans hypothèses restrictives, ce problème mais accroît la non linéarité du problème.

III. Exploitation des systèmes de production et de transport

Contrairement à la phase de conception, l'exploitation dispose de connaissances bien plus précises concernant le problème à résoudre. En effet, si la conception, n'a que des données partielles (sous forme de demande prévisionnelle), l'exploitation cherche à optimiser une demande réelle et effective et à déterminer la commande du système afin de la réaliser. Cette demande est quelque peu « brute » car elle correspond à un besoin commercial et non à un type de production (cyclique en l'occurrence). Ainsi, convient-il de décomposer cette demande en productions cycliques. Cette étape s'appelle planification fine (planification pour simplifier). Une fois cette phase réalisée, il faut optimiser chaque régime cyclique (détermination du temps de cycle et des bornes de performance) puis l'ordonner. Enfin, il faudra optimiser les régimes transitoires de montée en régime et fin de production tout en reliant les régimes permanents entre eux.

1. Planification

a. Contexte

L'étape de planification constitue la première étape dans l'élaboration d'une commande prédictive cyclique et déterministe des SFPM. Elle consiste, partant des quantités économiques des différents types de produits déterminées lors de la planification à moyen terme de la production et de leurs gammes opératoires, à réaliser la production de ces quantités en une ou plusieurs productions successives. Ces productions sont réalisées durant différents régimes permanents. Elles sont caractérisées par des ratios de productions qui peuvent être distincts d'une production à une autre. Durant un régime permanent, un ensemble de produits fabriqués simultanément est reconduit périodiquement jusqu'à la fin de la production des quantités à produire pendant ce régime. Un régime transitoire séparera chaque couple de régimes permanents successifs.

Pour cette étape, nous supposons que nous disposons des données issues du niveau programmation : elles consistent en des quantités absolues (besoins nets en termes de MRP) des différents types de produits à fabriquer sur une période figée (par exemple une semaine). La détermination de ces quantités a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Les critères à optimiser lors de la détermination des quantités économiques peuvent être les coûts de stockage à minimiser, cf. (Xie, et al., 1987), ou la somme de coûts de changements d'outils, d'achat de matières premières et de transport de produits finis (à minimiser), cf. (Bahroun, et al. 1998). Par conséquent, les données du problème sont :

- Les gammes opératoires des différents types de pièces à réaliser pendant les régimes permanents.
- Les ressources de transformation.
- I_{\max} le nombre de types de pièces à fabriquer.
- $T(I)$ la quantité de pièces à produire du type I .

A l'inverse de l'approche par flux continu (Ohl, 1995), l'approche que nous adoptons ici est discrète. Elle est basée sur les travaux de (Camus, 1997). Il n'est plus question de travailler sur des horizons a priori infinis pour atteindre les performances théoriques optimales des systèmes de production, mais sur des horizons cycliques qui doivent respecter à la fois les ratios de production fixés au préalable, les ratios de routage et l'équilibrage des charges entre les machines identiques d'une même ressource de transformation multiple. L'étude se fait directement sur des horizons discrets pour lesquels l'obtention en un temps de calcul raisonnable des commandes cycliques, doit être assurée. De même, chercher systématiquement à produire en un seul régime permanent constitue clairement un cas particulier et peut conduire à des solutions sous optimales souvent difficiles à mettre en œuvre. C'est la raison pour laquelle nous ne limitons pas la recherche à un seul régime cyclique mais recherchons la meilleure combinaison de régimes permanents permettant de réaliser la demande initiale.

Les principaux objectifs recherchés dans cette phase sont les suivants :

- Minimiser la durée de la production totale (critère classique de performance)

- Minimiser la taille N_{max} des horizons cycliques de production : rendre les cycles moins difficiles à ordonnancer.
- Minimiser le nombre de régimes permanents : éviter l'augmentation des régimes transitoires qui sont par définition plus lents que les régimes permanents
- Minimiser le temps de cycle pour chaque régime permanent : rendre la production cyclique plus « réactive » avec des cycles plus courts
- Maximiser le nombre X de répétitions de chaque commande cyclique au cours d'un régime permanent : fonctionner en régime permanent optimisé le plus longtemps possible
- Limiter les productions hors régimes permanents et leurs transitoires associés : au maximum 2% de la production peut être produit durant des transitoires isolés

J'ai donc cherché à reformuler le problème de planification fine antérieurement établie par H. Camus. Cette dernière ayant été faite sans tenir compte de l'approche de résolution, nous (Chaieb, 2002) la modifions de manière à ce qu'elle s'apprête à la prise en compte d'une méthode de résolution. En effet, la formulation du problème (Camus, 1997) est multicritère et comporte beaucoup de critères antagonistes. Pour ces raisons, sa résolution s'est avérée très difficile. Ainsi, nous avons choisi d'optimiser le critère qui semble d'un point de vue économique le plus important, et transformons les autres critères en contraintes à respecter. En procédant de la sorte, nous pourrions garantir, en dépit de la complexité du problème, une relative optimalité de la solution (Chaieb, Korbaa, Camus, 2001).

b. Formulation

A partir des données citées précédemment, notre but est de déterminer tout d'abord les régimes permanents, leur nombre ainsi que leurs nombres de répétitions, qui optimisent au mieux le critère de minimisation du temps total de production. Ainsi, les variables du problème sont les suivantes :

- MP temps nécessaire à la production des différentes quantités économiques (makespan).
- RP_{max} le nombre de régimes permanents nécessaires pour réaliser toute la production. Ce nombre est compris entre 1 et I_{max} , en effet, au pire nous réalisons un seul type de produits par régime permanent. Bien que nous privilégions la production simultanée de différents types de produits afin d'optimiser au mieux le flux de production (à l'aide des flexibilités des gammes opératoires), nous ne pouvons ignorer le cas d'une production mono produit qui permettrait, dans le cas où la gamme de chaque produit est caractérisée par une grande flexibilité, d'optimiser le flux de production.
- RP_p le $p^{ème}$ régime permanent, il est caractérisé par :
 - Un horizon de production cyclique et discret $E(RP_p)$ constitué du nombre de pièces de chaque type à réaliser au cours d'un cycle de fabrication :
 - Ce nombre est désigné par $I(p)$. Il est limité par N_{max} , nombre maximum de pièces à réaliser durant un cycle. Cette limitation permettra de satisfaire a priori la contrainte de réduction des tailles des horizons.
 - Un temps de cycle optimal $CT(p)$ associé à l'horizon discret $E(RP_p)$.

- $X(p)$ le nombre de répétitions de l'horizon $E(RP_p)$ pendant le $p^{\text{ème}}$ régime permanent. Pour que le fonctionnement du régime permanent puisse être considéré cyclique, $X(p)$ doit être supérieur à un nombre minimum de répétitions de cycles désigné par NC_{\min} . La valeur de ce nombre minimum dépend des quantités économiques déterminées pendant la phase de planification à moyen terme.
- $r_i(p)$ le ratio de production de la pièce de type i dans le $p^{\text{ème}}$ régime permanent.
- $\alpha_{ijk}(p)$ le ratio de routage associé à la $k^{\text{ème}}$ branche du $j^{\text{ème}}$ conflit de la gamme du $i^{\text{ème}}$ type de pièce durant le $p^{\text{ème}}$ régime permanent.
- $O_{i-t-M_{mm}-R_r}(p)$ le nombre d'opérations de la gamme du produit de type i , de durées t et affectées à la machine M_{mm} de la ressource multiple R_r , dans le $p^{\text{ème}}$ régime permanent.
- $Z_{M_{mm}-R_r}(p)$ la charge de travail affectée à la machine M_{mm} de la ressource multiple R_r dans le $p^{\text{ème}}$ régime permanent.

A la fin de l'étape de planification fine, nous obtenons RP_{\max} régimes permanents, chacun est caractérisé par un horizon discret et cyclique de production, un temps de cycle associé à cet horizon et un certain nombre de répétitions permettant de réaliser les pièces à produire pendant le régime permanent.

La fonction «objectif» consiste à minimiser le temps total de production (makespan) ou plutôt une estimation de sa valeur. Ce dernier est égal à la somme des durées des régimes permanents et des durées des régimes transitoires. La durée de production pendant un régime permanent est déterminée par le produit du temps de cycle par le nombre de répétitions du cycle. Quant aux régimes transitoires, une étude préalable (Korbaa, 1998) a démontré que ces régimes ne peuvent être évalués et optimisés qu'une fois l'ordonnancement effectué pour chaque régime permanent. Etant donné que l'étape d'ordonnancement est une étape ultérieure à celle de planification fine, nous ne pouvons à ce stade évaluer la durée de ce type de régime. Nous sommes donc amenés à fournir une estimation d'une borne supérieure du temps de production des pièces qui ne seront pas produites pendant les régimes permanents. Chaque pièce fabriquée pendant un régime transitoire aurait une durée égale au temps nécessaire à sa réalisation s'il n'y a pas de conflit d'accès à une ressource partagée et en supposant que la pièce soit produite seule dans l'atelier et avec une seule ressource de transport, cf. (Camus, 1997). Cette estimation sera notée par BS . Le critère d'optimisation du makespan s'exprime alors sous la forme :

$$\text{Minimiser } MP = \sum_{p=1}^{RP_{\max}} X(p)CT(RP_p) + BS$$

Sous les contraintes :

$$RP_{\max} \hat{I} \in \mathbb{N} \text{ et } RP_{\max} \mathbf{I} \in \mathbb{N} \quad (1)$$

$$\forall p \in \{1..RP_{\max}\}, X(p) \neq 0 \text{ et } X(p) \geq NC_{\min} \quad (2)$$

$$\forall p \in \{1..RP_{\max}\}, \text{card}(E(RP_p)) = \sum_{i=1}^{I_{\max}} I_i(p) \text{ avec} \quad (3)$$

$$\forall p \in \{1..RP_{\max}\}, \forall i \in \{1..I_{\max}\}, I_i(p) \in \mathbb{N} \text{ et } \sum_{i=1}^{I_{\max}} I_i(p) \leq N_{\max}$$

$\forall p \in \{1..RP_{\max}\}, \forall \text{ ressource } R_r \text{ et } \forall \text{ machine } M_{rm} \text{ de } R_r :$

$$CT(RP_p) \geq Z_{M_{rm}-R_r}(p) = \sum_{\forall i, \forall t} t.O_{i-t-M_{rm}-R_r}(p) \quad (4)$$

$$\forall p \in \{1..RP_{\max}\}, X(p) \in \mathbb{N} \quad \sum_{p=1}^{RP_{\max}} X(p) \left(\sum_{i=1}^{I_{\max}} I(p) \right) \geq \left\lceil \frac{98}{100} \left(\sum_{i=1}^{I_{\max}} T(i) \right) \right\rceil$$

$$\text{et } \sum_{p=1}^{RP_{\max}} X(p) I(p) \leq T(i), \forall i \in \{1..I_{\max}\} \quad (5)$$

(1) : limite le nombre de régimes permanents au nombre de produits. Plus le nombre de ces régimes est grand plus il y aura des régimes transitoires de mise en place des régimes permanents, d'arrêt de production et de passage d'un régime permanent à un autre.

(2) : permet de respecter le fonctionnement répétitif des régimes permanents en imposant un nombre minimal de répétition de ce régime.

(3) : limite la taille des horizons cycliques.

(4) : afin que le système de production atteigne ses performances optimales, il doit fonctionner à débit maximal. Ce débit est fixé par la machine la plus chargée.

(5) : contraint le nombre de produits réalisés durant le transitoire isolé à ne pas dépasser 2% du nombre total de pièces à produire.

c. Résolution

Afin de réduire la complexité du problème de planification, nous avons décomposé sa résolution en trois étapes (Chaieb, Korbaa, Camus, 2001). Dans un premier temps, nous générons l'ensemble des horizons possibles de production correspondant aux contraintes de taille du cycle¹. Dans un second temps, nous calculons le temps de cycle minimal associé à chaque horizon cyclique. En effet, pour chaque régime permanent, nous disposons des caractéristiques des gammes opératoires et du nombre d'exemplaires de chaque type de produits. Ainsi, nous obtenons une base de données de tous les régimes permanents possibles avec leurs performances optimales. Enfin, il suffit de trouver la meilleure combinaison de ces régimes permettant de respecter les contraintes de nombre max de régimes permanent, de taille max du transitoire isolé et minimisant l'estimation du makespan, cf. Figure C-9. Cette approche peut sembler lourde et le calcul associé fastidieux. Cependant, il est important de noter que les deux premières étapes ne sont pas à renouveler à chaque nouvelle demande. En effet, le calcul de tous les régimes possibles et de leurs performances temporelles ne sera fait qu'une seule fois (la première). Les résultats seront stockés dans une base de données afin de pouvoir les réutiliser à chaque nouveau calcul (Chaieb, 2002). Cette base reste valable sauf ajout de nouveau produit ou changement dans l'atelier (modification des temps opératoires, changement du nombre de machines, ...). Afin d'illustrer cette approche, prenons l'exemple de la Figure C-5. La demande initiale est la suivante² :

¹ Les données de cette étape sont la cardinalité maximale N_{\max} des horizons cycliques de production et le nombre I_{\max} de types de produits.

² Même si les quantités ont un PGCD très grand (égal à 100) nous verrons que ceci ne favorise pas forcément la production en un seul régime permanent.

- Produits de type A : $T(A) = 900$,
- Produits de type B : $T(B) = 500$,
- Produits de type C : $T(C) = 700$.

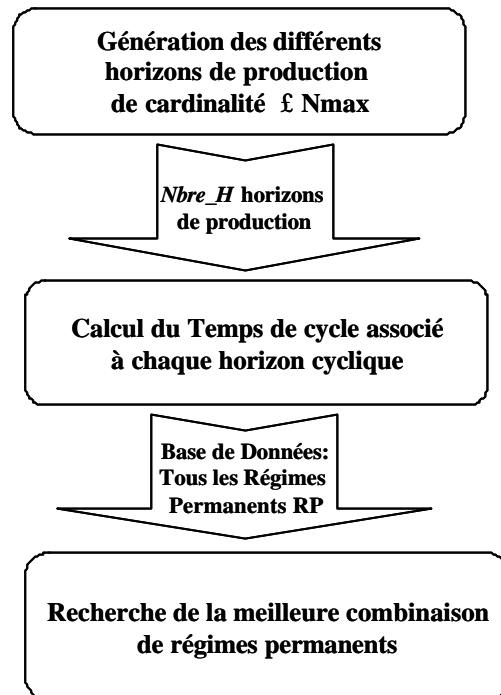


Figure C-9 : Résolution du problème de planification

Une étude par l'approche continue donne une référence (borne inférieure d'une durée 6696 u.t.) permettant d'évaluer la solution qui sera trouvée. Cette durée ne peut être atteinte qu'avec une production en un seul cycle (les 2100 pièces en même temps sans décomposition temporelle en cycles) et ne prend pas en compte le transitoire (la durée correspond à la charge de la machine critique uniquement). En nous inspirant de l'approche de (Ohl, 1995), nous déduisons qu'il est possible de réaliser la demande en produisant 100 fois le cycle suivant (9A, 5B, 7C). La durée du régime permanent est alors estimée à $100 * 68 \text{ u.t.} = 6800 \text{ u.t.}$ L'approche proposée aboutit à une production en deux régimes permanents :

- SS1: le cycle est formé de {4A, 2B, 4C} répété 175 fois, $CT = 35 \text{ u.t.}$, durée1 = 6125 u.t.
- SS2: le cycle est formé de {4A, 3B, 0C} répété 50 fois, $CT = 24 \text{ u.t.}$, durée2 = 1200 u.t.

Soit un temps total de production en régime permanent de $= 7325 \text{ u.t.}$ Au premier abord, il semble que la solution en un seul régime permanent soit meilleure. Cependant, elle présente l'inconvénient majeur d'être constituée de cycles contenant 21 pièces à produire. Cette taille est limite en terme de complexité pour la phase d'ordonnancement. En effet, si l'on garde en mémoire que le problème est NP-difficile, ordonnancer les régimes SS1 (10 pièces par cycle) ou SS2 (7 pièces par cycle) est nettement moins complexe et combinatoire (sans commune mesure) qu'une production de 21 pièces par cycle. En plus, SS1 et SS2 sont deux à trois fois plus courts que le cycle de 68 u.t. Ils sont donc plus « réactifs » en terme de possibilité d'arrêt pour cause de production prioritaire (cf. Transitoires) ou en terme de détection de défaillances (cf. Surveillance). De même, si on suppose que l'ordonnancement nécessitera une palette par pièce, la production en un seul régime permanent demandera au moins de 21 palettes (toujours faut il les avoir dans l'atelier)

contre respectivement 10 et 7 pour SS1 et SS2. Enfin, si on estime la durée du transitoire à un cycle pour le lancement et un autre pour l'arrêt, cette production nécessite 136 u.t. pour cette phase alors que SS1 + SS2 nécessitera de 35 + 24 + une estimation du transitoire les reliant. Prenons par exemple le max des deux durées comme valeur de cette estimation. Nous obtenons donc :

- Un seul régime permanent : $\text{Makespan} = 6800 + 136 = 6936 \text{ u.t.}$
- SS1 + SS2 : $\text{Makespan} = 7325 + 94 = 7419 \text{ u.t.}$

Ainsi, la solution à deux régimes permanents est-elle plus lente (6% de temps en plus) mais elle présente tellement d'avantages en terme d'ordonnement et d'exploitation du résultat qu'elle sera considérée comme meilleure (Chaieb, Korbaa, Camus, 2001). Ces résultats démontrent l'utilité et l'intérêt d'une planification qui ne se limite à la recherche d'une production en un seul régime permanent d'autant plus que ceci n'est pas toujours faisable (cas où les nombres de pièces sont premiers entre eux). Les travaux actuels s'intéressent à l'application de ces résultats dans le domaine de la logistique à travers la planification d'une installation portuaire. En effet, connaissant le planning des barges en partance du port et le carnet de commandes des clients, il s'agit d'affecter les containers aux différentes barges en prenant en compte des contraintes de capacité, de dates dues, ...

2. Evaluation des performances

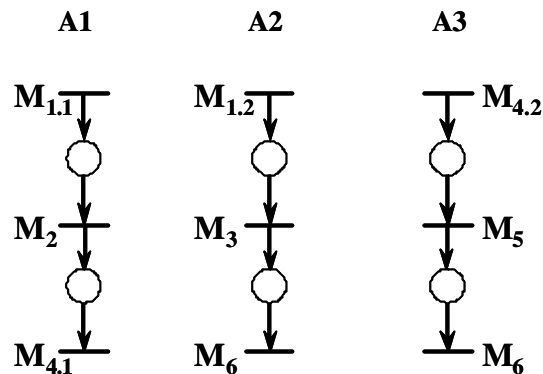
Cette phase est historiquement chargée de déterminer l'horizon cyclique de production, le temps de cycle minimal ainsi que la borne minimale d'en-cours. De plus, elle permet de déterminer les ratios de routages pour les gammes flexibles. Nous avons vu que la planification fine a déjà permis d'obtenir directement les productions cycliques avec leurs horizons de production, temps de cycle, ratios de routage. Ainsi, dans cette phase, la conception des cycles se trouve réduite et désormais chargée des opérations suivantes :

- Affecter les opérations aux machines identiques
- Linéariser le modèle donné par la planification
- Partitionner les gammes linéaires
- Déterminer la borne d'en-cours minimal pour chaque modèle ordonnançable ainsi obtenu

Si la planification détermine l'horizon cyclique de production et le temps de cycle, elle n'affecte pas définitivement les opérations aux machines identiques. En effet, déterminer le temps de cycle revient à vérifier les charges de machines pour en déterminer la plus critique. Supposons qu'une ressource M existe en 2 exemplaires (M_{11} et M_{12}) et qu'elle doit effectuer 4 opérations : op1 (2 u.t.), op2 (3 u.t.), op3 (4 u.t.), op4 (8 u.t.). La planification permet de dire que la plus lente des deux devra travailler 9 u.t. par cycle et effectué E1 : {op1, op2, op3} alors que la seconds n'effectuera que E2 = {op4}. Cependant, la planification ne détermine en aucun cas laquelle de ces deux machines produira E1. En effet, c'est durant cette phase et en prenant en compte les dispositions physiques des machines et les opérations de transfert induites par l'affectation de telle ou telle charge à chaque exemplaire, qu'on peut réellement disposer de ces informations.

En ce qui concerne la linéarisation du modèle, la planification a permis de déterminer l'horizon cyclique, le temps de cycle ainsi que les ratios de routage «entiers» pour les gammes flexibles. Prenons l'exemple de la Figure C-10 (Korbaa, 1998). La gamme A est à produire en 3

Chaque combinaison doit donc être étudiée à part en déterminant sa borne d'en-cours minimale et en l'optimisant dans la phase d'ordonnement pour trouver la meilleure des solutions.



3. Ordonnement cyclique

A ce niveau de notre étude, les gammes ont été linéarisées et les machines identifiées. Il est donc possible de s'intéresser à l'ordonnement des tâches. L'ordonnement est caractérisé par « *la programmation de l'exécution des tâches en leur allouant les ressources requises et en fixant leurs dates de début* » (Gotha, 1993). Dans notre cas, il s'agit, non seulement, d'affecter les machines en respectant le temps de cycle optimal (contrainte stricte), mais aussi de déterminer l'en-cours nécessaire (second critère de performance). Ainsi, les inconnues du système sont :

- pour les machines
 - l'ordre de passage des pièces sur les machines (c'est-à-dire rendre les partages de ressources déterministes),
 - les dates d'entrée des pièces sur les machines modulo CT : c'est-à-dire l'affectation temporelle des ressources de transformation ;
- pour les produits
 - le nombre de palettes utilisées par type de pièce,
 - l'emplacement des palettes à l'état initial.

Les problèmes d'ordonnement sont connus pour être complexes et hautement combinatoires (Bellmann, et al., 1982). Il a été prouvé que les problèmes de planification de projets sont de combinatoire *polynomiale* et que l'ordonnement cyclique est *NP-complet* (Carlier, Chrétienne, 1988 ; Serafini, Ukovich, 1989). La prise en compte des ressources de transformation (associées aux différentes opérations) rend le premier problème *NP-difficile* dans la majorité des cas et laisse le second dans la classe des problèmes *non déterministes polynomiaux* (Serafini, Ukovich, 1989). Dans le cas qui nous concerne, le passage par une heuristique est donc justifié par la grande complexité du problème. Parmi les méthodes d'ordonnement cyclique, connues à ce jour, nous pouvons citer :

- L'ordonnement de la machine critique (Erschler, et al., 1982) : le critère principal de cette approche est la minimisation de la taille moyenne et maximale des stocks d'entrée des différentes machines. Elle est basée sur l'ordonnement des tâches de la machine critique

(machine la plus lente au vu de la charge effectuée) suivi de la résolution des conflits des autres machines.

- Ordonnancement k -cyclique (Chrétienne, et al., 1997) : cette approche s'est intéressée à l'ordonnancement cyclique dans un contexte informatique. L'objectif de minimisation de l'en-cours n'a donc pas été abordé (la notion d'en-cours n'a que peu de sens dans ce cas). Dans ce contexte particulier, l'en-cours correspond aux emplacements mémoire nécessaires pour stocker les résultats intermédiaires. Cette ressource étant peu coûteuse, sa minimisation n'est pas recherchée.
- Ordonnancement 1-cyclique : les approches ont toutes pour objectif de respecter le temps de cycle optimal tout en minimisant l'en-cours.
 - (Hillion, 1989) : L'heuristique est composée de deux phases d'optimisation : la première concerne la détermination des circuits de fabrication (séquençement des opérations sur les machines) pour transformer le modèle initial en graphe d'événements déterministe. La seconde minimise l'en-cours dans le graphe d'événements en respectant le temps de cycle optimal. L'algorithme de Hillion procède au placement progressif et parallèle des différentes opérations. A chaque itération une opération est choisie, par l'intermédiaire d'une fonction de coût, et placée définitivement dans l'ordonnancement en cours. Le procédé est reproduit jusqu'à épuisement de l'ensemble des opérations. Chaque fois que l'opération candidate au placement est plus longue que le temps résiduel d'une palette, une nouvelle palette est introduite et l'opération est placée à la date zéro de cette nouvelle palette.
 - (Valentin, 1994) : L'algorithme est basé sur le même principe que le précédent avec une amélioration concernant une prise en compte des intervalles de disponibilité des machines pour améliorer le résultat.
 - (Camus, 1997) et (Korbaa, 1998) : La première amélioration que propose cette méthode, par rapport à la précédente (Valentin), concerne les intervalles de disponibilité. En effet, la précédente définition ne prend pas pleinement en compte l'aspect cyclique du problème étant donné qu'elle raisonne par rapport à une fenêtre $[0, CT]$ isolée des autres cycles : du fait des hypothèses retenues, une opération commence et se termine obligatoirement sur le même cycle. Dans cette approche, j'ai introduit avec *H. Camus* le principe d'ordonnancement à chevauchement de cycles. Ce chevauchement de cycles permet essentiellement de perdre moins de temps que dans le cas d'une recherche de placement de l'opération entière sur une nouvelle palette. La seconde amélioration concerne le placement des opérations. En effet, dans les deux méthodes précédentes, les opérations sont toujours placées au plus tôt (sauf si la machine est déjà occupée auquel cas l'opération est différée à la fin de l'opération : ceci revient à un placement au plus tôt dans le premier intervalle de disponibilité rencontré). A ce type de placement, ont été ajoutés deux autres types définis à partir des intervalles de disponibilité. Pour chaque intervalle de disponibilité, nous essayons à la fois le placement au plus tôt et le placement au plus tard dans l'intervalle. De plus, l'algorithme procède par recherche par faisceaux contrôlée. Disposant d'une profondeur de recherche π fixe, l'algorithme teste tous les placements possibles de séquences de π opérations. Il sélectionne la meilleure

(grâce à une fonction de coût), place définitivement la première opération de cette séquence et recommence le même calcul jusqu'à épuisement total des opérations.

Ainsi, l'algorithme développé au sein de l'équipe, cf. (Camus, 1997 ; Korbaa, 1998), s'avère particulièrement efficace en terme de qualité des résultats tout en étant très gourmand en temps de calcul. J'ai donc cherché à mettre en place une nouvelle approche plus rapide en relaxant l'optimisation de l'en-cours. De plus, j'ai travaillé sur la comparaison de cette approche avec d'autres à travers la mise en place de benchmarks et la participation à l'élaboration de nouveaux algorithmes basés sur les méta-heuristiques.

a. Nouvelle approche

J'ai proposé cette orientation qui a fait l'objet de la thèse de *J. K. Lee* en 2002. La méthode de résolution tire profit de la théorie des réseaux de Petri. En effet, elle est entièrement basée sur la transformation progressive du modèle initial et l'utilisation des matrices associées (matrice d'incidence, matrice d'incidence de place, ...) ainsi que les propriétés des réseaux de Petri (dépliage, vivacité, ...), cf. (Lee, 2002). L'approche de résolution se décompose donc comme suit, cf. Figure C-12 :

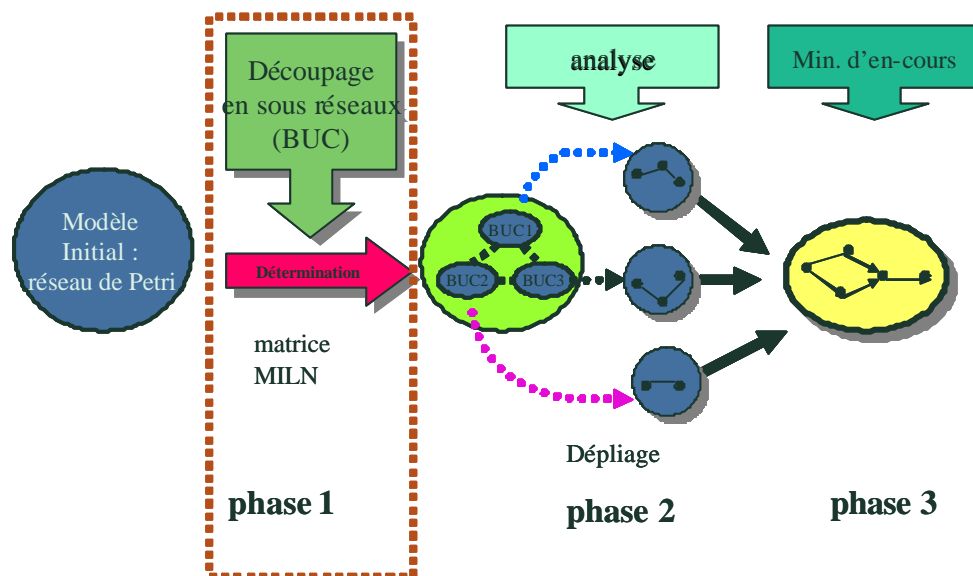


Figure C-12 : Structure de l'approche d'ordonnancement

- Phase 1 : A partir du modèle réseau de Petri initial, on détermine des sous réseaux basés sur les ressources. Ce découpage est réalisé à l'aide d'une matrice appelée MILN et d'un algorithme mis en place à cet effet.
- Phase 2 : Toujours en utilisant les propriétés des réseaux de Petri, nous déplaçons les sous réseaux pour obtenir des séquences de tir sur les machines.
- Phase 3 : Les différentes séquences sont évaluées (en terme d'en-cours obtenu) et seules les meilleures sont retenues.

Nous supposons le lecteur familier de la théorie des réseaux de Petri, cf. (Commoner, et al., 1971 ; Di Cesare, et al., 1993 ; David, Alla, 1992 ; Murata, 1989 ; Proth, Xie, 1994 ; Ramamoorthy, Ho, 1980 ; Sifakis, 1980 ; Silva, Valette, 1989) et rappelons quelques définitions et

notations pour faciliter la compréhension de ce qui suit. Soit $TPN = \langle P, T, I, O, M_0, \tau \rangle$ un réseau de Petri temporisé, où :

- P est un ensemble fini de places ($|P| = n$),
- T est un ensemble fini de transitions ($|T| = m$),
- $P \cap T = \emptyset$,
- $I : T \rightarrow P$ est une fonction d'incidence d'entrée,
- $O : T \rightarrow P$ est la fonction d'incidence de sortie.
- $M_0 \in M = \{M / M : P \rightarrow \mathbb{N}\}$ est le marquage initial (\mathbb{N} est l'ensemble des entiers naturels)
- $\tau : T \rightarrow \mathbb{Q}^* \times (\mathbb{Q}^* \cup \infty)$ est une fonction qui associe une durée de franchissement à chaque transition, où \mathbb{Q}^* est l'ensemble des rationnels positifs.

$B^- = [i, j] = \#(P_i, I(t_j))$, est la matrice de la fonction d'incidence d'entrée,

$B^+ = [i, j] = \#(P_i, O(t_j))$, est le matrice de la fonction d'incidence de sortie.

La différence, $B = B^+ - B^-$, s'appelle matrice d'incidence.

Déf. $B_P = B^- (B^+)^T$ est appelée matrice d'incidence de place.

Exemple :

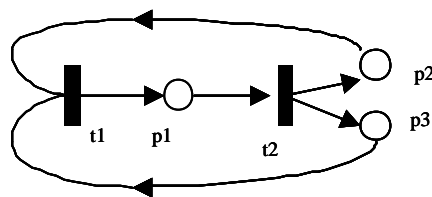


Figure C-13 : Exemple

$$B^- = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B^+ = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Alors, la matrice d'incidence de place $B_P = B^- (B^+)^T$:

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{matrix} \begin{matrix} p_1 & p_2 & p_3 \\ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Cette matrice exprime les relations entre places¹.

¹ Cette matrice et l'interprétation qui en découle, ne sont applicables que dans le cas de réseau de Petri ordinaire (arcs de poids unitaires).

Par exemple : nous pouvons déduire, directement à partir de la matrice, que p_2 et p_3 sont des « sorties » de p_1 et qu'à chaque fois qu'un jeton est retiré de p_1 , il produit un jeton dans p_2 et un jeton dans p_3 .

Déf. Soit L_{BP}^* la matrice d'incidence de place labellisée et normalisée (notée MILN). Si une transition t_k apparaît s fois dans une colonne de L_{BP} , alors nous la remplaçons dans L_{BP}^* par t_k/s . $L_{BP}^* = B^- \text{diag}(t_1/s_1, t_2/s_2 \dots t_n/s_n)(B^+)^T$ où $s_i(i=1, \dots, n)$ est le nombre d'entrées de la transition t_i .

Nous allons maintenant présenter l'utilisation de cette matrice pour déterminer les sous réseaux basés sur les machines. Ainsi, l'analyse de ces sous réseaux (appelés *Basic Unit Concurrency, BUC*) permettra de déterminer le temps de cycle et la séquence des opérations sur les machines. Un BUC est un ensemble d'opérations effectuées par une seule machine. L'approche BUC décompose le système en sous-systèmes concurrents. Nous associons à un BUC les deux fonctions suivantes :

- Le temps écoulé avant l'arrivée sur la machine
- Le temps écoulé après le passage sur la machine

Déf. (Définition « graphique » d'un BUC) Le BUC associé à une machine est le sous réseau de Petri composé des éléments suivants :

1. La place représentant la ressource partagée ;
2. Toutes les transitions représentant les opérations effectuées par la machine ;
3. Toutes les places ayant une transition de sortie commune avec la ressource;
4. Les places de sortie des transitions du point 2 ;
5. Les transitions de sortie des places du point 4 ;
6. les places de sortie des transitions du point 5 ;
7. Les arcs reliant tous les nœuds précédemment cités.

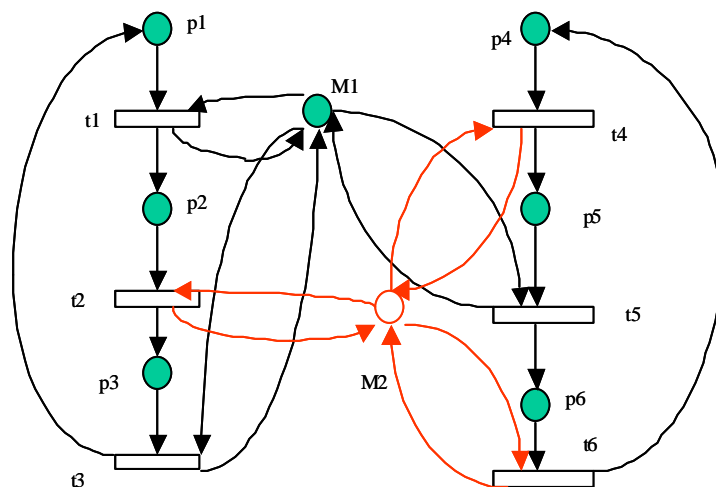


Figure C-14 : Exemple illustratif

En somme, le BUC contient toutes les conditions de franchissement des transitions utilisant la ressource partagée ainsi que, systématiquement, l'opération successive à chacune de ces dernières. Considérons l'exemple de la Figure C-14. Cet exemple contient deux ressources partagées soit deux BUCs. En ce qui concerne la machine M_1 , son BUC associé (cf. Figure C-15) contient :

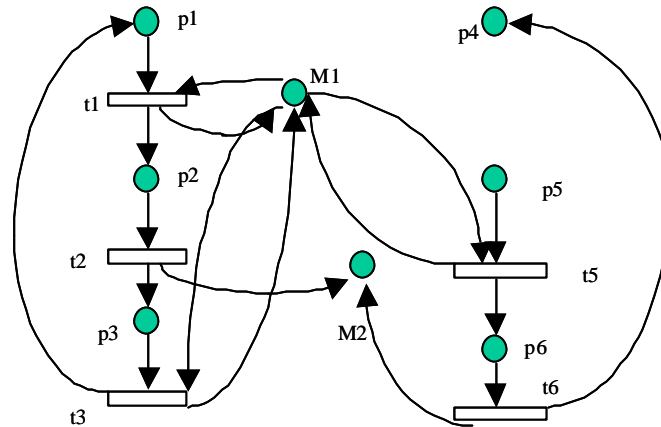


Figure C-15 : BUC correspondant à M_1

1. la ressource M_1 ;
2. les trois opérations de la ressource (resp. t_1 , t_3 et t_5) ;
3. les places d'entrée de ces transitions (resp. p_1 , p_3 et p_5) ;
4. les places de sortie des trois transitions (resp. p_2 , p_1 et p_6) ;
5. les transitions de sortie de ces places (resp. t_2 , t_1 et t_6) ;
6. les places de sortie de ces trois transitions (resp. p_3 , m_2 , p_2 , m_1 , et p_4)

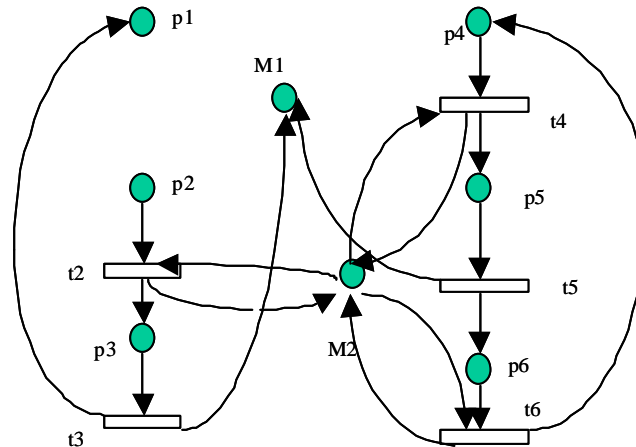


Figure C-16 : BUC correspondant à M_2

Afin d'extraire d'une manière automatique ces sous réseaux, nous utilisons La matrice MILN.

Procédure :

- (1) Soit L_{BP}^* la matrice MILN du modèle initial ;
- (2) Soit $R=\{M_i\}$ l'ensemble des ressources partagées dans le RdP ;

- (3) tant qu'il reste des éléments non traités dans R ;
- (4) considérer une place M_i de l'ensemble R ; (*point 1 de la déf. « graphique »*)
- (5) considérer la colonne relative à M_i ;
- (6) Trouver toutes les lignes (places) ayant une intersection non vide (transition) avec la colonne de M_i ; (*points 2 et 3 de la déf. « graphique »*)
- (7) considérer la ligne relative à M_i ;
- (8) Trouver toutes les colonnes (places) ayant une intersection non vide (transition) avec la ligne de M_i ; (*point 4 de la déf. « graphique »*)
- (9) Pour chaque place P_i établie durant l'étape 8
 - (10) considérer la ligne relative à la place P_i ;
 - (11) Trouver toutes les colonnes (places) ayant une intersection non vide (transition) avec la ligne de P_i ; (*points 5 et 6 de la déf. « graphique »*)
- (12) recommencer jusqu'à épuisement des places de l'étape 8
- (13) Changer de BUC et recommencer jusqu'à épuisement des éléments de R

Exemple : Ici nous considérons l'exemple représenté Figure C-14. La matrice MILN correspondante est la suivante :

Lors que l'on considère la colonne de la place M_1 , dans la matrice L_{BP}^* , on constate que celle-ci est connectée aux places p_1 , p_3 et p_5 par les transitions t_3 , t_1 et t_5 . En ce qui concerne **la ligne** relative à M_1 , elle est connectée à p_1 , p_2 et p_6 à travers les mêmes transitions ...

$$L_{BP}^* = \begin{array}{c|cccccccc|c} & P1 & P2 & P3 & P4 & P5 & P6 & M1 & M2 & \\ \hline P1 & 0 & t1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & t1/2 & 0 & P1 \\ P2 & 0 & 0 & t2/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & t2/2 & P2 \\ P3 & t3/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t3/2 & 0 & P3 \\ P4 & 0 & 0 & 0 & 0 & t4/2 & 0 & 0 & t4/2 & P4 \\ P5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t5/2 & t5/2 & 0 & P5 \\ P6 & 0 & 0 & 0 & t6/2 & 0 & 0 & 0 & t6/2 & P6 \\ \hline M1 & t3/2 & t1/2 & 0 & 0 & 0 & t5/2 & t1/2 & 0 & M1 \\ & & & & & & & t3/2 & & \\ & & & & & & & t5/2 & & \\ \hline M2 & 0 & 0 & t2/2 & t4/2 & 0 & t6/2 & 0 & t2/2 & M2 \\ & & & & & & & & t4/2 & \\ & & & & & & & & t6/2 & \end{array}$$

Déf. (Définition plus formelle d'un BUC). Soit $BUCSet = \{P_BUC_i \mid i=1, \dots, n\}$, c'est un ensemble des places du réseau de Petri temporisé $N = (P, T, F, M, \tau)$, BUC, i.e. défini par $(BUC_i \mid i=1, \dots, n)$ où chaque $BUC_i = (P_i, T_i, F_i, M_i, \tau_i)$ satisfait les conditions suivantes :

- $P_i = P_BUC_i$,

- $T_i = \{ t \in T \mid p \in P_i, (p, t) \in F \text{ ou } (t, p) \in F \},$
- $F_i = \{ (p, t) \in F, (t, p) \in F \mid p \in P_i, t \in T_i \},$
- $\forall \tau_i \in \tau, \tau_i(t) = \tau(t) \text{ et } \forall p \in M_i, M_i(p) = M(p).$

Notre approche de résolution est basée sur le dépliage des réseaux de Petri, cf. (McMillan, 1995). Cette technique permet d'éviter le problème d'explosion des états. Afin d'analyser le comportement du réseau de Petri cyclique, on peut utiliser son réseau d'occurrence. Nous allons montrer qu'il est possible de passer du réseau initial à un réseau de Petri qui possède toutes les informations du réseau initial. C'est dire qu'il possède les mêmes marquages que le réseau d'origine (Kondratyev, et al., 1996). Ce sous graphe complet s'appelle un dépliage.

Déf. (Réseau d'occurrence, **OCN**) Un réseau d'occurrence obtenu à partir d'un réseau de Petri acyclique (sans cycles) $N = \langle P, T, F, M_0 \rangle$ est tel que, toutes les places $p \in P$ vérifient $| \bullet p | \leq 1$.

Déf. Soit $N = \langle P, T, F, M_0 \rangle$ un réseau d'occurrence. $x_1, x_2 \in P \cup T$ ont une relation de concurrence ($x_1 // x_2$) S'il n'existe pas de relation entre les deux (ni de précédence ni de conflit).

Exemple : Considérons le réseau acyclique de la Figure C-17. Les relations qu'il contient sont les suivantes : La précédence : $t1 \Rightarrow t3$ et $t2 \Rightarrow t4$. Le conflit : $t1 \# t2$. La concurrence : $t7 // t8'$.

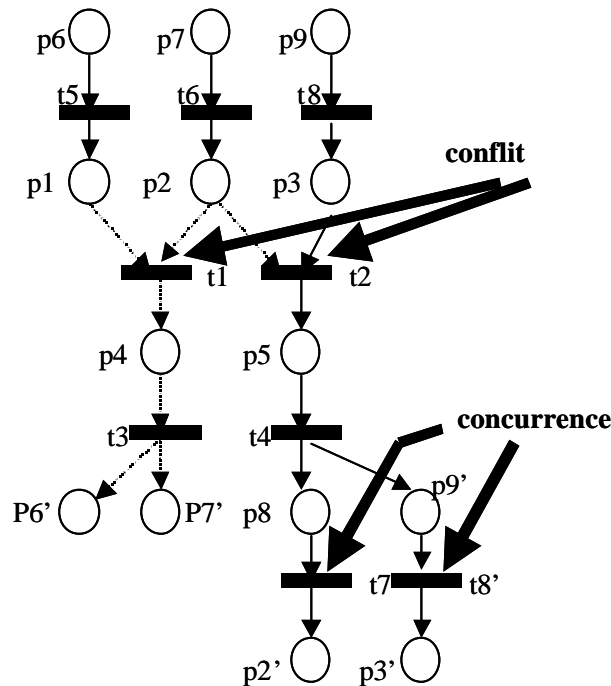


Figure C-17 : Relations de conflit et de concurrence

Déf. (Configuration) Un ensemble de transitions $C' \subset T'$ est une configuration dans un OCN si :

- 1) Pour chacun $t' \in C'$, la configuration C' contient tous les prédécesseurs de t' ,
 - 2) C' ne contient pas les transitions en conflit. ($\forall t_1, t_2 \in T' : \neg (t_1 \# t_2)$)
- L'ensemble des transitions, dans C' , en amont de t' , est appelé une configuration locale de t' notée par $\{\Rightarrow t'\}$.

- Un marquage final de C' , noté $\mathbf{FM}(C')$, est un marquage accessible à partir du marquage initial après que toutes les transitions de C' aient été franchies.
- Un marquage final d'une configuration locale de t' est appelé un marquage basique de t' et dénoté par $\mathbf{BM}(t')$.

Chaque configuration C' correspond à un marquage accessible à partir de M_0 après que toutes les transitions de C' aient été franchies. Ce marquage s'appelle le marquage final de C' et noté par $\mathbf{FM}(C')$ (McMillan, 1995).

Proposition : (Kondratyev, et al., 1996) Soit C' une configuration dans un réseau d'occurrence et $\mathbf{FM}(C')$ son marquage final. Alors, il existe une configuration C_1' dans le réseau de dépliage N' tel que $\mathbf{FM}(C_1') = \mathbf{FM}(C')$.

La taille de la configuration locale joue un rôle important pour construire le dépliage du réseau de Petri. En effet, elle définit le nombre des transitions qui sont préalablement strictement en amont de t' . Ainsi, réduire cette taille est un enjeu important dans cette étude. Ceci est réalisé grâce au découpage de ce réseau (Kondratyev, et al., 1996). Ce découpage doit néanmoins garantir les propriétés initiales du modèle. Soit C' une configuration du réseau d'occurrence, nous notons $|C'|$ la taille de la configuration C' (le nombre de transitions).

Déf. (Découpage Réduit) Une transition t_i' d'un OCN est dite découpée, s'il existe t_j' tel que

- $\mathbf{BM}(t_i') = \mathbf{BM}(t_j')$
- $|\Rightarrow t_i'| = |\Rightarrow t_j'|$
- la transition t_i' est non parallèle à t_j' ,
- il n'y a pas de découpage général possible entre la transition t_k' tel que, $t_k' // t_j'$ et $|\Rightarrow t_k'| \leq |\Rightarrow t_j'|$

Algorithme de construction du réseau de dépliage : (Lee, et al., 2001a)

Entrée : un OCN = $(N; M_0)$. Sortie : un dépliage de l'OCN : $\text{Dep} = (N'; M')$.

1. Copier chaque place p de OCN tel que $M_0(p) = 1$ dans le réseau dépliage Dep
2. Choisir une transition t de l'ensemble T
3. Pour chaque place amont de t ($\bullet t$)
 - Rechercher une copie dans le réseau Dep
 - Si non, aller à 2, éliminer la transition précédemment choisie.
4. Si aucune paire de places n'est concurrente, aller à 2.
5. Faire une copie de t dans Dep (l'appeler t').
 - Tracer un arc entre toutes les places déterminées dans 3. vers t' .
 - Si t est la transition de découpage, tracer un arc de t' vers la place et aller à 3.
6. Pour chaque place aval de t_1 ($t_1 \bullet$)

- Rechercher une copie dans le réseau Dep,
- si non, copier la place dans Dep.
- Tracer un arc de t' vers la place

7. répéter 2. à 6 autant que possible.

Exemple

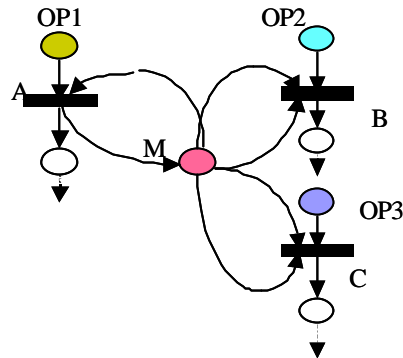


Figure C-18 : Partage de ressource

Dans ce réseau, la place M possède trois transitions en conflit, A, B et C. Donc, il existe six dépliages du réseau : A-B-C, A-C-B, B-A-C, B-C-A, C-A-B et C-B-A (dont 3 représentés Figure C-19).

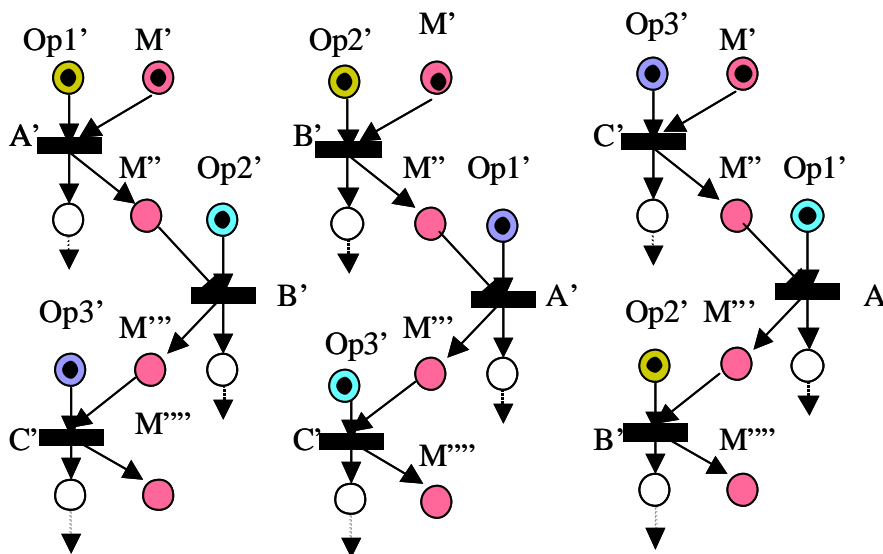


Figure C-19 : Réseaux de dépliage

Déf. Un Suf d'une ressource partagée est obtenu à partir du dépliage du BUC. Il représente une séquence d'accessibilité d'un cycle de fonctionnement de la ressource partagée.

En utilisant le théorème du dépliage du réseau de Petri, sur l'exemple de la Figure C-15, nous pouvons obtenir six dépliages (dont 3 représentés Figure C-20) (Lee, et al., 2001b). On peut voir ci-après trois séquences de tirs accessibles du BUC :

- Suf₁ : $t_1' \rightarrow t_3' \rightarrow t_5'$
- Suf₂ : $t_3' \rightarrow t_5' \rightarrow t_1'$

- Suf₃ : t₅' ->t₃'->t₁'

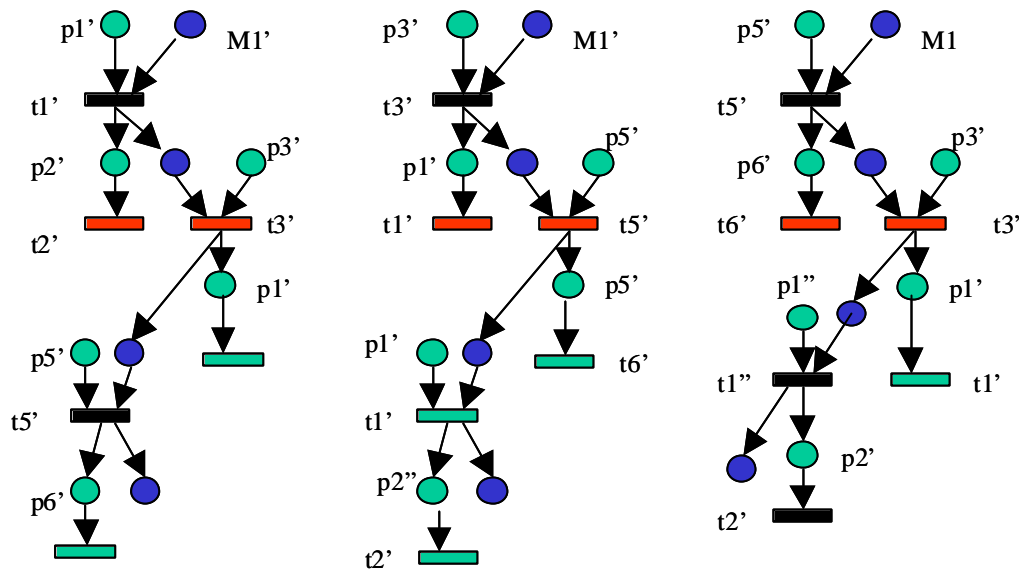


Figure C-20 : Séquences obtenues

Le dépliage d'un BUC donne lieu à plusieurs séquences (Suf). Ainsi, la recherche de la meilleure solution possible revient à étudier les différentes séquences ce qui revient à faire des permutations sur les opérations effectuées par la ressource partagée. A chaque séquence, nous associons la fonction $F(\text{Suf})$, correspondant au temps total de fabrication du Suf (temps nécessaire pour passer du marquage initial au marquage objectif). Afin d'ordonner les différentes machines, nous classons les différents BUC (représentant les différentes machines). Pour cela, nous définissons le degré de ressource partagée $d(M_k)$ (Lee, et al., 2001c) :

$$d(M_k) = \frac{\varphi(M_k)}{\gamma(M_k)}$$

Où $\varphi(M_k)$ est la durée opératoire de la machine k (charge de la machine durant un cycle) et $\gamma(M_k)$ le nombre d'opérations. $d(M_k)$ est ainsi la charge moyenne d'une machine par opération. Ainsi, On privilégie la machine qui a le plus grand nombre d'opérations à réaliser (transitions). A nombre d'opérations égal, on privilégie la machine qui a le plus grand degré.

Algorithme (Lee, Korbaa, 2004 ; Lee, 2002)

Entrée : Les BUC, Sortie: ordonnancement

Etape 1 : Choix du premier BUC

- (1) Ranger les BUC par ordre de priorité
- (2) Choisir le premier BUC
- (3) Déplier les séquences du BUC
- (4) Sélectionner le meilleur résultat après avoir comparé toutes les permutations des différents dépliages dans le BUC

Etape 2 : combinaison avec les autres BUC

- (1) Déplier le second BUC par l'ordre de priorité
- (2) Permuter les séquences du BUC
- (3) déterminer la meilleure permutation
- (4) combiner les séquences obtenues
- (5) Répéter étapes 1 à 4 jusqu'au BUC final

Ainsi, parmi toutes les solutions, nous gardons celles qui nécessitent le minimum d'en-cours. Par conséquent, cette procédure donne toutes les solutions équivalentes (et non pas une seule comme c'est le cas des autres algorithmes). Quant au temps de calcul, même si l'on peut constater, sur la Figure C-21, des produits « inquiétants » de factorielles, il ne faut pas oublier que ces factorielles correspondent à des nombres d'opérations par machine très réduits. De plus, le critère de classement des BUC est choisi de façon à ce que le nombre d'opérations soit décroissant lors de la procédure. Pour résumer, le classement des BUC permet de s'intéresser en priorité aux plus combinatoires pour permettre d'avoir au cours du calcul, un nombre de solutions en cours croissant et un nombre de possibilités dans les BUC restants décroissant.

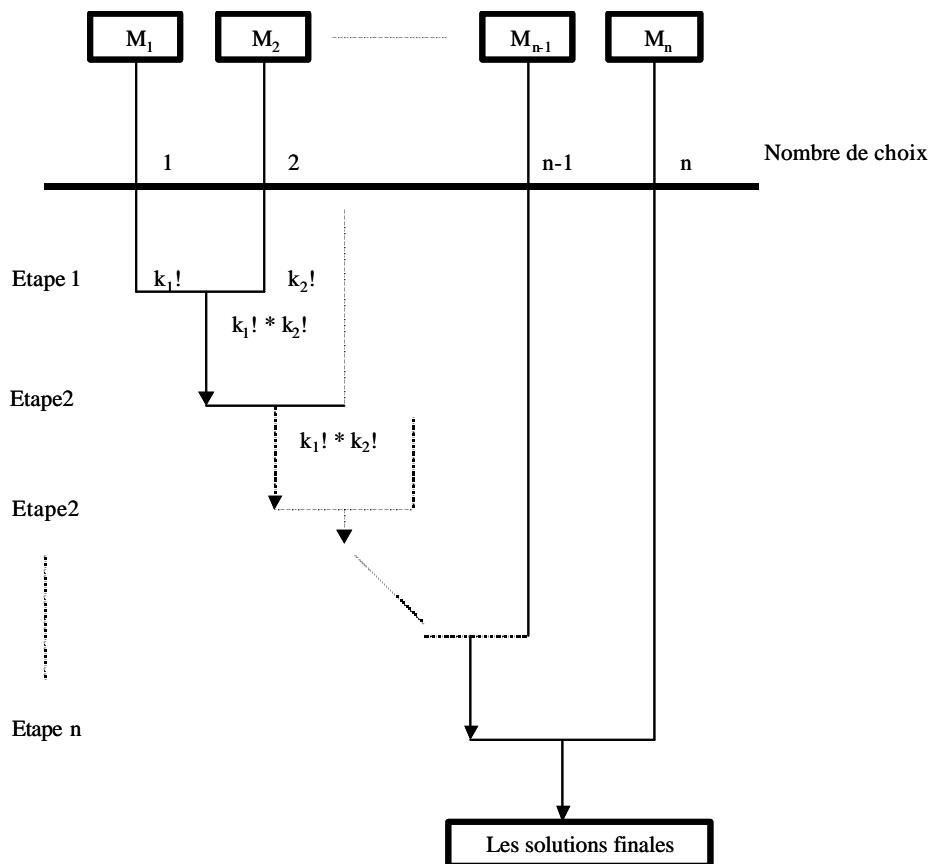


Figure C-21 : Procédure d'ordonnement

De plus, cette approche est basée sur les machines ce qui permet de garantir d'emblée la satisfaction du temps de cycle minimal. Expérimentalement, cet algorithme s'est avéré meilleur (qualité du résultat) que celui de (Valet, 1994) et moins performant que (Korbaa, 1998). En ce qui concerne le temps de calcul, il est particulièrement faible : de l'ordre de quelques minutes pour les cas étudiés les plus complexes.

b. Collaborations et Benchmarks

En complément de ces développements évoqués précédemment, j'ai cherché à mettre en place des collaborations avec d'autres collègues s'intéressant à ce type de problème pouvant contribuer à des solutions originales. Le but recherché est de confronter les approches et de mettre en place, à terme, des benchmarks d'ordonnements cycliques. La première de ces collaborations fut avec l'équipe «spécifications formelles» du LAIL (Prof. *P. Yim*). Cette étude a consisté à réaliser une comparaison entre ordonnancement cyclique et acyclique. Le but n'était pas de déterminer le meilleur car ils sont prédestinés à des domaines et des cas différents (grande production pour le premier et petite demande pour le second) mais plutôt de saisir à quel moment l'ordonnement acyclique devient trop lourd et combinatoire et à quel moment l'ordonnement cyclique peut s'avérer efficace, cf. (Korbaa, Benasser, Yim, 2003). L'algorithme d'ordonnement cyclique utilisé est (Korbaa, et al., 2002) alors que l'ordonnement acyclique utilise la programmation logique sous contraintes (Benasser, 2000) et les réseaux de Petri. Cette étude a également permis de mettre en valeur l'intérêt de l'optimisation des régimes transitoires qui permettent d'obtenir des résultats très compétitifs (parfois même meilleurs) par rapport à l'ordonnement acyclique même pour des demandes de petite taille.

La seconde collaboration a été initiée lorsque nous avons suivi et évalué les travaux de thèse de *O. Fournier* (Université de la Réunion). La méthode d'ordonnement cyclique proposée (Fournier, 2002) s'appuie sur la simulation et traite des gammes opératoires graphiquement non linéaires (assemblage, désassemblage). Les contraintes de la gamme initiale sont dégradées, puis les conflits d'affectation sur la gamme dégradée sont arbitrés suivant le principe des colonies de fourmis. L'optimisation de l'ordonnement est effectuée sur le critère du temps total et minimal d'exécution. Les contraintes initialement dégradées sont restaurées sur le résultat de simulation. Finalement, une évaluation de l'en-cours minimal (Fournier, et al., 2003) adaptée aux traitements des gammes graphiquement non linéaires permet de définir l'ensemble minimal de tâches qui autorise un fonctionnement cyclique et autonome.

Enfin, la coopération avec l'équipe du Prof. *G. Goncalves* de l'université de l'Artois, initiée dans le cadre du projet MOST¹ du programme TACT² et poursuivie par la suite entre les deux laboratoires, a permis de confronter deux approches d'ordonnement cyclique : heuristique dédiée (Korbaa, et al., 2002) et méta-heuristique basée sur les algorithmes génétiques (Cavory, 1999). De plus, elle a permis la mise en place d'un nouvel algorithme génétique pour l'ordonnement cyclique de meilleure qualité (meilleure optimisation de l'en-cours) et prenant en compte le chevauchement des cycles (Hsu, et al., 2003). Des travaux plus récents ont permis la détermination d'une formulation mathématique du problème d'ordonnement cyclique qui a été déclinée en un problème de programmation linéaire en nombres entiers.

4. Régimes transitoires

a. Contexte

Comme énoncé précédemment, l'étude des régimes transitoires s'est imposée d'elle-même étant donné le contexte de production flexible manufacturière (petite et moyenne séries) et la volonté de

¹ MOdélisation des Systèmes de Transport

² Technologies Avancée dans le domaine de la Communication et des Transports

rendre l'ordonnancement cyclique performant et concurrentiel même pour de petites productions. L'étude des régimes transitoires a été initiée lors de ma thèse (Korbaa, 1998). Parmi les études qui se sont intéressées aux régimes transitoires, on trouve les transitoires associés à la commande cyclique d'un flow-shop, cf. (Erschler, 1982) et la mise en régime d'ordonnements k-cycliques, cf. (Munier, 1991 ; Hanen, 1994). Ce dernier travail de recherche a consisté à conserver la même résolution temporelle que celle du régime permanent : duplication des opérations relevant du régime permanent durant la phase transitoire, puis à prendre en compte des contraintes de précédence dans les gammes opératoires permettant d'éliminer les opérations inutiles. De même, le transitoire permettant d'enchaîner deux régimes permanents, dans le cas de fabrication *mono-produit* (un seul produit à la fois), a été étudié par (Baptiste, et al., 1996) pour le *Hoist Scheduling Problem* (HSP). La résolution a été effectuée par une technique de programmation logique sous contraintes (PLC).

L'étude des régimes transitoires, a été décomposée en trois classes qui correspondent à trois types de régimes différents :

- Le régime transitoire de lancement de la production à partir d'un système initialement à l'arrêt et vide, appelé pré-production ;
- Le régime transitoire de fin de production qui se charge de vider le système et d'arrêter la production, appelé post-production ;
- Le régime transitoire se situant entre deux régimes permanents successifs : il gère la fin de la première production et, en même temps, le début de la suivante. Il est appelé inter-productions (entrelacement de deux régimes transitoires de fin et de lancement).

Durant cette étude (Korbaa, 1998), je me suis placé dans le cas d'une production isolée (sans production amont ni aval). Ainsi, je me suis intéressé aux deux premiers types de transitoire en supposant le système évoluer selon le schéma suivant :

- Système vide
- Transitoire de pré-production
- Régime permanent
- Transitoire de post-production
- Système vide

Nous supposons, sans perte de généralité, que toutes les dates caractérisant la fenêtre temporelle (durées et dates de début des gammes) sont entières. Ainsi, le régime permanent est représenté par une fenêtre temporelle ayant pour origine la date zéro. Ce régime ne possède donc pas a priori de date de début imposée. Cette Date de Début du Régime Permanent (notée *DDRP* et appartenant à l'intervalle $[0, CT[$) est donc une variable du problème. Le critère d'optimisation choisi est bien évidemment la minimisation du temps total de production.

L'hypothèse principale utilisée consiste à supposer que, durant le transitoire de pré-production, aucune pièce n'est terminée. Le régime transitoire de pré-production ne contient donc aucune réalisation d'aucune gamme. Cette hypothèse permet tout d'abord de considérer que la Date de Début du Régime Permanent est effectivement comprise entre zéro et *CT* afin d'éviter de transformer l'étude du transitoire en un problème général d'ordonnement. En effet, si nous tolérions la possibilité de produire, une ou plusieurs pièces, pendant le régime de pré-production

nous pourrions alors à la limite envisager de réaliser toute la production durant le régime de pré-production et par conséquent transformer le problème de minimisation du makespan en un problème de ré-ordonnancement acyclique. En conclusion, si, en changeant la date de début du régime permanent, nous observons qu'une pièce de l'une des gammes se trouve entièrement réalisée pendant le régime de pré-production, cette gamme est alors différée en fin de production.

b. Production isolée

Soient :

- $DDGL(i,DDRP) \in [0, CT]$, la Date de Début de la Gamme Linéaire i dans une fenêtre temporelle ayant pour origine la date $DDRP$,
- $DFGL(i,DDRP) \in]0, CT]$, la Date de Fin de la Gamme Linéaire i dans une fenêtre temporelle ayant pour origine la date $DDRP$.

Une étude approfondie des différentes fonctions (durée des deux transitoires, durée du permanent, makespan), cf. (Korbaa, Gentina, 2000b), a permis de limiter la combinatoire du problème en étudiant un nombre limité de dates $DDRP$ tout en garantissant l'optimalité de la solution. En effet, une étude mathématique concernant la monotonie de ces fonctions ainsi que l'établissement de bornes (min. et max.) fines, a permis de révéler plusieurs résultats concluants dont les deux suivants.

Lemme : Entre deux dates de fin de gamme successives le makespan optimal est décroissant.

Proposition : \exists une gamme i / le makespan optimal est atteint pour $DDRP = DFGL(i,0)-1$

A partir de cette proposition, il a été facile de déduire qu'en étudiant l'ensemble $\{DFGL(i,0)-1 / i \in [1, \text{card}(\text{horizon de production cyclique})]\}$, nous sommes certains d'atteindre le makespan optimal (correspondant aux hypothèses de l'étude bien entendu). Par conséquent cette étude a permis de réduire le nombre de cas à étudier de CT (nombre de dates entières dans un cycle) au nombre de pièces à produire par cycle (éventuellement moins si des pièces sortent en même temps). Rappelons que, pour chaque cas, il faut effectuer deux ordonnancements complémentaires (un pour le post et un pour le pré).

D'où la mise en place d'une procédure d'optimisation. Les données dont nous avons besoin pour cette procédure sont les suivantes : $n_{\text{pmax}}(t)$, X , CT , nb_palettes (nombre de palettes utilisées par le système), Gamme (i) et $\text{NO}(\text{Gamme}(i))$ (nombre d'opérations de la gamme i). De même, pour toute opération Op , nous définissons :

- X : nombre de répétitions du cycle
- $n_{\text{pmax}}(d)$: le nombre max. de palettes utilisées par toutes les gammes à la date d

L'énoncé de la procédure principale ainsi proposée (Korbaa, Gentina, 2000b) est donc le suivant :

$$M = \infty$$

$$\text{Pour } d \in \{DFGL(i,0)-1 / \forall i \in \{1, \text{Card}(\text{horizon cyclique de production})\}\}$$

Définir une fenêtre $F=[d, d+CT]$ du régime permanent
 Dupliquer $F (X + n_{pmax}(d))$ fois
 Eliminer les opérations inutiles dans le post et le pré
 Optimiser Makespan (M_{aux})
 Si $M_{aux} < M$
 Alors
 Mémoriser ordonnancement
 $M = M_{aux}$
 Fin Si
 Fin pour

L'élimination des opérations en pré et post est assez facile à mettre en œuvre (Korbaa, Gentina, 2000b). En ce qui concerne l'optimisation du makespan proprement dit, j'ai opté pour l'abstraction logique des réseaux de Petri et la programmation logique par contraintes pour la simplicité d'utilisation et la rapidité de résolution (Korbaa, Yim, Gentina, 2000). Cette technique, développée au LAIL (Benasser, 2000), permet d'éviter l'explosion combinatoire due au développement de l'arbre de marquage en décrivant ce dernier grâce à des vecteurs de variables, des équations d'évolution et des contraintes. Ainsi, l'arbre de marquage devient en quelque sorte «linéaire». Il suffit alors de renseigner le marquage initial et le marquage final pour qu'un solveur de contraintes cherche à instancier les variables permettant de satisfaire les contraintes pour les séquences de tir solution.

c. *Transitoire inter-productions*

Si l'étude précédente a permis de résoudre le problème d'une production isolée, le problème de passage d'une production cyclique à une autre s'avère beaucoup plus complexe d'autant plus que la planification est chargée de découper la demande initiale en plusieurs régimes permanents. Ce problème est l'objectif que j'ai fixé pour la thèse de *O. Belkahla Driss*. Les données dont nous disposons sont donc les régimes permanents et leurs ordonnancements cycliques optimisés. Avant de s'intéresser à l'optimisation des régimes transitoires, il faut tout d'abord déterminer la meilleure séquence de régimes permanents. En effet, si la planification décompose une production en RP1, RP2 et RP3, ceci ne renseigne aucunement sur l'ordre de réalisation de ces séquences. De plus, il est évident qu'en changeant la séquence, la durée du transitoire change et par la même occasion la durée du temps total de production. Une fois cette séquence déterminée, il faut ordonnancer les différents régimes transitoires afin de gérer la fin de chaque production et la montée en régime de la suivante, cf. Figure C-22.

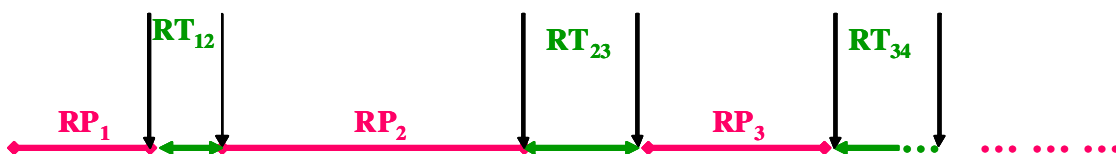


Figure C-22 : Positionnement des transitoires inter-productions

Cette procédure est très combinatoire. En effet, si on prend toujours le même cas des $N=3$ productions RP1, RP2 et RP3, nous avons $N! = 3! = 6$ séquences possibles des régimes permanents :

- RP1 - RP2 - RP3
- RP1 - RP3 - RP2
- RP2 - RP1 - RP3
- RP2 - RP3 - RP1
- RP3 - RP1 - RP2
- RP3 - RP2 - RP1

Pour chaque séquence, il faut optimiser $N-1$ transitoires inter-productions. Soit $N \times (N-1) = 12$ ordonnancements de régimes transitoires inter-productions à réaliser. On voit donc clairement que le problème est très fortement combinatoire. En considérant les différentes séquences, on remarque qu'il y a plusieurs successions communes entre les différentes séquences. Plus précisément, chaque succession $RP_i - RP_j / i \neq j$ se trouve dans $N!/N = (N-1)!$ séquences. Par exemple, pour RP1 - RP2 :

- **RP1 - RP2** - RP3
- RP1 - RP3 - RP2
- RP2 - RP1 - RP3
- RP2 - RP3 - RP1
- RP3 - **RP1 - RP2**
- RP3 - RP2 - RP1

Nous en avons donc conclu qu'il était inutile refaire le calcul à chaque séquence, cf. (Belkahla, et al., 2003). Nous avons de ce fait opté pour l'optimisation de toutes les successions possibles $RP_i - RP_j / i \neq j$. Ainsi, nous avons $N \times (N-1)$ transitoires inter-productions à optimiser. Il ne reste plus qu'à calculer la durée des $N!$ séquences possibles. Avant de poursuivre la résolution, quelques remarques, sur ces factorielles, s'imposent. En effet, si, une fois de plus, nous retrouvons des valeurs en factorielles, il ne faut pas oublier que la valeur de N (nombre de régimes permanents) est inférieure ou égale au nombre de types de pièces à produire (cf. D.III.1). Cette valeur est donc réduite et la factorielle ne peut être un facteur de complexité insurmontable. De plus, grâce à la remarque précédente, nous avons séparé les opérations complexes de celles qui sont combinatoires. En effet, nous avons identifié $N \times (N-1)$ transitoires inter-productions à optimiser ce qui est le nombre minimal. Quant au calcul de la durée de $N!$ séquences, il ne s'agit que de réaliser des sommes des différentes durées précédemment optimisées. Afin de résoudre ce problème, nous avons opté pour les systèmes Multi-Agent pour :

- Accélérer localement l'optimisation des régimes transitoires inter-productions : durée du régime transitoire
- Accélérer globalement la recherche de la solution optimale : durée du temps total de production

En fait, l'utilisation du terme Multi-agent est quelque peu usurpée dans le sens. Ainsi, 3 types d'agents sont utilisés, cf. Figure C-23 :

- Agent Interface : interface homme machine
- Agent PrePost : calcul des transitoires de pré-production et post-production
- Agent ATI : agent transitoire inter-productions

L'agent Interface est celui qui en interaction avec l'utilisateur est dédié à la saisie des données et l'affichage des résultats. Il dispose au départ des régimes permanents optimisés (connaissances statiques) et cherche à avoir la meilleure séquence des productions cycliques ainsi que sa durée (connaissances dynamiques). Ses accointances¹ sont tous les agents ATI ainsi que les agents PrePost.

Les agents PrePost sont chargés de calculer les régimes transitoires pré-production et post-production. En effet, même si on considère le cas de plusieurs régimes permanents, il n'en demeure pas moins qu'il faut lancer la première production cyclique (pré-production) et finir la dernière (post-production). Ainsi, les agents PrePost sont au nombre de N et chaque agent PrePost_i est chargé d'optimiser les deux transitoires sous l'hypothèse de production isolée (cf. D.III.4.b). Ces agents utilisent donc l'approche de résolution présentée précédemment, cf. (Korbaa, Yim, Gentina, 2000). Les connaissances statiques de chaque agent se résument à l'ordonnancement du régime permanent correspondant alors que les connaissances dynamiques sont les deux transitoires recherchés. Ses accointances sont l'agent interface ainsi que les agents ATI nécessaires en plus des agents de pré-production et de post-production.

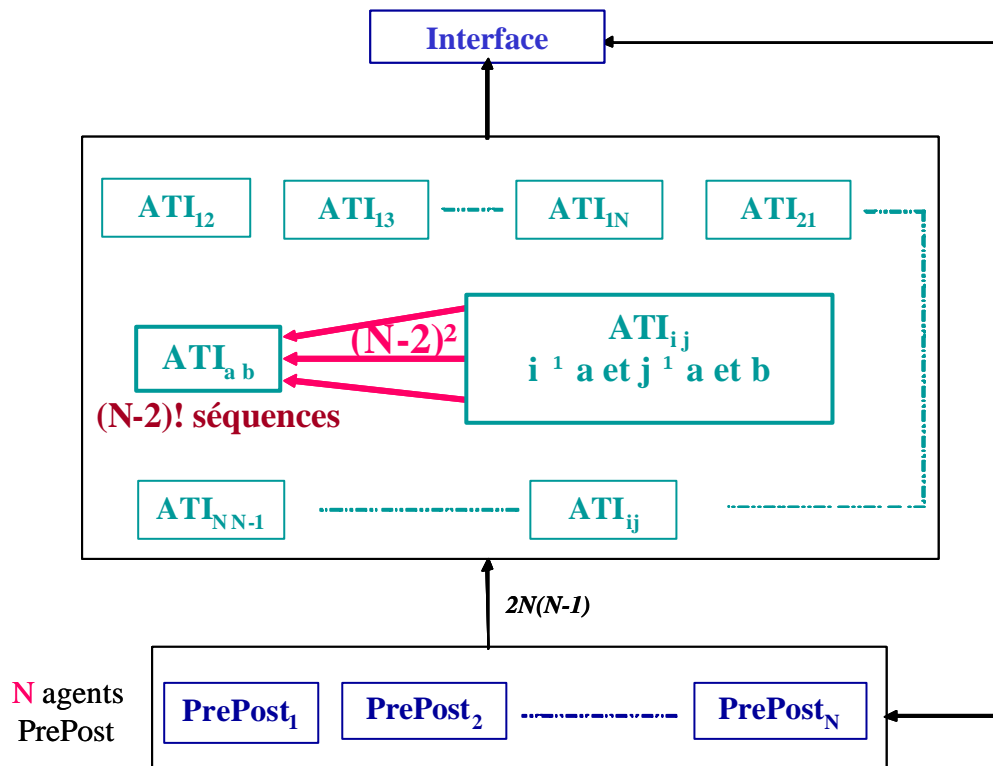


Figure C-23 : Architecture Multi-Agent

¹ Agent avec lesquels il communique

Enfin, les agents ATI sont chargés du calcul des transitoires inter-productions. Afin de ne pas en créer trop (surcharger la mémoire) ni pas assez (peu d'agents avec beaucoup d'opérations à effectuer), nous avons opté pour une solution intermédiaire. Ainsi, chaque agent ATI_{ij} est chargé de déterminer toutes les séquences commençant par le régime permanent i suivi de j . par conséquent chaque agent ATI_{ij} calcule le transitoire inter-productions entre RP_i et RP_j puis détermine toutes les séquences $RP_i - RP_j - \dots$ ¹ et demande aux autres ATI les transitoires inter-productions dont il a besoin et aux agents PrePost les transitoires pré-production ($PrePost_i$) et post-production ($PrePost_k / k \neq i$ et $k \neq j$). Nous avons donc $N*(N-1)$ agents ATI qui dialoguent avec un agent interface, $(N-1)$ agents PrePost et $(N-2)^2$ agents ATI.

L'architecture du système Multi-Agent ainsi construite (Belkahla, et al., 2003) porte le nom de **MATIS** : « Multi-Agent Model for Transient Inter-Production Scheduling », cf. Figure C-23. A titre d'exemple, prenons le cas de $N = 4$ régimes permanents : RP_1, RP_2, RP_3, RP_4 . Le système contient toujours un seul agent interface et $N = 4$ agents PrePost. Les agents ATI sont au nombre de $N*(N-1) = 12$. Si on s'intéresse de près à un de ces agents : ATI_{12} , cet agent optimise le transitoire permettant de finir RP_1 pour passer à RP_2 . De plus, il doit déterminer le temps total de production de toutes les séquences commençant par $RP_1 - RP_2$. Ces séquences sont au nombre de $(N-2)! = 2$:

- $RP_1 - RP_2 - RP_3 - RP_4$: pour cela, il doit recevoir le transitoire de pré-production de $PrePost_1$, le post-production de $PrePost_4$ et les transitoires inter-productions de ATI_{23} et ATI_{34} .
- $RP_1 - RP_2 - RP_4 - RP_3$: pour cela, il doit recevoir le transitoire de pré-production de $PrePost_1$ ², le post-production de $PrePost_3$ et les transitoires inter-productions de ATI_{24} et ATI_{43} .

L'optimisation du transitoire inter-productions, proprement dit (ordonnancement au sein de l'agent ATI), est réalisée grâce à l'abstraction logique sous contraintes et est en cours de réalisation dans le cadre de la thèse de *O. Belkahla* que je codirige.

5. Surveillance et diagnostic

Dans (Ly, et al., 2000) une approche de surveillance en ligne indirecte, basée sur l'analyse des flux de production dans un contexte de conduite réactive, a été proposée. Afin d'avoir au fil du temps des références de flux permettant de comparer la production réelle à celle prévue, la commande cyclique, par rapport aux produits, a été préférée. Bien qu'innovante sur de nombreux aspects, l'approche proposée présente des limites, notamment du point de vue réactivité. En effet, les périodicités nécessaires pour obtenir un comportement cyclique étaient relativement importantes (plusieurs centaines d'unités de temps). Il semble donc plus intéressant de se situer dans le cadre d'une conduite cyclique (par rapport aux machines) pour envisager ce type de surveillance par les flux. Etant donné l'intérêt que *A. Toguyéni* et moi-même portons à ce sujet, nous avons décidé de mettre en commun nos domaines de compétence (ordonnancement cyclique et surveillance/supervision) pour étudier ce problème, cf. (Toguyeni, Korbaa, 2001). Notre objectif est donc de surveiller les défaillances des ressources de production par l'analyse des perturbations qu'elles engendrent sur les produits.

¹ Ces séquences sont au nombre de $(N-2)!$

² Ce transitoire est déjà connu puisque reçu lors du calcul de la première séquence

Les ordonnancements 1-cycliques ont pour objectif d'optimiser le flux de production. Lorsque les hypothèses utilisées pour établir un ordonnancement donné restent vraies (régime permanent, durée opératoires constantes ...) nous avons en sortie du système, un flux maximal de produits. Notons, tout de suite, que la réciproque est fautive. Le flux en sortie peut être maximal alors que certaines de nos hypothèses ne sont plus vérifiées. Nous reviendrons par la suite sur cette remarque ... Ces constats nous amènent naturellement à croire que la surveillance du flux de production est d'autant plus légitime dans le contexte de cette étude.

a. Contexte

Afin d'illustrer cette étude, soit l'exemple suivant, cf. (Valentin, 1994 ; Korbaa, et al., 2000). Le système est composé de trois machines $\{M_i / i \in \{1, \dots, 3\}\}$ utilisées pour réaliser 2 types de pièces T1 (en 3 exemplaires) et T2 (en 2 exemplaires), cf. Figure C-24 :

- T1 : OP₁₁ (M₃, 2 u.t.), OP₁₂ (M₁, 3 u.t.), OP₁₃ (M₂, 2 u.t.) ;
- T2 : OP₂₁ (M₁, 1 u.t.), OP₂₂ (M₃, 2 u.t.).

Regardons « naïvement » le taux d'occupation des en-cours : les trois exemplaires de T1 ont un ratio d'utilisation de 64% alors que les ratios de T2 sont de 27%. On pourrait alors croire que l'on dispose de marges importantes pour assurer cette production. En fait, il y a moins de marge dans le système qu'il n'y paraît. La preuve vient du taux d'occupation des machines : M1 est utilisée à 100% du temps, M2 à 54% du temps et M3 à 91%. En réalité, il y a encore moins de marge dans ce système. En effet, en étudiant soit le diagramme de Gantt soit le graphe d'événements associé, nous pouvons obtenir la marge réelle de chaque opération, cf. (Khansa, et al., 1996).

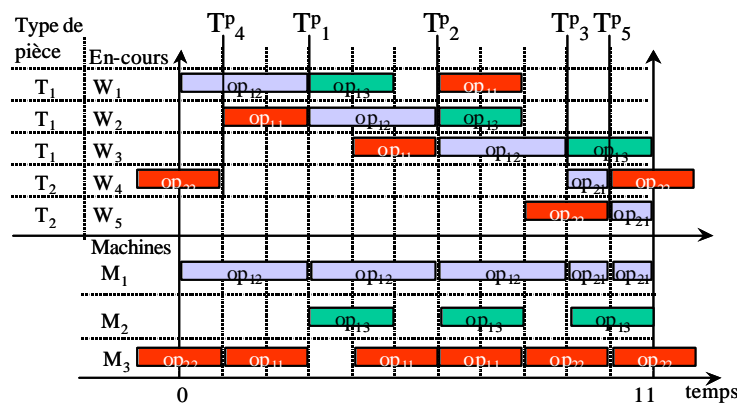


Figure C-24 : Régime permanent cyclique

Chaque opération possède deux opérations directement en aval (deux successeurs) et deux opérations en amont (deux prédécesseurs). En effet, chaque opération est suivie par une autre opération dans la même gamme de fabrication (la dernière opération est également suivie par la première étant donné le caractère cyclique du problème). Cette même opération est également suivie par une autre opération sur la même machine. Il en est de même pour les opérations en amont. Le graphe potentiel étapes (PERT) de la Figure C-25 résume à la fois les dépendances entre les différentes opérations ainsi que leurs dates de début au plus tôt et de début au plus tard. Le choix du PERT, en lieu et place d'autres graphes ou diagrammes ou encore des expressions mathématiques, cf. (Khansa, et al., 1996), est uniquement motivé par sa simplicité. En effet, l'intérêt du PERT

« cyclique » présenté est qu'il est fidèle au graphe d'événements (sans pour autant être équivalent ni pouvant représenter la dynamique du système car ce n'est ni le propos ni le but) tout en intégrant les informations du Gantt (à savoir les dates de tir de chaque opération ainsi que les marges).

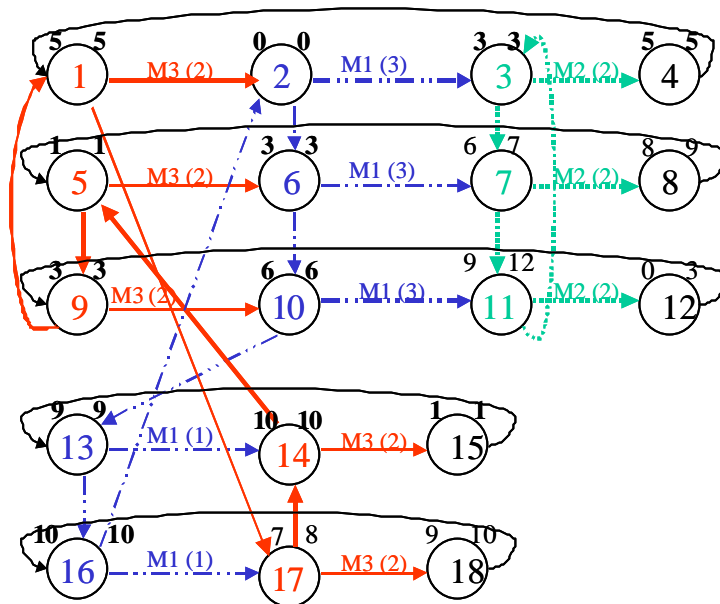


Figure C-25 : Pert cyclique

Pour chaque machine, nous reportons les séquences d'opérations sur le PERT ainsi que la date de début au plus tôt prélevée directement à partir du Gantt. En ce qui concerne les dates de début au plus tard, elles sont calculées à partir des dates de début au plus tôt des deux opérations en aval ainsi que la durée de l'opération étudiée. Ainsi, l'observation des marges réelles¹ des différentes opérations nous indique que la machine M1 ne possède aucune marge (ce qui est rassurant étant donné qu'elle est critique). En fait, seules 3 opérations possèdent de la marge. Toutes les autres (en gras sur la Figure C-25) sont contraintes soit par une opération de la même gamme soit par une opération de la même machine.).

b. Hypothèses

Nous supposons **qu'une diminution des performances est due à une augmentation des durées opératoires** (A1). Cette augmentation peut résulter soit de défaillances cataleptiques (la durée de l'opération tend alors vers l'infini) soit de défaillances par dégradation (Villemeur, 1988). Nous supposons que **les défaillances sont cohérentes et récurrentes** (A2) c'est-à-dire que la sollicitation d'une opération défaillante peut se traduire par une perturbation de la production qui ne peut que s'amplifier au fil du temps. Nous proposons donc de développer une **surveillance indirecte par l'analyse des flux des produits en sortie d'un SFPM soumis à une conduite 1-cyclique** (A3). Le positionnement en sortie est contraignant dans la mesure où nous percevons les défaillances en étant en dehors du système. En revanche, le fait d'être en sortie ne nécessite pas une instrumentation particulière du système. Nous favorisons ainsi sa fiabilité ... Aux hypothèses précédentes, nous en ajoutons deux supplémentaires qui seront exploitées pour le diagnostic :).

¹ Une opération est dite ayant de la marge, si sa date de début au plus tôt est différente de sa date de début au plus tard.

A4 : Nous nous plaçons dans un contexte de **défaillance unique**. Cela signifie que nous supposons que le système de surveillance est suffisamment rapide et efficace pour détecter et identifier une défaillance avant que n'en survienne en addition une seconde. Nous reviendrons sur cette hypothèse après la présentation du diagnostic.

A5 : Sur une machine multi-opérations, **une seule opération à la fois est défaillante**. L'objectif de cette hypothèse est de généraliser le problème en s'intéressant au contexte de traitement le plus contraignant. Bien entendu, dans la réalité, plusieurs opérations d'une même ressource peuvent être défaillantes en raison d'une cause première commune ...

c. Détection

Pour détecter les perturbations du flux de production engendrées par les défaillances, il suffit à une date donnée, de comparer le flux mesuré, à la référence maximale fixée comme objectif de conduite. Toute baisse du flux est alors révélatrice de l'occurrence d'une défaillance dans le système. En effet, une baisse de flux s'explique par une diminution des performances d'une ressource. D'un point de vue pratique, une baisse de performance d'une ressource de production est assimilable à une augmentation de ses durées opératoires. Malheureusement, du fait que certaines opérations possèdent une marge, certaines ressources peuvent connaître des défaillances par dégradation¹ qui ne soient pas perceptibles par des dérives du flux. Considérons l'exemple donné par le diagramme de Gantt de la Figure C-24. Supposons que la durée opératoire de op_{13} de la pièce W2 est passée de 2 u.t. à 2,2 u.t.. Si nous faisons abstraction de l'hypothèse de panne récurrente, cette défaillance se traduit par la sortie des pièces W2 à 8,2 u.t. (au lieu de 8 u.t.) relativement au début du cycle. La fin de cycle étant à 11 u.t. et la marge de gamme de W2 étant de 1 u.t., cette augmentation de la durée opératoire ne modifie pas le flux des pièces en sortie en fin de cycle ($F(11)=5/11$). Un autre inconvénient de l'approche par le flux concerne la réactivité. Le flux est mesuré à une date donnée. Par exemple, en fin de cycle, dans notre exemple. De ce fait, même si nous avons une défaillance cataleptique de OP_{13} rendant impossible la sortie de la pièce W_2 à la date 8 (modulo CT), nous ne le détectons qu'à la date 11 (modulo CT).

Définition 1 : Un **chemin** (du PERT) est dit **critique** si toutes les opérations qu'il contient (nœuds traversés) ne possèdent pas de marge.

Une autre "idée apparemment de bon sens" concerne la surveillance de la ressource menante du système (ressource la plus lente qui impose donc son flux aux autres). En effet, les ordonnancements 1-cycliques se caractérisent également par l'existence d'au moins une machine menante et par l'existence de circuits critiques. Tout allongement d'une durée opératoire d'une ressource menante se traduit, à nombre de pièces constant, par une augmentation du temps de cycle. Cela induit une baisse du flux de production. Cela est également vrai si le retard d'une opération réalisée par une ressource tiers induit un retard d'exécution d'une opération par la machine menante. On pourrait donc croire que la surveillance de la machine menante est suffisante pour détecter toute défaillance dans le système. L'exemple de l'opération OP_{13} réalisée par la machine M2 sur la pièce W2 est un bon contre-exemple. Cette opération possédant une marge de gamme de 1 u.t. (cf. le PERT de la Figure C-25), une défaillance par dégradation inférieure à cette marge n'a aucune influence sur le

¹ Dans le cas des défaillances complètes, sans réaction, la durée opératoire tend vers l'infini. Il y a donc consommation de toute marge et baisse du flux de production.

fonctionnement de la machine critique. Définissons d'abord la notion d'opération critique dans notre contexte d'étude.

Définition 2: une **opération** est dite **critique pour le flux** si elle est reliée par un chemin critique vers une opération d'une ressource menante.

Définition 3: une **opération** est dite **critique pour la sortie** si elle est reliée par un chemin critique vers la dernière opération d'une pièce.

Définition 4 : une **opération** est dite **critique** si elle est critique pour le flux ou pour la sortie.

Nous proposition consiste à observer le système à la **date de sortie de chaque pièce**. Bien entendu, avec un tel dispositif, toutes les défaillances ne sont pas forcément observables ni directement détectables. Ainsi, nous allons proposer un ensemble de règles sous forme de condition nécessaires ou suffisantes décrivant la détectabilité de défaillances.

Proposition : Toute défaillance d'une opération critique est détectable à la sortie.

Preuve, cf. (Toguyeni, Korbaa, 2001).

Lemme 1 : Condition suffisante pour détecter toute défaillance : Toute défaillance est détectable si toutes les opérations réalisées par les ressources du système de production sont critiques.

Ce lemme est une conséquence directe de la proposition qui précède. Il correspond à un contexte idéal pour la surveillance d'un système de production. Il peut donc servir de critère supplémentaire pour l'ordonnancement d'une production. Dans la pratique, nous devons souvent adapter la surveillance à un ordonnancement qui ne tient pas compte des contraintes de la surveillance.

Proposition : Toute défaillance d'une opération non critique, ayant une durée supérieure à sa marge et la rendant critique est détectable à la sortie.

Preuve, cf. (Toguyeni, Korbaa, 2001).

d. Diagnostic

Dans le cadre de cette étude, l'objectif principal du diagnostic est de déterminer l'opération dont la défaillance est la conséquence des retards des pièces observés en sortie du système. Le diagnostic est lancé par la première détection de retard de pièce au cours du cycle de production courant. Le retard ainsi détecté est un événement que nous qualifierons de symptôme initiateur. A partir du symptôme initiateur, le principe du diagnostic consiste à générer des hypothèses qui seront ensuite confirmées (resp. réfutées) par l'observation (resp. la non observation) de retards d'autres pièces en sortie, au cours du cycle courant (cycle de détection du premier symptôme) ou du cycle suivant (dans le contexte d'un ordonnancement 1-cyclique par rapport aux pièces et aux machines). La génération des hypothèses s'effectue en construisant un arbre de résolution en chaîne arrière basé sur les contraintes entre les circuits définies par l'ordonnancement. Nous distinguons trois types d'hypothèses relatives au non-respect de l'ordonnancement par une opération :

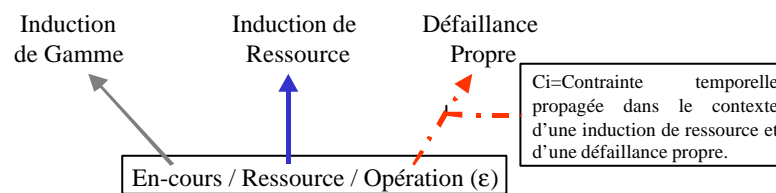
- Défaillance propre : Ce type caractérise le fait que l'opération traitée soit la cause première du symptôme initiateur détecté en sortie du système ;
- Défaillance par induction : Ce type caractérise le fait que l'opération traitée ait été décalée dans le temps par rapport à l'ordonnancement planifié. Le décalage est dû à l'appartenance de l'opération à un circuit n'ayant pas de marge résiduelle et soumise à une défaillance propre ou induite en amont de l'opération considérée. Nous distinguons les **inductions de gamme** (perturbation du flux d'un type de pièce comme W1 dans notre exemple) et les **inductions de ressource** (perturbation de la séquence d'opérations planifiées par rapport à une ressource). ;

e. Résolution

Afin d'identifier la cause première des retards observés en sortie du système de production, nous avons besoin d'un modèle de connaissance décrivant ce comportement anormal. A partir de l'ordonnancement cyclique, nous proposons la construction d'arbres de résolution. Ils sont obtenus par un chaînage mixte (chaînage arrière suivi de chaînage avant) déclenché sur détection d'un symptôme initiateur. Considérons l'exemple donné par la Figure C-24. Supposons que la pièce W3 ne sorte pas du système à la date prévue (que nous noterons T_{13}^p) mais avec un retard (noté ϵ). Conformément au principe de diagnostic nous pouvons générer trois hypothèses de défaillances :

- **H1** : L'opération OP_{13} réalisée sur la pièce W_3 par la machine M_2 est défaillante. Nous noterons ce fait par $W_3/M_2/OP_{13}$.
- **H2** : L'opération OP_{13} n'est pas défaillante, mais subit un retard ϵ induit par l'opération précédente OP_{12} de la gamme de la pièce W3.
- **H3** : L'opération OP_{13} réalisée sur W_3 est défaillante et subit un retard ϵ_1 induit par l'opération précédente OP_{13} réalisée par la machine M_2 sur la pièce W_2 .

Légende des arcs d'un arbre de résolution :



Légende des nœuds d'un arbre de résolution :

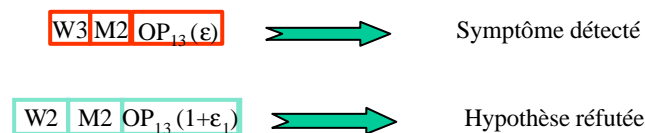


Figure C-26 : Sémantique des nœuds et arcs

Pour comprendre la construction des arbres de résolution, nous en proposons une représentation graphique dont la sémantique des nœuds et des arcs est donnée par la Figure C-26. Ainsi, chaque nœud de l'arbre modélise une hypothèse de défaillance d'une opération réalisée sur une pièce donnée (Notée "En-cours") par une ressource donnée. Entre parenthèse est donné le retard mesuré ou prévu compte tenu des phénomènes d'induction. La Figure C-27 représente un arbre d'hypothèses obtenu

par chaînage arrière à partir du symptôme initiateur $W_3/M_2/OP_{13}(\epsilon)$. Chaque nœud de l'arbre modélise une hypothèse de défaillance propre qui doit être confirmée ou réfutée.

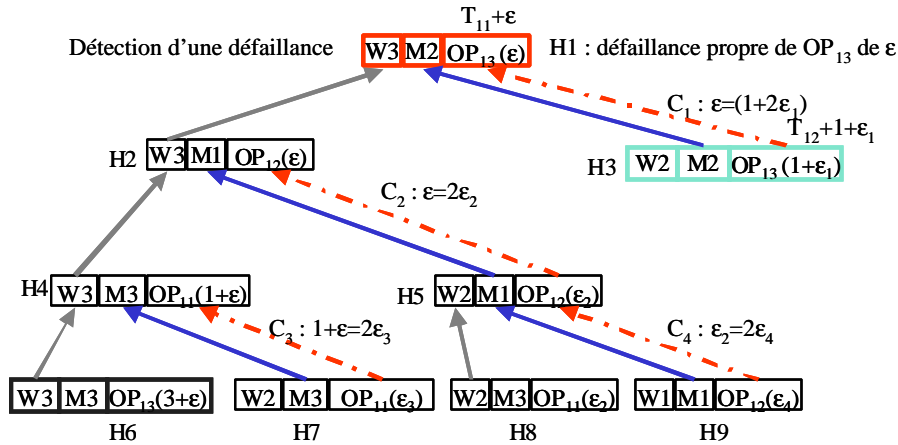


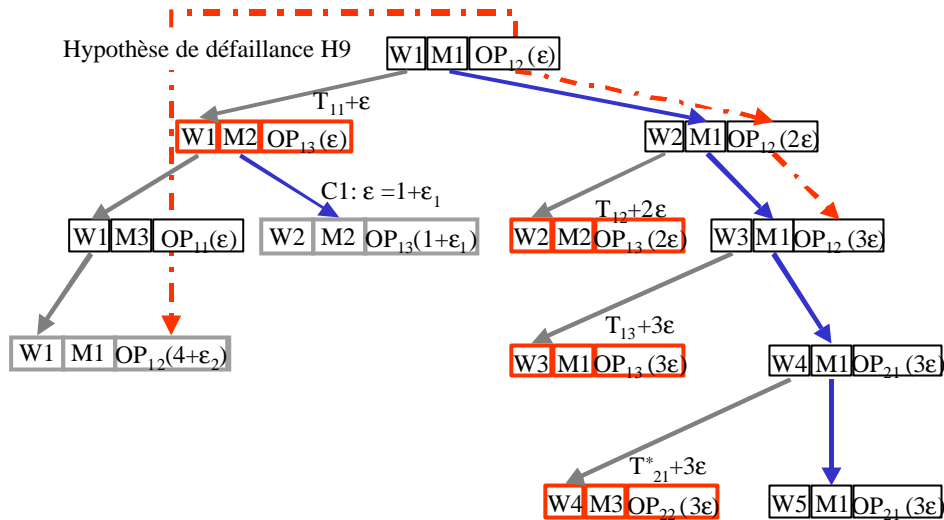
Figure C-27 : Génération d'hypothèses.

Le sens des arcs reliant ces nœuds indique le sens de propagation des phénomènes d'induction. Ainsi, le nœud racine (hypothèse H1) peut être causé par les nœuds $W_3/M_1/OP_{12}(\epsilon)$ (Hypothèse H2) et $W_2/M_2/OP_{13}(1+\epsilon_1)$ (Hypothèse H3). Si la cause du symptôme initiateur est l'hypothèse H2, alors dans ce cas nous avons uniquement une induction de gamme liée à l'absence de marge entre les opérations OP_{12} et OP_{13} réalisées sur la pièce W_3 . Par contre si la cause est H3, nous devons tenir compte à la fois de la défaillance propre de OP_{13} et de l'induction de ressource. Comme il existe une marge de 1 UT dans le circuit relatif à la ressource M_2 , cf. Figure C-25, le phénomène d'induction de $W_2/M_2/OP_{13}(1+\epsilon_1)$ sur $W_3/M_1/OP_{12}(\epsilon)$ ne peut s'expliquer que s'il y a eu consommation de la marge. Donc nous faisons l'hypothèse que OP_{13} connaît une défaillance propre de $1 + \epsilon_1$, ce qui se traduit par une induction sur $W_3/M_1/OP_{12}$ de ϵ_1 . Par conséquent, il vient que le retard de $W_3/M_1/OP_{12}(\epsilon)$ est égal à la somme du retard dû à la défaillance propre et à l'induction de ressource, i.e. $\epsilon = 1 + 2 \epsilon_1$. A partir d'un symptôme ou d'une hypothèse, nous pouvons également construire un arbre en chaînage avant. Considérons, le cas de l'hypothèse H9 de la Figure C-29.

Pour exploiter nos modèles de connaissance, nous pouvons utiliser deux mécanismes de résolution: le chaînage mixte ou l'interprétation de Signatures Temporelles Causales (STC) (Toguyeni, 1990 ; Toguyeni, 1997). Ce mécanisme consiste à coupler les phases de générations d'hypothèses en chaînage arrière et de validation d'hypothèse par le chaînage avant. La validation peut être positive (confirmation) ou négative (réfutation). La réfutation d'une hypothèse est obtenue par l'atteinte d'un retard potentiellement cause qui aurait dû être observé avant le retard symptôme.

Revenons sur l'exemple du retard de production de W_3 , détecté à la date T_{13}^P et évalué à $\epsilon = T_{13}^R - T_{13}^P$ ¹. Le mécanisme de résolution consiste à développer l'arbre des hypothèses en chaînage arrière en largeur. A chaque niveau de l'arbre on essaie de valider les hypothèses générées avant de poursuivre le développement en profondeur. Au niveau 0 nous avons l'hypothèse de défaillance propre de OP_{13} (hypothèse H1).

¹ T_{13}^P (respectivement T_{13}^R) est la date planifiée (respectivement réelle) de sortie de W_3



* Le temps T_{21} sur cette figure correspond à la sortie planifiée d'une pièce appartenant au cycle suivant

Figure C-28 : Arbres de résolution

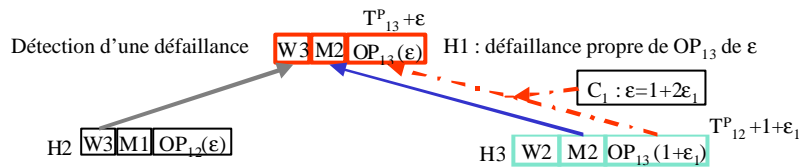


Figure C-29 : Réfutation d'une hypothèse en chaînage arrière

Compte tenu de notre contexte d'étude (pas de moyen direct d'observation des ressources), cette hypothèse n'est pas vérifiable directement. Donc nous avons généré les hypothèses H2 et H3 du niveau 1. L'hypothèse H3 est tout de suite réfutée. En effet, si elle était vérifiée, un retard aurait dû être détecté pour la pièce W2 à date T^P_{12} . Comme cette date est antérieure à T^P_{13} , $W_2/M_2/OP_{13}(\epsilon)$ aurait été le symptôme initiateur. Ce n'est pas le cas, d'où la réfutation de l'hypothèse H3. Intéressons-nous à présent à l'hypothèse H2. Nous ne pouvons pas la valider directement car l'opération est supposée non observable. Par contre, si nous admettons cette hypothèse, nous pouvons prédire toutes ses conséquences par chaînage avant (cf. Figure C-30).

Nous notons sur la Figure C-30, que l'hypothèse H2 aurait également pour conséquence l'observation d'un retard relatif à la sortie de la pièce W4 à la date T^P_{21} (modulo CT)¹. Si cette date avait été inférieure à la date T^P_{13} , et qu'aucun retard n'avait été détecté, indirectement nous aurions pu également réfuter l'hypothèse H2. Mais ce n'est pas le cas. En effet cette date étant postérieure à celle de détection du symptôme initiateur de la résolution nous pouvons juste prédire que si l'hypothèse H2 est vraie alors elle sera confirmée par l'occurrence d'un nouveau symptôme relatif à W4 à la date T^P_{21} (modulo CT). Le développement d'un arbre d'hypothèses en chaînage arrière se poursuit jusqu'à ce que l'on arrive à des hypothèses qui peuvent être réfutés à la date courante. Pour l'exemple de la Figure C-30 cela consisterait à analyser l'impact d'une défaillance de l'opération $W_2/M_1/OP_{12}(\epsilon)$ (hypothèse H5) ou de l'opération $W_3/M_3/OP_{11}(1+\epsilon)$ (hypothèse H4). L'absence de détection d'un symptôme initiateur à la date T^P_{12} relatif à la sortie de W2 réfute l'hypothèse H5. De même l'hypothèse H4 impliquerait que l'on devrait avoir eu à T^P_{22} un symptôme relatif à un retard

¹ La pièce W4 sort du système au cycle suivant celui relatif au symptôme initiateur. Pour cette raison nous donnons sa date de sortie modulo CT.

de sortie de W5. Elle peut donc être réfutée également. En conséquences, il nous faut attendre la date de sortie de W4 à T_{21}^P (modulo CT) pour conclure entre les hypothèses H1 et H2.

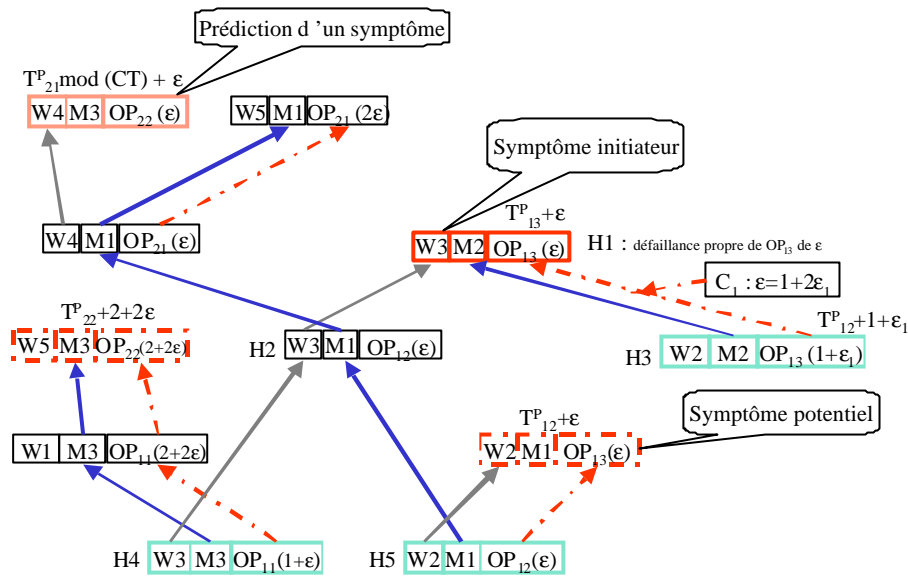


Figure C-30 : Réfutation par chaînage mixte et prédiction de symptômes

Cette étude nous permet donc de conforter le choix de l'ordonnancement cyclique tant il facilite la surveillance de la production et le diagnostic des défaillances. La résolution proprement dite du problème reste tout de même à implémenter pour pouvoir évaluer son efficacité et sa rapidité. C'est dans ce contexte que nous avons continué cette étude à travers un stage de DEA, cf. (Mezziani, 2003), pour expérimenter une autre approche de résolution qui consiste en une interprétation graphique des observations effectuées et l'utilisation des distances euclidiennes afin de diagnostiquer l'origine de la défaillance. Cette méthode s'est avérée plus facile à mettre en œuvre mais moins performante dans le résultat puisqu'elle peut ne pas converger vers une solution et, surtout, se limite à des hypothèses plus restrictives que la première méthode proposée.

IV. Contrats de recherche

En plus de ces axes de recherche, j'ai participé à deux contrats industriels dans le cadre du programme régional TACT (Technologies Avancées dans le domaine de la Communication et des Transports). Les deux projets ont été menés en collaboration avec le Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines (LAMIH) de l'Université de Valenciennes.

1. 3 Suisses

Portée par Prof. *Pascal Yim* (LAIL) et *Saïd HANAFI* (LAMIH), l'étude concerne l'optimisation du système de transport « enlèvement fournisseurs » dans le cadre d'une chaîne logistique VAD (Vente A Distance) et s'inscrit dans le volet 3, axe 2 du Programme TACT : « Logistique : outils pour la gestion des systèmes de transport et la régulation des flux ». Le montant total du contrat est de 45000 € L'objectif recherché est la Réorganisation et optimisation des circuits de transport des 3 Suisses. Il comporte 3 volets distincts :

- Analyse prévisionnelle des charges : analyse des données, data mining, modélisation stochastique
- Aide à la décision : Modélisation de la chaîne logistique, simulation et analyse des performances du système global de transport
- Outil d'optimisation : optimisation des circuits de véhicules, affectation des charges aux fournisseurs

Cette étude a permis également la mise en place d'un système d'information pour le secteur Livraison à Valeur Ajoutée (LVA). Ce système est actuellement en production et est utilisé quotidiennement par les services concernés. Ma participation à ce projet fut à deux niveaux :

- Participation aux travaux de recherche
- Membre du comité de pilotage du projet : groupe de 8 membres chargé de la définition des besoins, du cadre des études, résultats attendus, ...

2. Port Fluvial de Lille

Portée par moi-même (LAIL) et Frédéric SEMET (LAMIH), l'étude concerne l'optimisation du système régional de transport fluvial de conteneurs dans le cadre d'un contrat Européen FEDER. Le montant alloué à l'équipe Lilloise (*Emmanuel Castelain, Ouajdi KORBA et Pascal Yim*) est de 22000 € en équipement et 15000 € en fonctionnement. Dans ce projet, j'ai participé aux recherches effectuées ainsi qu'à l'encadrement des chercheurs et stagiaires. De plus, j'ai eu à gérer l'aspect financier.

Dans un contexte de développement du nombre de lignes fluviales et d'accroissement de la capacité des navires affectés à ces lignes, ce projet vise à renforcer l'efficacité opérationnelle d'un maillage régional de terminaux travaillant en collaboration les uns avec les autres. Dans ce cadre spécifique du transport fluvial de conteneurs, où interviennent des contraintes liées entre autres à la navigabilité et à la multimodalité, l'objectif principal était de rendre plus efficace la rotation des barges et les opérations de transbordement de manière à optimiser les conditions d'exploitation des terminaux et la qualité des prestations (temps, coûts,...) offertes aux chargeurs (clients). Dans ce projet de développement d'outils d'aide à la décision, une attention particulière était portée à l'intégration des technologies spatiales (GPS), tout particulièrement dans les processus de optimisation du système en cas de perturbations liées à des causes naturelles (crues) ou mécaniques (écluses, navires,...). Dans ce cadre, les contributions attendues de l'étude s'organisaient selon les problématiques suivantes :

- Gestion des quais
- Réorganisation en cas de perturbations

La solution proposée d'optimisation des mouvements parasites utilisant un algorithme d'optimisation stochastique a montré son efficacité sur plusieurs jeux de simulations, et donne satisfaction au Port Fluvial de Lille. De plus, un système de positionnement des containers utilisant des GPS différentiels conçu par notre équipe est en cours d'installation sur le site. Un financement complémentaire pour cette opération de 15 k€ a été apporté par un co-financement Port Fluvial/CETEC.

V. Conclusion

L'optimisation et l'exploitation des systèmes de production flexible nécessitent l'accomplissement de plusieurs étapes, visant à réduire la complexité, et l'intervention de différents experts. J'ai pu, au cours des travaux que j'ai animés, contribuer à mieux définir les différentes étapes d'analyse, de conception et d'exploitation. L'utilisation des réseaux de Petri, outil fédérateur de mes approches, illustre la puissance et l'intérêt de ce modèle. L'ouverture de mes travaux à l'étude des systèmes de transport a révélé une relative similitude des problèmes étudiés et des questions posées. Les outils de modélisation utilisés pour les systèmes de production peuvent être transférés aux systèmes de transport.

En ce qui concerne les différentes phases de résolution, la complexité de résolution est très forte dans tous les cas. En effet, toutes les phases de résolution sont de complexité, au moins, Non déterministe Polynomiale. Dans un premier temps¹, nous avons systématiquement cherché à déterminer la meilleure solution : ordonnancement cyclique, évaluation de performances, planification. Cette démarche s'est avérée souvent très coûteuse en temps de résolution (ordonnancement cyclique) ou très complexe à mettre en œuvre (planification fine). Ainsi, il paraît, de plus en plus, qu'il est plus approprié d'établir des bornes de performance qui soient les plus « fines » possible pour tenter de les approcher en un temps « raisonnable » c'est-à-dire trouver un bon compromis entre la qualité de la solution et le temps de calcul (conception, planification, ordonnancement). L'établissement des bornes de performance (lorsque c'est possible) constitue certainement le meilleur moyen d'évaluer la qualité de la solution lorsqu'on utilise la programmation logique sous contraintes ou une heuristique (régime transitoire, ordonnancement cyclique). Cette référence peut être également utilisée comme objectif à approcher pour une résolution par méta-heuristique (ordonnancement cyclique).

De même, la limitation de la combinatoire (et donc du temps de calcul) peut être obtenue en réalisant des « coupes » dans l'arbre de résolution ou en décomposant la résolution. En effet, dans la phase de conception, nous avons décomposé la résolution en deux phases en équilibrant la charge des machines (flexibilité des gammes) avant de s'intéresser au problème d'agencement des machines proprement dit. J'ai également adopté cette technique pour la planification en effectuant un calcul de tous les régimes permanents possibles et en utilisant les résultats comme base de données lors de la résolution. L'ouverture de mes travaux à une coopération avec d'autres équipes, notamment pour la surveillance indirecte de la production a permis d'obtenir des résultats originaux tout en confirmant de ce point de vue l'intérêt des techniques d'ordonnancement cyclique. Cette étude a permis d'enrichir le savoir-faire de deux sous équipes du LAIL.

Plusieurs pistes sont actuellement en cours d'étude aussi bien pour l'étude des systèmes de production que celle pour des systèmes de transport et logistique. Dans le cadre de la conception d'ateliers de production, si la formulation et l'approche de résolution ont donné satisfaction pour une classe importante de configurations, il nous apparaît que les cas les plus complexes nécessitent encore de nouvelles extensions et approches de résolution. En effet, si on prend le cas où toutes les flexibilités sont présentes (machines identiques, flexibilités de gamme, flexibilité dans le système de transport), il est évident que le modèle mathématique devient non quadratique et dépasse la capacité des logiciels de résolution. Ces approches de résolution doivent répondre à des critères de qualité

¹ Durant les travaux de thèse de *H. Ohl, H. Camus et O. Korbaa*.

des solutions beaucoup plus que de temps de réponse. Parmi les approches candidates, il est possible d'évoquer :

- Le « Branch and Cut » : c'est classiquement la méthode la plus utilisée dans la communauté de recherche opérationnelle même si elle présente des difficultés de mise en œuvre pour les non-spécialistes ;
- La recherche tabou : également très utilisée dans ce genre de cas, elle présente l'avantage d'être plus simple à mettre en œuvre ;
- Algorithmes génétiques : également faciles à mettre en œuvre puisque la difficulté majeure réside dans la détermination d'un codage « efficace ». Ils présentent l'avantage d'avoir été utilisée pour la résolution du problème d'ordonnement cyclique et de pouvoir bénéficier de l'expertise de collègues spécialistes avec lesquels nous collaborons ;
- Algorithmes de fourmis : même cas que le précédent.

La mise en place des benchmarks concernant les problèmes d'ordonnement cyclique est également un objectif intéressant. En effet, comparer les performances des différentes méthodes de résolution à la fois en terme de qualité de la solution, de domaine d'application ou de temps de calcul permet de mieux les situer les uns par rapport aux autres et de déceler les points à améliorer. Cette comparaison ne peut s'effectuer qu'à l'aide de jeux d'essais significatifs et complets. Ces jeux d'essais nécessitent une coopération avec les autres équipes travaillant sur ce sujet en toute objectivité. Ces benchmarks permettront aux futurs chercheurs de ce domaine de mieux évaluer leurs solutions et approches de résolution sans avoir à effectuer le travail fastidieux de recoder les approches existantes.

Ce travail d'élaboration de jeux d'essais communs se heurte cependant à un problème de modélisation. En effet, les différentes équipes de recherche emploient des outils de modélisation différents. Ces modèles, souvent employés pour des raisons historiques de cultures différentes des équipes tant sur le point de vue visuel que formel. Ils permettent également de modéliser des problèmes sensiblement différents. Parmi ces méthodes et outils, nous trouvons les réseaux de Petri, les graphes, les graphes à contraintes linéaires, la programmation linéaire en nombres entiers, les modèles mathématiques, ... A partir de ce constat, un modèle « unifié » permettrait de représenter les différentes contraintes des différents outils précédemment cités et surtout de simplifier la tâche pour les chercheurs désireux d'essayer un problème représenté par un modèle inconnu pour eux. Ce modèle doit donc être extensible, simple à écrire et indépendant des outils précités. Il doit également proposer de permettre une traduction vers un de ces modèles et permettre de retrouver un modèle familier pour l'utilisateur. C'est pour ces raisons que nous avons opté pour le langage de description de données par excellence : le langage XML. Il possède l'avantage d'être normalisé, portable d'une plateforme à une autre, et surtout disposant d'outils et langages dérivés simplifiant sa manipulation. Le résultat visé sera donc composé de 3 types de fichiers différents :

- Un fichier des données en XML qui contient la description du problème (type et nombre des ressources, description des gammes, demande initiale, ...) il est spécifique à chaque problème.
- Un fichier XML Schema : c'est le fichier de description de la syntaxe. Il décrit les différents éléments, leur hiérarchie, leur type, leur cardinalité, ... La Figure C-31 décrit le premier

- Chaque équipe possède ses propres outils de résolutions. Ainsi, notre but n'est pas d'informer sur les outils de résolutions potentiels mais plutôt de permettre « d'importer » un exemple d'une autre équipe, fait avec un autre outil, à être utilisable par l'outil « local ».

Finalement, nous souhaitons compléter la prise en compte des opérations de transfert intégrées dès la phase d'ordonnancement. En effet, les travaux de *I. Chaieb* ont permis de démontrer que les ressources de transfert ne sont pas de même nature que les ressources de transformation et que la prise en compte des opérations de transfert conduit le plus souvent à l'augmentation de l'en-cours nécessaire. En ce qui concerne les régimes transitoires, la thèse de *O. Belkahla Driss* étant en cours, nous attendons des résultats concluants à court terme. Ces résultats concernent la validation de l'architecture Multi-Agents proposée et la mise en place de l'algorithme de résolution à l'intérieur des agents ATI. Ces agents responsables de l'ordonnancement des régimes transitoires inter-productions opèrent un ordonnancement acyclique particulier avec une date de début fixée pour certaines opérations¹. Ces agents doivent notamment établir une politique de gestions pour les différents cas suivants :

- Les deux régimes successifs utilisent le même nombre et type de palettes
- Le premier régime utilise plus de palettes que le suivant
- Le premier régime utilise moins de palettes que le suivant
- Les deux régimes utilisent des types de palettes différents

Quant à l'outil de résolution, nous avons opté pour l'abstraction des réseaux de Petri et la programmation logique sous contraintes. L'utilisation du langage Prolog pour la résolution de ce type de problèmes (Benasser, 2000) a donné de bons résultats mais reste perfectible. Ainsi, nous envisageons de développer un outil de résolution capable de donner de meilleurs résultats (contraintes linéaires à variables entières). La dernière phase de l'approche de résolution concerne la surveillance indirecte de la production. La résolution de cette phase fait également partie intégrante des perspectives à court terme. En effet, nous envisageons d'expérimenter les Signatures Temporelles Causales (Toguyeni, 1992) comme méthode de résolution.

¹ Les opérations traversées par la date de fin du premier régime cyclique ou celles traversées par la date de début du régime suivant ne peuvent être bougées pour ne pas modifier les régimes permanents.

D. RESPONSABILITES

I. Recherche

Dans ce domaine, mes responsabilités sont principalement partagées entre l'évaluation d'articles de recherche et la participation à l'organisation de manifestations. En ce qui concerne l'évaluation d'articles soumis à des conférences, j'ai été sollicité à la fois par des conférences nationales et des conférences internationales :

- 4^{ème} Congrès International de Génie Industriel 2001,
- MOSIM '2001,
- JDA'01,
- 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCT'2001),
- IEEE SMC'02¹,
- Congrès International de Génie Industriel 2003,
- MOSIM'2003,
- CESA'2003.

Quant aux revues qui m'ont sollicité pour participer à l'évaluation d'articles soumis :

- IEEE Transactions on Robotics and Automation,
- International Journal on Computers and Industrial Engineering,
- European Journal of Operational Research.

De plus, depuis 1999, j'ai participé à l'organisation de 3 conférences internationales :

- Secrétaire Général de la Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA'2000, Lille, France, 550 participants).
- Président du comité d'organisation de la Conférence IEEE SMC'02 (Hammamet, Tunisie, 650 participants).
- Secrétaire du Symposium "*Discrete Events in Industrial and Manufacturing Systems*" de la conférence CESA'2003 (Lille, France).

Ces activités, quelques fois lourdes, me permettent d'avoir des contacts privilégiés avec des collègues du monde entier, d'aborder et de comprendre le fonctionnement, à la fois d'un point de vue administratif, financier, organisationnel ou scientifique, de ces manifestations.

J'ai également été responsable de la phase de sélection préliminaire pour le concours du meilleur article d'étudiant pour la conférence IEEE SMC 2000. De plus j'ai organisé deux sessions invitées pour le compte de la conférence IEEE SMC 2002 :

- « Cyclic Scheduling : modeling and benchmarks »

¹ A noter que j'ai fait partie du jury final de d'évaluation du meilleur papier d'étudiant « best paper contest » pour la conférences IEEE SMC'02.

- « Monitoring and supervision of Flexible Manufacturing Systems » co-organisée avec A. Toguyéni.

Egalement, je prépare actuellement un numéro spécial dans la revue *Mathematics in Computers and Simulation*. Ce numéro spécial concerne une sélection des meilleurs papiers du symposium "Discrete Events in Industrial and Manufacturing Systems" de la conférence CESA'2003. Il est réalisé en étroite collaboration avec prof. Etienne Craye (Président du Comité de Programme de CESA'2003) et prof. Eric Niel (président du symposium *Discrete Events in Industrial and Manufacturing Systems*). Les articles présélectionnés seront expertisés par un nouveau Jury pour décider de la liste définitive des papiers publiés.

Enfin, je co-anime l'axe « ordonnancement cyclique et problèmes avec blocage »¹ dans le cadre du projet régional « Modélisation et Optimisation des Systèmes de Transport » (MOST). Ce groupe s'étend aujourd'hui à travers des collaborations avec l'Université de la Réunion, l'Université de Changwon et l'Université de Dublin qui accueillent des équipes s'intéressant aux ordonnancements cycliques.

II. Enseignement

Dans le cadre des responsabilités liées aux enseignements, j'ai tout d'abord été responsable des enseignements de Réseaux Informatiques à l'IG2I. Cette activité consiste à gérer un ensemble de 12 matières (550 heures d'enseignement) et 14 enseignants. Pour ces matières, il s'agit de définir le contenu des cours (en respectant une totale cohérence avec leurs objectifs) et de les affecter aux enseignants compétents. Veiller à ce que les notes soient rendues à temps ainsi que la post-évaluation du cours (par les élèves et les enseignants) qui font également partie intégrante de cette responsabilité.

A partir de l'année scolaire en cours (2003-2004), je suis chargé d'animer la filière de troisième année, à l'EC Lille : *logistique commerciale et industrielle*. Chaque étudiant de 3^{ème} année doit choisir une filière à but professionnalisant et un génie disciplinaire. Cette filière compte 29 étudiants pour un volume horaire de 200 heures et prépare aux métiers de logisticien et de chaîne logistique. A l'exception de deux enseignants (moi-même et l'enseignant de communication), tous les autres intervenants sont des professionnels du domaine. Outre l'établissement du programme de la filière, il faut trouver les intervenants et réaliser l'emploi du temps en fonction de leurs contraintes et de celles de l'EC Lille. La provenance des élèves (en terme de génie choisi) est très intéressante pour la première promotion (2003-2004). Si 8 élèves relèvent du génie « Systèmes de transport et Logistiques », 7 sont issus des systèmes automatisés et systèmes de production et 6 élèves du génie des « systèmes d'information ». Ce dernier profil est original et intéressant car il permettra notamment de former des spécialistes en informatique maîtrisant la gestion de la « Supply Chain » ce qui constitue un profil recherché.

A travers les collaborations que j'ai initié avec l'université *Changwon National University* (Corée du Sud), j'ai reçu une invitation à y séjourner un mois pour préparer des coopérations et échanges en recherche et dispenser quelques cours. Toujours dans le cadre des échanges avec cette

¹ Egalement appelé MOST2.

université, j'ai pris la responsabilité du programme d'échange de professeurs et d'étudiants en double diplôme avec *Changwon National University*.

Egalement, j'ai participé à la rédaction de la convention d'échange d'étudiants en double diplôme avec l'Ecole Nationale des Sciences de l'Informatique de Tunis dont le directeur est Prof. *Kh. Ghédira* (co-encadrant des thèses en co-tutelle en cours). Enfin, sur invitation du Prof. *Kh. Mellouli*, j'interviens chaque année à l'Institut des Hautes Etudes Commerciales de Tunis (IHEC Tunis) dans le cadre du DESS Technologie de l'Information et la Communication Electronique pour y enseigner, durant 16 heures, les nouvelles technologies de l'Internet.

III. Responsabilités collectives

Mon intérêt pour les technologies de l'Internet m'a naturellement conduit à développer ou à maintenir quelques sites Internet :

- Créateur et responsable du Site Internet de la conférence CIFA'2000
- Responsable du Serveur WEB de l'EC Lille
- Co-Administrateur du serveur de Messagerie (1998-2000) et Internet (1998-2003) de l'IG2I (sous Linux).
- Administrateur du serveur Internet de la conférence IEEE SMC'02
- Co-administrateur du serveur Internet de la conférence CESA'03

De plus, je suis membre élu du Conseil d'Administration de l'Ecole Centrale de Lille (depuis juin 2002). Je suis également membre du Conseil de Perfectionnement du Centre de Ressources Informatiques de l'EC Lille depuis 2001. Cette instance est chargée de «conseiller» et veiller au bon fonctionnement du service du Centre des Ressources Informatiques (CRI) de l'EC Lille. Ce dernier recense 3 ingénieurs et 3 techniciens chargés du bon fonctionnement du parc informatique (près de 30 serveurs et 400 ordinateurs), du réseau informatique de l'EC Lille et ses deux départements IG2I et ITEEM (près de 2000 utilisateurs) et de leur sécurité. De plus, la direction de l'Ecole Centrale de Lille vient de me confier la direction de ce service en septembre 2003. Mes tâches, pour cette fonction, consistent à :

- Réorganiser le service
- Veiller à son bon fonctionnement au quotidien
- Gestion du budget du service (autour de 140 000 €par an).
- Dialoguer avec les utilisateurs (élèves, enseignants et personnel)
- ...

Depuis mon arrivée à la tête de ce service, deux gros chantiers sont lancés. En effet, l'IG2I est en cours d'être connectée au réseau universitaire RENATER ce qui implique des changements profonds dans son architecture physique et logique :

- remise à plat de l'architecture physique (routeur)
- modification de l'architecture logique : DMZ, Vlan, ...

- mise en place de nouveaux services : proxy, DNS, ...

Egalement, l'EC Lille vient d'intégrer le projet « Campus Numérique » avec une vingtaine d'établissements publics de la région Nord – pas de Calais. Ce projet vise à proposer un espace de travail convivial et complet à destination des enseignants et étudiants. Outre les développements conséquents qu'il faut effectuer pour adapter l'application « Sup-Portail » aux spécificités de l'école, ce projet impliquera des mutations profondes dans la « culture » du Centre de ressources informatiques :

- utilisation des logiciels libres (*Open Source*)
- mise en place d'authentification par LDAP,
- mise en place de bornes de connexion sans fil (Wifi),
- ...

E. CONCLUSION & PERSPECTIVES

Durant ces dernières années, je me suis intéressé, en recherche, à l'optimisation des systèmes de production et de transport. Ainsi, j'ai étudié la conception des systèmes de transport, le problème de planification ainsi que l'ordonnancement cyclique et acyclique. Pour y parvenir, j'ai pu mener et animer différents types d'études :

- Poursuite des travaux déjà lancés par l'équipe : évaluation de performances, planification, ordonnancement.
- Lancement de nouvelles pistes : conception, surveillance.
- Utilisation de nouvelles méthodes de résolution : régimes transitoires (Multi-Agents et PLC), planification (PLNE), ordonnancement cyclique (méthode par RdP, méta-heuristiques), surveillance (méthode graphique).
- Validation des résultats théoriques et des hypothèses émises : établissement des benchmarks.
- Applications industrielles : contrats de recherche avec les 3 Suisses et le Port Fluvial de Lille.

Pour mener à bien ces travaux, j'ai co-encadré 2 thèses soutenues¹ (en plus de deux thèses en cours²) et 3 stages de DEA, cf. Figure A-8. De plus, j'ai travaillé en équipe avec différents collègues du LAIL et l'ERGI :

- *P. Yim* pour l'utilisation de la programmation logique sous contraintes en ordonnancement cyclique et acyclique.
- *A. Toguyéni* pour l'étude concernant la surveillance de la production.
- *M. Bigand* pour l'intégration de l'ordonnancement au référentiel.

J'ai également collaboré avec des collègues d'autres laboratoires principalement dans le cadre de l'ordonnancement cyclique. Dans ce contexte, j'ai participé à l'animation du groupe de recherche en « ordonnancement cyclique et problèmes avec blocage » et je continue cette activité en établissant des collaborations avec d'autres laboratoires. J'ai également lancé de nouveaux axes de recherche en veillant à leur cohérence avec les axes existants. L'originalité de ces axes n'empêche pas leur complémentarité avec l'ensemble de thèmes étudiés par l'équipe. A travers ces différentes études, j'ai cherché à maintenir un équilibre entre les travaux encadrés, les études en collaboration (interne au laboratoire ou externe) et les travaux personnels. J'ai également tenu à garder un équilibre entre les travaux théoriques et les applications (contrats industriels, validation des résultats, benchmarks).

Quand aux perspectives de recherche, nous pouvons distinguer trois axes principaux : la conception des systèmes de transport, l'ordonnancement cyclique et les problèmes logistiques.

En ce qui concerne la **conception du système de transport**, la formulation du problème des flexibilités dans le moyen de transport n'est pas totalement satisfaisante. En effet, si l'idée des machines virtuelles, remplaçant le tronçon de transport, est à la fois efficace et fonctionnelle, elle suppose néanmoins la possibilité de déduire la longueur du tronçon en connaissant les coordonnées des deux machines virtuelle. En effet, la position des deux extrémités du tronçon étant variable, la longueur de ce dernier l'est aussi et dépend de ces deux positions. Elle dépend également de la forme géométrique du système de transport (circulaire de préférence pour avoir des valeurs simples

¹ Thèses de *I. Chaïeb* et *J. K. Lee* co-encadrées avec Prof. *J.-C. Gentina*

² Thèses de *O. Belkahla Driss* et *M. El Kefi* co-encadrées avec Prof. *P. Yim* et *Kh. Gédira* (en cotutelle)

à déterminer). Par conséquent, il serait utile de poursuivre l'étude sur ce point afin d'élargir son champ d'application.

De plus, il conviendra d'étudier d'autres types de configurations que les 4 configurations choisies (linéaire unidirectionnelle, linéaire bidirectionnelle, circulaire unidirectionnelle, circulaire bidirectionnelle). Cet élargissement concerne la prise en compte de configurations plus compliquées qui restent à la fois à définir, à formuler et à résoudre. Ce point ne peut être étudié sans envisager l'étude de l'affectation des machines à des cellules ou îlots. En effet, l'utilisation de configurations complexes doit justifier d'une plus grande efficacité. Cette efficacité peut provenir d'un meilleur regroupement des machines dans des structures à la fois plus complexes et plus fonctionnelles.

De même, l'interconnexion des cellules entre elles (qu'elles soient simples ou complexes) reste un problème à aborder. En effet, si le trafic inter cellules est minimisé lors de la décomposition en cellules, il ne faut pas l'alourdir par une interconnexion moins performante qui le ralentirait. Notamment si les moyens de transport employés dans les deux cellules ne sont pas les mêmes, ce qui pose le problème de compatibilité de ces moyens. Nous avons également réussi à intégrer les durées opératoires en ajoutant une opération d'équilibrage de charges, dans le cas de la flexibilité de gamme, lors de la phase de conception. Cette considération des durées opératoires n'est pas un artifice car elles sont d'une importance capitale pour l'ordonnancement et leur prise en compte dans la phase de conception est nécessaire. Par exemple, dans le cas d'un atelier sans flexibilité, le meilleur placement est déterminé sans aucune connaissance du flux optimal ni des charges des machines. Nous souhaitons donc mieux les intégrer (si possible dans la fonction de coût directement) dès la détermination du meilleur agencement.

Dans le cadre de l'**ordonnancement cyclique**, plusieurs pistes restent encore à exploiter. Tout d'abord, le souci de modélisation uniforme est certes en cours et des résultats sont prévus à court terme, cependant, il faudra continuer l'effort pour prendre en compte des contraintes spécifiques utilisées dans certaines études : contraintes uniformes, assemblage, désassemblage, ... L'extension du champ d'application de l'ordonnancement cyclique est une priorité dans cet axe de recherche. En effet, je prévois d'étudier les extensions suivantes :

- Problèmes à en-cours limité : c'est le problème « dual » de celui étudié jusque là. En effet, au lieu de fixer le temps de cycle et déterminer l'en-cours minimal pour le respecter, on fixe l'en-cours et détermine le temps e cycle minimal qu'il autorise.
- Problèmes avec blocage : dans les cas où une opération nécessite plusieurs ressources en même temps (ressources imbriquées), le blocage est un risque important. Dans ce cas, il ne s'agit plus de vouloir fonctionner à vitesse maximale mais plutôt de garantir le «bon» fonctionnement du système
- Problèmes avec assemblage : dans ce cas, la notion de l'en-cours est faussée puisque les pièces sont assemblées et ne font plus qu'un. Il s'agit donc de redéfinir le critère à minimiser (en-cours).

De plus, les résultats encourageants des travaux de thèse de *J. K. Lee* ainsi que les travaux de collaboration avec les différents collègues, dans le domaine de l'ordonnancement, nous poussent à nous intéresser au problème de complexité et de qualité de la solution. En effet, même si le problème est très complexe et combinatoire, ces algorithmes conduisent à de bonnes performances ce qui mérite réflexion. Une première explication pourrait venir du «bon sens» dans l'élaboration de

l'algorithme ce qui induit que les coupes faites dans l'arbre des solutions sont « bonnes ». Dans ce cas, il serait utile de justifier formellement ces coupes. Une deuxième piste à explorer revient à dire que la qualité de la solution est plus influencée par certains paramètres que par d'autres. Par exemple, le choix du chevauchement des cycles est le point commun entre les différentes approches « efficaces ». Enfin, nous souhaitons également étudier la distribution des « bonnes » solutions dans l'espace de toutes les possibilités. En effet, si les meilleures solutions forment un « nuage » assez compact, il serait facile d'approcher cette zone (et par conséquent obtenir une bonne solution) mais bien plus complexe de « fouiller » ce nuage à la recherche de « la » meilleure solution. Dans ce cas, il serait intéressant d'étudier la répartition des solutions afin d'en connaître les propriétés (unicité ou pas des zones de concentration des solutions, comment y accéder rapidement et efficacement, ...) et les exploiter pour améliorer ou accélérer la résolution.

Finalement, les premières études concernant les **systèmes de transport et logistiques** ont démontré l'intérêt des outils de modélisation et d'optimisation déjà utilisés dans le cadre des systèmes de production ainsi que la proximité des problématiques. Nous envisageons donc de continuer ces études et de diversifier les terrains d'application en cherchant de nouveaux partenaires industriels. En effet, ce terrain est fort intéressant pour la région du Nord – Pas de Calais que ce soit dans le domaine de la vente à distance, dans le transport fluvial ou dans le transport ferroviaire. En ce qui concerne le cas de la vente à distance, les axes que nous avons dégagés concernent :

- La modélisation des systèmes de stockage et logistique.
- Le dimensionnement des flux : l'utilisation des outils de modélisation stochastique (réseaux de Petri stochastiques, files d'attente) permet de déterminer les tailles moyennes de stock, de prévoir les fluctuations de ventes, prise en compte de ressources de transport (navettes par exemple), ...
- Les tournées de véhicules pour les approvisionnements et les livraisons : optimisation déterministe en fonction des données effectives (carnet de commande) ou prévisionnelles (prévisions de ventes).

Une dernière piste concerne « l'impact de l'organisation (changements) de la chaîne logistique sur la satisfaction des clients ». Cette piste est envisagée en partenariat avec l'Equipe de Recherche en Génie Industriel de l'Ecole Centrale de Lille¹ afin d'intégrer des aspects relevant de la science humaine (critères de satisfaction, management des équipes, conduite du changement, ...).

L'étude préliminaire pour le Port Fluvial de Lille a également permis de dégager les problématiques scientifiques concernant la gestion d'un port ainsi que les outils et approches de résolution existantes. Parmi les pistes que nous proposons, nous citons :

- Affectation des conteneurs aux barges : optimisation déterministe en fonction des contraintes (nombre et taille des conteneurs, type spécifiques de conteneurs, capacité de la barge, conditions climatiques, niveau d'eau), et du carnet de commandes (conteneurs pleins et vides).
- Affectation des quais et affectation des ressources de transport (grues, ...) : ces deux points représentent des ressources à optimiser car leur nombre est fixe et non extensible.

¹ Cette équipe comporte deux composantes : une SPI et une SHS (aspects sociologiques, conduite du changement dans les projets, ...).

- Rangement de conteneurs dans la barge : l'équilibrage du poids sur la barge pour respecter un centre de gravité permettant une bonne navigabilité est une contrainte importante à respecter et à étudier.
- Rangement des conteneurs dans la zone de stockage : l'optimisation de l'aire de rangement est une priorité étant donné sa taille non extensible. Également une bonne affectation des conteneurs permet de minimiser les mouvements parasites des ressources de transport¹ et de limiter le nombre nécessaire de ces ressources.

L'originalité des travaux, dans ce cadre, relève de plusieurs points :

- Le terrain d'application : les ports fluviaux sont peu étudiés et présentent des spécificités qui empêchent l'application directe des méthodes établies pour des ports « classiques » : constantes de temps différentes, transport multimodal, chemins prédéterminés et connus pour les barges, influence des conditions climatiques, contraintes fortes de synchronisation avec les ports de destination (fenêtre de temps).
- Les méthodes de résolution : outre les méthodes classiques, nous souhaitons expérimenter de nouvelles approches tel que la satisfaction de contraintes dynamiques par exemple.

Pour terminer, il me paraît essentiel de veiller à garder un équilibre entre la recherche fondamentale, le développement d'outils et les applications ce qui permet un transfert de savoir faire et de compétence entre les trois. Également, il est important de conserver une cohérence globale entre les différents axes de recherche afin d'avoir une complémentarité entre ces axes et bénéficier de retours d'expérience à la fois utiles et intéressants d'un axe par rapport aux autres.

¹ Appelées « ReachStackers »

F. ANNEXES

I. Curriculum Vitae

1. Etat civil

Nom : Korbaa
Prénom : Ouajdi
Date de naissance : 22 juin 1972
Lieu de naissance : Sfax (Tunisie)
Etat matrimonial : Célibataire
Nombre d'enfants : -
Adresse personnelle : 2 / 24 allée Taine
59650 Villeneuve d'Ascq
Adresse professionnelle : Ecole Centrale de Lille
BP 48, 59651 Villeneuve d'Ascq
Téléphone professionnel : + 33 3 20 33 54 04
Fax professionnel : + 33 3 20 33 54 18

2. Formation

1983 - 1990 *Lycée Mixte de Jemmel (Tunisie)*
Baccalauréat section Math-Science mention bien.
1990 - 1992 *Lycée Henri IV (Paris)*
Classes Préparatoires Mathématiques supérieures - mathématiques spéciales
1992 - 1995 *Ecole Centrale de Lille*
Diplôme d'ingénieur obtenu juillet 1995.
1995 *Université des Sciences et Technologies de Lille*
DEA de productique : automatique et informatique industrielle (mention Très Bien)
1995 - 1998 *Université des Sciences et Technologies de Lille*
Préparation d'une thèse de doctorat à l'Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL) en « Productique : Automatique et Informatique Industrielle » (mention très honorable avec les félicitations du jury).

3. Titres universitaires

1995 *Ecole Centrale de Lille*
Diplôme d'ingénieur.
1995 *Université des Sciences et Technologies de Lille*

DEA en Productique : Automatique et Informatique Industrielle (obtenu avec la mention Très Bien).

1998 *Université des Sciences et Technologies de Lille*

Doctorat de l'université des Sciences et Technologies de Lille en « Productique : Automatique et Informatique Industrielle » (Mention très honorable avec les félicitations du jury).

Titre : Commande cyclique des Systèmes Flexibles de Production Manufacturière à l'aide des réseaux de Petri : de la planification à l'ordonnancement des régimes transitoires

Soutenance : Juillet 1998.

Jury :

Président :	J. P. CASSAR	Professeur, Université de Lille I
Rapporteurs :	J. ERSCHLER	Professeur, INSA de Toulouse
	X. XIE	Chargé de Recherche, INRIA Lorraine - HDR
Encadreur :	J.-C. GENTINA	Professeur, Ecole Centrale de Lille
Examineurs :	Y. DALLERY	Directeur de Recherche - HDR, CNRS
	H. OHL	Docteur, Ingénieur, Andersen Consulting
	P. YIM	Maître de Conférences, Ecole Centrale Lille

4. Fonctions exercées

1999 - 2004 Maître de conférence à l'Ecole Centrale de Lille

1998 - 1999 ATER à l'Ecole Centrale de Lille

1995 - 1998 Allocataire de recherche

5. Encadrements

a. Diplômes d'Etudes Approfondies

- Agencement de machines dans un atelier sans flexibilité, *I. Chaieb* (juillet 1999), LAIL, Ecole Centrale de Lille.
- Planification des Projets chez IBM, *M. Matuzewski* (juillet 2001), ERGI, Ecole Centrale de Lille.
- Surveillance indirecte d'une production cyclique par Signatures Temporelles causales, *A. Meziani* (septembre 2003), LAIL, Ecole Centrale de Lille. Co-encadré avec *A. Toguyéni*.

b. Thèses de Doctorat

Jong Kun Lee

Titre : Une Méthode d'Analyse d'Ordonnancement des Systèmes Flexibles de Production Manufacturière Utilisant le Dépliage des Réseaux de Petri

Soutenance : Mars 2002, Ecole Centrale de Paris.

Jury :

Y. DALLERY	Président, Professeur, Ecole Centrale Paris
G. GONCALVES	Rapporteur, Professeur, Université d'Artois
R. VALETTE	Rapporteurs, Directeur de Recherche LAAS-CNRS
P. YIM	Examinateur, MdC - HDR, Ecole Centrale Lille
J.-C. GENTINA	Directeur de thèse, Professeur, Ecole Centrale de Lille
O. KORBAA	Co-encadreur, Maître de Conférences, EC Lille

Publications : 3 conférences, 1 revue.

Fonction actuelle : Professeur à « Changwon National University » (Corée du Sud), responsable du « Laboratory of Information Systems ».

Imen Chaïeb

Titre : Conception et Exploitation des Systèmes Flexibles de Production Manufacturière : Introduction des tâches de Transport

Soutenance : Juin 2002, Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL).

Jury :

M. STAROSWIECKI	Président, Professeur, Université de Lille I
H. PIERREVAL	Rapporteur, Professeur, IFMA
X. XIE	Rapporteur, Professeur, ENI de Metz
A. ARTIBA	Examinateur, Professeur, Université Catholique de Mons
J.-C. GENTINA	Directeur de thèse, Professeur, Ecole Centrale de Lille
O. KORBAA	Co-encadreur, Maître de Conférences, EC Lille

Publications : 4 conférences, 1 revue.

Fonction actuelle : Assistante à l'Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie de Sousse (Tunisie).

Olfa Belkahla-Driss

Titre : Ordonnancement des régimes transitoires pour productions cycliques : approche Multi-Agents et Programmation Logique sous Contraintes.

Soutenance : Prévue courant 2005, Ecole Centrale de Paris, Institut Supérieur de Gestion de Tunis. Thèse en **cotutelle**.

Encadreurs :

P. YIM	Professeur, Ecole Centrale de Lille
O. KORBAA	Maître de Conférences, Ecole Centrale de Lille
K. GHEDIRA	Professeur, ENSI de Tunis

Publications : 1 colloque.

Meriem El Kefi

Titre : Conception et Optimisation d'un port.

Soutenance : Prévues courant 2006, Ecole Centrale de Paris, Ecole Nationale des Sciences de l'Informatique de Tunis. Thèse en **cotutelle**.

Encadreurs :

P. YIM	Professeur, Ecole Centrale de Lille
O. KORBAA	Maître de Conférences, Ecole Centrale de Lille
K. GHEDIRA	Professeur, ENSI de Tunis

6. Publications

Année	Plénières	Conférences	Revue	Ouvrages	Total
2000	1	0	3	1	5
2001	0	7	0	0	7
2002	1	2	1	0	4
2003	0	3	2	1	6
2004 ¹	0	0	3	0	3
Total	2	12	9	2	25

Publications depuis le recrutement comme MdC (sept. 1999) par année²

Conférences visées :

- IEEE System Man and Cybernetics (IEEE SMC),
- IEEE Advanced Intelligent Mechatronics (IEEE AIM),
- Information Control Problems in Manufacturing (INCOM),
- European Control Conference (ECC),
- Int. Conf. on Industrial Engineering and Production Management (IEPM),
- Int. Conf. on Computers & Industrial Engineering (ICCIE),
- Modélisation des Systèmes Réactifs (MSR),
- Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA),
- Conférence francophone de MODélisation et SIMulation (MOSIM),
- ...

Revue visées :

- Int. J. on Flexible Manufacturing Systems (IJFMS),
- Int. J. on Production Research (IJPR),
- European J. of Control (EJC),
- J. of Engineering Manufacture (JEM),

¹ Articles acceptés uniquement.

² 5 articles ont été publiés en conférence, dans une version préliminaire, puis sélectionnés par un journal et réévalués. Ils sont comptabilisés uniquement dans la colonne « *revues* ».

- Computers & Industrial Engineering (CIE),
- J. Européen des Systèmes Automatisés (JESA),
- Revue Internationale d'Ingénierie des Systèmes de Production Mécanique (RIISPM).

Type	Plénières	Conférences	Revue	Ouvrages	Total
Encadrement	0	8	2	0	10
Personnel	2	0	3	2	7
Collaboration Interne	0	2	4	0	6
Collaboration Externe	0	2	0	0	2
Total	2	12	9	2	25

Publications depuis le recrutement comme MdC (sept. 1999) par type

II. Liste des Publications

1. Revues à audience internationales

KORBAA O., YIM P., GENTINA J.-C., 2000, Solving Transient Scheduling Problems with constraint programming, *European Journal of Control (EJC)*, Vol. 6, N. 6, pp. 511-524, version préliminaire de l'article présentée à ECC'99.

KORBAA O., CAMUS H., GENTINA J.-C., 2002, A New Cyclic Scheduling Algorithm for Flexible Manufacturing Systems, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems (IJFMS)*, Vol. 14, N. 2, pp. 173-187.

KORBAA O., BENASSER A., YIM P., 2003, Two FMS scheduling methods based on Petri nets: a global and a local approach, *International Journal of Production Research (IJPR)*, Vol. 41 N. 7, pp. 1349-1371.

CHAIEB I., KORBAA O., 2003, Intra-cell machine layout associated with flexible production and transport systems, *Proceedings of the I MECH E Part B Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 217, pp. 883-897.

LEE J., KORBAA O., 2004, Modeling and analysis of ratio-driven FMS using unfolding time Petri nets, *Computers & Industrial Engineering (CIE)*, (à paraître), version préliminaire de l'article présentée à ICCIE'01.

BIGAND M., KORBAA O., BOUREY J.P., 2004a, Integration of FMS performance evaluation models using patterns for an information system design, *Computers & Industrial Engineering (CIE)*, (à paraître), version préliminaire de l'article présentée à ICCIE'01.

2. Revues à audience nationale

KORBAA O., GENTINA J.-C., 2000a, Ordonnancement Cyclique en Production Flexible Manufacturière, *Revue Internationale d'Ingénierie des Systèmes de Production Mécanique (RIISPM)*, N. 4, pp. 47-56.

KORBAA O., GENTINA J.-C., 2000b, Etude et optimisation des régimes transitoires pour une production cyclique, *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, Vol. 34, N. 10, pp. 1233-1252.

BIGAND M., KORBAA O., BOUREY J.P., 2004b, Apport d'UML et des Schémas de Conception pour l'Intégration de Modèles de Planification/Ordonnancement des Systèmes Automatisés de Production, *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, accepté, (à paraître).

3. Ouvrages de Synthèse

GENTINA J.-C., KORBAA O., CAMUS H., 2000, L'ordonnancement cyclique en production flexible manufacturière, *Hermes Sciences pour Ingénieur (Traité IC2), Ordonnancement de la Production*, Chapitre 7, pp. 197-223.

KORBAA O., GENTINA J.-C., 2003, Optimisation de Performances en fonctionnement cyclique : approche par réseaux de Petri, *Hermes Sciences pour Ingénieur (Traité IC2), Evaluation de Performance des systèmes de production*, Chapitre 10, pp. 213-230.

4. Conférences Plénières

GENTINA J.-C., KORBAA O., 2000, *De l'apport spécifique des réseaux de Petri temporisés à l'optimisation de performance des SFPM en fonctionnement cyclique et à l'ordonnancement cyclique de la production*, Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA), Lille (France), Session Plénière, pp. 214-223.

GENTINA J.-C., KORBAA O., 2002, *Formal Approach of FMS Cyclic Scheduling*, IEEE SMC conference, Hammamet (Tunisie), Plenary Session, SMC02-PLE-01, Vol. 1.

5. Conférences Internationales

LEE J., KORBAA O., GENTINA J.-C., 2001a, *Modeling and analysis of cyclic schedule using Petri nets unfolding*, IEEE SMC, Tucson (USA), pp. 2211-2216.

CHAIEB I., KORBAA O., GENTINA J.-C., 2001, *Machine layout problem in FMS design*, Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (IEEE AIM'01), Como (Italie), pp. 1035-1040.

CHAIEB I., KORBAA O., 2001, *Machine layout problem in FMS design with identical machines*, Int. Conf. on Industrial Engineering and Production Management (IEPM), Quebec (Canada), (CD ROM).

LEE J., KORBAA O., GENTINA J.-C., 2001b, *Slices Analysis Method of Petri nets in FMS Using the Transitive Matrix*, INCOM (10th IFAC Symposium), Vienne (Autriche), Information Control Problems in Manufacturing, ISBN: 0-08-043246-8, Elsevier Science.

LEE J., KORBAA O., GENTINA J.-C., 2001c, *Scheduling Analysis in FMS Using the Unfolding Time Petri nets*, INCOM (10th IFAC Symposium), Vienne (Autriche), Information Control Problems in Manufacturing, ISBN: 0-08-043246-8, Elsevier Science.

CHAIEB I., KORBAA O., CAMUS H., 2001, *Short-term production planning of FMSs*, Int. Conf. on Computers & Industrial Engineering, Montréal (Canada), pp. 226-232.

6. Conférences Nationales

TOGUYENI A., KORBAA O., 2001, *Surveillance Indirecte par le flux d'une production cyclique*, Modélisation des Systèmes Réactifs (MSR), Toulouse (France), pp. 361-376.

CHAIEB I., KORBAA O., GENTINA J.-C., 2002, *Evaluation des performances des SFPMs*, Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA), Nantes (France), pp. 68-73.

BIGAND M., KORBAA O., BOUREY J.P., 2002, *Apport d'Object Constraint Language pour la réalisation d'un outil de conception des systèmes automatisés de production*, Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA), Nantes (France), pp. 722-727.

BELKAHLA DRISS O., KORBAA O., GHEDIRA K., 2003, *A Multi-Agent model for Transient Inter-production Scheduling (MATIS)*, Quatrième Journées Scientifiques JS'2003, Borj El-Amri (Tunisie).

HSU T., KORBAA O., DUPAS R., GONCALVES G., 2003, *Genetic Algorithm for FMS Cyclic Scheduling*, MOSIM'03, Toulouse, pp. 519-525.

FOURNIER O., KORBAA O., LAN SUN LUK J.D., 2003, *Algorithme basé sur le comportement des colonies des fourmis pour ordonnancer cycliquement une gamme d'assemblage*, MOSIM'03, Toulouse, pp. 546-552.

III. Bibliographie

- BELLMANN R., ESOGBUE A.O., NABESHIMA I., 1982, *Mathematical aspects of scheduling and applications*, Pergamon Press.
- CAMUS H., 1997, *Conduite de Systèmes Flexibles de Production Manufacturière par composition des régimes permanents cycliques : modélisation et évaluation des performances à l'aide des Réseaux de Petri*, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille.
- CARLIER J., CHRETIENNE P., 1988, *Problèmes d'ordonnancement: modélisation / complexité / algorithmes*, Editions Masson, Paris, France.
- BAPTISTE P., LEGEARD B., MANIER M.-A., VARNIER C., 1996, Résolution d'un problème d'ordonnancement avec la PLC, *RAIRO-APII-JESA*, Vol 30, n° 2-3, pp.201-230.
- BAHROUN Z., BAPTISTE P., CAMPAGNE J-P, MOALLA M., 1998, *A production management model operating under a cyclic delivery schedule*, CESA'98, Tunisia, pp.569-574.
- BENASSER A., 2000, *Accessibilité dans les réseaux de Petri : une approche basée sur la programmation par contraintes*, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille.
- BERRUET P, TOGUYENI A.K.A., ELKHATTABI S., CRAYE E., 1998, *Tolerance evaluation criteria for Flexible Manufacturing Architectures*. CESA'98, Hammamet Tunisia, Vol. 3, pp. 1-6.
- BOUHCHOUC A., FREIN Y., DALLERY Y., 1996, Performance evaluation of closed tandem queuing networks with finite buffers, *Performance Evaluation*, No 26, pp. 115-132.
- CAVORY G., 2000, *Une approche génétique pour la résolution d'ordonnements cycliques*, Thèse de Doctorat, Université d'Artois.
- CHAIEB I., 2002, *Conception et Exploitation des Systèmes Flexibles de Production Manufacturière : Introduction des Taches de Transport*, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille.
- CHRETIENNE P., COFFMAN E G., LENSTRA J. K., LIU Z., 1997, *Scheduling theory and its applications*, Edt. Wiley.
- COMMONER F., HOLT A.W., EVEN S., PNUELI A., 1971, *Marked directed graphs*, Journal of Computer and System Sciences, Vol. 5, n° 5, pp.511-523.
- DAVID R., ALLA H., 1992, *Du grafset aux réseaux de Petri*, Hermes, 1992.
- DEVISE O., PIERREVAL H., 1996, *Modélisation par la méthodologie KADS du choix de systèmes de transitique au sein d'un atelier Flexible de Production*. Proceeding of the 5th International Congress of Industrial Engineering, Grenoble, France, Vol. 2, pp. 287-295.
- DI CESARE F., HARHALAKIS G., PROTH J.M., SILVA M., VERNADAT F.B., 1993, *Practice of Petri Nets in Manufacturing*, Chapman et Hall, Londres.

- ERSCHLER J., LEVEQUE D. et ROUBELLAT F., 1982, *Periodic loading of Flexible Manufacturing Systems*, IFIP Congress, APMS, Bordeaux, France, pp.327-339.
- FEIGIN G., PROTH J.M., 1989, *Performance analysis of a flexible Manufacturing Cell feeding several machines with finite buffer capacity*, Rapport de Recherche, INRIA Lorraine, N°1127.
- FOURNIER O., 2002, *Conception de la commande d'un système automatisé de production : Apport des graphes et de l'ordonnancement cyclique*, Thèse de Doctorat, Université de La REUNION, TOULOUSE.
- GOTHA, 1993, *Les problèmes d'ordonnancement*, Recherche opérationnelle, Vol. 27, n° 1, pp.77-150.
- HAMANN T., 1992, *Le problème d'agencement des ressources à l'intérieur des cellules des systèmes de production*. Thèse de doctorat. Université de Metz.
- HANEN C., 1994, *Problèmes d'ordonnancement cycliques*, Habilitation à diriger des recherches, LIPT, Institut Blaise Pascal, Université Paris V.
- HARHALAKIS G., NAGI R., PROTH J.M., 1990, An efficient heuristic in manufacturing cell formation for group technology applications, *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 28, No. 1, pp. 185-198.
- HARHALAKIS G, PROTH J.M., XIE X., 1990, Manufacturing cell design using simulated annealing: an industrial application. *Journal of Intelligent Manufacturing*, No. 1, pp. 185-191.
- HILLION H., 1989, *Modélisation et analyse des systèmes de production discrets par les Réseaux de Petri temporisés*, Thèse de Doctorat en Mathématiques, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- KERMAD L., 1996, *Contribution à la supervision et à la gestion des modes et des configurations des Systèmes Flexibles de Production Manufacturière*, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille.
- KHANSA W., DENAT J.-P. et COLLART DUTILLEUL S., 1996, *Analysis of Robustness using the periodic functioning of timed Event Graphs*, Rensselaer's CIMAT'96, Grenoble, France, Vol. 1, pp.180-185.
- KONDRATYEV A., KISHINEVSKY M., TAUBIN A. AND TEN S., 1996, *Analysis of Petri nets by Ordering Relations in Reduced Unfolding*, in Kluwer Aca. Pub., Boston.
- KORBAA O., 1998, *Commande cyclique des Systèmes Flexibles de Production Manufacturière à l'aide des réseaux de Petri : de la planification à l'ordonnancement des régimes transitoires*, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille.
- LEE J. K., 2002, *Une Méthode d'Analyse d'Ordonnancement des Systèmes Flexibles de Production Manufacturière Utilisant le Dépliage des Réseaux de Petri*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris.
- LY F., 1999, *Contribution par la surveillance prédictive indirecte à l'optimisation de la maintenance dans les Systèmes Flexibles de Production Manufacturière*, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille.
- LY F., TOGUYENI A.K.A., CRAYE E., 2000, Indirect predictive monitoring in FMS, *Robotics and Computer Integrated Man.*, Pergamon Ed., vol. 16, N°5, pp. 321-338.

- MAHDI A.H., AMET H., PORTMANN M-C., 1997, *Agencement physique d'atelier avec minimisation des coûts de transport*, Colloque de Recherche Doctorale AGIS'97 : « Automatique, Génie informatique, Image, Signal », Angers.
- McMILLAN. K, 1995, A technique of state space search based on unfolding, *Formal Methods in System Design*, 6(1), pp.45-65
- MEZZIANI A., 2003, *Méthode de surveillance Prédictive indirecte des SFPM soumis à une conduite cyclique*, Rapport de DEA, Université des Sciences et Technologies de Lille.
- MUNIER A., 1991, Résolution d'un problème d'ordonnancement cyclique à itérations indépendantes et contraintes de ressources, *RAIRO, Recherche Opérationnelle*, Vol. 25, n° 2, pp.161-182.
- MURATA T., 1989, Petri Nets: properties, analysis and application, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 77, n° 4, pp.541-580.
- OHL H., 1995, *Fonctionnements répétitifs de systèmes flexibles de production manufacturière : Analyse et Optimisation des performances à l'aide des Réseaux de Petri*, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille.
- PLAQUIN M-F., PIERREVAL H. , 1998, *A multicriteria approach to cell formation using an evolutionary algorithm*, CESA'96 IMACS Multi-conference on computational engineering in systems applications, Lille, France, pp. 664-668.
- PLAQUIN MF., 1998, *Contribution des Algorithmes Evolutionnistes à la constitution d'îlots de Fabrication*, Thèse de Doctorat en Informatique, Université Blaise Pascal – Clermont II.
- PROTH J.M., SOUILAH A., 1992, Near-optimal Layout Algorithm Based on Simulated Annealing, *Int. J. Systems Automation: Research and Applications (SARA)*, 2, pp. 227-243.
- PROTH J.-M., XIE X.L., 1994, *Les Réseaux de Petri pour la conception et la gestion des systèmes de production*, EDITIONS MASSON.
- RAMAMOORTHY C.V., HO G.S., 1980, Performance evaluation of asynchronous concurrent systems using Petri Nets, *IEEE TRANSACTIONS ON SOFTWARE ENGINEERING*, VOL. SE-6, N° 5, PP.440-449.
- SERAFINI P., UKOVICH W., 1989, A mathematical model for periodic scheduling problems, *SIAM J. Disc. Math*, Vol 2, n° 4, pp.550-581.
- SIFAKIS J., 1980, Performance evaluation of system using nets, *Net Theory and Applications, Lecture Notes in Computer Science*, Springer Verlag, pp.307-319.
- SILVA M., VALETTE R., 1989, Petri Nets and Flexible Manufacturing, in *Advances in Petri Nets, Lecture Notes in Computer Science 424*, Springer Verlag, New York, pp.374-417.
- SOUILAH A., 1990, *La séquence globale minimale*, Rapport de recherche, INRIA-Lorraine, n°1328.
- SOUILAH A., 1993, *Simulated annealing for manufacturing systems layout design*, Rapport de recherche, INRIA-Lorraine, n°1909.
- SOUILAH A., 1994, *Le systèmes cellulaires de production : l'agencement inter-cellules*. Thèse de Doctorat. Université de Metz.

- TACQUARD C., MARTINEAU P., 2001, Automatic notation of the physical structure of a flexible manufacturing system, *Int. Journal of Production Economics*, Vol 74, 279-292.
- TOGUYENI A.K.A., CRAYE E., GENTINA J.C., 1990, *A method of temporal analysis to perform on-line diagnosis in the context of flexible manufacturing system*, in the proceedings of IECON'90, Pacific Grove (Californie), Vol.1, pp445-450.
- TOGUYENI A.K.A., 1992, *Surveillance et Diagnostic en ligne dans les ateliers flexibles de l'industrie manufacturière*, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille.
- TOGUYENI A.K.A., CRAYE E., GENTINA J.C., 1997, *Time and reasoning for on-line diagnosis of failures in Flexible Manufacturing Systems*, 15 th IMACS World Congress on "Scientific Computation, Modelling and Applied Mathematics", Berlin (Allemagne), Vol.6, pp. 709-714.
- VALENTIN C., 1994, *Modeling and analysis methods for a class of hybrid dynamic systems*, Symposium Automatisation des processus mixtes : Les systèmes dynamiques hybrides, ADPM'94, Bruxelles, Belgique, pp.221-226.
- VARNIER Ch., 1996, *Extensions de 'Hoist Scheduling Problem' cyclique - Résolution basée sur un traitement des contraintes disjonctives en programmation logique avec contraintes*, Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté, n°502.
- VILLEMEUR A., 1988, *Sûreté de Fonctionnement des Systèmes Industriels*, Ed. Eyrolles.
- XIE X., HILLION H.P., PROTH J-M., 1987, *Medium term production planning model with production subsystems and part-families*, Rapport de Recherche, INRIA Lorraine, N°736.
- XIE X., 1989, *Performance Analysis of a transfer line with unreliable machines and finite buffers*, Rapport de Recherche, INRIA Lorraine, N°1089.

IV. Notations et Abréviations

<i>1-cyclique</i>	Les machines répètent à chaque cycle exactement le même fonctionnement (mêmes opérations aux mêmes dates)
<i>Cellule</i>	(de transport) ressource unitaire de transport (capacité = une palette)
<i>CGI</i>	Common Gateway Interface : technologie permettant d'interfacier un programme exécutable avec un serveur Web pour réaliser des pages dynamiques
<i>Charge</i>	(d'une machine) somme des temps opératoires des opérations réalisées par la machine
<i>CT</i>	Cycle Time. fr. Temps de Cycle (optimal)
<i>EC Lille</i>	Ecole Centrale de Lille. Recrutement après les classes préparatoires sur concours (concours des Ecoles Centrale).
<i>ENSI de Tunis</i>	Ecole Nationale des Sciences de l'Informatique de Tunis
<i>Flexibilité</i>	(de gamme) non unicité du procédé de fabrication : possibilité de produire le type de pièces avec au moins deux gammes linéaires différentes
<i>Gamme</i>	Ensemble des chemins possibles pour fabriquer un type de produit
<i>Gamme linéaire</i>	séquence linéaire d'opérations (avec un ordre strict) permettant de réaliser un produit
<i>G1, G2, G3</i>	Noms donnés aux 3 années d'études à l'EC Lille
<i>GSI</i>	Génie des Systèmes Industriel
<i>IG2I</i>	Institut des Génie Informatique et Industriel (département de l'Ecole Centrale de Lille se trouvant à Lens). Recrutement niveau Bac, cursus en 5 ans dont les deux dernières en option (Génie Informatique ou Génie Industriel).
<i>Inter-productions</i>	Régime transitoire qui permet d'enchaîner deux régimes permanents successifs
<i>IE1, ..., IE5</i>	Noms donnés aux 5 années d'études à l'ITEEM
<i>IHEC</i>	Institut des Hautes Etudes Commerciales (Tunis – Carthage)
<i>ISG de Tunis</i>	Institut Supérieur de Gestion de Tunis
<i>ITEEM</i>	Institut Technologique
<i>L1, ..., L5</i>	Noms donnés aux 5 années d'études à l'IG2I
<i>LAIL</i>	Laboratoire d'Automatique et d'Informatique industrielle de Lille
<i>Makespan</i>	Temps total de production
<i>Menante</i>	(critique, goulet) : Machine dont la charge est supérieure ou égale à toutes les autres machines
<i>MILN</i>	Matrice d'incidence labellisée et normalisée
<i>MOST</i>	MOdélisation des Systèmes de Transport
<i>Problème NP</i>	Problème Non déterministe Polynomial
<i>Ordonnancement</i>	Séquencement des opérations sur les machines et détermination du nombre d'encours ainsi que son emplacement
<i>Permanent</i>	régime cyclique respectant le flux (temps de cycle) optimal

<i>PFM</i>	Production Flexible Manufacturière
<i>Ressource</i>	(de transformation) Ensemble d'une ou plusieurs machines identiques capables d'effectuer les mêmes opérations avec les mêmes temps opératoires (de transfert) moyens de transport des pièces : robot, convoyeur, ...
<i>RdP</i>	Réseau de Petri
<i>RFA</i>	Réseau de Files d'Attente
<i>RP</i>	Régime Permanent
<i>SED</i>	Système à Evénements Discrets
<i>Séminaire</i>	Type d'enseignement regroupant à la fois du cours et du travail pratique.
<i>SFPM</i>	Système Flexible de Production Manufacturière
<i>SSI</i>	Server Side Includes : technologie permettant d'exécuter des commandes système par le serveur Web
<i>TACT</i>	Technologies Avancée dans le domaine de la Communication et des Transports
<i>Tronçon</i>	(de transport) : partie de l'anneau de transport, formée d'une ou plusieurs cellules et gérée en FIFO, ne possédant qu'une entrée (en amont) et une sortie (en aval). Capacité = nombre de cellules.
<i>UML</i>	Unified Modeling Language
<i>u.t.</i>	unité de temps

V. Index Alphabétique

agencement.....	27	machine	
définition.....	27	~ critique	44
fonction de coût	27	~s identiques	28
blocage	24	affectation de charge.....	38
BUC.....	47	distance entre ~s	31
complexité	23	largeur de ~	31
conception.....	25	marge de ~	64
phases de ~	26	nombre de ~s	31
configuration		positionnement des ~s	30
transport	28	marge	
cycle		~ de machine.....	64
optimisation de ~	44	~d'une opération	63
temps de ~	24	MILN.....	45
cyclique		opération	
commande ~	23	~ critique	65
ordonnancement ~	44	~ de transfert	31
défaillance.....	64	Petri	
~ par induction.....	67	réseau de ~.....	23, 46
~ propre	67	planification	36
en-cours	23, 24	fonction de coût.....	38
~ minimal.....	23	formulation.....	37
taux d'occupation.....	63	ratio	
flexibilité	23	~ de production.....	31
~ d'affectation.....	30	~ de routage.....	41
~ de gamme.....	30	référentiel.....	25
~ de machine	28	régime	
~ de procédé.....	30	~ permanent	23
~ de transport.....	34	~ transitoire.....	23, 25, 56
linéarisation.....	42	ressource	
flux.....	23, 24	~ de transport	23, 24
~ optimal.....	23	~ menante.....	24
approche par le ~	36	~ multiple.....	29
		SFPM	23

VI. Description des matières enseignées

1. Systèmes à Événements Discrets

Intitulé du cours : Théorie des graphes

Public : 3^{ème} année EC Lille option Informatique Industrielle

Volume : 6 heures de Cours magistral

Descriptif : Introduction à la théorie des graphes (notations, définitions). Problèmes liés à la théorie des graphes (connexité, déterminations des circuits et cycles, plus court chemin, ...). Graphes particulier (planaires, arbres, sans cycles, ...). Cet enseignement prépare aux cours concernant les réseaux de Petri.

Divers : Nouveau cours avec un support des transparents (61 diapositives)

Intitulé du cours : Introduction aux réseaux de Petri

Public : DEA de génie Industriel

Volume : 4 heures de Cours magistral

Descriptif : Ce cours permet de donner les bases des réseaux de Petri (définition, propriétés, mathématique associée, aspect dynamique, RdP particuliers, extensions, ...). L'accent est mis sur l'intérêt de ce modèle et ses domaines d'application.

Divers : Nouveau cours avec un support des transparents (65 diapositives)

Intitulé du cours : Evaluation de performances et Ordonnancement

Public : DEA de génie Industriel

Volume : 4 heures de Cours magistral

Descriptif : Ce cours présente les définitions, notations, problèmes (types d'ateliers, problèmes avec et sans ressources, ...) et méthodes d'ordonnancement à la fois acycliques (Johnson, Jackson) et cyclique (optimisation du flux, détermination du temps de cycle, respect du temps de cycle minimal).

Divers : Nouveau cours avec un support des transparents (81 diapositives)

Intitulé du cours : Automates Programmables Industriels

Public : 3^{ème} année EC Lille option production Industrielle

Volume : 16 heures de Travaux Pratiques

Descriptif : l'objectif de ces 4 séances de TP, sous forme d'un mini-projet, est d'appliquer les connaissances acquises durant les cours de réseaux de Petri et Grafct. La maquette est un réseau de voies ferrées « truffé » de capteurs et actionneurs où circulent 3 à 5 trains. Les élèves doivent alors modéliser la commande en utilisant les réseaux de Petri (gestions des ressources, détection des

blocages), mettre en place une politique de gestion des priorités d'accès aux ressources évitant les conflits et les collisions et finalement la mettre en œuvre en Grafcet.

Intitulé du cours : Simulation

Public : 3^{ème} année EC Lille option Informatique Industrielle

Volume : 12 heures de Travaux Pratiques

Descriptif : ces 3 séances de TP suivent les cours de files d'attente et réseaux de Petri (stochastiques). Le but est d'appliquer la théorie mais également de comprendre les problèmes dus à la simulation (horizon de simulation, générateurs de variables pseudo aléatoires).

2. Génie Logiciel

Intitulé du cours : Langage C

Public : 2^{ème} année EC Lille

Volume : 24 heures de Séminaire

Descriptif : Cours optionnel pour les élèves désirant connaître ce langage pour leur projet ou stage : Introduction au langage C, structures de données, structures de contrôles, pointeurs, accès aux fichiers.

Divers : Nouveau cours avec un support des transparents (78 diapositives) réalisé avec W. Holderbaum

Intitulé du cours : Langage Pascal

Public : 1^{ère} année EC Lille

Volume : 32 heures de Séminaire

Descriptif : Initiation à l'algorithmique et à la programmation à travers l'apprentissage du langage Pascal.

Intitulé du cours : Langage Java

Public : 2^{ème} année IG2I

Volume : 32 heures de Séminaire

Descriptif : Initiation à la programmation orientée objets à travers l'apprentissage du langage Java, utilisation des connaissances acquises en cours de Conception des Systèmes d'Information (diagrammes de Classe).

Intitulé du cours : Langage Prolog

Public : 3^{ème} année EC Lille option Automatique

Volume : 8 heures de Cours + 16 heures de travaux pratiques

Descriptif : Introduction à l'intelligence artificielle à travers l'apprentissage de Prolog.

Intitulé du cours : Langage Perl

Public : 4^{ème} année IG2I

Volume : 12 heures de Séminaire

Descriptif : Initiation au langage de script le plus utilisé sous Unix en vue de son utilisation durant les cours de programmation WEB (CGI), d'administration réseaux, ...

Divers : Nouveau cours avec un support des transparents (51 diapositives) réalisé avec S. El Khattabi et A. Toguyeni

Intitulé du cours : Programmation Shell

Public : 4^{ème} année IG2I

Volume : 8 heures de Travaux Pratiques

Descriptif : Initiation à la programmation Shell : bash, csh, sh.

3. Réseaux Informatiques et NTIC

Intitulé du cours : Initiation aux Systèmes Informatiques

Public : 1^{ère} année EC Lille

Volume : 12 heures de Séminaire

Descriptif : Ce cours est optionnel (choisi uniquement par les élèves s'intéressant à cette thématique), il présente les aspects système en informatique : architecture d'un ordinateur, architecture des réseaux, ... il permet d'avoir les notions de base et le vocabulaire ad hoc pour des élèves désirant poursuivre dans cette voie.

Divers : Nouveau cours avec un support des transparents (127 diapositives) réalisé avec S. El Khattabi

Intitulé du cours : Initiation aux Systèmes Informatiques

Public : 1^{ère} année ITEEM

Volume : 15 heures de Séminaire

Descriptif : Cet enseignement permet aux élèves de l'ITEEM, durant leur première semaine à l'école, d'avoir un premier contact avec l'informatique et de répondre à des questions du type : qu'est ce qu'un ordinateur ? Comment il fonctionne ? Comment se connecter au réseau de l'Ecole ? De quels services dispose-t-on et comment les utiliser ? Qu'est ce que la messagerie, le FTP et le WEB ? ...

Intitulé du cours : Initiation aux Réseaux Informatiques

Public : 2^{ème} année EC Lille

Volume : 24 heures de Séminaire

Descriptif : Ce cours présente les réseaux informatiques (normes, protocoles, architectures, ...) et leurs applications (FTP, SMTP, DNS, HTTP). Le fonctionnement interne de ces derniers est décortiqué et expliqué.

Divers : Nouveau cours un support des transparents (189 diapositives) réalisé avec S. El Khattabi et A. Toguyeni

Intitulé du cours : Réseaux locaux

Public : 3^{ème} année IG2I

Volume : 8 heures de Travaux Pratiques

Descriptif : Deux séances de travaux pratiques permettant aux élèves d'approcher et manipuler le matériel nécessaire pour les réseaux informatiques (hub, routeur, ...) et de câbler un réseau local. Une analyse des trames est effectuée pour leurs permettre de mieux comprendre les informations échangées sur le support physique.

Intitulé du cours : Sécurité des Réseaux Informatiques

Public : 5^{ème} année IG2I option Génie Informatique

Volume : 24 heures de Travaux Pratiques

Descriptif : Durant ces 6 séances de TP, les élèves apprennent à mettre en place une architecture réseaux sécurisée avec un réseau privé, contenant les données sensibles et les utilisateurs locaux, et une zone démilitarisée contenant les services vers l'extérieur. Un soin particulier est accordé au filtrage des données entrantes et sortantes ainsi qu'à la sécurisation des services (installation de serveurs de messagerie, FTP et Internet sécurisés).

Divers : Réalisation de la maquette de la séance « sécurité des applications et serveurs Internet »

Intitulé du cours : HTTP et serveurs WEB

Public : 4^{ème} année IG2I

Volume : 6 heures de Cours Magistral

Descriptif : Après une brève introduction et un historique d'Internet, ce cours détaille le protocole HTTP et l'illustre, par la suite, à travers le serveur Apache (67% des serveurs dans le monde). Les requêtes HTTP sont également détaillées à travers le fonctionnement des CGI et SSI.

Divers : Nouveau cours avec un support des transparents (154 diapositives)

Intitulé du cours : Langage HTML

Public : 1^{ère} année ITEEM

Volume : 15 heures de Séminaire

Descriptif : Présentation du langage HTML : mise en forme et en page, tableaux, fenêtre, formulaires et feuilles de style.

Divers : Nouveau cours avec un support des transparents (46 diapositives) et polycopié détaillé de 50 pages réalisés avec N. Dangoumau

Intitulé du cours : Langage Javascript

Public : 1^{ère} année ITEEM

Volume : 15 heures de Séminaire

Descriptif : Présentation du langage Javascript : filtrage et soumission de formulaire, messages, calculs dans un formulaire, ...

Divers : Nouveau cours avec un support des transparents (40 diapositives)

Intitulé du cours : Langage ASP

Public : 2^{ème} année IG2I

Volume : 16 heures de Séminaire

Descriptif : A travers ce cours, les élèves découvrent la programmation coté serveur avec la solution Microsoft : Active Server Pages. L'utilisation des bases de donnée Access est également abordée pour la sauvegarde et la restitution des données.

Divers : Nouveau cours avec un support des transparents (62 diapositives)

Intitulé du cours : Langage PHP

Public : 4^{ème} année IG2I option Génie Informatique

Volume : 12 heures de Séminaire

Descriptif : Ce langage est le second coté serveur vu dans le cursus de l'IG2I. Il constitue à ma fois une alternative et un complémentaire de l'ASP. L'utilisation des bases de données MySQL est également abordée dans ce cours.

Divers : Nouveau cours avec un support des transparents (73 diapositives)

Intitulé du cours : Langage XML et dérivés

Public : 3^{ème} année EC Lille option Génie Informatique

Volume : 12 heures de Séminaire

Descriptif : Ce cours présente les différentes facettes de l'XML ainsi que ses langages dérivés (Schema, XSL, XLL, SVG, ...). Une attention particulière est accordée aux avantages et inconvénients des différentes configurations possibles ainsi que les potentiels d'évolution.

Divers : Nouveau cours avec un support des transparents (240 diapositives)