

Projet MACSI

Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes Industriels

Metz¹ et Nancy²

THÈME 4A



*R*apport
*d'**A*ctivité

1999

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	4
3	Fondements scientifiques	4
3.1	Modélisation des systèmes industriels	4
3.2	Synthèse de la commande des systèmes industriels	6
3.3	Évaluation de performances des systèmes à événements discrets	8
3.4	Ordonnancement et gestion des systèmes industriels	8
4	Domaines d'applications	10
5	Logiciels	11
6	Résultats nouveaux	11
6.1	Modélisation et synthèse des systèmes industriels	11
6.1.1	Modélisation des systèmes industriels	11
6.1.2	Synthèse des réseaux de Petri	12
6.1.3	Synthèse de commande à l'aide des réseaux de pétri	12
6.2	Évaluation des performances	13
6.3	Organisation et gestion de production	14
6.3.1	Ordonnancement prédictif pour les systèmes de production	14
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	16
6.3.5	Organisation des systèmes de production	17
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	18
7.1	Projet ESPRIT OPAL (EP 20 377)	18
7.2	Projet AEE (Architecture Electronique Embarquée)	18
7.3	Consulting à PSA Peugeot Citroën	18
7.4	Contrat avec la société FS2i	19
7.5	Consulting à Sollac	19
7.6	Consulting avec la Société INCOTEC	19
8	Actions régionales, nationales et internationales	19
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	Groupe BERMUDES	20
8.1.4	Groupement de Recherche en Productique (GRP)	21
8.1.5	ROADEF	21
8.1.6	Groupe EEA "Réseaux de Petri"	21

8.1.7	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 on Architectures for Enterprise Integration	22
8.2.3	EC INTAS	22
9	Diffusion de résultats	22
9.1	Animation de la Communauté scientifique	22
9.2	Enseignement	23
9.3	Participation à des colloques, séminaires, tutoriels, invitations	23
9.4	Invitations	23
9.5	Jurys de thèses et d'habilitations	24
10	Bibliographie	24

1. 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.

2. 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.

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

François Vernadat [Professeur à l'Université de Metz]

Personnel Université

Gülğün 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]
Lamia Djerid [ATER à l'Université Nancy II puis contractuelle, UHP - Nancy I]
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 [CR1 INRIA, puis Professeur à l'École Nationale d'Ingénieurs de Metz (depuis septembre 1999)]

Chercheurs invités

Giuseppe Berio [Boursier programme TMR, Université de Metz (jusqu'au 31 mai 1999)]
Mu Der Jeng [National Taiwan Ocean University (2 mois)]
Dr. Murat Uzam [postdoctorant (3 mois)]

Chercheurs invités

Doctorants

Bérénice Damasceno [Thèse soutenue le 4 mars 1999]
Mauro Ferreira Koyama [Doctorant, chercheur au CTI Campinas, Brésil (Thèse en 2000)]

Yadiz Mati [Doctorant (Thèse en 2002)]
Abdel Halim Mahdi [Doctorant (Thèse en 2000)]

Doctorants[]

Membres associés

Dominique Benmouffek [Maître de conférences à l'École des Mines de Nancy (INPL)]
Lionnel Grelly [Thèse CNAM]

Assistants de Projet

Antoinette Courier [TC CNRS, à temps partiel dans MACSI à Nancy]
Christel Wiemert [TC INRIA, à temps partiel dans MACSI à Metz]

Ingénieurs expert

Guy Achard [Sèdre, de mars 1999 à octobre 1999]

2 Présentation et objectifs généraux

L'avant-projet MACSI a été lancé en 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'ordonnancement 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'ordonnancement 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 : Gülğün 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^[AMI93], acceptée par les comités de normalisation tant européen (CEN) 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^[Wil92,Sch96]. 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^[BS92a]. 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^[Ho92]. Les formalismes les plus connus de représentation des systèmes à événements discrets sont les automates, les réseaux de Petri^[DA92,DHP⁺93], les state-

-
- [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.
- [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⁺93] F. DICESARE, G. HARHALAKIS, J.-M. PROTH, M. SILVA, F. VERNADAT, *Practice of Petri Nets in Manufacturing*, Chapman & Hall, London, 1993.

charts^[Har87], les processus communicants de type CSP^[Mil80,Hoa85,IV88a] ou utilisant les logiques temporelles ^[OW90a,MP92].

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 propriétés^[Mur89]. 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^[PX94]. 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^[WX96]. 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^[JX97].

3.2 Synthèse de la commande des systèmes industriels

Mots clés : synthèse de commande, système à événements discrets, contrôleur,

-
- [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.
 - [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.

superviseur, réseau de Petri.

Participants : Gülgün Alpan-Gaujál, 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^[KG95]. 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 peut utiliser les réseaux de Petri^[ZD93, HK92], les réseaux conditions /événements^[HR95], les langages formels ou l'approche de Ramadge et Wonham^[RW87, RW89, BW94], les processus récursifs finis^[IV88b] ou les logiques temporelles^[OW90b, Ost89].

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-Gaujál^[Alp97].

-
- [KG95] R. KUMAR, V. GARG, *Modeling and Control of Logical Discrete Event Systems*, Kluwer Press, Boston, 1995.
 - [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.

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^[Des90, Ho89, CMQV89, BCOQ92]. D'une part, les outils analytiques souffrent de problèmes d'explosion d'états, c'est-à-dire que 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^[HC91]. 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 Ordonnement et gestion des systèmes industriels

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

Participants : Gülğün Alpan-Gaujal, 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'ordonnement, la livraison, le contrôle de qualité, la supervision ou la maintenance des équipements, entre autres

-
- [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.
- [HC91] Y. HO, X. CAO, *Perturbation Analysis of Discrete Event Dynamic Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1991.

[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^[BS92b] ou les problèmes d'agencement de ressources^[MUY95], ce sont les problèmes de planification et d'ordonnancement pour lesquels les fondements théoriques sont les mieux établis^[Fre82].

Les problèmes de planification et d'ordonnancement se posent aux niveaux moyen terme, court terme et très court terme d'une approche de gestion de la production hiérarchisée. 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 ?

Les problèmes de planification concernent le niveau moyen terme^[Orl75]. Il s'agit de répartir les charges de production, éventuellement entre plusieurs sites géographiques, et de les lisser sur un horizon relativement long, appelé horizon du moyen terme et constitué d'unités de temps du moyen terme. Par exemple, l'horizon du moyen terme peut être 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^[BEP⁺96]. 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 (on considère un problème très difficile de référence qu'aucun scientifique n'a pu résoudre jusqu'à ce jour avec un algorithme polynomial et on démontre mathématiquement que le problème à résoudre est au moins aussi difficile que le problème de référence) 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 qu'ils durent en général des siècles d'ordinateur dès l'instant où l'on considère des problèmes de taille industrielle). C'est

-
- [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.
- [Fre82] S. FRENCH, *Sequencing and Scheduling: An Introduction to the Mathematics of the Job Shop*, Horwood, Chichester, 1982.
- [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.

pourquoi, pour ces problèmes, on conçoit des méthodes approchées (recuit simulé, méthodes Tabu, algorithmes évolutionnistes...) qui ne donnent pas toujours la solution optimale et qui ne prouvent pas nécessairement l'optimalité de la solution obtenue, alors qu'il faut utiliser des méthodes exactes polynomiales pour les problèmes faciles^[ACC+96].

Au niveau du très court terme, l'existence d'aléas nécessite de concevoir des processus réactifs de pilotage en temps réel, en essayant de garder le mieux possible les performances de l'ordonnement prédictif à court terme.

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 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)

[ACC+96] F. ALEXANDRE, C. CARDEIRA, F. CHARPILLET, Z. MAMMERI, M. PORTMANN, *Compu-Search Methodologies II : Scheduling Using Genetic Algorithms and Artificial Neural Networks*, édition In Production and Scheduling of Manufacturing Systems, (A. Artiba et E. Elmaghraby, Chapman & Hall, London, 1996.

5 Logiciels

Un certain nombre de résultats de l'équipe MACSI font l'objet de développement de programmes informatiques ou de systèmes logiciels. Parmi ceux-ci, nous pouvons citer :

- les programmes de formation de cellules et d'agencement de systèmes de production
- les programmes d'ordonnancement
- les méthodes d'évaluation de performances
- le système SYROCO de conduite réactive d'atelier

L'ensemble de ces systèmes n'en sont qu'au stade de prototypes de recherche. Certains peuvent cependant être appliqués industriellement en l'état pour résoudre des problèmes spécifiques difficiles (ordonnancement, agencement).

Un logiciel de calepinage a été développé par Henri Amet pour la société FS2i dans le cadre d'un contrat du projet ISA de mars 99 à mai 99 (avec des mises en conformité jusqu'à décembre 99). Il s'agit d'un logiciel qui optimise (par des méthodes approchées) le coût de l'installation de plaques chauffantes dans des plafonds suspendus. Ce logiciel, selon le contrat, est la propriété de la société FS2i. Des démonstrations peuvent néanmoins être présentées (pour le moment sur nos machines personnelles).

6 Résultats nouveaux

6.1 Modélisation et synthèse des systèmes industriels

Mots clés : systèmes industriels, systèmes à événements discrets, modélisation en entreprise, modélisation comportementale, synthèse de commande, réseau de Petri..

6.1.1 Modélisation des systèmes industriels

Participants : Giuseppe Berio, François Vernadat, Lionel Gelly.

Le but de cette recherche est de définir un lien clair entre les concepts de la modélisation en entreprise (de nature plutôt descriptive) et ceux de la modélisation comportementale (de nature plutôt analytique). Pour cela, nous nous basons pour le modèle d'entreprise sur les constructs (ou blocs de base de modélisation) de CIMOSA que nous avons développés antérieurement [1, 5, 9, 10] et qui fournissent toujours une base de travail au niveau international pour les discussions de la *IFAC-IFIP Task Force on Architectures for Enterprise Integration*, un groupe de travail international sur les architectures d'intégration d'entreprise¹. Concernant les aspects fonctionnels, les résultats obtenus cette année ont permis de montrer comment passer du modèle de haut niveau centré processus de CIMOSA 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 [11, 12]. La partie workflow est spécifiée sous forme de réseaux de Petri et la partie ressources est spécifiée à l'aide de state-charts de

1. <http://www.cit.gu.edu.au/~bernus/ifip/WG5.12/>

Harel. Un mécanisme d'intégration prenant en compte la sémantique des deux formalismes est alors proposé pour faire le couplage des deux modèles et spécifier le comportement global du système en ajoutant éventuellement des règles de coordination. La prochaine étape consistera à faire le lien avec les travaux en synthèse de réseaux de Petri développée en 6.1.2. Concernant les aspects informationnels, nous avons complété les aspects statiques et dynamiques du modèle PDN (Process and Data Net) de spécification de la méthodologie M* (modèle à base d'objets et de réseaux de Petri) par des aspects temporels [4, 3, 31].

Un travail annexe, réalisé dans le cadre de la thèse CNAM de Lionnel Gelly, nous a permis de mettre en évidence l'inadéquation des logiciels classiques de simulation (comme ARENA ou G2) pour simuler des modèles d'entreprise de grande taille ou des chaînes logistiques inter-entreprises. La structure monolithique et "à plat" des modèles manipulés se prête mal à l'étude de mécanismes de coordination de processus concurrents et asynchrones exécutés par des entités fonctionnelles pouvant présenter différents types de comportements. Nous avons déduit de cette étude un cahier des charges pour une nouvelle famille de simulateurs adaptés à ce besoin (simulation distribuée et architecture multi-agents) [21, 27]. Actuellement, nous poursuivons cette étude et nous cherchons à lancer un projet international avec l'Université Laval (Québec), le CTI à Campinas (Brésil), le AI & Simulation Center (Tucson, 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.

6.1.2 Synthèse des réseaux de Petri

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

La venue du Professeur MuDer Jeng en qualité de professeur invité a été l'occasion de poursuivre et de renforcer notre collaboration sur la synthèse des réseaux de Petri pour la modélisation des systèmes complexes de production. Nous avons développé une approche de modélisation à deux étapes : i) modélisation des produits et ii) prise en compte des ressources. D'abord, chaque type de produit est modélisé à l'aide d'une classe de réseaux de Petri que nous appelons "Process-Nets". Un tel réseau contient une place marquée initialement, appelée "job-place", et possède la particularité de pouvoir toujours revenir à l'état initial tout en bloquant les jetons de la job-place. Dans la deuxième étape, de nouvelles places reliant les différents Process-Nets sont introduites pour modéliser les ressources. Nous montrons que les PNR (les réseaux intégrés Process-Nets with Resources) permettent de modéliser un large éventail des systèmes de production. De plus, un PNR est réversible et sans blocage si et seulement si aucun siphon (une propriété structurelle correspondant à un sous-ensemble de places) ne peut devenir vide. La vivacité d'un PNR peut également être caractérisée par les siphons. Une fois de plus, nous constatons l'importance de la notion de siphons dans l'analyse de réseaux de Petri [8, 7].

6.1.3 Synthèse de commande à l'aide des réseaux de pétri

Participants : Gülğün Alpan-Gaujaj, Bruno Gaujal [Projet TRIO], M. A. Jafari

[Professeur à Rutgers University], Nidhal Rezg, Xiolan Xie.

Cette recherche concerne le problème de la conception et l'analyse d'un contrôleur - superviseur. Dans l'article par Alpan et Jafari [AJ98], nous avons évoqué les problèmes pratiques liés à la conception du contrôleur et proposé un modèle pour le système sous contrôle. Ce modèle est hybride car le modèle du système de production est un réseau de Petri et le contrôleur - superviseur est basé sur la théorie de Ramadge et Wonham et utilise les langages formels. Nous donnons un algorithme pour fusionner ces deux modèles dans lequel le modèle résultant qui donne le comportement sous contrôle du système de production est un 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. Dans l'article par Alpan et Gaujal [30], nous avons 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 notre cas, nous utilisons les fonctions de routage. D'abord, nous montrons la relation entre les deux notions, contrôle par les places de contrôle et contrôle par routage. Ensuite, nous présentons l'utilisation des fonctions de routage pour éviter les famines dans un sous-ensemble de RdP, notamment les SI-nets (c'est-à-dire "single input nets"). L'avantage des fonctions de routage est que nous n'avons pas besoin du graphe de recouvrement mais des équations d'évolution sous forme d'algèbre linéaire. Notre méthode peut donc être utilisée pour les RdP non-bornés. Une autre partie de la recherche s'inscrit dans le cadre de l'action coopérative 1999-2000 MARS dont Xiaolan Xie est le coordinateur (voir section 8.1.1). Cette année a vu le démarrage de l'action et la mise en commun de méthodes et outils pour l'analyse et la synthèse de commande de systèmes à événements discrets. Ainsi, une approche originale a déjà pu être proposée. Celle-ci consiste tout d'abord à construire le réseau de Petri de la partie opérative du système (processus physique), puis à générer le graphe de recouvrement de ce réseau, puis à modifier ce graphe pour éviter d'atteindre 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 les résultats du projet Paragraphe. Nous avons démontré que, pour les réseaux de Petri sains (réseaux de Petri dont le marquage est binaire), la supervision peut être réalisée par ajout des nouvelles places appelées places de contrôle. Les résultats du projet Paragraphe peut être utilisés pour déterminer ces places de contrôle. Un nouveau problème à résoudre est celui de l'optimisation qui consiste à minimiser le nombre de places de contrôle.

6.2 Évaluation des performances

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

Participants : Nidhal Rezg, Xiaolan Xie, Michael Fu [professeur à l'University of Maryland], MuDer Jeng [professeur à National Taiwan Ocean University].

Dans le cadre de notre collaboration avec le Professeur MuDer Jeng, à partir du modèle RdP obtenu à l'aide d'une approche modulaire, nous nous intéressons dans ce travail à l'éva-

[AJ98] G. ALPAN, M. A. JAFARI, « Synthesis of a closed-loop combined plant and controller model », 1998, révisé Sept. 1999.

luation des performances du système considéré. Les temps de franchissement des transitions sont supposés soit nuls soit exponentiellement distribués. Le processus stochastique sous-jacent est par conséquent Markovien. Pour éviter le problème d'explosion d'états, nous utilisons la technique de l'uniformisation et les propriétés du modèle RdP pour établir des bornes inférieures et supérieures d'une large classe de mesures de performance. Ces bornes peuvent être obtenues à l'aide de la programmation linéaire. L'originalité de ce travail est la prise en compte des opérations non-préemptives et des règles de gestion exprimées en termes de priorité, de la reprise des opérations et des opérations de maintenance préventive. Une expérimentation numérique a été menée pour étudier la productivité et les taux d'utilisation des équipements d'un système de fabrication de circuits intégrés. Les résultats montrent que la borne supérieure est d'excellente qualité et l'erreur est de l'ordre de 5%. Par contre, la borne inférieure est de moins bonne qualité. Nous travaillons actuellement sur l'amélioration des bornes [14, 25].

Dans le cadre de notre collaboration avec le Professeur Michael Fu, nous nous intéressons à la prise en compte des données de production, telles que le planning et les paramètres de contrôle, dans la détermination des politiques/ordonnancement de maintenance. Cette recherche part du constat que seules les données sur la fiabilité des équipements sont prises en compte dans les approches existantes et les données de la production sont généralement ignorées. Dans ce projet de collaboration, nous étudions les méthodes analytiques et les méthodes fondées sur la simulation pour une optimisation globale de la politique de maintenance et la gestion de production. Une proposition de collaboration NSF/INRIA a été déposée.

6.3 Organisation et gestion de production

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

6.3.1 Ordonnancement prédictif pour les systèmes de production

Participants : Gülgün Alpan-Gaujál, Marie-Claude Portmann, Benoît Sonntag, Antony Vignier.

Nous travaillons sur les ordonnancements prédictifs depuis de nombreuses années. Nous nous sommes intéressés au croisement des algorithmes génétiques avec des techniques plus classiques de recherche opérationnelle^[PVDD98]. Nous travaillons à la fois sur l'efficacité des algorithmes génétiques, en cherchant à concevoir des croisements qui conservent les meilleures propriétés des chromosomes croisés [6, 13, 32, 37], et sur celle des techniques de recherche opérationnelle, en cherchant à améliorer les bornes inférieures, les bornes supérieures et les schémas de séparation des procédures par séparation et évaluation développées [6]. Nos travaux récents sur les algorithmes génétiques nous ont conduits à concevoir des opérateurs génétiques de type "data oriented" qui se sont révélés efficaces pour plusieurs problèmes d'ordonnancement [37]. Nous étudions plus précisément dans quelle mesure leur efficacité dépend de la structure de l'atelier et de l'environnement de production (existence et positionnement de machines

[PVDD98] M. PORTMANN, A. VIGNIER, D. DARDILHAC, D. DEZALAY, « Branch and Bound Crossed with GA to Solve Hybrid Flowshops », *European Journal of Operational Research* 107, 1998, p. 389–400.

goulets d'étranglement, délais clients plus ou moins tendus). Nous avons également utilisé une approche par construction suivie d'une approche par améliorations successives pour un problème d'ordonnancement issu de la sidérurgie^[VWP98]. Cette méthode a été améliorée d'une part en utilisant une règle de priorité plus adéquate, d'autre part en utilisant un algorithme génétique [24, 23, 29]. Les problèmes abordés ces derniers temps appartiennent tous à la même famille : les flow-shops hybrides et leurs cas particuliers (un seul étage ou une seule machine par étage) avec des hypothèses issues de problèmes concrets.

Enfin, dans le cadre du DEA informatique de Nancy de Benoît Sonntag, co-encadré par Antony Vignier et Marie-Claude Portmann nous nous sommes intéressés à un problème académique d'ordonnancement. Il s'agit d'un problème intitulé "coupled tasks" où les opérations sont composées de deux tâches couplées entre l'exécution desquelles la ressource est disponible pour d'autres tâches. Pour un cas particulier dont la complexité reste ouverte, nous avons conçu un algorithme polynomial qui nous a fourni la solution optimale pour toutes les instances générées, néanmoins, la complexité en temps de ce problème (est-il NP difficile ou polynomial?) demeure ouverte sauf sur quelques cas encore plus particuliers où nous avons montré que le problème était polynomial [29].

6.3.2 Ordonnancement réactif

Participants : Marie-Claude Portmann, Antony Vignier.

Nous avons commencé des travaux sur les ordonnancements réactifs et plus particulièrement sur la boucle rétroactive entre les ordonnancements prédictifs et les ordonnancements réactifs. Si quelques chercheurs proposent (depuis plus de vingt ans pour certains) de fournir non pas un ordonnancement "prédictif", mais des familles d'ordonnancements prédictifs qui vont conserver une certaine flexibilité qui pourra être utilisée lors de l'apparition d'aléas au niveau de l'ordonnancement réactif, aucun d'entre eux ne propose d'indicateurs permettant de mesurer la flexibilité des ordonnancements prédictifs proposés et de la relier à la déviation des performances obtenues par rapport à celles attendues en fonction du processus réactif utilisé. Ils n'ont donc aucun moyen de faire un choix raisonnable entre deux familles d'ordonnancements prédictifs supposées contenir un maximum de flexibilité. Nos objectifs sont : i) de concevoir des mesures de flexibilité, ii) de choisir des indicateurs de performances et iii) de mettre en œuvre de nouveaux processus d'intégration à deux niveaux (prédictif/réactif) qui intégreraient les nouvelles mesures et permettraient globalement une meilleure performance. Cette thématique, qui nous paraît fondamentale pour la bonne résolution des problèmes d'ordonnancement en entreprise, est une de nos perspectives prioritaires. Une première étude très simple a été menée dans le cadre du mémoire de DEA de Benoît Sonntag [29]. Dans un premier temps, nous nous sommes limités à un problème à une seule machine. Grâce à un algorithme génétique, nous avons construit un ensemble d'ordonnancements de bonne qualité pour les critères de performance considérés. Nous avons appliqué à cette ensemble des études statistiques dont les résultats sont utilisés lorsque le processus réactif doit prendre des décisions en présence d'aléas.

[VWP98] A. VIGNIER, S. WAGNER, M. PORTMANN, « Alternative assignment and sequencing on 2-parallel machine problem under constraints », *in : 6th Int. Workshop on Production Management Scheduling (WPMS'98)*, p. 324-328, July 7-9 1998.

6.3.3 Gestion des systèmes de production à ressources multiples

Participants : Bérénice Damasceno, Xiaolan Xie.

L'étude a fait l'objet de la thèse de Mlle Bérénice Camargo Damasceno sur l'ordonnement des systèmes automatisés de production [2]. Nous avons introduit la notion de "job-shops Multi-ressources avec Blocage" ou job-shops MRB qui forment un cadre générique pour l'étude d'ordonnement des systèmes de production automatisés. Un job-shop MRB est composé d'un ensemble de ressources de différents types sur lesquelles est réalisé un ensemble de travaux. Chaque type de ressources contient une ou plusieurs ressources identiques. La réalisation d'un travail nécessite une séquence d'opérations. L'exécution d'une opération nécessite la présence simultanée d'un ensemble de ressources différentes ou non. Le passage d'une opération à l'opération suivante est caractérisé par la propriété "Retenir et Attendre", c'est-à-dire qu'à la fin d'une opération d'un travail, les ressources nécessaires à l'opération suivante de la même tâche ne peuvent être libérées et les autres ressources ne peuvent pas être libérées avant le début de l'opération suivante. Les opérations multi-ressources et la propriété "Retenir et Attendre" rendent la coordination des ressources difficile et rendent le système sensible au blocage. La méthode d'ordonnement que nous avons proposée est fondée sur la notion des systèmes simples, une classe de job-shops MRB dont le passage entre deux opérations consécutives est caractérisée soit par l'acquisition de nouvelles ressources soit par la libération des ressources. Nous montrons que pour un système simple, les contraintes de capacité de ressources et de précedence des opérations impliquent l'absence de blocage. Nous avons développé dans des heuristiques permettant d'obtenir, pour un système simple, des ordonnancements sans blocage tout en minimisant la durée totale de l'ensemble de tâches. L'ordonnement d'un job-shop MRB quelconque consiste donc en trois étapes : i) transformer le job-shop MRB en un système simple, ii) ordonner le système simple, iii) traduire l'ordonnement du système simple en celui du job-shop MRB. Les résultats numériques obtenus sont satisfaisants [13, 18].

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. Celles-ci sont assez difficiles à prendre en compte et à résoudre de manière automatique et dans des temps brefs. En effet, pour trouver une solution il faut prendre en compte tous les paramètres régissant la production d'un produit (cadences, charges, capacités, etc.) et établir le panel de solutions acceptables. Il faut de plus pouvoir choisir la solution la mieux adaptée et/ou la moins coûteuse. En pratique, ces tâches sont en général réalisées par des opérateurs humains. Cependant, la résolution du problème dépend de la vitesse de recherche des solutions et du temps nécessaire pour en effectuer le tri. C'est pourquoi, nous cherchons à automatiser cette tâche et à en accélérer l'exécution afin de pouvoir répondre aux aléas de production (endogènes et exogènes) et ceci en temps quasi-réel.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons réalisé une plate-forme pour le pilotage réactif d'atelier. Ce système, nommé SYROCO (SYstème Réactif par Objectifs de CONduite), est

basé sur une structure multi-agents fortement hiérarchisée et à contrôle centralisé [19, 22, 36]. L'originalité de cette approche réside dans l'utilisation conjointe de techniques habituellement dissociées. Ainsi, nous utilisons des agents cognitifs, à savoir le Superviseur qui gère le système et le Méta-Objet qui construit les solutions, et des agents réactifs (agents Cellules, Produits et Ressources) qui réagissent à des stimuli. De plus, nous utilisons une structure de commande hiérarchique (chaque niveau de l'architecture correspond à un niveau de décision de l'atelier) gérée par un organe de décision central et unique (le Superviseur). Les tests effectués par simulation donnent des résultats particulièrement encourageants [36]. En effet, il apparaît que le système est capable de fournir des résultats fiables et stables avec des temps de réaction de l'ordre de la minute. Bien qu'il ne s'agisse que d'une simulation, ces résultats sont très prometteurs quant à l'implantation de SYROCO sur un véritable atelier.

Actuellement, SYROCO est en phase de transfert sur une cellule d'assemblage. Ce travail a plus particulièrement été confié à M. Ferreira Koyama. Il est réalisé en collaboration avec l'Université de Campinas et le CTI (Brésil) [20].

SYROCO ayant été développé de manière très générale 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 fusionnant différents niveaux de l'architecture initiale.

Enfin, nous prévoyons d'utiliser SYROCO sur diverses cellules (ENIM, Université de Metz) afin d'en tester la fiabilité en situation réelle. Pour cela, le Superviseur fera appel aux algorithmes d'ordonnancement développés par les autres membres de MACSI.

6.3.5 Organisation des systèmes de production

Participants : Abdeljallil Abbas-Turki, Henri Amet, Abdel Halim Mahdi, Randame Mansoura, Marie-Claude Portmann.

Nous nous intéressons de manière privilégiée aux problèmes d'agencement physique d'ateliers. Nous avons développé des procédures de résolution en croisant des méta-heuristiques (recuit simulé et algorithmes génétiques essentiellement) avec des approches exactes de recherche opérationnelle qui nous permettent de résoudre plusieurs problèmes d'agencement avec des hypothèses différentes [17, 35, 34]. Nous sommes en train d'utiliser cette bibliothèque de procédures pour résoudre avec des approches similaires des problèmes de découpe industrielle à deux dimensions [15, 16, 33]. Dans le cadre d'une collaboration avec Roland De Guio du LRPS (Laboratoire de Recherche en Productique de Strasbourg), nous avons enrichi et complété cette bibliothèque de procédure. Plus particulièrement, dans le cadre du DEA GSI de Nancy de Abdeljallil Abbas-Turki [26], co-encadré par Adel Halim Mahdi, Marie-Claude Portmann et Rolland De Guio, nous avons croisé des éléments de la bibliothèque fournie par Strasbourg (mise en évidence de concepts d'ordres partiels ou de classes, par exemple) avec les éléments de la bibliothèque fournie par Nancy (éléments constitutifs de méthodes approchées) et nous avons complété l'ensemble avec des outils de visualisation de graphe. L'objectif de cette collaboration était de concevoir des outils de visualisation de flux physiques dans les ateliers. Dans un cadre plus global des problèmes de gestion de production, Marie-Claude Portmann a co-encadré, avec André Thomas du LRPSI de Nancy, le mémoire de DEA de Randame Mansoura

[28] sur l'amélioration de l'établissement du plan industriel et commercial (PIC) pour un site industriel lorrain dépendant d'un groupe mondial (zone Europe), sachant qu'il faut obtenir sur une période très courte un compromis entre le PIC du site local et les besoins au niveau Europe.

Nous avons également traité un problème d'agencement très particulier qui consiste à "optimiser" le coût et le schéma de montage du placement de plaques chauffantes dans des plafonds suspendus. Il s'agit bien sûr de méthodes approchées les plus efficaces possibles car la réponse doit être quasi-instantanée.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 Projet ESPRIT OPAL (EP 20 377)

Participants : Daniel Roy, François Vernadat.

Le contrat OPAL est un projet ESPRIT AIT qui est arrivé à son terme en février 1999. Il avait pour but de développer une plate-forme d'intégration permettant l'interopérabilité des systèmes d'application et l'échange de données techniques nécessaires à l'exécution des processus opérationnels dans des environnements de conception et de fabrication hétérogènes et répartis. L'architecture développée fait intervenir des technologies avancées et des normes existantes comme la technologie objet, un ORB de type CORBA, les technologies hypermédia, le web et HTML, la technologie workflow/WPDL et STEP/EXPRESS. Dans la phase finale du contrat, les membres de MACSI sont intervenus avec l'ENIM pour le compte du LGIPM et de l'INRIA dans la réalisation du démonstrateur OPAL de PSA (gestion des modifications techniques de pièces de véhicule en bureau d'études) [25]. Partenaires: Fatronik (SP), AMT (IRL), Bull (F), Bosch (D), Eigner & Partners (D), ENIM (F), FAW (D), INRIA (F), O2 Technology (F), PSA (F), SHERPA France (F), Tekniker (SP).

7.2 Projet AEE (Architecture Electronique Embarquée)

Participants : Gülgün Alpan-Gaujal, Marie-Claude Portmann, François Vernadat.

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 première 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 la tâche 3 du lot 1 pour la définition d'algorithmes de placement optimisé des fonctions sur les calculateurs présents dans une architecture donnée. Partenaires: GIE PSA Peugeot Citroën - Renault, Aérospatiale, Valéo, Siemens Automative, INRIA, IRCyN, LORIA.

7.3 Consulting à PSA Peugeot Citroën

Participants : Giuseppe Berio, François Vernadat.

La Division des Technologies de l'Information et Informatique (DTII) du groupe PSA nous

a confié une étude comparative sur les systèmes de workflow susceptibles de répondre à leurs besoins en matière d'ingénierie de systèmes de production et de conception de produit dans le cadre de leur projet IngéNum. Ce contrat d'une durée de 4 mois a été mené à terme. Il a permis de sélectionner cinq systèmes répondant aux besoins parmi lesquels un système doit être retenu par PSA.

7.4 Contrat avec la société FS2i

Participants : Henri Amet, Marie-Claude Portmann.

A la demande du projet ISA, Henri Amet a conçu pour la société FS2i un logiciel clé en main de calepinage (outil d'aide au placement de plaques chauffantes dans les plafonds suspendus) de manière à minimiser les ressources utilisées tout en maintenant un schéma agréable pour les monteurs. Le contrat d'une durée de deux mois a été mené à terme.

7.5 Consulting à Sollac

Participant : Marie-Claude Portmann.

Marie-Claude Portmann poursuit une action de conseil pour la SOLLAC Thionville depuis 1991. Il s'agit d'activités de transfert de connaissances. Marie-Claude Portmann conseille la direction du développement de la SOLLAC pour l'amélioration de son système d'aide à la décision, abordant successivement des problèmes d'aide à la décision divers et variés. Ces problèmes enrichissent la base de problèmes concrets travaillés par l'équipe dans un cadre plus fondamental.

7.6 Consulting avec la Société INCOTEC

Participants : Marie-Claude Portmann, Antony Vignier.

Marie-Claude Portmann a assuré du consulting en ordonnancement auprès de la société INCOTEC, Société de service en informatique qui, en particulier, fournit des logiciels en ordonnancement sur mesure en collaboration avec une autre société qui installe des ERP (Enterprise Resource Planning) dans les entreprises. Cette collaboration devrait se poursuivre par l'encadrement de bourses Cifre.

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, l'avant-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, en construisant sur les réseaux de Petri une méthodologie de conception intégrée des systèmes à événements discrets contrôlés, de contribuer au développement de logiciels sûrs et fiables. 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'action².

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 et de l'UHP. 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 1999 s'est essentiellement concrétisée par le co-encadrement d'un DEA GSI sur la visualisation des flux de production [26].

8.1.3 Groupe BERMUDES

Plusieurs membres du projet MACSI participent régulièrement aux activités du groupe de travail BERMUDES qui concerne les problèmes de recherche et d'enseignement en ordonnancement en France. Ce groupe de travail réunit des chercheurs de plus de 20 laboratoires

2. <http://www.loria.fr/xie/Mars.html>

français. Il est actuellement piloté par Michel Gourgand du LIMOS Clermont Ferrand³.

8.1.4 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.

8.1.5 ROADEF

Pour 1998 et 1999, Marie-Claude Portmann est présidente de la ROADEF⁴, société française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision créée en janvier 1998. En 1999, elle a représenté la France à Pékin pour le 40ème anniversaire de IFORS. La société a intensifié ses relations avec ses sociétés soeurs (principalement Belgique, Canada, Italie et Suisse). Elle est en train de préparer son troisième bulletin. Elle a enrichi considérablement son site Web. Le bureau de la ROADEF est chargé de l'organisation du troisième prix Robert Faure 1999-2000 (président du jury du prix : Bernard Roy).

8.1.6 Groupe EEA "Réseaux de Petri"

Nidhal Rezg et Xiaolan Xie sont les représentants de MACSI dans ce groupe de travail du Club EEA. En particulier, ils ont présenté l'action MARS lors de la dernière réunion du groupe organisée en septembre 1999 à Paris. Ce groupe se réunit environ quatre fois par an.

8.1.7 Club de Génie Industriel

Marie-Claude Portmann et François Vernadat sont membres du Club de Génie Industriel (comprenant une commission recherche et une commission enseignement) dont ils assurent certaines responsabilités, soit au bureau du Club, soit dans le cadre de la nouvelle revue du Club intitulée "Les Cahiers du Génie Industriel".

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 1999, l'activité a essentiellement concerné les travaux de l'ISO TC 184 SC5 WG1 en charge des questions de modélisation et d'intégration en automatisation industrielle et en particulier la finalisation du document ISO DIS 15 704 (Requirements for Enterprise Reference Architectures and Methodologies) soumis au vote fin 1999⁵.

3. <http://bermudes.univ-bpclermont.fr/>

4. <http://www.lip6.fr/ROADEF/>

5. <http://www.mel.nist.gov/sc5wg1>

8.2.2 IFAC-IFIP Task Force on Architectures for Enterprise Integration

Ce groupe d'experts commun à l'IFAC et à l'IFIP travaille sur la généralisation d'architectures pour l'intégration d'entreprise. Une architecture générale, nommée GERAM (*Generalised Enterprise Reference Architecture and Methodologies*), a été proposée par le groupe sur la base des résultats des architectures CIMOSA, GIM et PERA pour le CIM. En 98-99, le document de référence sur GERAM, rédigé à l'origine par K. Kosanke et F. Vernadat en 1997, a été finalisé et sert d'annexe au document ISO DIS 15 704. Ce groupe se réunit 2 à 3 fois par an à l'occasion de congrès ou conférences IFAC ou IFIP. Lors du congrès mondial de l'IFAC à Beijing en juillet 1999, un nouveau mandat de trois ans a été défini pour la Task Force et F. Vernadat s'est vu nommé vice-président du groupe et désigné 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/>).

8.2.3 EC INTAS

Didier Anciaux, Daniel Roy, François Vernadat et Xiaolan Xie ont participé à un projet INTAS piloté par l'Université Technologique de Troyes (UTT) et portant sur la conception et la conduite d'un atelier flexible pour la fabrication de pièces en plastique moulées. Ce projet s'est terminé en août 1999. Il avait pour objet la conception intégrée, l'évaluation et la conduite de cellules flexibles robotisées de production. Les membres de MACSI du LGIPM sont intervenus dans ce projet pour des problèmes d'agencement de cellule, de dimensionnement, d'évaluation de performance, d'ordonnancement et de pilotage. Les autres partenaires du projet sont l'Université de Saint-Petersbourg (Russie), l'Université de Minsk (Biélorussie) et l'Université de Southampton (UK). Suite à ce projet, un nouveau contrat INTAS, intitulé "Performance Evaluation and Multicriteria Optimisation Tool-kit for Integrated Design of Production Lines" a été soumis en août 1999 avec notre collègue A. Dolgui de l'UTT, des russes et des biélorusses. MACSI est porteur de ce nouveau projet.

9 Diffusion de résultats

9.1 Animation de la Communauté scientifique

Marie-Claude Portmann est présidente de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF). Elle est membre du conseil scientifique du laboratoire HEUDIASYS (Dir. B. Dubuisson), Université Technologique de Compiègne. Elle 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. Il est rédacteur en chef pour l'Europe de la revue *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. Il 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* et *Cahiers de Génie Industriel*. Il 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. Il 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 complémentaires. 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'École des Mines de Nancy, l'ENSEM de l'INPL. Mais aussi, l'École des Mines de Paris, l'E2I de Tours et l'Université Technologique de Wroclaw en Pologne.

Deux membres de MACSI interviennent dans le cadre du DEA de Production Automatisée de Nancy-Cachan en tronc commun (François Vernadat) et pour les cours d'option (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 :

Journées d'optimisation de Montréal (Optimization Days), mai 1999. Antony Vignier a organisé une session invitée sur les problèmes d'ordonnancement.

IFAC World Congress, 5-9 July 1999, Beijing : - François Vernadat : Co-organisateur, avec Prof. P. Bernus, de deux sessions invitées "Enterprise Integration: Social and Organisational Aspects" - Xiaolan Xie : Co-organisateur, avec Prof. MuDer Jeng, de deux sessions invitées "Scheduling and control of manufacturing systems" et "Petri nets in manufacturing".

15th ISPE/IEE International Conference on CAD/CAM Robotics and Factories of the Future (CARS & FOF'99), Aguas de Lindoia, SP, Brésil, 18-20 août 1999. François Vernadat est membre du comité scientifique et conférencier invité en séance plénière "Enterprise Integration: Myth or Reality?".

IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, Tokyo, Japan, Octobre 1999. Xiaolan Xie est membre du comité scientifique et co-organisateur, avec Prof. MuDer Jeng, d'une session invitée "Petri nets in manufacturing".

9.4 Invitations

De Gülgün Alpan-Gaujaj

- Rutgers University, Département de Génie Industriel, NJ, États-Unis, invitée par Prof. M. A. Jafari. Collaboration scientifique sur le thème " Définition formelle des tâches atomiques de spécification de contrôle pour la synthèse de commande ", 10-20 juin, 1999. - INRIA Sophia Antipolis, projet Mistral, invitée par Dr Eitan Altman. Collaboration scientifique sur le thème " Analyse de performance dans des réseaux à haut débit", 15-22 mars 1999.

De Marie-Claude Portmann

- Représentante de la France (ROADEF) au 40ème anniversaire de la société mondiale de recherche opérationnelle (IFORS). - Éditeur responsable de deux bulletins de la ROADEF. - École des Mines de Paris, 17 novembre 1998. Séminaire " Résolution de problèmes combinatoires, applications à des problèmes d'ordonnancement ".

De François Vernadat

- Co-rédacteur en chef, avec K. Kosanke et M. Zelm, d'un numéro de la revue Computers in Industry, Vol. 40, No. 2-3 (sur le thème Applications of CIMOSA). - Université de Campinas, SP, Brésil, 18-22 août 1999.

Les personnes suivantes ont été reçues par l'équipe MACSI : - Prof. Mu der Jeng, National Taiwan Ocean University (2 mois) - Prof. Mickael Fu, University of Maryland, USA (2 mois) - Prof. Y. Wardi et M. McGuillan, Georgia Tech., Atlanta, USA (10 jours)

9.5 Jurys de thèses et d'habilitations

Les membres de MACSI ont pris part aux jurys suivants :

- Marie-Claude Portmann : Marie-Laure Espinousse (thèse INPG Grenoble, rapporteur), Carlos Castro (thèse, UHP Nancy 1, rapporteur), Jean-Charles Billaut (habilitation à diriger des recherches Université de Tours, rapporteur), Christelle Bloch (thèse Université de Franche Comté, rapporteur), Christophe Rapine (thèse INPG, Grenoble), Marc Sevaux (thèse Université de Paris VI Jussieu).
- François Vernadat : Gabriel Wainer (thèse Université de Buenos Aires, Argentine, rapporteur), Olivier Million (thèse UHP Nancy I, rapporteur), Tianqiang Jia (thèse, Université de Tours, rapporteur), Laurent Piétrac (thèse ENS Cachan, rapporteur), Laurent Allain (thèse Université des Sciences et technologies de Lille, rapporteur), Ahmedou Haouba (Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Metz, rapporteur), Louis Cloutier (thèse Université Aix-Marseille III, rapporteur), Samuel Deniaud (thèse UTBM, rapporteur), Mickael Gardoni (thèse Université de Metz, directeur de recherche), Xavier Boucher (thèse Université Aix-Marseille III, président de jury), Névine Hafez, (thèse Université de Metz, président de jury), Mickael Petit (thèse Facultés Universitaires Notre Dame de Namur, rapporteur), Corinne Thomas (thèse UHP Nancy I, président du jury).
- Xiaolan Xie : Patrick Sarri, (thèse INSA de Lyon, rapporteur), Bérénice Damasceno (thèse Université de Metz, directeur de thèse), Ahmedou Haouba (Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Metz).

10 Bibliographie

Livres et monographies

- [1] F. VERNADAT, *Techniques de Modélisation en Entreprise : Applications aux Processus Opérationnels*, Economica, Paris, 1999.

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [2] B. DAMASCENO, *Ordonnancement des systèmes de production multi-ressources avec la prise en compte de blocage*, thèse de doctorat, Université de Metz, 4 mars 1999.

Articles et chapitres de livre

- [3] G. BERIO, A. DI LEVA, P. GIOLITO, F. VERNADAT, « Object-Oriented Process Development in the M*-OBJECT Methodology », *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1999, à paraître.
- [4] G. BERIO, A. D. LEVA, P. GIOLITO, F. VERNADAT, « Process and Data Nets: The Conceptual Model of the M*-OBJECT Methodology », *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics SMC 29*, 1, February 1999, p. 104–114.
- [5] G. BERIO, F. VERNADAT, « New Developments in Enterprise Modelling using CIMOSA », *Computers in Industry 40*, 2-3, November 1999, p. 99–114.
- [6] A. JANIAK, M.-C. PORTMANN, « Genetic Algorithm for the Permutation Flow-shop Scheduling Problem with Linear Models of Operations », *Annals of Operations Research special issue, F. Werner (réd.) 83*, 1998, p. 95–114.
- [7] M. JENG, X. XIE, « Analysis of Modularly Composed Nets by Siphons », *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, part A, SMC-29*, 4, 1999, p. 399–405.
- [8] M. JENG, X. XIE, « ERCN-merged Nets and Their Analysis Using Siphons », *IEEE Trans. on Robotics and Automation 15*, 4, 1999, p. 692–703.
- [9] K. KOSANKE, F. VERNADAT, M. ZELM, « CIMOSA: Enterprise Engineering and Integration », *Computers in Industry 40*, 2-3, 1999, p. 83–97.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [10] G. BERIO, F. VERNADAT, « Enterprise modelling with CIMOSA: Models and methods », *in: International Enterprise Modelling Conference (IEMC'99)*, Trondheim, Norway, June 14-16 1999.
- [11] G. BERIO, F. VERNADAT, « Formal foundations for a process/resource approach in manufacturing systems behaviour modelling », *in: 13th IFAC World Congress (IFAC'99)*, J, p. 181–186, Beijing, July 5-9 1999.
- [12] G. BERIO, F. VERNADAT, « Une méthode de spécification du comportement des systèmes réactifs de production », *in: Actes de la Deuxième Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'99)*, p. 185–190, Annecy, France, 6-8 octobre 1999.
- [13] L. DJERID, M. PORTMANN, « How to Keep Good Schemata Using Cross-over Operators for Permutation Problems », *in: Int. Conf. IFORS'99*, p. 111, Beijing, August 16-20 1999.
- [14] M. JENG, X.-L. XIE, W. Y. HUNG, « Markovian Petri nets for performance bounds of semiconductor manufacturing systems », *in: IFAC World Congress (IFAC'99)*, J, Beijing, July 5-9 1999.
- [15] A. MAHDI, H. AMET, M. PORTMANN, « Algorithmes génétiques pour la résolution d'un problème de découpe 2D », *in: Deuxième congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et Aide à la Décision (ROADEF'99)*, p. 85, 13-15 janvier 1999.
- [16] A. MAHDI, H. AMET, M. PORTMANN, « Genetic Algorithm for the 2D cutting problem », *in: Int. Conf. on Industrial Engineering and Production Management (IEPM'99)*, 2, p. 540–549, Glasgow, July 12-15 1999.
- [17] A. MAHDI, H. AMET, M. PORTMANN, « Genetic Algorithms for Solving a Physical Facility Layout Problem », *in: Int. Conf. IFORS'99*, p. 168, Beijing, August 16-20 1999.

- [18] A. E. MHAMEDI, F. VERNADAT, « ACNOS: A functional and socio-cognitive modelling approach to analyse industrial systems », *in: 13th IFAC World Congress (IFAC'99)*, A, p. 145–150, July 5-9 1999.
- [19] D. ROY, D. ANCIAUX, M. KOYAMA, « Reactive Shop-Floor Control: State Charts Modelling », *in: Int. Symposium on Manufacturing Systems (ISMS'99) at Second World Manufacturing Congress (WMC'99)*, Université de Durham, Angleterre, 27-30 septembre 1999.
- [20] D. ROY, D. ANCIAUX, « Shop Floor Control: a Multi-Agent Approach », *in: Int. Conf. on Industrial Engineering and Production Management (IEPM'99)*, p. 85–97, Glasgow, Ecosse, 12-15 juillet 1999.
- [21] F. VERNADAT, « Enterprise Integration: Myth or Reality? », *in: 15th Int. Conf. on CAD/CAM, Robotics & Factories of the Future (CARs & FOF'99)*,guas de Lindoia, SP Brazil, 1999. Plenary talk.
- [22] F. VERNADAT, « Requirements for simulation tools in Enterprise Engineering », *in: 15th Int. Conf. on CAD/CAM, Robotics & Factories of the Future (CARs & FOF'99)*, p. MT5–19 – MT5–24, Aguas de Lindoia, SP Brazil, August 18-20 1999.
- [23] A. VIGNIER, B. SONNTAG, M. PORTMANN, « A hybrid method for a parallel-machine scheduling problem », *in: IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'99)*, 1, p. 671–678, Barcelone, October 1999.
- [24] A. VIGNIER, S. SONNTAG, M. PORTMANN, « A decomposition method based on priority rules for a parallel-machine scheduling problem », *in: Int. Conf. on Industrial Engineering and Production Management (IEPM'99)*, 1, p. 163–172, Glasgow, Ecosse, July 12-15 1999.
- [25] X.-L. XIE, « Fluid Stochastic Event Graphs for Optimisation of Failure-Prone Manufacturing Systems », *in: European Control Conference (ECC'99)*, Karlsruhe, Germany, August 1999.

Rapports de recherche et publications internes

- [26] A. ABBAS-TURKI, « Visualisation des flux de production », *Mémoire de dea*, GSI, Nancy, 23 septembre 1999.
- [27] L. GELLY, « Modélisation et simulation des systèmes de production », *Mémoire de thèse cnam*, CNAM, Metz, 22 janvier 1999.
- [28] R. MANSOURA, « Recherche de bonnes pratiques pour l'élaboration d'un plan industriel et commercial (PIC); Application Industrielle: Optimisation du process - PIC - ASTSA de Thaon Les Vosges », *Mémoire de dea*, GSI, Nancy, 23 septembre 1999.
- [29] B. SONNTAG, « Contribution à l'étude de problèmes d'ordonnancement: le couplé task, le problème de la Sollac et la recherche de flexibilité », *Mémoire de dea informatique*, Nancy, 29 juin 1999.

Divers

- [30] G. ALPAN, B. GAUJAL, « Supervisory control of Petri nets using routing functions: starvation avoidance issues », soumis à *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, special issue on Discrete Systems and Control, 1999.
- [31] G. BERIO, A. D. LEVA, P. GIOLOTO, F. VERNADAT, « Timed Process and Data Nets: An object-oriented conceptual model for reactive systems », 2000, à paraître.
- [32] L. DJERID, M. PORTMANN, « How to Keep Good Schemata Using Cross-over Operators for Permutation Problems », présenté à IFORS'99 et soumis à *International Transactions in Operational Research*, 1999.

-
- [33] A. MAHDI, H. AMET, M.-C. PORTMANN, « Algorithmes génétiques pour la résolution de problèmes de découpe 2D », soumis à la revue TSI, 1999.
 - [34] A. MAHDI, H. AMET, M. PORTMANN, « A Genetic Algorithm for Solving the Physical Facility Layout », soumis à International Transactions in Operational Research, 1999.
 - [35] A. MAHDI, H. AMET, M. PORTMANN, « Physical Layout with Minimization of the Transport Costs », soumis à International Journal of Production Research, 1999.
 - [36] D. ROY, D. ANCIAUX, F. VERNADAT, « SYROCO: A novel multi-agent shop-floor control system », Journal of Intelligent Manufacturing, à paraître, 2000.
 - [37] A. VIGNIER, A. MAHDI, M.-C. PORTMANN, « Genetic algorithm for flowshop scheduling problem using data oriented operators », Optimization Days (JOPT'99), May 10-12 1999, (sans actes).