

## *Projet MACSI*

*Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes Industriels*

*Metz et Nancy*

THÈME 4A

*R* *apport*  
*d'Activité*

2000



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Composition de l'équipe</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Présentation et objectifs généraux</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Fondements scientifiques</b>	<b>5</b>
3.1	Modélisation des systèmes industriels . . . . .	5
3.2	Synthèse de la commande des systèmes industriels . . . . .	7
3.3	Évaluation de performances des systèmes à événements discrets . . . . .	8
3.4	Ordonnancement et gestion des systèmes industriels . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Domaines d'applications</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Logiciels</b>	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>Résultats nouveaux</b>	<b>12</b>
6.1	Modélisation et synthèse des systèmes industriels . . . . .	12
6.1.1	Modélisation des systèmes industriels . . . . .	12
6.1.2	Synthèse des réseaux de Petri . . . . .	12
6.1.3	Synthèse de commande à l'aide des réseaux de Petri . . . . .	13
6.2	Évaluation des performances . . . . .	14
6.2.1	Politique de maintenance des systèmes de production . . . . .	14
6.2.2	Evaluation et optimisation des graphes d'événements fluides stochastiques	14
6.3	Organisation et gestion de production . . . . .	15
6.3.1	Ordonnancement prédictif pour les systèmes de production . . . . .	15
6.3.2	Ordonnancement réactif . . . . .	15
6.3.3	Gestion des systèmes de production à ressources multiples . . . . .	16
6.3.4	Architectures de pilotage des systèmes réactifs . . . . .	17
6.3.5	Organisation des systèmes de production . . . . .	17
<b>7</b>	<b>Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)</b>	<b>18</b>
7.1	Projet AEE (Architecture Electronique Embarquée) . . . . .	18
7.2	Collaboration avec la Société INCOTEC . . . . .	18
7.3	Contrat avec PREDICT SARL . . . . .	19
7.4	Consulting à Sollac . . . . .	19
<b>8</b>	<b>Actions régionales, nationales et internationales</b>	<b>19</b>
8.1	Actions nationales . . . . .	19
8.1.1	Action Coopérative MARS . . . . .	19
8.1.2	PPF sur la conception et la gestion des organisations productives . . . . .	20
8.1.3	Région Lorraine . . . . .	20
8.1.4	Groupe BERMUDES . . . . .	20
8.1.5	Groupement de Recherche en Productique (GRP) . . . . .	20
8.1.6	ROADEF . . . . .	21

---

8.1.7	Groupe EEA "Réseaux de Petri" . . . . .	21
8.1.8	Club de Génie Industriel . . . . .	21
8.2	Actions internationales . . . . .	21
8.2.1	Actions de normalisation (CEN, ISO) . . . . .	21
8.2.2	IFAC-IFIP Task Force . . . . .	21
8.2.3	CBI Grant . . . . .	22
8.2.4	NSF-INRIA Grant . . . . .	22
8.2.5	EC INTAS . . . . .	22
<b>9</b>	<b>Diffusion de résultats</b>	<b>22</b>
9.1	Animation de la Communauté scientifique . . . . .	22
9.2	Enseignement . . . . .	22
9.3	Participation à des colloques, séminaires, tutoriels, invitations . . . . .	23
9.4	Invitations . . . . .	23
9.5	Jurys de thèses et d'habilitations . . . . .	24
<b>10</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>24</b>

*MACSI est un projet du LORIA (UMR 7503) commun au CNRS, à l'INRIA, à l'Université Henri POINCARÉ Nancy 1, à l'Université Nancy 2, à l'Institut National Polytechnique de Lorraine,*

## 1 Composition de l'équipe

*Les membres du projet MACSI de Metz sont également membres du LGIPM, laboratoire de Génie Industriel et Production Mécanique commun entre l'ENIM, l'ENSAM - CER de Metz et l'Université de Metz.*

*Les membres du projet MACSI de Nancy sont également membres du LORIA UMR 7503 du CNRS, de l'Université Henri Poincaré Nancy 1, de l'Université Nancy 2 et de l'INPL.*

### Responsable scientifique

François Vernadat [Professeur à l'Université de Metz]

### Personnel Université

Gülgün Alpan-Gaujal [Maître de conférences, École des Mines de Nancy (INPL)]

Henri Amet [Maître de Conférences à l'École des Mines de Nancy (INPL)]

Didier Anciaux [Maître de conférences à l'Université de Metz]

Marie-Claude Portmann [Professeur à l'École des Mines de Nancy (INPL)]

Nidhal Rezg [Maître de conférences, Université de Metz]

Daniel Roy [Maître de conférences, École Nationale d'Ingénieurs de Metz]

Antony Vignier [Maître de conférences à l'ESIAL, UHP - Nancy I]

Xiolan Xie [Professeur à l'École Nationale d'Ingénieurs de Metz]

### Assistants de projet

Antoinette Courier [Nancy]

Christel Wiemert [Metz]

### Chercheurs invités

Daoud Ait-Kadi [Professeur à l'Université Laval, Canada (1 mois)]

Mu der Jeng [Professeur à National Taiwan Ocean University (3 mois)]

### Doctorants

Mauro Ferreira Koyama [Doctorant, chercheur au CTI Campinas, Brésil(Thèse en 2000)]

Yazid Mati [ doctorant (Thèse en mars 2001)]

Abdel Halim Mahdi [Doctorant (Thèse soutenue le 20 septembre 2000)]

Asma Ghaffari [doctorante (Thèse en 2002)]

Riad Aggoune [doctorant (Thèse en 2002)]

Mohamad Aloulou [doctorant (Thèse en 2002)]

Freddy Deppner [doctorant Cifre INCOTEC (Thèse en 2002)]

Olivier Dupuis [doctorant Cifre INCOTEC (Thèse en 2002)]

### Stagiaires

YiSheng Huang [National Taiwan Ocean University (3 mois)]

Mounia Rachidi [ENSIAS, Rabat, Maroc (3 mois)]

### Assistants de Projet

Antoinette Courrier [TC CNRS, à temps partiel dans MACSI à Nancy]

Christel Wiemert [TC INRIA, à temps partiel dans MACSI à Metz]

## 2 Présentation et objectifs généraux

MACSI est projet INRIA depuis janvier 2000, après avoir été avant-projet depuis janvier 1998. Il se fixe pour objet d'étude la modélisation, l'analyse et la conduite des systèmes industriels. Le champ d'application visé concerne principalement les systèmes de production discrète, mais n'exclut pas les systèmes de production unitaire, continue ou encore "lots".

Les activités de recherche au sein de MACSI sont organisées suivant trois axes complémentaires :

- Modélisation et spécification des systèmes industriels comprenant la modélisation en entreprise (modèles descriptifs), la modélisation comportementale (modèles analytiques) et la synthèse de commande ;
- Évaluation des performances et dimensionnement des systèmes à événements discrets stochastiques. Cet axe concerne à la fois les méthodes analytiques pour des systèmes particuliers et les méthodes génériques d'optimisation des systèmes généraux ;

- Organisation et gestion de la production. Cet axe a principalement trait à l'ordonnement prédictif et réactif, au pilotage, à l'agencement ainsi qu'à l'étude de politiques de maintenance dans les ateliers de production.

Les activités de MACSI se positionnent clairement dans le cadre de la conception et de la conduite des systèmes de production, sans toutefois chercher à en couvrir tous les aspects. Les bases théoriques sont celles des systèmes à événements discrets. La finalité de la recherche est résolument double, en privilégiant d'une part la recherche de résultats fondamentaux, mais en ayant d'autre part constamment le souci des applications industrielles. Ainsi, en phase de démarrage du projet, nous nous posons des problèmes ponctuels d'organisation, d'évaluation de performance, d'ordonnement et de définition de politiques de maintenance. L'objectif à plus long terme est de contribuer au développement d'une méthode systématique et d'outils associés de conception et d'analyse des systèmes de production reposant sur la modélisation et la spécification formelle de la structure et de la commande de ces systèmes, à l'instar de ce qui se fait déjà en génie logiciel.

### 3 Fondements scientifiques

#### 3.1 Modélisation des systèmes industriels

**Mots clés :** système industriel, système à événements discrets, modélisation en entreprise, modélisation comportementale, synthèse de commande, réseau de Petri.

**Participants :** Gülgün Alpan-Gaujal, Giuseppe Berio, Nidhal Rezg, François Vernadat, Xiaolan Xie.

La modélisation est indispensable pour la compréhension et l'analyse des phénomènes mis en jeu dans les systèmes industriels. La conduite de tels systèmes repose également sur l'utilisation de modèles. Ces modèles doivent rendre compte de la structure et du comportement du système et permettre l'analyse de ses propriétés qualitatives et quantitatives. Nous considérons deux types de modélisation : la modélisation en entreprise, qui est relative à l'expression des besoins, et la modélisation comportementale, qui est relative à la spécification des propriétés du système.

Les techniques de modélisation en entreprise [Be96,Pet93,Ver96] sont relativement récentes et les premiers outils informatisés font leur apparition sur le marché (ARIS ToolSet, FirstSTEP, IBM FlowMark, PrimeObject...). Il s'agit de méthodes descriptives visant à fournir une aide à la conception, l'analyse et la réorganisation d'environnements industriels. A l'instar de l'approche CIMOSA<sup>[AMI93]</sup>, acceptée par les comités de normalisation tant européen (CEN)

- 
- [Be96] P. BERNUS, L. N. (EDS.), *Modelling and Methodologies for Enterprise Integration*, Chapman & Hall, London, 1996.
- [Pet93] C. PETRIE, *Enterprise Integration Modeling*, The MIT Press, Cambridge, MA, 1993.
- [Ver96] F. VERNADAT, *Enterprise Modeling and Integration: Principles and Applications*, Chapman & Hall, London, 1996.
- [AMI93] AMICE, *CIMOSA: Open System Architecture for CIM, second revised and extended edition*, Springer-Verlag, Berlin, 1993.

qu'international (ISO), toutes ces méthodes placent la notion de processus opérationnel (ou *business process*) au coeur de leur démarche, les outils étant pour la plupart bâtis autour d'un système de *workflow* (ou flux de contrôle) et d'un moteur de simulation. A ces aspects de modélisation fonctionnelle s'ajoutent des aspects de modélisation des systèmes d'information, des ressources (techniques ou humaines) et de l'organisation du système industriel. Le but est de modéliser, dans le langage de l'utilisateur, d'une part l'architecture du système physique (partie opérative) et d'autre part l'architecture du système de commande et d'information (partie commande) du système industriel tout en prenant en compte le rôle des hommes et de leurs interactions<sup>[Wil92,Sch96]</sup>. L'inconvénient majeur des méthodes et outils actuels est que ceux-ci reposent sur une vision trop algorithmique et déterministe des processus d'entreprise. Dans MACSI, nous cherchons à étendre ces approches pour prendre en compte plus d'indéterminisme et des mécanismes de gestion d'exception pour une modélisation plus fidèle et plus réactive du comportement des systèmes réels.

La modélisation comportementale consiste à modéliser un système de production en représentant le processus de fabrication de chaque produit, le comportement dynamique de chaque ressource et les différentes contraintes techniques à un niveau analytique<sup>[BS92a]</sup>. Une caractéristique importante des systèmes de production est l'omniprésence des aléas tels que les pannes, les retards de livraison des matières commandées, les demandes exceptionnelles, l'absentéisme du personnel, etc. Pour cela, on considère un système de production comme un système dynamique à événements discrets<sup>[Ho92]</sup>. Les formalismes les plus connus de représentation des systèmes à événements discrets sont les automates, les réseaux de Petri<sup>[DA92,DHP<sup>+</sup>93]</sup>, les statecharts<sup>[Har87]</sup>, les processus communicants de type CSP<sup>[Mil80,Hoa85,IV88a]</sup> ou utilisant les logiques temporelles<sup>[OW90a,MP92]</sup>.

Dans MACSI, nous avons opté pour les réseaux de Petri à cause de leur simplicité d'utilisation, leur puissance de modélisation et les nombreux outils existant pour la vérification de leurs

- 
- [Wil92] T. WILLIAMS, *The Purdue Enterprise Reference Architecture*, Instrument Society of America, 1992.
  - [Sch96] T. SCHAEEL, *Théorie et Pratique du Workflow*, Springer Verlag, 1996.
  - [BS92a] J. BUZACOTT, J. SHANTHIKUMAR, « Models of production systems », in : *Handbook of Industrial Engineering*, G. Salvendy (éditeur), IIE, New-York, 1992.
  - [Ho92] Y. HO, *Discrete Event Dynamic Systems*, IEEE Press, 1992.
  - [DA92] R. DAVID, H. ALLA, *Du Grafset aux Réseaux de Petri*, édition 2, Hermès, Paris, 1992.
  - [DHP<sup>+</sup>93] F. DICESARE, G. HARHALAKIS, J.-M. PROTH, M. SILVA, F. VERNADAT, *Practice of Petri Nets in Manufacturing*, Chapman & Hall, London, 1993.
  - [Har87] D. HAREL, « Statecharts: a visual formalism for complex systems », in : *Sci. Comput. Program.*, 8, 1987, p. 231–274.
  - [Mil80] R. MILNER, *A Calculus for Communicating Systems*, Springer-Verlag, New-York, 1980.
  - [Hoa85] C. HOARE, *Communicating Sequential Processes*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.
  - [IV88a] K. INAN, P. VARAIYA, « Finitely recursive process models for discrete event systems », *IEEE Trans. Automatic Control AC-33*, 7, 1988, p. 626–639.
  - [OW90a] J. OSTROFF, W. WONHAM, « A framework for real-time discrete event control », *IEEE Trans. Automatic Control AC-35*, 4, 1990, p. 386–397.
  - [MP92] Z. MANNA, A. PNUELI, *The Temporal Logic of Reactive and Concurrent Systems*, Springer-Verlag, Berlin, 1992.

propriétés<sup>[Mur89]</sup>. Dans des travaux antérieurs, il a été montré que les systèmes de production répétitifs peuvent être représentés aisément à l'aide des graphes d'événements, une classe élémentaire de réseaux de Petri<sup>[PX94]</sup>. La vérification des propriétés est aisée grâce à de nombreuses propriétés des graphes d'événements. Il a également été proposé de nouveaux réseaux de Petri, appelés les réseaux de Petri à sorties contrôlables, qui possèdent toutes les propriétés souhaitées du point de vue des systèmes de production et qui peuvent être utilisés comme briques de construction pour bâtir des modèles de taille importante de façon incrémentale<sup>[WX96]</sup>. En effet, l'expérience montre qu'il est difficile, voire impossible, de construire le modèle complet d'un système puis d'analyser ses propriétés à cause de la taille prohibitive du modèle final. Il faut alors avoir recours à des approches modulaires. Une approche modulaire consiste à identifier les modules de base ou les composants d'un système complexe, à représenter chaque module à l'aide des réseaux de Petri, et à intégrer les modèles des modules pour obtenir le modèle final. A ce titre, des expériences sont menées pour développer une approche qui représente le comportement dynamique de chaque ressource à l'aide d'une machine à états, puis construit le modèle complet du système en fusionnant les transitions et les places communes des différentes machines à états<sup>[JX97]</sup>.

### 3.2 Synthèse de la commande des systèmes industriels

**Mots clés :** synthèse de commande, système à événements discrets, contrôleur, superviseur, réseau de Petri.

**Participants :** Gülgün Alpan-Gaujaj, Nidhal Rezg, Murat Uzam, Xiolan Xie.

La synthèse de commande consiste, partant d'une spécification de la structure et du comportement du système physique à contrôler et des objectifs à atteindre, à spécifier une politique de commande pour ce système et à générer le code du contrôleur<sup>[KG95]</sup>. Un contrôleur est un agent capable d'activer ou de désactiver les transitions contrôlables d'un système discret en fonction des occurrences d'événements survenant dans le système physique. Il a pour but de gérer l'évolution des occurrences de chaque processus et leur coordination. Le contrôleur peut avoir une structure hiérarchique assurant ainsi une fonction de commande globale et des fonctions de commande locales. Le nombre de niveaux dépend de la complexité du système à commander.

En théorie, plusieurs techniques ont été proposées pour la conception des contrôleurs. On

- 
- [Mur89] T. MURATA, «Petri Nets: Properties, Analysis and Applications», *Proceedings of IEEE 77*, 4, 1989, p. 541-580, CD-ROM.
- [PX94] J.-M. PROTH, X.-L. XIE, *Les réseaux de Petri pour la conception et la gestion des systèmes de production*, Masson, Paris, France, 1994, Version anglaise intitulée Petri nets: A tool for design and management of manufacturing systems, John Wiley & Sons, 1996..
- [WX96] L.-M. WANG, X.-L. XIE, «Modular Modelling Using Petri Nets», *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 12, 5, october 1996, p. 800-809.
- [JX97] M. JENG, X.-L. XIE, «Synthesis of resource control nets using siphons», *in: IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetic*, p. 435-440, october 1997.
- [KG95] R. KUMAR, V. GARG, *Modeling and Control of Logical Discrete Event Systems*, Kluwer Press, Boston, 1995.

peut utiliser les réseaux de Petri<sup>[ZD93,HK92]</sup>, les réseaux conditions /événements<sup>[HR95]</sup>, les langages formels ou l'approche de Ramadge et Wonham<sup>[RW87,RW89,BW94]</sup>, les processus récursifs finis<sup>[IV88b]</sup> ou les logiques temporelles<sup>[OW90b,Ost89]</sup>.

Dans MACSI, la synthèse de la commande des systèmes de production est envisagée pour des systèmes à événements discrets à partir d'une spécification obtenue suivant les principes des travaux de Ramadge et Wonham. En particulier, l'approche considérée est basée sur un modèle hybride qui cherche à combiner les avantages des réseaux de Petri et des langages formels, développée dans le cadre de la thèse de G. Alpan-Gaujaj<sup>[Alp97]</sup>.

### 3.3 Évaluation de performances des systèmes à événements discrets

**Mots clés :** évaluation de performance, système stochastique, réseau de Petri, analyse de perturbation, simulation.

**Participants :** Nidhal Rezg, Xiaolan Xie.

Les outils reconnus pour l'évaluation des performances des systèmes à événements discrets sont la simulation et les outils analytiques tels que les chaînes de Markov, les réseaux de files d'attente, les réseaux de Petri stochastiques et l'algèbre max-plus<sup>[Des90,Ho89,CMQV89,BCOQ92]</sup>. D'une part, les outils analytiques souffrent de problèmes d'explosion d'états, c'est-à-dire que

- 
- [ZD93] M. ZHOU, F. DICESARE, *Petri Net Synthesis for Discrete Event Control of Manufacturing Systems*, Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, 1993.
  - [HK92] L. HOLLOWAY, B. KROGH, « Synthesis of feedback control logic for a class of controlled Petri nets », *IEEE Trans. Automatic Control* 37, 5, 1992, p. 692–697.
  - [HR95] H.M.HANISCH, M. RAUST, « Synthesis of supervisory controllers based on novel representation of condition/event systems », in : *IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, 4, p. 3069–3074, Oct. 22-25, 1995.
  - [RW87] P. RAMADGE, W. WONHAM, « Supervisory control of a class of discrete-event processes », *SIAM J. Contr. Optimiz.* 25, 3, 1987, p. 206–230.
  - [RW89] P. RAMADGE, W. WONHAM, « The control of discrete event systems », *Proceedings of the IEEE* 77, 1, 1989, p. 81–98.
  - [BW94] B. BRANDIN, W. WONHAM, « Supervisory control of timed discrete event systems », *IEEE Trans. On Automatic Control* 39, 2, 1994, p. 329–342.
  - [IV88b] K. INAN, P. VARAIYA, « Finitely recursive process models for discrete event systems », *IEEE Trans. On Automatic Control* 33, 7, 1988, p. 626–639.
  - [OW90b] J. OSTROFF, W. WONHAM, « A framework for real-time discrete event control », *IEEE Trans. Automatic Control* 35, 4, 1990.
  - [Ost89] J. OSTROFF, *Temporal Logic for Real Time Systems*, Research Studies Press, 1989.
  - [Alp97] G. ALPAN, *Design and Analysis of Supervisory Controllers for Discrete Event Dynamic Systems*, Ph.d. thesis, Rutgers University, New Brunswick, New Jersey, May 1997.
  - [Des90] A. DESROCHERS, *Modeling and Control of Automated Manufacturing Systems*, IEEE Computer Society Press, Washington, DC, 1990.
  - [Ho89] Y. HO, « Special issue on Discrete Event Dynamic Systems », *Proceedings of the IEEE* 77, 1, 1989.
  - [CMQV89] G. COHEN, P. MOLLER, J.-P. QUADRAT, M. VIOT, « Algebraic tools for the performance evaluation of discrete event systems », *Proceedings of the IEEE* 77, 1, 1989, p. 38–58.
  - [BCOQ92] F. BACCELLI, G. COHEN, G. OLSDER, J. QUADRAT, *Linearity and Synchronization*, John Wiley & Sons, New York, 1992.

le nombre d'états croît de manière exponentielle avec la taille du problème. Pour des systèmes particuliers, il est cependant possible de développer des méthodes analytiques exactes ou approximatives pour déterminer les performances du système étudié sans explorer l'espace d'états. D'autre part, bien que la simulation soit l'outil d'évaluation des performances le plus utilisé et le mieux adapté dans l'industrie, son utilisation reste lourde et coûteuse en temps de calcul. La simulation a longtemps été considérée comme une "boîte noire". Cet aspect "boîte noire" est en train de changer grâce aux développements récents des techniques de l'analyse des perturbations<sup>[HC91]</sup>. Ces techniques visent à évaluer, à l'aide d'une seule simulation, les gradients ou d'autres mesures de sensibilité par rapport à des paramètres du système simulé.

### 3.4 Ordonnancement et gestion des systèmes industriels

**Mots clés :** agencement, ordonnancement, optimisation discrète, système réactif, pilotage, architecture de commande, politique de maintenance.

**Participants :** Gülgün Alpan-Gaujál, Henri Amet, Didier Anciaux, Bérénice Damasceno, Lamia Djerid, Mauro Ferreira Koyama, Abdel Halim Mahdi, Yadiz Mati, Marie-Claude Portmann, Nidhal Rezg, Daniel Roy, François Vernadat, Antony Vignier, Xiaolan Xie.

L'organisation et la conduite d'un système de production posent de nombreux problèmes tels que l'agencement des ateliers, la prévision de demandes, le réapprovisionnement en matières premières et en composants, la gestion des stocks, la planification, l'ordonnancement, la livraison, le contrôle de qualité, la supervision ou la maintenance des équipements, entre autres [Gia88,Dup98,Sal92]. Le projet MACSI n'a pas la prétention de s'attaquer à tous ces problèmes mais vise à contribuer à une gestion plus globale et plus réactive des systèmes industriels. Bien que de nombreux modèles formels existent pour les systèmes de production<sup>[BS92b]</sup> ou les problèmes d'agencement de ressources<sup>[MUY95]</sup>, ce sont les problèmes de planification et d'ordonnancement pour lesquels les fondements théoriques sont les mieux établis<sup>[Bak74,CMM67,Fre82]</sup>.

Les problèmes de planification et d'ordonnancement se posent aux niveaux du moyen terme, court terme et très court terme. Ce sont des problèmes de décision liés à la production de produits, de transports ou de services. Les questions soulevées par ces problèmes sont : quand produit-on? combien? en utilisant quels moyens? et de quelle façon?

- 
- [HC91] Y. HO, X. CAO, *Perturbation Analysis of Discrete Event Dynamic Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [Gia88] V. GIARD, *Gestion de la Production, 2ème édition*, Economica, Paris, 1988.
- [Dup98] L. DUPONT, *La Gestion Industrielle*, Hermès, Paris, 1998.
- [Sal92] G. SALVENDY, *Handbook of Industrial Engineering*, John Wiley, New York, 1992.
- [BS92b] J. BUZACOTT, J. SHANTHIKUMAR, *Stochastic Models of Manufacturing Systems*, Prentice-Hall Pub., Englewood Cliffs, NJ, 1992.
- [MUY95] C. MOODIE, R. UZSOY, Y. YIH, *Manufacturing Cells: A Systems Engineering View*, Taylor & Francis, London, 1995.
- [Bak74] K. BAKER, *Introduction to Sequencing and Scheduling*, John Wiley, New York, NY, 1974.
- [CMM67] R. CONWAY, W. MAXWELL, R. MILLER, *Theory of Scheduling*, Addison-Wesley, reading, MA, 1967.
- [Fre82] S. FRENCH, *Sequencing and Scheduling: An Introduction to the Mathematics of the Job Shop*, Horwood, Chichester, 1982.

Les problèmes de planification concernent le niveau moyen terme<sup>[Orl75]</sup>. Il s'agit de répartir les charges de production, éventuellement entre plusieurs sites géographiques (cas des chaînes logistiques) et de les lisser sur un horizon relativement long, appelé horizon du moyen terme découpé en périodes, par exemple, un horizon de six mois découpés en 12 quinzaines. Le choix de l'horizon et de l'unité de temps du moyen terme dépend de la durée de vie des produits fabriqués, des délais, de la qualité des prévisions de vente... Ils doivent être définis par l'entreprise pour chaque grand secteur d'activités.

Les problèmes d'ordonnancement se posent au niveau court terme et très court terme de la gestion de production<sup>[BEP+96,CC88,GOT93,Pin92]</sup>. Il s'agit de définir avec une précision qui dépend du niveau où on se place, quand et avec quelles ressources on réalise les opérations qui permettent d'assurer la production de produits, la maintenance des machines ou des transports de marchandises ou de personnes. On distingue trois classes de problèmes d'ordonnancement : les problèmes dits faciles ou polynomiaux (on peut obtenir une solution optimale et avoir la preuve de son optimalité en utilisant un algorithme polynomial), les problèmes dits NP-difficiles (ou non polynomiaux) et les problèmes dits ouverts (personne n'a encore prouvé qu'ils sont polynomiaux ou qu'ils sont NP-difficiles). Pour les problèmes NP-difficiles et les problèmes ouverts, on ne sait écrire, pour obtenir une solution optimale ou même pour obtenir une solution réalisable dans le cas de problèmes très contraints, que des algorithmes dont la complexité est exponentielle (c'est-à-dire de durée prohibitive dès l'instant où l'on considère des problèmes de taille industrielle). C'est pourquoi, pour ces problèmes, on conçoit des méthodes approchées (recuit simulé, méthodes Tabu, algorithmes évolutionnistes...). MACSI vise à apporter des solutions exactes à ces problèmes lorsque c'est possible et à proposer des méthodes approchées (comme des algorithmes génétiques) dans les autres cas.

## 4 Domaines d'applications

Les domaines d'application du projet MACSI concernent principalement les systèmes de production discrète (production mécanique, chaînes d'assemblage, parachèvement, fabrication de semi-conducteurs, etc.) mais également les systèmes de production continue (en particulier la sidérurgie), unitaire ou par lots. Bien que l'ensemble des résultats obtenus dans le projet aient été étudiés dans le cadre de la production de biens, certains résultats peuvent être appliqués à l'industrie du service (modélisation en entreprise, évaluation de performances, ordonnancement). Les domaines de compétences des membres de MACSI portent essentiellement sur :

1. La conception préliminaire des systèmes de production allant de l'expression formalisée

---

[Orl75] J. ORLICKY, *Material Requirements Planning*, McGraw Hill, 1975.  
[BEP+96] J. BLAZEWICZ, K. ECKER, E. PESCH, G. SCHMIDT, J. WEGLARZ, *Scheduling Computer and Manufacturing Processes*, Springer Verlag, Berlin, 1996.  
[CC88] J. CARLIER, P. CRETENNE, *Problèmes d'Ordonnancement*, Masson, Paris, 1988.  
[GOT93] GOTHA, « Les problèmes d'ordonnancement », *Recherche Opérationnelle/Operations Research* 27, 1, 1993, p. 77-150.  
[Pin92] M. PINEDO, *Scheduling*, In *Handbook of Industrial Engineering*, John Wiley, New York, NY, 1992, pp. 2131-2153.

des besoins, l'analyse fonctionnelle, structurelle et informationnelle de ces besoins, le choix des ressources et l'agencement physique du système, le choix d'une politique de gestion, la simulation et la prédiction des performances du système ;

2. la réorganisation d'un système existant et l'évaluation de ses performances ;
3. l'optimisation des flux physiques d'un atelier et la définition d'une politique d'ordonnement prenant éventuellement en compte une politique optimisée de maintenance des équipements ;
4. la définition et la mise en place de systèmes de pilotage d'atelier pouvant réagir aux aléas de fonctionnement ;
5. l'intégration des systèmes de production au moyen de plates-formes d'intégration.

Les secteurs industriels dans lesquels les membres de MACSI ont été amenés à intervenir ou pour lesquels ils développent leur recherche concernent :

- l'industrie automobile
- les ateliers de fabrication mécanique
- les problèmes d'assemblage
- la fabrication de semi-conducteurs
- la sidérurgie
- les problèmes de découpe (en deux dimensions)

## 5 Logiciels

Un des doctorants de MACSI, Halim Mahdi, a décidé de créer une start-up du LORIA avec d'autres associés à partir de logiciels issus de son travail de thèse. La société qui doit être créée en 2001 s'appellera COSPROD. Les produits déposés à l'origine de la société concernent :

- un logiciel d'agencement d'atelier de production (*Hybrid Layout*) qui peut prendre en compte deux types d'agencement à partir de la forme des machines et de la connaissance des gammes de production : agencement de machines de forme rectangulaire avec affectation des moyens de manutention dans l'atelier ; agencement de machines de forme polygonale rectiligne mais avec un seul moyen de transport des produits.
- un logiciel de découpe à deux dimensions (*Méta-découpe*) pour l'optimisation de la découpe de bois dans les scieries, de la découpe de verre, de la découpe de tôle ou de textile. Il peut prendre en compte soit des formes rectangulaires (verre ou autres matériaux), soit des formes complexes pour le métal ou le textile.

Par ailleurs, la plate-forme SYROCO de pilotage d'atelier a été réécrite en JAVA et a été portée sur une application grandeur nature de pilotage d'une cellule de production automatisée (assemblage) à l'Université de Campinas au Brésil.

## 6 Résultats nouveaux

### 6.1 Modélisation et synthèse des systèmes industriels

**Mots clés** : système industriel, système à événements discrets, modélisation en entreprise, modélisation comportementale, synthèse de commande, réseau de Petri..

#### 6.1.1 Modélisation des systèmes industriels

**Participants** : François Vernadat, Zeigler [professeur à The University of Arizona, USA].

Le but de cette recherche est de définir un lien clair entre les concepts de la modélisation en entreprise (de nature plutôt descriptive se basant sur les constructs de CIMOSA , ) et ceux de la modélisation comportementale (de nature plutôt analytique comme les réseaux de Petri et les statecharts) [3, 21].

Après avoir montré comment passer du modèle de haut niveau centré processus de CIMOSA<sup>[AMI93, Ver96]</sup> vers une spécification du comportement du système de production sous forme de machines d'états en séparant la partie workflow (ou flux de contrôle) de la partie comportement des ressources (voir rapport d'activité 1999), nous avons proposé un cahier des charges pour une nouvelle famille de simulateurs basés sur la modélisation en entreprise pour fournir une aide à l'ingénierie des systèmes complexes de production ou les chaînes logistiques (simulation distribuée et architecture multi-agents). Une réflexion internationale est menée conjointement sur ces questions avec l'Université Laval (Québec), le CTI à Campinas (Brésil), le AI & Simulation Center (Tuscon, AZ) et le DIAM de l'Université d'Aix-Marseille pour le développement d'un outil de modélisation et de simulation basé sur les principes de CIMOSA. Avec le Prof. Zeigler de Tuscon, AZ, nous avons proposé une architecture de plate-forme d'ingénierie basée sur le formalisme DEVS et les outils associés (DEVS-CORBA et DEVS-Java) pour les couches basses de l'architecture et CIMOSA pour les couches de niveau utilisateur [20].

#### 6.1.2 Synthèse des réseaux de Petri

**Participants** : Xiaolan Xie, MuDer Jeng [professeur à National Taiwan Ocean University].

La collaboration avec le Professeur MuDer Jeng (qui a passé trois mois à Metz cette année) se poursuit sur la modélisation modulaire des systèmes de production avec des performances dégradées telles que les pannes des machines, la maintenance des équipements et la reprise des opérations. Ces phénomènes sont particulièrement fréquents dans les systèmes de fabrication des circuits intégrés. Nous avons étendu les réseaux "RCN-merged nets" que nous avons proposées précédemment. Les nouveaux réseaux sont baptisés "RCN\*-merged nets". Chaque

---

[AMI93] AMICE, *CIMOSA: Open System Architecture for CIM, second revised and extended edition*, Springer-Verlag, Berlin, 1993.

[Ver96] F. VERNADAT, *Enterprise Modeling and Integration: Principles and Applications*, Chapman & Hall, London, 1996.

"RCN\*-merged net" est obtenu par l'intégration des modèles de base. Chaque modèle de base est une machine à état avec des cycles locaux permettant la prise en compte des comportements dégradés. L'introduction des cycles locaux complique l'analyse du modèle intégré. Nous avons démontré que la réversibilité d'un réseau "RCN\*-merged net" se caractérise par l'absence des siphons pouvant être vidés de jetons. L'analyse de la vivacité s'appuie sur les siphons et les T-invariants.

### 6.1.3 Synthèse de commande à l'aide des réseaux de Petri

**Participants :** Asma Ghafarri, Gülgün Alpan-Gaujal, Bruno Gaujal [Projet TRIO], M. A. Jafari [Professeur à Rutgers University], YiSheng Huang [National Tawain Ocean University], MuDer Jeng [National Tawain Ocean University], Nidhal Rezg, Xiolan Xie.

Une part importante de la recherche s'inscrit dans le cadre de l'action coopérative 1999-2000 MARS (voir 8.1.1). L'action porte sur la modélisation, la vérification et la synthèse de commande des systèmes à événements discrets à l'aide des réseaux de Petri. Le but est de mesurer l'effet dans ce domaine des avancées récentes sur les réseaux dues aux participants du projet.

Nous avons proposé une approche originale pour la supervision des systèmes de production avec des états interdits et des transitions incontrôlables. L'approche proposée consiste tout d'abord à construire le réseau de Petri de la partie opérative du système (processus physique), puis à générer le graphe d'états de ce réseau, puis à modifier ce graphe pour éviter d'atteindre les états interdits et les états de blocage (prise en compte des spécifications de contrôle), et enfin de synthétiser le réseau de Petri équivalent à ce nouveau graphe en utilisant la théorie des régions développée par le projet Paragraphe. L'approche fondée sur la théorie des régions est générale et elle permet d'obtenir un contrôleur optimal et compact pour la supervision en temps réel mais elle souffre de l'explosion combinatoire dans sa construction. Cependant, si le réseau de Petri à contrôler appartient à des classes élémentaires ou bien si l'objectif de la supervision est simplement l'évitement de blocage, nous avons développé des approches algébriques et des approches structurelles permettant une construction rapidement du contrôleur optimal. Ces travaux conduisent à une publication dans une revue internationale [31], deux communications dans des conférences internationales [18, 22] et un article soumis dans une revue internationale [25].

Par ailleurs, Bruno Gaujal et Gülgün Alpan [1] ont étudié le problème de la famine dans le cadre du contrôleur superviseur. Pour les réseaux de Petri, la méthode traditionnelle du contrôle est l'utilisation des places de contrôle. Dans cette nouvelle étude, nous utilisons les fonctions de routage. L'avantage des fonctions de routage est que nous n'avons pas besoin du graphe de recouvrement mais des équations d'évolution sous forme de système d'algèbre linéaire. Cette méthode peut donc être utilisée pour les RdP non-bornés. La suite de travail est poursuivie avec une optique d'optimisation des performances. Il s'agit de concevoir des politiques de routage qui à la fois évitent la famine et maximisent le débit dans les réseaux.

Une autre étude sur le même thème est menée par Gülgün Alpan et Mohsen Jafari [2] dans laquelle un modèle hybride est proposé pour le contrôle superviseur. Ce modèle fusionne la théorie de Ramadge et Wonham de contrôle superviseur et la modélisation par les réseaux de

Petri des systèmes discrets. Le modèle résultant donne le comportement sous contrôle du système de production sous forme de réseau de Petri. Ce modèle peut être utilisé pour des analyses fonctionnelles et celles de la performance du système sous contrôle ainsi que la vérification du contrôleur.

## 6.2 Évaluation des performances

**Mots clés** : évaluation de performance, systèmes stochastiques, réseau de Petri, analyse de perturbations, simulation, maintenance, systèmes de production.

### 6.2.1 Politique de maintenance des systèmes de production

**Participants** : Mounia Rachidi, Nidhal Rezg, Xiaolan Xie.

Dans le cadre du stage de fin d'étude de Mounia Rachidi (ENSIAS, Rabat, Maroc), nous avons considéré l'optimisation de la politique de maintenance d'une ligne de production composée de deux machines de performance identique séparées sans stock tampon intermédiaire. La production dépend d'un stock de sécurité  $h$  et la ligne produit à sa capacité maximale si  $h$  n'est pas atteint et s'adapte à la demande sinon. Plusieurs politiques de maintenance sont considérées : 1) maintenance séparée et une machine est arrêtée pour maintenance préventive si son âge atteint une limite  $m$ ; 2) maintenance opportuniste systématique qui arrête les deux machines pour maintenance corrective/préventive si une machine tombe en panne ou si son âge atteint la limite  $m$ ; 3) maintenance opportuniste partielle qui arrête une machine ayant un âge  $x$  avec  $\alpha < x < m$  pour maintenance préventive lorsque la deuxième machine tombe en panne ou que son âge atteint la limite  $m$  de la maintenance préventive. L'objectif de cette étude est l'optimisation simultanée de  $\alpha$ ,  $m$  et  $h$  pour minimiser les coûts de stockages, de rupture, de pannes et de maintenance. Nous avons développé une méthode analytique approximative et une méthode fondée sur la simulation. La méthode analytique donne des résultats satisfaisants si la charge de la machine est faible et devient décevante lorsque la charge de la machine augmente. La méthode fondée sur la simulation utilise l'analyse des perturbation et permet de donner la solution optimale dans un temps raisonnable. Les résultats numériques montrent que la maintenance opportuniste est meilleure que la maintenance séparée et que la différence entre la maintenance opportuniste systématique et la maintenance partielle n'est pas significative. Nous avons également tenté de relier directement la maintenance préventive à l'état de la production en interdisant la maintenance préventive avant la constitution du stock de sécurité  $h$ . Les résultats numériques montrent une dégradation significative. Ce phénomène surprenant nécessite une étude théorique approfondie pour comprendre le lien entre la politique de maintenance et la politique de gestion de stock.

### 6.2.2 Evaluation et optimisation des graphes d'événements fluides stochastiques

**Participants** : Xiaolan Xie.

Ce travail est motivé par l'évaluation et l'optimisation des performances des systèmes de production soumis à pannes. Nous avons proposé un modèle de graphes d'événements fluides

stochastiques. Dans ce modèle, les jetons sont considérés comme des fluides. Chaque transition peut être en état de marche ou en panne. Une transition en état de marche peut franchir à sa vitesse maximale et une transition en panne ne peut pas franchir. La transition entre l'état de marche et l'état de panne est un processus stochastique indépendant de la politique de contrôle de flux. Le temps de séjours dans chaque état est une variable aléatoire de distribution générale. Le modèle proposé est un système hybride car il possède un comportement dynamique continu à cause des fluides de jeton et un comportement dynamique des événements discrets à cause des pannes et des réparations. Nous avons établi des équations d'évolution min-plus permettant la détermination des variables continues à l'occurrence des événements discrets. Grâce à ces équations d'évolution, nous avons démontré la Lipschitz-continuité, la monotonie et la concavité des volumes de franchissement des transitions par rapport aux paramètres du système tels que la vitesse maximale et le marquage initial. L'ergodicité du processus stochastique sous-jacent est prouvé. Les équations d'évolution permettent d'obtenir des estimateurs des gradients des performances du systèmes. Ces estimateurs sont prouvés sans biais et fortement consistants. Ces résultats conduisent à un algorithme d'optimisation stochastique des paramètres du système en se basant sur une seule simulation, plus précisément une seule trajectoire [23, 24, 30].

### 6.3 Organisation et gestion de production

**Mots clés :** systèmes de production, agencement, ordonnancement, optimisation discrète, systèmes réactifs, pilotage, architectures de commande, politiques de maintenance.

#### 6.3.1 Ordonnancement prédictif pour les systèmes de production

**Participants :** Gülgün Alpan-Gaujál, Riad Aggoune, Mohamed Ali Aloulou, Freddy Deppner, Olivier Dupuis, Abdel Halim Mahdi, Marie-Claude Portmann, Antony Vignier.

Nous travaillons sur les ordonnancements prédictifs depuis de nombreuses années [19]. Nous avons travaillé cette année plus particulièrement sur l'efficacité des algorithmes génétiques, en cherchant à concevoir des croisements qui conservent les meilleures propriétés des chromosomes croisés [4, 8, 16, 17]. Nous poursuivons nos travaux sur les opérateurs génétiques de type "*data oriented*" qui se révèlent de plus en plus efficaces pour plusieurs problèmes d'ordonnancement [13, 14]. Les problèmes abordés ces derniers temps appartiennent tous à la même famille : les flow-shops hybrides et leurs cas particuliers (un seul étage et/ou une seule machine par étage) [10] avec des hypothèses issues de problèmes concrets. Nous commençons à y intégrer des tâches de maintenance dont la position doit également être optimisée.

Les travaux concernant les thèses Cifre qui viennent juste de démarrer au mois de juillet 2000 sont présentés dans la partie relations industrielles.

#### 6.3.2 Ordonnancement réactif

**Participants :** Riad Aggoune, Mohamed Ali Aloulou, Marie-Claude Portmann, Antony Vignier.

Nos travaux sur les ordonnancements réactifs et plus particulièrement sur la boucle rétroac-

tive entre les ordonnancements prédictifs et les ordonnancements réactifs [7] se sont intensifiés cette année avec le démarrage fin 1999 de deux thèses sur le sujet. Dans le prolongement des travaux faits au LAAS qui ont conduit à ORABAID et au progiciel ORDO, nous cherchons à construire un système de conduite d'atelier à deux niveaux constitués d'un ensemble d'ordonnancements prédictifs flexibles et d'un processus d'ordonnement réactif qui soit un bon compromis entre la flexibilité introduite a priori pour faire face à certaines familles d'aléas et les performances obtenues a posteriori en fonction des aléas réalisés et de la manière d'utiliser les ordonnancements prédictifs dans la conduite de l'atelier en temps réel. Nos principales différences avec ORABAID sont les suivantes :

- le critère de performance privilégié sera la somme des retards par rapport aux délais et non pas la durée totale ou le plus grand retard, ce qui n'exclut pas la possibilité de choisir d'autres critères,
- pour essayer de moins perdre sur les performances tout en maintenant un maximum de flexibilité, nous n'utilisons pas des groupes d'opérations totalement permutables, mais des groupes d'opérations partiellement permutables, en fait nous utilisons un cas particulier d'arbres PQR,
- la conséquence des deux points précédents est que nous ne pouvons plus garantir les performances de manière absolue. Nous aurons donc des estimations des meilleurs cas et des pires cas pouvant survenir en respectant toutes les contraintes d'une famille donnée d'ordonnancements prédictifs flexibles. Nous estimons les performances en utilisant des algorithmes génétiques qui ont la capacité d'explorer les solutions contenues dans toute famille d'ordonnancements prédictifs flexibles. Nous envisageons également de compléter notre procédé de conduite d'atelier à deux niveaux par des outils d'aide à la décision qui permettent de choisir entre différentes familles d'ordonnancements flexibles en fonction de leur robustesse différente à différentes familles d'aléa. Cela pose le difficile problème de la conception d'indicateurs de flexibilité pertinents.

Nos travaux de cette année ont surtout porté sur la conception de prototype de la partie traitant des ordonnancements prédictifs flexibles. Nous abordons actuellement la partie processus réactif correspondant.

### 6.3.3 Gestion des systèmes de production à ressources multiples

**Participants :** Yazid Mati, Nidhal Rezg, Xiaolan Xie.

Dans les systèmes de production que nous étudions, la fabrication d'un produit nécessite la présence de plusieurs types de ressources telles que les machines, les moyens de transport, les outils, les opérateurs, etc. L'objectif consiste à proposer une méthodologie intégrée pour la spécification de tels systèmes et des algorithmes pour l'ordonnement de la production en tenant compte de la variété des ressources engagées dans une production. Dans le cadre de la thèse de Yazid Mati, nous avons développé une méthode originale d'ordonnement des job-shop multi-ressources avec blocage (ou job-shop MRB). Cette méthode s'appuie sur un algorithme exact pour les job-shops MRB à deux travaux que nous avons développé. L'ordonnement d'un

job-shop MRB avec un nombre quelconque de travaux est obtenu par une méthode itérative qui prend en compte un nouveau travail à chaque itération. Chaque itération de cette méthode consiste à agréger les travaux déjà ordonnancés en un travail composé et ensuite ordonnancer le nouveau travail et le travail composé. Les nombreuses expériences numériques montrent que cette nouvelle méthode est en moyenne 5% à 10% meilleure que les résultats précédemment obtenus. Ces travaux conduisent à une communication dans une conférence internationale [15] et deux articles soumis pour publication dans des revues internationales [28, 29].

### 6.3.4 Architectures de pilotage des systèmes réactifs

**Participants :** Didier Anciaux, Mauro Ferreira Koyama, Daniel Roy, François Vernadat.

Ce travail concerne la prise en compte des perturbations pouvant intervenir lors du pilotage de la production de différents produits dans un atelier de production discrète. Pour atteindre ces objectifs, une plate-forme nommée SYROCO<sup>[ARV98]</sup> pour le pilotage réactif d'atelier a été réalisée et validée [9]. La phase de transfert de SYROCO sur une cellule réelle est quasiment terminée et la thèse en co-tutelle de M Koyama portant sur ce sujet sera soutenue en mars 2001 à Campinas, Brésil. Ces travaux ont montré la faisabilité de l'interconnexion de SYROCO avec des ressources réelles et l'efficacité de l'architecture du point de vue du pilotage.

La connexion de SYROCO avec des ressources réelles ayant été réalisée via un superviseur commercial dans le cadre du travail de M Koyama, nous nous tournons actuellement vers le développement de méthodologies et d'applications permettant la connexion de manière directe et sans intermédiaires (autre que des automates programmables s'ils existent déjà dans l'atelier).

SYROCO ayant été développé de manière très générique et modulaire, nous étudions maintenant les possibilités de spécialisation de l'architecture afin de pouvoir l'adapter à différents types particuliers de production (systèmes KANBAN, production en anneau, etc.). Ces nouvelles structures sont obtenues en adaptant ou en fusionnant différents niveaux de l'architecture initiale en fonction du cas particulier à traiter.

Enfin, faire de SYROCO une plate-forme d'accueil pour tester et valider des applications d'ordonnancement réactif reste d'actualité. De plus, les applications de maintenance, maintenant intégrée aux axes de recherche de MACSI pourraient être, de la même manière, intégrées et testées dans le cadre de SYROCO.

### 6.3.5 Organisation des systèmes de production

**Participants :** Henri Amet, Abdel Halim Mahdi, Marie-Claude Portmann.

Les travaux de cette année sont liés à la fin de la thèse d'Abdel Halim Mahdi [1]. Nous avons essentiellement finalisé les travaux précédents : méta-heuristiques hybrides pour les problèmes d'agencement [12], pour résoudre des problèmes de découpe industrielle à deux dimensions [5, 6] et pour optimiser des problèmes de mise en ligne [11], ceci en collaboration avec le LRPS (laboratoire de Recherche en Productique de Strasbourg).

---

[ARV98] D. ANCIAUX, D. ROY, F. VERNADAT, «Reactive shop-floor control with a multi-agent system», *in : Management and Control of Production and Logistics*, L.M.Aguilera and Z. Binder (éd), Pergamon Press, London, 1998.

Un travail antérieur de collaboration avec la Turquie sur l'utilisation de méta-heuristique pour des problèmes de planification a été accepté pour publication [7].

De nouveaux travaux démarrent sur ce thème dans le cadre de la collaboration avec l'Université Laval [26]. Il s'agit de travaux concernant la minimisation de l'espérance mathématique des coûts de tests (problème non réductible) pour trouver la cause de la panne d'une machine.

## 7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

### 7.1 Projet AEE (Architecture Electronique Embarquée)

**Participants :** Marie-Claude Portmann, Thomas Scheer, Grégory Vial.

MACSI intervient dans le contrat AEE en association avec l'équipe TRIO pour le compte du LORIA et de l'INRIA. Il s'agit de la deuxième année de ce contrat prévu sur deux ans. AEE concerne le développement d'architectures pour l'électronique embarquée dans les véhicules permettant de répartir les fonctions sur les processeurs de l'architecture. MACSI intervient essentiellement dans le lot 3 pour la définition d'algorithmes de placement optimisé des fonctions sur les calculateurs présents dans une architecture donnée. Les travaux de cette année ont concerné la spécification des problèmes d'ordonnement-placement. Grâce aux travaux de deux stagiaires durant l'été, un générateur de problèmes a pu être conçu. Ceci nous a permis de travailler plus finement sur la cohérence des architectures logiciels et matériels décrites dans l'AIL. Par ailleurs, en supposant que l'on dispose de bonnes heuristiques d'ordonnement en temps réel, nous avons mis au point les éléments permettant de concevoir des algorithmes génétiques pour le problème du placement, avec à nouveaux des tests de cohérence intégrés à l'algorithme.

**Partenaires :** GIE PSA Peugeot Citroën - Renault, Aérospatiale, Valéo, Siemens Automative, INRIA, ERCyN, LORIA.

### 7.2 Collaboration avec la Société INCOTEC

**Participants :** Marie-Claude Portmann, Antony Vignier, Freddy Deppner, Olivier Dupuis.

La collaboration avec INCOTEC s'est poursuivie cette année. Elle a débouché sur le mémoire de DEA d'Olivier Dupuis [27]. Deux thèses Cifre (Freddy Deppner et Olivier Dupuis) ont démarré au 1er juillet 2000. L'un des deux sujets portent sur la prise en compte en ordonnancement des contraintes liées aux produits périssables et/ou aux produits volumineux. L'autre sujet s'intéresse à la gestion des ressources humaines. Il s'agit de gérer simultanément les services des personnels (horaires dynamiques, 35h, contraintes sociales) et la disponibilité nécessaire des personnels afin d'assurer la productivité souhaitable au niveau des ateliers afin de respecter au mieux les délais clients. Les possibilités de polyvalence des personnels doivent être prises en compte.

### 7.3 Contrat avec PREDICT SARL

**Participants :** Daniel Roy, Antony Vignier, François Vernadat.

La Société PREDICT est une jeune SARL qui offre du conseil et des services spécialisés orientés sûreté et productivité des installations industrielles et tertiaires. Il nous est demandé d'effectuer une étude sur l'impact des technologies de l'information pour aider PREDICT à se doter des moyens et compétences nécessaires à l'intégration de ses logiciels aux systèmes d'information des entreprises (de type ERP, GPAO, GMAO, ...). Il s'agit d'un contrat de 100 KF HT à réaliser avant le 31 mars 2001. Il s'agit pour nous d'une part de valoriser nos compétences en intégration de systèmes et d'autre part d'une opportunité pour mieux cerner les besoins industriels dans le domaine de la maintenance et de l'assistance aux tâches de surveillance, diagnostic et pronostic de l'évolution de défaillances et dysfonctionnements d'équipements.

### 7.4 Consulting à Sollac

**Participant :** Marie-Claude Portmann.

Cette activité a été mise en veille cette année par suite d'un changement d'affectation du correspondant privilégié. Elle devrait reprendre en 2001.

## 8 Actions régionales, nationales et internationales

### 8.1 Actions nationales

#### 8.1.1 Action Coopérative MARS

L'action coopérative 1999-2000 MARS, dont Xiaolan Xie est le coordinateur, est financée par la direction de la recherche de l'INRIA. Elle regroupe quatre partenaires : le projet Paragraphe de l'INRIA-Rennes, le projet MACSI de l'INRIA-Lorraine, le projet CLOVIS du LaBRI (Bordeaux), et le laboratoire L.S.V. de l'ENS-Cachan.

L'action porte sur la modélisation, la vérification et la synthèse de commande des systèmes à événements discrets, allant des systèmes de production aux systèmes de flux de tâches, avec des impératifs variables en matière de distribution. Elle a pour objectif de contribuer au développement de *logiciels sûrs et fiables*, en construisant sur les réseaux de Petri une méthodologie de conception intégrée des systèmes à événements discrets contrôlés. Les aspects de la conception d'un tel système sont nombreux et variés. On doit en premier lieu modéliser le système non contrôlé, ce qui peut se faire en utilisant des réseaux de Petri classiques ou des réseaux à files dans le cas des systèmes de production, mais peut exiger le recours à d'autres formes de réseaux étendus pour des systèmes plus complexes. La taille des systèmes à décrire impose dans tous les cas que la modélisation soit modulaire. Une fois obtenu un modèle du système non contrôlé, il convient de le valider en vérifiant partiellement ses propriétés, ce qui pose le problème de la vérification modulaire et tous les problèmes de vérification relatifs aux réseaux étendus. Il s'agit ensuite de spécifier le contrôleur du système, puis de dériver la commande correspondante, si possible par synthèse. A ce stade, peut en outre se poser le problème de la distribution de la commande. Il reste finalement à vérifier les propriétés du

système contrôlé, résultant de l'effet de la commande sans être explicites dans la spécification du contrôleur. L'étude d'une telle méthodologie de conception intégrée ne peut être menée à bien sans le concours de plusieurs équipes, ayant déjà développé les compétences nécessaires sur les thèmes de la modélisation modulaire, de la vérification, de la commande et de la synthèse de systèmes à l'aide de réseaux de Petri. Le renfort de deux équipes extérieures à l'INRIA, particulièrement compétentes en spécification et vérification, semble ainsi nécessaire pour mener à bien le projet précédent, en s'appuyant sur les résultats obtenus à l'INRIA en matière de modélisation modulaire, de commande et de synthèse. En nous fixant clairement le domaine des systèmes de production comme domaine d'application privilégié, nous visons à centrer le projet sur des objectifs réalistes. Le but est de mesurer l'effet dans ce domaine des avancées récentes sur les réseaux dues aux participants du projet.

Pour plus de détails, voir la page web de l'action : <http://www.loria.fr/~xie/Mars.html>.

### 8.1.2 PPF sur la conception et la gestion des organisations productives

Un projet Pluri-Formation (PPF) intitulé "conception et gestion des organisations productives" a été créé en 1997 dans le cadre du plan quadriennal de l'INPL. Il regroupe l'ex-équipe AMII du CRIN intégrée à l'équipe MACSI en janvier 1998 avec des membres du laboratoire Beta et l'ensemble du laboratoire LRPS de Strasbourg. L'activité 2000 s'est essentiellement concrétisée par la fin des travaux liés à la thèse de Abdel Halim Mahdi [1].

### 8.1.3 Région Lorraine

MACSI a reçu une dotation du Conseil Régional au titre de l'aide aux jeunes équipes de recherche de 75 KF en investissement et 75KF en fonctionnement pour l'année 2000.

### 8.1.4 Groupe BERMUDES

Plusieurs membres du projet MACSI participent régulièrement aux activités du groupe de travail BERMUDES et du groupe de travail GOTHA. Tous deux concernent les problèmes de recherche et d'enseignement de l'ordonnancement en France. Le groupe GOTHA comporte plus d'informaticiens et s'intéresse davantage aux aspects théoriques des problèmes d'ordonnancement. Le groupe BERMUDES comporte plus de producticiens et s'intéresse davantage aux aspects pragmatiques des problèmes d'ordonnancement. Cette année a été créé, dans le cadre du GOTHA, un groupe de travail sur la flexibilité et la robustesse des ordonnancements, groupe auquel participe activement Mohamed Ali Aloulou, Riad Aggoune, Marie-Claude Portmann et Antony Vignier.

### 8.1.5 Groupement de Recherche en Productique (GRP)

François Vernadat et Xiaolan Xie représentent régulièrement MACSI auprès du GRP. En particulier, ils sont actifs dans les groupes de travail "Modélisation d'entreprise" et "Systèmes de production sûrs de fonctionnement" où ils y ont présenté leurs travaux. Ces groupes se réunissent environ deux fois par an.

### 8.1.6 ROADEF

En 2000, Marie-Claude Portmann a passé le relais de la présidence de la ROADEF, société française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision créée en janvier 1998. Elle a terminé ses engagements importants pour la ROADEF avec la fin de la préparation de l'organisation du troisième prix Robert Faure 1999-2000 (président du jury du prix : Bernard Roy) qui a été remis à Troyes en avril 2000.

### 8.1.7 Groupe EEA "Réseaux de Petri"

Nidhal Rezg et Xiaolan Xie sont les représentants de MACSI dans ce groupe de travail du Club EEA. Ce groupe se réunit environ quatre fois par an pour des séminaires recherche d'une journée.

### 8.1.8 Club de Génie Industriel

Marie-Claude Portmann et François Vernadat sont membres du Club des Enseignants en Génie Industriel dont ils assurent certaines responsabilités au bureau du Club, en particulier, François Vernadat est vice-président de la commission recherche. Le Club a vocation à fédérer les activités en enseignement en Génie Industriel dans les formations universitaires françaises. Il organise le Congrès de Génie Industriel, tenu tous les deux ans, et dont Marie-Claude Portmann et François Vernadat sont membres du comité scientifique pour les éditions 1999 et 2001.

## 8.2 Actions internationales

### 8.2.1 Actions de normalisation (CEN, ISO)

François Vernadat participe régulièrement depuis près de dix ans en tant qu'expert français aux travaux de comités de normalisation dans le domaine de la modélisation et de l'intégration d'entreprise. Pour 2000, l'activité a essentiellement concerné les travaux communs du CEN TC 310 et de l'ISO TC 184 SC5 WG1 concernant la finalisation du document ISO DIS 15 704 (Requirements for Enterprise Reference Architectures and Methodologies) qui devient IS en 2000 (<http://www.mel.nist.gov/sc5wg1>) et la révision de l'ENV 40 003 du CEN (Architecture for Enterprise Modelling).

### 8.2.2 IFAC-IFIP Task Force

Ce groupe d'experts commun à l'IFAC et à l'IFIP travaille sur la généralisation d'architectures pour l'intégration d'entreprise et a proposé une architecture générale, nommée GERAM (Generalised Enterprise Reference Architecture and Methodologies) comme généralisation des architectures CIMOSA, GIM et PERA. Depuis le congrès mondial de l'IFAC à Beijing en juillet 1999, F. Vernadat s'est vu nommé vice-président du groupe et désigné comme responsable de l'action visant le développement d'un langage unifié pour la modélisation en entreprise (UEML). (<http://www.cit.gu.edu.au/~bernus/ifip/WG5.12/>). L'année 2000 a permis de définir les besoins pour un tel langage et un projet européen pour le développement de l'UEML est en cours de constitution pour être soumis comme projet IST en mars 2001.

### 8.2.3 CBI Grant

Gülğün Alpan, en collaboration avec Itir Karaesmen de Carnegie Mellon University, vient de recevoir une bourse de Carnegie Bosch Institute (de \$10000 sur 1 an) pour poursuivre des études sur l'évaluation du contrôle de stock et des différentes politiques de gestion de capacités dans une chaîne d'approvisionnement internationale.

### 8.2.4 NSF-INRIA Grant

NSF-INRIA Grant : Xiaolan Xie, en collaboration avec Prof. Mickael Fu, University of Maryland, vient de se voir octroyer une bourse (90 KF sur deux ans) pour poursuivre ses travaux en évaluation de performances de systèmes soumis à aléas avec prise en compte des activités de maintenance.

### 8.2.5 EC INTAS

Marie-Claude Portmann a participé au montage d'une demande de projet INTAS piloté par l'Université Technologique de Troyes (UTT) et portant sur les modèles et les méthodes pour équilibrer les chaînes automatisées et les lignes transfert.

## 9 Diffusion de résultats

### 9.1 Animation de la Communauté scientifique

Marie-Claude Portmann est expert depuis plusieurs années pour la région Pays de Loire pour le projet CIM Anjou faisant intervenir des laboratoires de Angers, Le Mans et Nantes.

François Vernadat est directeur du Laboratoire de Génie Industriel et Production Mécanique (LGIPM) commun à l'ENIM, l'ENSAM et l'Université de Metz.

François Vernadat est rédacteur en chef pour l'Europe de la revue *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*.

François Vernadat est membre du comité scientifique des revues suivantes : *International Journal of Production Research*, *International Journal of Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, *Computers in Industry*, *Engineering Design and Automation*.

François Vernadat est vice-président des comités techniques de l'IFAC : *IFAC TC-MIM on Manufacturing Modelling, Management and Control* (président : Prof. A. Villa) et *IFAC TC-MIA on Architectures for Enterprise Integration* (Président : Dr. P. Bernus). Il est également vice-président du groupe de travail *IFAC-IFIP Task Force on Architectures for Enterprise Integration* depuis juillet 1999.

François Vernadat est expert français auprès du CEN TC 310 WG1 et de l'ISO TC 184 SC5 WG1.

### 9.2 Enseignement

Le projet MACSI comporte 9 enseignants-chercheurs permanents. Ceux-ci dispensent leurs enseignements dans plusieurs établissements universitaires, soit au titre de leur charge principale, soit en enseignements supplémentaires. On peut citer en particulier : l'ENIM et la Faculté

des Sciences de Metz, l'ESIAL, l'ISIAL, l'ESSTIN et la Faculté des Sciences de l'UHP-Nancy 1, l'IUT d'informatique de Nancy 2, ainsi que l'Ecole des Mines de Nancy, l'ENSEM de l'INPL. En 2000, H. Amet est intervenu à l'Université Technologique de Wroclaw en Pologne (30 h) et F. Vernadat a été invité à intervenir dans le programme de la formation doctorale de l'ETS à Montréal (20 h), de l'Université Polytechnique de Valencia, Espagne (12 h) et de l'Institut Technologique de Monterrey (ITESM), Mexique (16 h).

Du point de vue de la formation doctorale, MACSI relève de l'Ecole doctorale IAE + M de Nancy. Deux membres de MACSI interviennent dans le cadre du DEA de Production Automatisée (PA) de Nancy-Cachan en tronc commun (François Vernadat et Xiaolan Xie).

### 9.3 Participation à des colloques, séminaires, tutoriels, invitations

Mis à part la participation régulière en tant que conférenciers aux congrès et colloques où furent présentés nos travaux, les membres de MACSI ont plus particulièrement contribué aux événements suivants :

2nd IFAC/IEEE/INRIA Int. Conf. on Manufacturing Control and Production Logistics (MCPL'2000), Grenoble, 4-7 Juillet 2000. F. Vernadat est vice-président et membre du comité scientifique avec Xiaolan Xie.

Préparation de la 3ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MO-SIM'01), Troyes, 25-27 avril 2001. F. Vernadat est président du comité scientifique, Xiaolan Xie est membre du comité scientifique.

### 9.4 Invitations

#### De Marie-Claude Portmann

- Séminaire INPG " Conception et pilotage court terme des systèmes de production ", Grenoble, jeudi 16 novembre 2000, titre de l'exposé : " Ordonnancements prédictifs flexibles / ordonnancement réactif : flexibilité versus performances ".

#### De François Vernadat

- Exeter University, Angleterre, 10-11 février 2000 (séminaire de 6 heures).

- Université Laval, Québec, 21-22 février 2000 (titre de l'exposé : " Techniques de modélisation et de simulation pour l'intégration des entreprises en réseau ").

- Université Polytechnique de Valencia, Espagne, 3-4 avril 2000 (cours de doctorat de 12h : Modélisation en Entreprise).

- Ecole de Technologie Supérieure, Montréal, Canada, 15-19 mai 2000 (cours de formation doctorale : Ingénierie des Systèmes).

- ITESM, Monterrey, Mexique, 9-23 juin 2000 (cours de 20h en Ingénierie d'Entreprise Intégrée et échange recherche).

- Ecole de Technologie Supérieure de Fès, Séminaire Gestion de la Qualité, Maroc, 1-6 novembre 2000 (titre de l'exposé : " Modélisation des processus opérationnels d'entreprise dans une démarche qualité ")

- Conférence invitée, session inaugurale : " Enterprise Modeling and Integration: Current status and research perspectives", 2nd IFAC/IEEE/INRIA Int. Conf. on Manufacturing Control and Production Logistics (MCPL'2000), Grenoble, 4 Juillet 2000.

### Editeurs invités de numéros spéciaux de revue

En 2000, des membres de MACSI ont participé à la préparation de numéros spéciaux de revues comme suit :

M.-D. Jeng et X-L. Xie, Numéro spécial sur Semiconductor Manufacturing Systems: Modeling, Analysis, and Control, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001.

F. Vernadat et X-L. Xie, Numéro spécial sur Modeling, Specification and Analysis of Manufacturing Systems, *International Journal of Production Research*, 2001.

F. Vernadat, Numéro spécial sur Enterprise Modelling, *Int. J. Production Planning & Control*, 2001.

### Personnes reçues

Les personnes suivantes ont été reçues par l'équipe MACSI :

- Prof. Mickael Fu, University of Maryland, USA 24-26/06/2000
- Prof. Daoud Ait-Kadi, Université Laval, Québec (1 mois)
- Prof. Mu der Jeng, National Taiwan Ocean University (3 mois)

## 9.5 Jurys de thèses et d'habilitations

Les membres de MACSI ont pris part aux jurys suivants :

- Gülgün Alpan : Ali Yalcin (thèse de Ph.D. Rutgers University, USA, rapporteur)
- Marie-Claude Portmann : Vincent Tkindt (thèse Université de Tours, rapporteur), Frédéric Guégnard (thèse, Université d'Angers, rapporteur), Arnaud Simon (thèse, Université de Nancy 1 Henri Poincaré, rapporteur), Laurent Girard (thèse, Université de Paris 6, rapporteur), Vincent Bernier (thèse, INP Grenoble, rapporteur), Lyes Benyoussef (thèse, INP Grenoble)
- François Vernadat : Mickael Petit (thèse Namur, Belgique, rapporteur), Corinne Thomas (thèse UHP Nancy I, président de jury), Agnès Dagan-Laville (thèse Ecole Centrale de Paris, rapporteur), Mounira Harzallah (thèse Université de Metz, directeur de thèse), Doru Mihalachi (thèse Université de Metz, examinateur), Laurent Gerbaud (HDR, INP Grenoble, examinateur), Philippe Levy (thèse, Université d'Aix-Marseille III, rapporteur), Djibril Ndiaye (thèse Ecole Centrale de Lille, rapporteur), Lionel Franchini (thèse Ecole des Mines d'Albi, rapporteur)
- Xiaolan Xie : Frédéric Quegnard (Université d'Angers, rapporteur), Ahmer Benasser (Ecole Centrale de Lille, rapporteur)

## 10 Bibliographie

### Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [1] A. MAHDI, *Utilisation de méta-heuristiques pour la résolution de problèmes d'agencement d'atelier, de découpe 2D et d'ordonnancement*, thèse d'université, INPL, Nancy, s, octobre 2000.

## Articles et chapitres de livre

- [2] G. ALPAN, B. GAUJAL, «Supervisory control of Petri nets using routing functions: starvation avoidance issues», *Special issue on Discrete Systems and Control, IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetics SMC* 30, 5, 2000, p. 684–69.
- [3] G. BERIO, F. VERNADAT, «Enterprise Modeling with CIMOSA: Functional and organizational aspects», *Production Planning & Control* 11, 2000.
- [4] L. DJERID, M. PORTMANN, «How to Keep Good Schemata Using Cross-over Operators for Permutation Problems», *International Transactions in Operational Research T.J. Stewart (Réd.)* 7, 2000, p. 637–651.
- [5] A. MAHDI, H. AMET, M. PORTMANN, «Algorithmes génétiques pour la résolution d'un problème de découpe 2D», *Technique et Science Informatique, Hermès, J.F. Maurras (Réd.)*, 2000, à paraître.
- [6] A. MAHDI, H. AMET, M. PORTMANN, «Genetic algorithms for the 2D placement», *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 2000, à paraître.
- [7] L. OZDAMAR, P. Y. BIRBIL, M. PORTMANN, «New results for the capacitated lot sizing problem with overtime decisions and setup times», *Journal of Production Planning & Control*, 2000, à paraître.
- [8] M. PORTMANN, A. VIGNIER, «Algorithmes génétiques et Ordonnancement», *Ordonnancement de la production, F. Roubellat & P. Lopez (Réd.) chapitre 4*, novembre 2000.
- [9] D. ROY, D. ANCIAUX, F. VERNADAT, «SYROCO: A novel multi-agent shop-floor control system», *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2000, à paraître.

## Communications à des congrès, colloques, etc.

- [10] M. ESPINOUSE, M. PORTMANN, G. FINKE, «Flowshop avec Chevauchements, Délais d'attente, Temps de préparation et Temps de remise en état», *in: Troisième congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et Aide à la Décision (ROADEF'2000)*, p. 76–77, janvier 2000.
- [11] A. MAHDI, A. ABBAS-TURKI, R. D. GUIO, «Data-oriented genetic operators for the production line formation problem», *in: Conference ORBEL 14*, 2000. CD-ROM.
- [12] A. MAHDI, H. AMET, M. PORTMANN, «An hybrid method for solving a facility layout with minimization of the transport costs», *in: Second Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL'2000)*, p. 205–207, 5-8 juillet 2000. CD-ROM.
- [13] A. MAHDI, G. A. M. PORTMANN, «Data oriented genetic operators for solving flowshop problems having tardiness criteria», *in: Industrial Engineering Research Conference (IERC'2000)*, mai 2000. CD-ROM.
- [14] A. MAHDI., M. PORTMANN, «New Genetic Operators for Flowshop Problems», *in: 7th International Workshop on Project Management and Scheduling (WPMS'2000)*, p. 205–207, 17-19 avril 2000.
- [15] Y. MATI, N. REZG, X.-L. XIE, «A Shortest Path Approach for Deadlock-Free Scheduling of Automated Manufacturing Systems», *in: IFAC/IFIP/IEEE 2nd Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL'2000)*, July 5-8 2000. CD-ROM.

- [16] M. PORTMANN, A. VIGNIER, «Etude comparative d'opérateurs de croisement pour un problème d'ordonnancement à une machine», in : *Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA'2000)*, 5-8 juillet 2000.
- [17] M. PORTMANN, A. VIGNIER, «Performances' study on crossover operators keeping good schemata for some scheduling problems», in : *Second Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'2000)*, D. Whitley, D. Golberg, E. Cantu-Paz, L. Spector, I. Parmee, H.-G. Beyer (éditeurs), p. 331–338, July 10-12 2000.
- [18] N. REZG, X.-L. XIE, A. GHAFARI, «Supervisory Control in Discrete Event Systems Using the Theory of Regions», in : *Discrete Event Systems: Analysis and Control (WoDES'2000)*, R. Boel, G. Stremersch (éditeurs), p. 391–398, August 2000.
- [19] B. SONNTAG, A. VIGNIER, «Un algorithme polynomial pour le problème ouvert du “coupled tasks”», in : *Troisième congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et Aide à la Décision (ROADEF'2000)*, p. 57–58, 26-28 janvier 2000.
- [20] F. VERNADAT, B. ZEIGLER, «New simulation requirements for model-based Enterprise Engineering», in : *IFAC/IEEE/INRIA 2nd Int. Conf. on Manufacturing Control and Production Logistics (MCPL'2000)*, 4-7 July 2000. CD-ROM.
- [21] F. VERNADAT, «Enterprise Modeling and Integration: Current status and research perspectives», in : *IFAC/IEEE/INRIA 2nd Int. Conf. on Manufacturing Control and Production Logistics (MCPL'2000)*, 4-7 July 2000. CD-ROM.
- [22] X.-L. XIE, Y.-S. HUANG, M.-D. JENG, S.-L. CHUNG, «An Iterative Deadlock Prevention Policy Based On Petri Nets», in : *IFAC/IFIP/IEEE 2nd Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL'2000)*, July 5-8 2000. CD-ROM.
- [23] X.-L. XIE, «Manufacturing flow control using fluid event graphs», in : *IFAC Symposium on Manufacturing, Modeling, Management and Control (MIM 2000)*, p. 190–195, July 12-14 2000.
- [24] X.-L. XIE, «Performance optimization of discrete event systems with failures using fluid Petri nets», in : *IEEE Conf. on Decision and Control*, December 2000.

## Divers

- [25] N. R. A. GHAFARI, X.-L. XIE, «Design of Live and Maximally Permissive Petri Net Controller Using Theory of Regions», soumis à *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 2000.
- [26] D. AIT-KADI, J. GAO, M. PORTMANN, «Minimisation des coûts de détection de pannes à partir des coupes minimales du diagramme de fiabilité», soumis à *MOSIM'01*, 25-27 avril 2001.
- [27] O. DUPUIS, «Gestion de ressources humaines : constitution des services pour habiller un ordonnancement cumulatif», Mémoire de DEA en Informatique, 12 juillet 2000.
- [28] Y. MATI, N. REZG, X.-L. XIE, «Geometric Approach and Taboo Search for Scheduling Flexible Manufacturing Systems», soumis à *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 2000.
- [29] Y. MATI, N. REZG, X.-L. XIE, «A taboo search approach for deadlock-free scheduling of automated manufacturing systems», soumis à *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2000.
- [30] X.-L. XIE, «Fluid stochastic event graphs for evaluation and optimization of discrete event systems with failures», soumis à *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 2000.

- [31] X.-L. X. Y-S. HUANG, M-D. JENG, S.-L. CHUNG, « A Deadlock Prevention Policy Based on Petri Nets and Siphons », *International Journal of Production Research*, 2001, à paraître en Février.