

*Projet macsi**Modélisation, Analyse et Conduite des
Systèmes Industriels**Lorraine*

THÈME 4A



*R*apport
*A*ctivité

2002

Table des matières

1. Composition de l'équipe	1
2. Présentation et objectifs généraux	2
3. Fondements scientifiques	3
3.1. Modélisation des systèmes industriels	3
3.2. Synthèse de la commande des systèmes industriels	4
3.3. Évaluation de performances des systèmes à événements discrets	4
3.4. Chaînes logistiques, gestion de production et ordonnancement	4
4. Domaines d'application	5
5. Logiciels	6
6. Résultats nouveaux	6
6.1. Modélisation et synthèse des systèmes industriels	6
6.1.1. Modélisation des systèmes industriels	6
6.1.2. Synthèse de commande basée sur le GRAFCET	7
6.1.3. Synthèse des réseaux de Petri	7
6.1.4. Synthèse de commande à l'aide des réseaux de Petri et de la théorie des régions	7
6.1.5. Evitement de blocage des réseaux de Petri sauf par dépliage	8
6.2. Évaluation des performances	8
6.2.1. Maintenance des systèmes industriels	8
6.2.2. MDP et Politique de maintenance des systèmes de production	9
6.2.3. Configuration des réseaux de production et distribution	9
6.3. Chaînes logistiques et gestion de production	10
6.3.1. Ordonnements prédictifs pour les systèmes de production	10
6.3.2. Ordonnements prédictifs et réactifs en présence de perturbations	11
6.3.3. Gestion des systèmes de production à ressources multiples	11
6.3.4. Planification, ordonnancement et chaînes logistiques	12
6.3.5. Aide à la décision pour la maintenance industrielle	13
7. Contrats industriels	13
7.1. Collaboration avec la Société INCOTEC	13
7.2. Projet GROWTH ONE	13
7.3. Projet GROWTH V-chain	13
7.4. Réseau Thématique GROWTH-TNEE	14
7.5. Génération automatique d'un plan de montage chez RENAULT	14
8. Actions régionales, nationales et internationales	14
8.1. Actions nationales	14
8.1.1. Région lorraine	14
8.1.2. Groupes de recherche en ordonnancement	15
8.1.3. Groupement de Recherche en Productique (GRP)	15
8.1.4. Club génie industriel	15
8.1.5. Groupe Réseaux de Petri Francophone	15
8.2. Actions internationales	15
8.2.1. IFAC-IFIP Task Force et CIMOSA Association	15
8.2.2. NSF-INRIA	15
8.2.3. Réseau FM »Fiabilité et Maintenance «	15
8.2.4. Collaboration avec Minsk	15
9. Diffusion des résultats	15
9.1. Animation de la Communauté scientifique	15
9.1.1. Membres de comités d'organisation	15

9.1.2.	Membres de comités scientifiques de revues et conférences	16
9.1.3.	Editeurs invités de numéros spéciaux de revues	16
9.2.	Enseignement	16
9.3.	Participation à des colloques, séminaires, tutoriels, invitations	17
9.4.	Invitations et personnes reçues	17
9.5.	Jurys de thèses et d'habilitations	17
10.	Bibliographie	18

1. Composition de l'équipe

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

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

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

Responsable permanent

Xiaolan Xie [Professeur à l'École Nationale d'Ingénieurs de Metz jusqu'au 31 août 2002, Directeur de Recherche INRIA à partir du 1er septembre 2002]

Personnel INRIA

Lyès Benyoucef [Chargé de Recherche INRIA]

Xiaolan Xie [Directeur de Recherche INRIA à partir du 1er septembre 2002]

Personnel Université

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

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

Sophie Hennequin [Maître de Conférences à l'École Nationale d'Ingénieurs de Metz, à partir du 1er septembre 2002]

Thibaut Monteiro [Maître de Conférences à l'Université de Metz, à partir du 1er octobre 2002]

Ammar Oulamara [Maître de Conférences à l'École des Mines de Nancy (INPL), à partir du 1er septembre 2002]

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

Nidhal Rezg [Maître de conférences à l'Université de Metz]

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

Alexandru Sava [Maître de Conférences à l'École Nationale d'Ingénieurs de Metz, à partir du 1er septembre 2002]

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

Xiaolan Xie [Professeur à l'École Nationale d'Ingénieurs de Metz jusqu'au 31 août 2002]

Collaborateur extérieur

François Vernadat [Professeur à l'Université de Metz, détaché à la Communauté Européenne]

Assistantes de projet

Françoise Laurent [École des Mines de Nancy (INPL)]

Christel Wiemert [INRIA Metz]

Professeurs invités

Yuri Sotskov [Directeur de Laboratoire à l'Institut de Cybernétique de l'Académie des Sciences de Minsk (Biélorussie), professeur invité à l'École des Mines de Nancy (INPL), (2 mois)]

Yakov Shafransky [Chercheur à l'Institut de Cybernétique de l'Académie des Sciences de Minsk (Biélorussie), professeur invité à l'École des Mines de Nancy (INPL), (1 mois 1/2)]

Doctorants

Zied Achour [doctorant, à partir du 1er octobre 2002]

Riad Aggoune [doctorant (Thèse soutenue le 6 décembre 2002)]

Mohamed Ali Aloulou [doctorant (Thèse soutenue le 16 décembre 2002), ATER à l'UHP depuis le 1er octobre 2002]

Freddy Deppner [doctorant Cifre INCOTEC (Thèse en 2003)]

Hongwei Ding [doctorant (Thèse en 2004)]
Olivier Dupuis [doctorant Cifre INCOTEC (Thèse en 2003)]
Julien Fondrevelle [doctorant, BDI à partir du 1er novembre 2002]
Asma Ghaffari [doctorante (Thèse soutenue le 5 décembre 2002), ATER à l'Ecole des Mines de Nancy (INPL)]
Yazid Mati [doctorant (Thèse soutenue le 12 juin 2002), enseignant à l'Ecole des Mines de Nantes à partir du 1er septembre 2002]
Iyad Mourani [doctorant, à partir du 1er septembre 2002]
Latifa Ouzizi [doctorante en co-tutelle France-Maroc (Thèse en 2004)]
Guillaume Thisselin [doctorant, MJENR à partir du 1er octobre 2002]

Ingénieur expert

Juan Francisco Gaytan Delgado [6 mois pour le projet V-chain]

Stagiaires

Hind Aljzearli [stagiaire du DEA Génie industriel de l'UTT de Troyes, 3 mois]
Lyès Bouslami [stagiaire du DEA Recherche Opérationnelle, Combinatoire et optimisation de l'INPG de Grenoble, 6 mois]
Julien Fondrevelle [stagiaire du DEA GSI de l'INPL, 6 mois]
Raja Lammat [stagiaire de l'ENSIAS, 2 mois]
Emad Madani [stagiaire en Master 'Computer Assisted Production Engineering', Norvège, 5 mois]
Rémi Pannequin [étudiant ESIAL, deuxième année, 2 mois 1/2]
Guillaume Thisselin [stagiaire du DEA Informatique de Lorraine, 6 mois]

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'étudier 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 et de l'optimisation discrète. 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, nous nous posons des problèmes ponctuels d'organisation, d'évaluation de performance, d'ordonnancement et de définition de politiques de maintenance. Un objectif complémentaire 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 : Juan Francisco Gaytan Delgado, Thibaut Monteiro, Latifa Ouzizi, 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 [62][93][100] 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[59], 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[102][99]. 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 [65]. 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[81]. Les formalismes les plus connus de représentation des systèmes à événements discrets sont les automates, les réseaux de Petri[70][72], les state-charts[78], les processus communicants de type CSP[88][82][84] ou utilisant les logiques temporelles [92][87].

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[90]. 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[95]. 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[101]. 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[85].

Grâce aux deux projets européens Groth ONE et Groth V-CHAIN, les recherches de MACSI sont de plus en plus orientées vers la modélisation des flux (produits, information, négociations, décisions,...) au sein des chaînes logistiques et des entreprises virtuelles. Les "pilotes" à développer dans le cadre de ces projets avec des entreprises partenaires permettent à l'équipe MACSI de retenir des hypothèses de travail de plus en plus pertinentes et d'avoir des retours quant aux modèles proposés.

3.2. Synthèse de la commande des systèmes industriels

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

Participants : Asma Ghaffari, Nidhal Rezg, Xiaolan 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[86]. 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[103][83], les réseaux conditions /événements[77], les langages formels ou l'approche de Ramadge et Wonham[96][97][64], les processus récursifs finis[84] ou les logiques temporelles.

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-Gaujal[58].

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 : Lyès Benyoucef, 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[71][80][68][60]. 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[79]. 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. Chaînes logistiques, gestion de production et ordonnancement

Mots clés : *équilibre de chaînes, chaînes logistiques, planification, ordonnancement, optimisation discrète, système réactif, pilotage, architecture de commande, politique de maintenance.*

Participants : Riad Aggoune, Mohamed Ali Aloulou, Henri Amet, Didier Anciaux, Lyès Benyoucef, Freddy Deppner, Hongwei Ding, Olivier Dupuis, Julien Fondrevelle, Raja Lammat, Mikhail Kovalyov, Yazid Mati, Latifa Ouzizi, Rémi Pannequin, Marie-Claude Portmann, Nidhal Rezg, Daniel Roy, Yakov Shafransky, Yuri Sotskov, Guillaume Thisselin, 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, l'équilibrage des lignes transfert, 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 [75][73][98]. 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[66] ou les problèmes d'agencement de ressources[89], ce sont les problèmes de planification et d'ordonnement pour lesquels les fondements théoriques sont les mieux établis[61][69][74].

Les problèmes de planification et d'ordonnement 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 ?

Les problèmes de planification concernent le niveau moyen terme[91]. 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'ordonnement se posent au niveau court terme et très court terme de la gestion de production[63][67][76][94]. 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'ordonnement : 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.

Un des objectifs principaux de MACSI est de proposer des outils d'aide à la planification et à l'ordonnement qui puissent être utilisés par les entreprises. Ceci implique d'une part que des contraintes peu considérées dans la littérature sont introduites dans les problèmes considérés et d'autre part que nous considérons des approches hiérarchiques à plusieurs niveaux introduisant de la flexibilité dans les niveaux supérieurs qui pourra ensuite être utilisée pour faire face aux aléas aux niveaux inférieurs.

4. Domaines d'application

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,

certaines 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'ordonnancement 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 (Renault-France, FIAT-Italie et Ford-Espagne)
- les ateliers de fabrication mécanique (en particulier les équipementiers de l'industrie automobile)
- les problèmes d'assemblage (Aprilia-Italie)
- la fabrication de semi-conducteurs
- la sidérurgie
- les industries pharmaceutiques et agro-alimentaires (clients d'INCOTEC)

Les activités industrielles de MACSI sont de plus en plus liées à la conception et à la gestion des chaînes logistiques, qui consistent à proposer des modèles de flux, de produits, d'informations et de décisions englobant plusieurs entreprises qui collaborent à la réalisation de produits finis.

5. Logiciels

Des logiciels ont été développés dans le cadre des thèses soutenues, ce sont des prototypes destinés à prouver la validité des idées. MACSI n'est propriétaire que des idées utilisées dans les logiciels développés dans le projet Européen V-CHAIN (en particulier, l'ordonnancement de l'assemblage des chaînes de l'entreprise Aprilia), le projet Européen ONE (modélisation et simulation des réseaux de production et distribution, en particulier, la production et la distribution du modèle PUNTO-FIAT en Allemagne).

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 : Thibaut Monteiro, Daniel Roy, François Vernadat.

La modélisation des systèmes industriels s'est orientée vers une plate-forme de modélisation, simulation et évaluation de chaînes logistiques. Actuellement, la définition des constructs de modélisation est terminée et nous avons résolu le problème de modélisation du comportement des entités constituant la chaîne. La recherche s'oriente actuellement vers la définition de la politique de coordination de la chaîne et des indicateurs de performance de la chaîne à prendre en compte dans la simulation. L'application de simulation est en cours

de développement, afin de pouvoir implémenter nos constructs et de fournir à l'utilisateur les indicateurs de performances lui permettant de créer sa Supply Chain au niveau stratégique/tactique. Ce travail de recherche est directement lié au projet européen V-Chain.

6.1.2. Synthèse de commande basée sur le GRAFCET

Participants : Zied Achour, Nidhal Rezg.

Nous avons développé une méthode optimale et directe pour la synthèse de superviseurs sous forme Grafcet. La notion d'optimalité est liée au nombre d'états atteignables par le système en boucle fermée, c'est-à-dire sous supervision. La notion directe est liée à son aspect implémentation sur contrôleurs tels que les automates programmables industriels (API). En tenant compte des modèles de commande grafcet du procédé, l'approche proposée permet de déterminer un ensemble de variables de contrôle à ajouter aux modèles grafcet initiaux pour faire respecter les spécifications. Les spécifications considérées sont du type sûreté. Le superviseur recherché doit être le plus permissif possible tout en tenant compte des spécifications, de la contrainte de vivacité et des événements non contrôlables. L'avantage pratique de cette approche, est qu'elle utilise directement les modèles grafcet déjà implémentés dans les contrôleurs pour synthétiser un superviseur. La méthode comporte deux phases ; une première consiste à déterminer par la théorie Ramadge-Wonham le comportement le plus permissif que doit avoir le système contrôlé. Dans la deuxième phase, nous avons utilisé la théorie des régions pour construire le superviseur en Grafcet en déterminant un ensemble de variables de contrôle à intégrer aux modèles grafcet initiaux du procédé. Une maquette informatique a été développée pour illustrer l'approche proposée et permet d'avoir en sortie la loi de commande sous un superviseur grafcet.

6.1.3. Synthèse des réseaux de Petri

Participants : Sheng-Luen Chung [National Taiwan University of Science and Technology], MuDer Jeng [professeur à National Taiwan Ocean University], Xiaolan Xie.

La collaboration avec le Professeur MuDer Jeng (National Taiwan Ocean University) 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. La nouveauté est la prise en compte des opérations d'assemblage/désassemblage. Nous avons étendu les réseaux "ERCN-merged net" que nous avons proposées précédemment. Les nouveaux réseaux sont baptisés "ERCN*-merged nets". Chaque "ERCN*-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 "ERCN*-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 le dépliage.

6.1.4. Synthèse de commande à l'aide des réseaux de Petri et de la théorie des régions

Participants : Asma Ghafarri, Nidhal Rezg, Xiaolan Xie.

Nous poursuivons les travaux commencés dans l'action MARS sur la synthèse de commande des systèmes à événements discrets à l'aide des réseaux de Petri (RdP) et de la théorie de régions développée par le projet Paragraphe. Nous avons développé cette année un cadre formel pour l'application de la théorie des régions pour la synthèse de commande des réseaux de Petri. Il concerne une large classe de problèmes : la classe des problèmes de transitions d'état interdites (PTEI). Dans un PTEI, un changement d'état peut être interdit sans pour autant que l'état qui en résulte ne soit interdit. L'approche proposée utilise la théorie des régions, une théorie de synthèse de réseaux à partir de systèmes de transition, pour construire le contrôleur RdP qui permet de réaliser exactement le comportement souhaité. Une caractérisation algébrique de l'espace des états admissibles est déterminée pour les problèmes non solubles par des contrôleurs RdP.

Quand un contrôleur RdP n'existe pas, nous proposons deux extensions de cette première approche. La première est fondée sur une transformation du réseau à contrôler en un réseau appelé réseau de Petri essentiellement sauf en remplaçant certaines places par des chaînes FIFO des places binaires. Nous avons prouvé que tout problème de synthèse de commande du type PTEI peut être résolu de manière optimale

par un contrôleur RdP. L'approche proposée consiste donc à (i) transformer un réseau de Petri P en un RdP essentiellement sauf P' , (ii) construire le contrôleur RdP S' pour P' , et (iii) utiliser S' et P' pour la supervision du P . Plusieurs techniques telles que la priorité des transitions FIFO et l'agrégation du graphe d'état de P' ont été développées pour éviter l'explosion d'état due à la transformation. La deuxième extension consiste à superviser le réseau de Petri P en faisant collaborer plusieurs contrôleurs RdP. Cette deuxième piste est en cours de développement.

6.1.5. Évitement de blocage des réseaux de Petri sauf par dépliage

Participants : Alessandro Giua, Xiaolan Xie.

La collaboration avec le professeur Alessandro Giua (Université de Cagliari, Italie) se poursuit sur l'application de la technique de dépliage pour la synthèse de commande des réseaux de Petri (RdP). Nous nous sommes limités au problème d'évitement de blocage des RdPs saufs, c'est-à-dire les RdP dont les places sont marquées 0 ou 1. Traditionnellement, le dépliage de réseau s'arrête lorsque le réseau déplié contient tous les états du réseau initial. Nous appelons ce réseau déplié le réseau du niveau 1 et nous poursuivons le dépliage pour permettre la représentation de l'espace atteignable à partir de tout état possible du réseau de niveau 1. Cette deuxième partie du réseau est appelée le réseau du niveau 2. L'approche d'évitement de blocage consiste à (i) identifier dans le niveau 1 un état de blocage M (blocage dans le réseau initial ou blocage induit par le contrôle) ; (ii) identifier les places de contrôle à ajouter dans le niveau 1 afin d'éviter qu'un état correspondant M dans les deux niveaux soit atteint à partir d'un état du niveau 1 ; (iii) répéter (i) et (ii) jusqu'à évitement de tous les blocages. Le réseau déplié du niveau 1 ainsi que les places de contrôle sont utilisés pour déterminer la supervision du réseau initial.

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. Maintenance des systèmes industriels

Participants : Iyad Mourani, Mohamed Salah Ouali, Nidhal Rezg, Xiaolan Xie.

Dans la littérature, peu nombreux sont les travaux qui considèrent le couplage entre la maintenance et la production. Par cette étude, nous souhaitons apporter une contribution au problème de modélisation et d'évaluation des performances des systèmes de production soumis aux opérations de maintenance préventive et de gestion de production. L'intérêt de notre contribution réside dans le développement d'une stratégie intégrée de maintenance et de gestion de production. En effet, la plupart des travaux existants traitent la gestion de production et la maintenance des systèmes de production de manière indépendante. Malheureusement, les activités de maintenance peuvent perturber la production et il est alors souhaitable de pouvoir optimiser simultanément la production et les activités de maintenance. La thématique développée à MACSI s'intéresse au couplage entre la production et la maintenance. Dans un premier temps nous nous sommes intéressés au cas d'une seule machine fabriquant un seul type de produit. Les produits finis sont disposés dans un stock de sortie. La demande arrive à débit constant. La machine peut tomber en panne. Lorsqu'une machine tombe en panne, elle ne peut plus produire, et le niveau du stock baisse. La réparation prend un temps aléatoire et engendre un coût de réparation. Pour éviter la rupture du stock lors d'une panne de la machine, la politique de gestion construit un niveau de sécurité pour le stock de sortie. Il permettra de satisfaire la demande. D'un autre côté, les pannes d'une machine peuvent être évitées en effectuant des maintenances préventives en fonction de l'âge de la machine et du niveau du stock. Chaque maintenance prend un temps aléatoire et engendre un coût de maintenance. L'approche proposée permet de déterminer une politique de Contrôle/Maintenance intégrée optimale. En d'autres termes, elle permet de déterminer à quel moment la machine doit monter en puissance pour constituer le stock de sécurité, à quel niveau on doit maintenir le stock et à quel âge on doit intervenir sur la machine pour effectuer une maintenance préventive. Ces trois variables de décision sont obtenues en minimisant un critère de coût incluant les coûts de maintenance et de gestion du stock. L'approche a été étendue au cas de plusieurs machines en série et la prise en compte de la disponibilité de machine comme deuxième

critère d'évaluation pour déterminer la politique de maintenance intégrée optimale. Plusieurs méthodes de résolution ont été utilisées pour déterminer la politique de maintenance intégrée selon les hypothèses. On cite, les modèles analytiques, la simulation, les plans d'expériences et les algorithmes génétiques.

6.2.2. MDP et Politique de maintenance des systèmes de production

Participants : Michael Fu, Xiaolan Xie, Xiaodong Yao.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet de collaboration NSF/INRIA entre l'Université du Maryland et le projet MACSI sur l'optimisation des politiques de maintenance préventive des systèmes de production. L'objectif est de développer un cadre théorique pour l'étude des politiques de maintenance préventive. Dans ce travail, nous considérons la maintenance d'une machine fabriquant un produit. Un modèle à temps discret est proposé. Durant chaque période, une machine en état de marche a une capacité de fabrication de P pièces, la demande est de d pièces. La machine peut tomber en panne mais ceci peut être évité par une action de maintenance préventive. La durée de bon fonctionnement de la machine, la durée de réparation et la durée de maintenance préventive sont toutes des variables aléatoires discrètes quelconques. Le problème consiste à choisir, pour une machine en état de marche, une action a (maintenance préventive PM ou fabriquer u pièces avec $u = 0, 1, \dots, P$) en fonction du niveau de stock et de l'âge de la machine afin de minimiser la sommes actualisée des coûts de réparation, de maintenance, de stockage et de rupture de stock. Nous avons formulé le problème comme un problème MDP (Markovian Decision Process). Grâce à cette formulation et sous certaines conditions techniques, nous avons prouvé les résultats suivants (i) si l'action est différente de PM, alors la production est choisie de telle sorte à amener le niveau de stock au dessus de 0 ; (ii) pour un niveau de stock donné, il existe un seuil a^* tel que l'action optimale est PM si l'âge de la machine $a \geq a^*$ et elle est différente de PM sinon ; (iii) il existe un seuil de stock s^* tel que l'action optimale est soit PM soit ne pas fabriquer (i.e. $u = 0$) si le niveau de stock s est supérieur à s^* . Nous avons également établi des propriétés plus fortes en absence de maintenance préventive. De nombreux résultats numériques montrent que ces propriétés restent vraies sous des conditions beaucoup plus faibles que celles utilisées dans les preuves.

6.2.3. Configuration des réseaux de production et distribution

Participants : Lyès Benyoucef, Hongwei Ding, Xiaolan Xie.

Dans cette étude, nous nous intéressons à l'optimisation des entreprises en réseaux. Notre objectif principal est de contribuer au développement des méthodes d'évaluation de performances et de conception des entreprises en réseaux, des algorithmes d'optimisation et de participer à la validation des méthodes proposées sur des études de cas présentés par les partenaires industriels du secteur automobile (FIAT, RENAULT) et du secteur textile (POPILLA) du projet européen GROWTH-ONE (voir plus loin pour la présentation du projet européen GROWTH-ONE).

Un modèle générique de simulation d'un réseau de distribution fonctionnant à la fois en "production à la commande" et en "production pour stock", et impliquant différents modes de transport a été développé. Ce modèle permet d'obtenir différents indicateurs de performance du réseau (temps de transport, niveau de stock moyen, coût de transport, taux de production, ...). Une validation, sur un cas d'étude proposé par FIAT-Italie, a été réalisée.

En fonction de l'avancée de cette étude, on pourrait également être amené à étudier les décisions tactiques et opérationnelles des entreprises en réseaux. En particulier, la coordination des flux de matières dans un réseau d'entreprises est un problème de forte demande industrielle mais peu étudiée dans la littérature.

Lors de la visite du professeur Stein Wallace (Molde University College, Norvège) (21-26.02.2002) à MACSI-Metz, nous avons démarré une collaboration sur la prise en compte des temps (principalement les temps de transport liés aux différents modes) dans l'optimisation stratégique des réseaux de distribution. Cette collaboration se poursuit et motive une collaboration plus importante entre la Molde University College et le projet MACSI.

6.3. Chaînes logistiques 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. Ordonnements prédictifs pour les systèmes de production

Participants : Riad Aggoune, Mohamed Ali Aloulou, Henri Amet, Freddy Deppner, Olivier Dupuis, Julien Fondrevelle, Adam Janiak, Mikhail Kovalyov, Rémi Pannequin, Marie-Claude Portmann, Yakov Shafransky, Guillaume Thisselin, Antony Vignier.

En raison du plus grand nombre de personnes concernées, en 2002 nos travaux sur les ordonnancements prédictifs ont été plus diversifiés qu'en 2001. Ils ont porté à la fois sur des problèmes ne comportant qu'une seule machine, des problèmes de "flow shop" (atelier linéaire où les produits visitent les machines toujours dans le même ordre) et des problèmes de "job shop" (où les produits visitent les machines dans un ordre quelconque). Dans la plupart des cas, nous ne considérons qu'une machine ou ressource pour traiter chaque opération, mais nous avons également envisagé des généralisations où il y avait plusieurs ressources disponibles en parallèle. Nous avons également considéré plusieurs critères : souvent la durée totale de l'ordonnement, mais aussi d'autres critères comme la somme pondérée des retards ou d'autres critères dits réguliers (pour lesquels avancer une opération sans déplacer les autres ne peut dégrader la valeur du critère). Nous cherchons à obtenir des méthodes de résolution les plus efficaces possibles tout en essayant de demeurer le plus réaliste possible par rapport aux problèmes industriels.

En ce qui concerne les problèmes d'ordonnement de type "flow shop" classique où le critère consiste à minimiser la durée totale de l'ordonnement, il est très connu depuis les années 50 que l'ensemble des ordonnancements de permutation (règle FIFO pour la politique de stocks devant chaque machine) contient au moins une solution optimale (sous-ensemble dominant) lorsque l'atelier contient au plus trois machines. Nous avons démontré l'an passé que sous certaines contraintes raisonnables (pour des chaînes de production presque équilibrées), la dominance restait vraie pour 4 machines et 2, 3 et 4 travaux ([47]). Lors de son séjour dans l'équipe MACSI, Yakov Shafransky a élaboré un contre-exemple pour 5 travaux, mais avec des erreurs relatives très petites. Il convient donc maintenant de s'intéresser non plus à la dominance pour n plus grand que 5, mais à obtenir des théorèmes sur la majoration de l'erreur relative.

Le papier en commun avec Adam Janiak de Wroclaw (Pologne) et Misha Kovalyov de Minsk (Biélorussie) sur l'utilisation de méthodes géométriques et de programmation linéaire pour résoudre un problème d'ordonnement à une machine avec des temps de réglage et des temps opératoires qui dépendent d'une ressource unique à partager a été amélioré et accepté dans EJOR ([21]).

Une nouvelle modélisation a été proposée pour le problème dit "du cultivateur" ([49], [48],[57]) qui correspond à un problème d'ordonnement de type "job shop" ou "flow shop" généralisé : tous les travaux demandent trois opérations toujours dans le même ordre, il existe deux types de ressources de performances différentes pour effectuer les différentes opérations et certaines ressources peuvent effectuer différentes opérations. Il s'agit d'affecter les ressources aux opérations et d'ordonner les opérations de manière à minimiser la durée totale. Le nouveau modèle proposé permet en utilisant ILOG Studio d'obtenir de meilleurs résultats que les travaux existants dans la littérature.

De manière à pouvoir tenir compte de contraintes de calendrier, nous nous sommes intéressés à l'ordonnement d'atelier de type "flow shop" et de type "job shop" en présence de contraintes d'indisponibilité des machines ([4]) lorsque les opérations des travaux sont supposées non interruptibles. Quatre résultats ont été obtenus : la conception d'une méthode polynomiale qui permet de minimiser tout critère régulier dans le cas de deux travaux pour le problème de type "job shop" ([31]), le développement de méta-heuristiques avec un générateur d'ordonnement actif de type classique pour les ateliers de type "flow shop" ([8],[32]), le développement de méta-heuristiques avec un générateur utilisant la méthode polynomiale à deux travaux appliquée aux problèmes de types "job shop" et aux problèmes de types "flow shop" et le développement d'une méthode de résolution exacte de type procédure par séparation et évaluation qui utilisent la méthode polynomiale à deux travaux pour améliorer les évaluations. Il apparaît que plus les

contraintes de calendrier sont restrictives, plus la méthode exacte réussit à résoudre des problèmes de grande taille.

De manière à pouvoir traiter des problèmes d'ordonnancement existant dans les entreprises pharmaceutiques et agroalimentaires où les produits sont partiellement périssables, nous nous sommes intéressés à l'ordonnancement d'atelier de type " flow shop " et de type " job shop " en présence de contraintes d'écart minimal et d'écart maximal entre des couples d'opérations des travaux. Deux pistes ont été suivies en parallèle. Dans le cadre d'une bourse Cifre, le développement de méthodes approchées sur des problèmes de type " job shop " et même de type " job shop " généralisés utilisant la notion de " clusters " pour décomposer les problèmes industriels en sous-problèmes de tailles plus petites ([36]). Dans le cadre d'un stage de DEA, le développement d'une procédure par séparation et évaluation pour résoudre de manière exacte le problème dans le cas particulier des problèmes d'atelier de type " flow shop " ([54],[40],[55]).

On peut encore citer dans le cadre des ordonnancements prédictifs, la rédaction d'un chapitre de livre ([12]), la recherche de l'optimisation simultanée de la gestion des ressources humaines (problèmes d'emploi du temps) et de l'ordonnancement de l'atelier ([37]) et le prolongement d'activités en découpe 2D ([35]).

6.3.2. *Ordonnements prédictifs et réactifs en présence de perturbations*

Participants : Mohamed Ali Aloulou, Mikhail Kovalyov, Raja Lammat, Marie-Claude Portmann, Yuri Sotskov, Antony Vignier.

Nous nous intéressons à l'ordonnancement et au pilotage des ateliers en présence de perturbations. Nous proposons à l'atelier, non pas un ordonnancement prédictif, qui devient caduque très vite lorsque les perturbations arrivent, mais des familles d'ordonnancement qui contiennent de la flexibilité qui peut ensuite être utilisée lors du pilotage, de manière à espacer les instants où il faut recalculer des ordonnancements prédictifs car il est devenu impossible de les suivre.

Dans [5] a été développé un prototype complet fournissant un système de pilotage d'atelier à deux niveaux en présence de perturbations dans le cas d'un problème à une machine avec quelques propositions pour des extensions en ce qui concerne les problèmes de " job shop ". La conception du modèle servant de cadre à cette approche comprend sa définition et son implémentation. Le modèle est défini par 1) les caractéristiques statiques et l'environnement dynamique du problème, 2) le processus d'élaboration d'une solution, 3) la mesure de la qualité a priori d'une solution, 4) la mesure de la qualité a posteriori d'une solution ([34]). Pour l'élaboration de la solution, il est proposé de construire une structure flexible correspondant à une famille d'ordonnements respectant un ordre partiel entre les opérations à exécuter (ce qui généralise les travaux basés sur les séquences de groupes d'opérations permutables ([10]) et d'associer à cette structure une procédure qui génère un ordonnancement à partir de l'ordre partiel. La procédure peut être semi-active, active ou sans retard (ce qui généralise les travaux antérieurs limités aux ordonnancements semi-actifs). La qualité a priori d'une structure flexible est mesurée selon un double point de vue : la performance vis à vis de critères classiques (retards, durée,...) et la flexibilité offerte. Compte tenu de la présence de flexibilité, la performance a priori doit être calculée dans le meilleur et dans le pire des cas. L'implémentation du modèle est réalisée à travers deux algorithmes : 1) un algorithme proactif qui construit, à l'aide d'un algorithme génétique, une ou plusieurs structures flexibles présentant, a priori, un bon compromis entre performance et flexibilité ([52]), 2) un algorithme réactif qui exploite au mieux la flexibilité a priori afin d'obtenir de bonnes performances a posteriori ([33]). Un schéma général pour les procédures de décision en temps réel est proposé et l'effet de certaines pannes sur les performances est analysé.

Ces travaux s'intègrent dans un cadre de recherche plus général qui consiste à s'intéresser à la flexibilité, à la robustesse ou à la stabilité des ordonnancements en présence de perturbations ([9], [10]). En particulier, Yuri Sotskov et les chercheurs biélorusses s'intéressent au rayon de stabilité des solutions optimales en présence de perturbations. Dans le cadre de sa venue dans l'équipe MACSI en avril-mai 2002, nous avons travaillé ensemble sur la stabilité des chaînes de production en présence de perturbation ([26]).

6.3.3. *Gestion des systèmes de production à ressources multiples*

Participants : Yazid Mati, Emad Madani, Xiaolan Xie.

Nous poursuivons les travaux sur l'ordonnancement des systèmes de production dans lesquels 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. Les travaux de cette année portent sur l'étude des systèmes présentant les caractéristiques suivantes : flexibilité des gammes de fabrication des produits, opérations nécessitant plusieurs types de ressources, et la propriété de retenir et attendre pour la libération de ressource. La présence de la flexibilité de gammes de fabrication complique de manière significative le problème d'ordonnancement. Même le cas de deux jobs devient NP-difficile. Cependant nous avons proposé un algorithme polynomial pour l'ordonnancement pour le cas un job sans flexibilité de gamme et un job flexible. L'ordonnancement d'un système avec un nombre quelconque de jobs est obtenu par une méthode itérative qui prend en compte un nouveau job à chaque itération. Chaque itération de cette méthode consiste à agréger les jobs déjà ordonnancés en un job composé qui est sans flexibilité de gamme et ensuite ordonnancer le nouveau job et le job composé. La méthode génétique est ensuite utilisée pour déterminer l'ordre optimal dans lequel les travaux sont pris en compte. De nombreuses expériences numériques ont été conduites sur des études de cas en présence de flexibilité de gamme mais sans les deux autres propriétés des systèmes étudiées. Elles montrent que cette nouvelle méthode est compétitive par rapport aux meilleures méthodes conçues pour ces cas particuliers.

6.3.4. Planification, ordonnancement et chaînes logistiques

Participants : Mohamed Ali Aloulou, Lyès Benyoucef, Hongwei Ding, Ammar Oulamara, Latifa Ouzizi, Marie-Claude Portmann.

Dans le cadre des projets européens, nous travaillons de plus en plus sur des modèles issus des chaînes logistiques.

Les développements effectués dans [5] permettent de commencer par construire des ordonnancements prédictifs flexibles sur un terme relativement long afin de prévoir les approvisionnements en flux tendus tout en maintenant de la flexibilité. Une succession de recherches d'ordonnements prédictifs flexibles le long d'une chaîne logistique peut servir de bases à des négociations au sein de la chaîne. Des approches semblables sont en cours de développement dans le cadre de la planification au sein d'entreprises virtuelles. On suppose que l'on utilise une technique de plan glissant, que l'on a contractualisé des maxima et des minima d'échanges de produits entre les partenaires de la chaîne, que l'on avait au préalable conçu des plannings cohérents, que la demande n'est pas exactement conforme aux prévisions (perturbations) et on cherche à définir un système de négociations pour rétablir un ensemble de plannings cohérents au sein de la chaîne logistique.

Concevoir une entreprise en réseaux, autrement dit « supply chain », c'est décider le nombre de fournisseurs, le nombre d'unités de production, le nombre d'entrepôts et ou centres de distribution à implanter ainsi que leurs emplacements, leurs capacités, les flux de matières, les flux financiers, les modes de transport, etc, à avoir dans un objectif principal de produire le bon produit, à la date voulu et aux moindres coûts. Des coûts qui comptent entre autres les coûts d'approvisionnement, de production et de distribution. Ce problème stratégique peut être considéré comme une généralisation du problème "facility location" résolu traditionnellement par des techniques de programmation linéaire en nombres entiers. Pour être applicable, on s'appuie sur un modèle réaliste prenant en compte les contraintes industrielles (limitation des capacités de production, de transport et de stockage, les aléas dans les demandes produit, l'aspect multi-modal du transport, etc), les facteurs humains et sociaux des différents sites, des sites qui peuvent être dans différents pays. Afin d'optimiser un modèle de cette nature, nous envisageons de coupler des techniques d'optimisation et de simulation. Le verrou technologique à casser consiste à optimiser un modèle de très grande taille avec présence de phénomènes aléatoires.

Comme résultats, nous avons établi, dans un premier temps, un rapport sur l'état de l'art des études traitant des chaînes logistiques. Ensuite, nous avons proposé des modèles d'optimisation stratégique où des réseaux de distribution fonctionnant en " production à la commande " et impliquant différents modes de transport ont été testés avec succès.

Des études, qui prennent en compte l'aspect stochastique du problème, sont en cours. En effet, très souvent les entreprises, en se plaçant dans un niveau de décisions stratégiques, cherchent à évaluer l'impact de certaines décisions sur leur devenir. En effet, le fait de décider si on ferme ou pas un centre de production, un centre de

distribution, l'utilisation d'un nouveau mode de transport, nécessite une optimisation et une simulation avec prise en compte des aléas. Ainsi, via des algorithmes génétiques où on cherche à optimiser le réseau sous sa forme statique, la simulation va nous permettre d'évaluer les différentes performances du réseau sous sa forme dynamique (ie. temps de livraison moyen, coût moyen de transport, consommation moyenne en fuel, etc).

6.3.5. Aide à la décision pour la maintenance industrielle

Participants : Riad Aggoune, Mohamed Ali Aloulou, Marie-Claude Portmann, Guillaume Thisselin.

Deux activités ont porté sur la gestion des activités liées à la maintenance industrielle.

Dans [4] nous avons considéré des contraintes de calendriers flexibles qui correspondent à des opérations de maintenance. Au lieu d'avoir une contrainte d'indisponibilité d'une ressource entre deux dates, nous avons une opération de maintenance ayant une durée connue à placer entre une date de placement au plus tôt et une date de placement au plus tard.

Dans [56] ont été poursuivis les travaux développés en 2001 en collaboration avec Daoud Ait-Kadi de l'Université Laval. Il a été proposé deux méthodes exactes et plusieurs méthodes approchées pour obtenir l'arbre de maintenance optimal, c'est à dire les directives à suivre si l'on veut minimiser l'espérance mathématique de la somme des coûts de test et de réparation pour faire repartir un système complexe qui vient juste de tomber en panne.

7. Contrats industriels

7.1. Collaboration avec la Société INCOTEC

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

Deux thèses Cifre sont en cours chez INCOTEC. Les travaux correspondant ont été présentés au paragraphe 6.3.1. La collaboration avec INCOTEC nous permet d'avoir des cas industriels pertinents à analyser. Il est ainsi possible d'extraire les contraintes les plus significatives à introduire dans nos modèles d'ordonnancement et de savoir selon les types de production quelles sont les contraintes les plus serrées qu'il ne faut absolument pas relaxer si nous cherchons à rester réalistes.

7.2. Projet GROWTH ONE

Participants : Lyès Benyoucef, Hongwei Ding, Nidhal Rezg, Xiaolan Xie.

Ce projet Européen du programme GROWTH du 5e PCRD, démarré en 01 février 2001 et piloté par CRF-FIAT, porte sur l'optimisation des entreprises en réseau (Optimisation Methodology for Networked Enterprises). L'objectif de ce projet est de développer des modèles réalistes pour la conception et la gestion des chaînes logistiques en prenant compte des coûts, des délais, des impacts sociaux et environnementaux. L'INRIA contribue principalement à l'évaluation des performances et l'optimisation des chaînes logistiques stochastiques. La première année a été consacrée à l'étude de l'état de l'art académique et industriel et à la définition des études de cas dans les secteurs automobiles et textiles. Cette année est consacrée au développement de modèles de simulation et d'optimisation des chaînes logistiques dans la perspective de conception d'un réseau. Nous avons également présenté des résultats numériques sur un cas d'étude proposé par FIAT.

Partenaires : FIAT (I), RENAULT(F), POPILIA (I), Université de WARWICK (UK), CNRS-I2S (F), BIBA (D), INRIA (F) et INTRASOFT (GR).

7.3. Projet GROWTH V-chain

Participants : M.A. Aloulou, D. Anciaux, J.F. Gaytan Delgado, Thibaut Monteiro, Ammar Oulamara, L. Ouzizi, M-C. Portmann, D. Roy, F. Vernadat.

Le projet V-CHAIN, piloté par DMR Consulting, est un contrat UE Growth qui a démarré en mars 2001. Il concerne la définition et la gestion de chaînes logistiques de production manufacturière dans le cadre de

l'entreprise virtuelle, c'est à dire d'un réseau de fournisseurs et de donneurs d'ordre partageant les risques et les profits de la production. Les domaines d'application concernent l'industrie automobile (Ford, Espagne) et la fabrication de motocyclettes (Aprilia, Italie). Un accent a été mis, cette année, sur la modélisation de l'architecture de ces chaînes logistiques et des éléments qui les composent en vue de proposer une méthode, pour la conception des chaînes virtuelles, et pour le contrôle de celles-ci. Ces développements sont effectués dans le cadre de la tâche WP5 - Virtual Enterprise Framework - dont le projet MACSI est le coordonnateur. Ce projet fait en partie l'objet de la thèse de Mme Latifa OUZIZI et un ingénieur expert a été embauché dans le cadre du contrat (M. Juan Francisco GAYTAN DELGADO). Des développements ont également été réalisés en collaboration avec l'université d'Udine pour la planification et l'ordonnement de l'assemblage de moto (pilote italien). Partenaires : Ford (Espagne), Aprilia (Italie), DMR Consulting (Espagne), Université de Valencia, Université de Udine, INRIA-MACSI.

7.4. Réseau Thématique GROWTH-TNEE

Participants : Lyès Benyoucef, Nidhal Rezg, Xiaolan Xie.

TNEE, démarré en 01 novembre 2001 et piloté par CRF-FIAT, est un réseau thématique ayant pour objectif de fédérer les nombreux projets Européens sur les entreprises en réseau. Il rassemble les leaders Européens des différents secteurs industriels y compris l'industrie manufacturière et l'industrie de service et les grands centres de recherche européens du domaine. Les principales actions sont : (i) échanges d'informations, (ii) définition de benchmarks et de meilleures pratiques, (iii) coordination des efforts, (iv) disséminations. L'INRIA s'appuie sur ses deux projets européens (ONE et V-CHAIN) et se focalise sur l'industrie automobile. L'INRIA est responsable du working group "logistics" et nous avons organisé une première réunion du groupe de travail les 08-09/04/2002 à Paris. Cette réunion a été considérée comme un succès et les résultats ont servi de base pour structurer les travaux du réseau thématique.

Partenaires : CRF-FIAT (I), CNR-ITIA (I), MCC (SP), UPMAD (SP), ZEM (D), INRIA (F), University of Warwick (UK), BASF (D), FHD.IFF (D), IAI (Israel), BIBA (D), IVL(SW).

7.5. Génération automatique d'un plan de montage chez RENAULT

Participants : Lyès Benyoucef, Nidhal Rezg, Xiaolan Xie.

Démarré en 01 avril 2002, pour une durée d'un an, ce contrat avec Renault a pour objectif de développer un outil d'aide à la décision permettant la génération automatique des ordres de production (appelé plan de montage) à partir des prévisions pour les unités d'assemblages (taux/agenda) en respectant les points suivants : 1) utilisation efficace de la main d'oeuvre disponible (ouvrier salarié de Renault, organisation en 2 ou 3 équipes), 2) réduction des coûts industriels et logistiques, et 3) prise en compte de contraintes sociales telles que : utilisation des jours flexibles, utilisation d'un Samedi, utilisation d'un Dimanche, utilisation des heures supplémentaires, utilisation partielle ou totale d'une troisième équipe.

Comme premier résultat, nous avons un modèle mathématique traitant du cas où on a des lignes d'assemblage dédiées. Par ligne dédiée, on suppose que la ligne ne fabrique qu'un seul type de voiture. Pour ce modèle mathématique, les différents volumes à produire ainsi que les décisions à prendre (heures supplémentaires, troisième équipe, samedi travaillé, dimanche travaillé,...) sont obtenus. Parallèlement, une implémentation des algorithmes obtenus est en cours. Prochainement, nous envisagerons d'aborder le cas plus général où on est confronté à des lignes mixtes (lignes qui peuvent assembler différents types de voitures).

8. Actions régionales, nationales et internationales

8.1. Actions nationales

8.1.1. Région lorraine

Les travaux du paragraphe 6.3.2 sur la flexibilité en ordonnancement ont été développés dans le cadre d'un PPF sur les processus de production flexible de la région lorraine. Ils concernent également le thème régional QSL " qualité et sûreté des logiciels et des systèmes informatiques ".

8.1.2. Groupes de recherche en ordonnancement

Nous avons participé au groupe " flexibilité " du Gotha ([9]). Nous avons également participé activement aux actions qui cherchaient à conduire à la création d'un GDR Recherche Opérationnelle, qui aurait inclus tous les groupes de recherche en Ordonnancement, dont le groupe GOTHa et le groupe Bermudes auxquels nous participons. Nous n'avons pas abouti à la création d'un GDR, mais à celle d'un Action Spécifique "RO-action inter-GDR" qui a conduit en particulier au rattachement du groupe Gotha au GDR Alp.

8.1.3. Groupement de Recherche en Productique (GRP)

Des membres de MACSI participent à l'occasion aux activités des groupes de travail du GRP (Groupement de recherche en productique), principalement ceux concernant la modélisation en entreprise (GT 5) et l'Automatisation et Systèmes Sûrs de Fonctionnement (groupe AS2F). Le GRP se réunit en général deux fois l'an.

8.1.4. Club génie industriel

Le Club de génie industriel a vocation à fédérer la communauté des enseignants-chercheurs en génie industriel, par nature fort interdisciplinaire. Des membres de MACSI participent à l'occasion aux activités et réunions du club.

8.1.5. Groupe Réseaux de Petri Francophone

Xiaolan Xie est membre du comité de pilotage.

8.2. Actions internationales

8.2.1. IFAC-IFIP Task Force et CIMOSA Association

F. Vernadat a été vice-président de la IFAC-IFIP Task Force on Architectures for Enterprise Integration depuis 1996 jusqu'au dernier Congrès IFAC de Barcelone (Juillet 2002). Il représentait également MACSI et le LGIPM au sein de la CIMOSA Association, association internationale chargée de la promotion de l'intégration d'entreprise et des technologies de modélisation associées. A ce titre, il a participé comme conférencier invité à la 3ème Conférence Internationale on Enterprise Integration and Modeling Technologies (ICEIMT) qui a eu lieu les 24-26 avril 2002 à Valencia, Espagne. Comme les trois éditions précédentes, cette conférence est parrainée par la Commission Européenne et le NIST américain et a été précédée de quatre workshops de préparation (brainstorming d'une vingtaine d'experts invités).

8.2.2. NSF-INRIA

Projet de collaboration NSF-INRIA (10/2000 -09/2003) entre l'Université du Maryland (Prof. Fu) et le projet MACSI. Dans ce cadre, Xiaolan Xie a passé d'environ 4 semaines à l'Université du Maryland (16/08-11/09/2002).

8.2.3. Réseau FM »Fiabilité et Maintenance «

Le réseau FM regroupant l'Université de Laval (CANADA), L'Ecole Polytechnique de Montréal (CANADA), l'Ecole Supérieure de Science et Techniques de Tunis, et le LGIPM dont les membres messins font partie. Ce réseau porte sur la fiabilité et de la maintenance dans les systèmes de production.

8.2.4. Collaboration avec Minsk

De plus en plus de collaborations ont lieu avec des chercheurs de Minsk en Biélorussie : Mikhail Kovalyov, Yakov Shafransky et Yuri Sotskov. En décembre 2001, nous avons également eu le plaisir de recevoir Viatcheslav Sergeevich Tanaev, le président de la société nationale biélorusse de recherche opérationnelle, le fondateur de la recherche en ordonnancement à Minsk, qui est malheureusement décédé le 19 juillet 2002.

9. Diffusion des résultats

9.1. Animation de la Communauté scientifique

9.1.1. Membres de comités d'organisation

Les permanents de MACSI ont été membres de très nombreux comités scientifiques et comités d'organisation de conférences.

François Vernadat a été membre du comité d'organisation de conférences :

- 4th International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS'2002), Ciudad Real, Spain, April 3-6, 2002.
- 6th International Conference on Engineering Design and Automation, Maui, Hawaii, USA, August 4-7, 2002.
- 5th IEEE/IFIP International Conference on Information Technology for Balanced Automation Systems in Manufacturing and Services (BASYS'2002), Cancun, Mexico, September 25-27, 2002.
- 9th International Multi-Conference on Advanced Computer Systems, Miedzyzdroje, Poland, October 23-25, 2002.

Le projet MACSI organise, en collaboration avec les projets TRIO et MOSEL de l'INRIA-Lorraine et le CRAN, le workshop MSR2003 (Modélisation des Systèmes Réactifs), 06-08/10/2003, Metz. Xiaolan Xie est, avec Dominique Mery (avant-projet MOXEL), co-président du comité de programme et Nidhal Rezg est président du comité d'organisation.

MACSI a obtenu d'organiser le 9ème International Workshop on Project Management and Scheduling-PMS en 2004.

9.1.2. Membres de comités scientifiques de revues et conférences

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, Design and Manufacturing Automation, Journal Européen des Systèmes Automatisés.

Xiaolan Xie est Associate Editor pour IEEE Transactions on Robotics and Automation.

Xiaolan Xie a été membre du comité scientifique du Intl. Conf. WODES'02, Zaragoza, Spain, Oct. 2002, du comité scientifique de IEEE Conf. on Systems, Man, and Cybernetic (SMC2002), Hammamet, Tunisia, Oct. 2002, du comité scientifique de CIFA2002, Nantes, France, 2002.

Marie-Claude Portmann a été membre du comité scientifique de ROADEF'2002 à Paris, France, en février 2002 et de WPMS'2002 à Valencia, Spain, en avril 2002.

9.1.3. Editeurs invités de numéros spéciaux de revues

En 2001-2002, des membres de MACSI ont participé à la préparation de numéros spéciaux de revues suivantes :

- F. Vernadat, guest editor, Special issue on Advances in modeling, control and integration of manufacturing facilities, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 14, No. 6, Nov.-Dec. 2001.
- A. Dolgui et F. Vernadat, Numéro spécial sur MOSIM'01, International Journal of Production Research, 2002.

9.2. Enseignement

Le projet MACSI comporte 2 chercheurs et 10 enseignants-chercheurs. 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, l'ULP de Strasbourg.

Marie-Claude Portmann est (pour la douzième et dernière année) responsable du département Génie Industriel de l'Ecole des Mines de Nancy. Marie-Claude Portmann est responsable pédagogique d'un nouveau Mastère reconnu par la Conférence des Grandes Ecoles (CGE) intitulé " Recherche Opérationnelle et Stratégie

de Décision ". Marie-Claude Portmann est responsable pédagogique du Master of Sciences du groupe des Ecoles des Mines (GEM) intitulé " Industrial Economy and International Management " où les enseignements du premier semestre sont assurés en anglais. Les enseignants de MACSI en poste à l'Ecole des Mines de Nancy participe au groupe de travail en génie industriel (pour l'enseignement et la recherche) du groupement des Ecoles des Mines (GEM). Henri Amet vient de prendre la succession de Marie-Claude Portmann pour la responsabilité de la filière " Ingénierie des Systèmes de Décision et de Production " de l'Ecole des Mines de Nancy.

Marie-Claude Portmann est membre élu au conseil d'UMR du LORIA, au Conseil d'Administration de l'Ecole des Mines de Nancy, au CEVU de l'INPL. Elle est (pour la cinquième année consécutive) présidente de la Commission de Spécialistes 27ème section de l'INPL.

Marie-Claude Portmann vient d'être nommée au 1er décembre 2002, membre de la Commission des Titres de l'Ingénieur (CTI).

Antony Vignier est (pour la quatrième année consécutive) directeur des études de l'ESIAL.

Du point de vue de la formation doctorale, MACSI relève de l'Ecole doctorale IAEM 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

F. Vernadat a été conférencier invité dans »3rd International Conference on Enterprise Integration and Modelling Technology, 24-26 April 2002, Valencia, Spain ». Sa conférence a portée sur »Enterprise Modelling and Integration : From fact modelling to Enterprise Interoperability », Proc.

Marie-Claude Portmann a participé à l'animation d'une table ronde sur les enjeux de la recherche concernant les ordonnancements d'atelier à PMS en avril 2002 à Valencia.

9.4. Invitations et personnes reçues

- Visite du Professeur Stein W. Wallace (Molde University College, Norway), 21-26/02/2002.
- Séjour du professeur Yuri Sotskov (Directeur de Laboratoire à l'Institut de Cybernétique de l'Académie des Sciences de Minsk, Biélorussie), invité par l'Ecole des Mines de Nancy (INPL), pour une durée de 2 mois (en mars et avril 2002).
- Séjour du professeur Yakov Shafransky (Chercheur à l'Institut de Cybernétique de l'Académie des Sciences de Minsk, Biélorussie), invité par l'Ecole des Mines de Nancy (INPL), pour la durée de 1 mois et 1/2 à compter du 1er mars 2002.
- Visite du Professeur Liming Liu (Hongkong University of Sciences and Technology), 17-18/09/2002.
- Visite des Professeurs MuDer Jeng (National Taiwan Ocean University) et ShengLuen Chung (National Taiwan University of Science and Technology), 14-18/10/2002.

9.5. Jurys de thèses et d'habilitations

Les membres de MACSI ont pris part aux jurys suivants :

- F. Vernadat (depuis septembre 2001) : Ioana Filipas (thèse, Université de Franche-Comté et Université Polytechnique de Timisoara, Roumanie, rapporteur), Thibaud Monteiro (thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble, rapporteur), Georges Habchi (HDR, Université de Savoie, rapporteur), Stéphane Galland (thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de St-Etienne et Université Jean Monnet, rapporteur), Rebiha Bacha (thèse, Ecole Centrale de Paris, président), Laureen Hellouin (thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse, rapporteur), Fehmi H'Mida (thèse, Université de Metz, co-directeur de thèse), Abdennebi Talbi (thèse d'état, Université Mohammed V, Maroc, rapporteur).

- Marie-Claude Portmann : Alexandre Dolgui (HDR, Université de Technologie de Troyes, fin décembre 2001), Sébastien Thomassey (thèse, Lille 1, rapporteur), Patrick Martineau (HDR, Tours), Riad Aggoune (thèse, Université de Metz, directeur de thèse), Mohamed Ali Aloulou (thèse, INPL, directeur de thèse).
- X. Xie : Yazid Mati (thèse, Université de Metz, directeur de thèse), Asma Ghaffari (thèse, université de Metz, directeur de thèse).

10. Bibliographie

Livres et monographies

- [1] B. CAILLAUD, P. DARONDEAU, L. LAVAGNO, X. XIE. *Synthesis and Control of Discrete Event Systems*. édition B. Caillaud, Ph. Darondeau, L. Lavagno and X.L. Xie, Kluwer Academic Publishers, Boston, 237 pages, 2002.
- [2] A. DOLGUI, F. VERNADAT. *Conception et Planification des Chaînes de Production, MOSIM'01*. édition Dolgui, A., Vernadat, F.), série Journal Européen des Systèmes Automatisés, Vol. 36, No. 1, Hermès, 188 pages, 2002.
- [3] A. DOLGUI, F. VERNADAT. *Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels*. édition Dolgui, A., Vernadat, F., série Actes de la troisième conférence francophone de MOdélisation et SIMulation (MOSIM'01), 25-27 avril 2001, Troyes, France, volume 1 et 2, Society for Computer Simulation International, Erlangen, 2002.

Thèses et habilitations à diriger des recherche

- [4] R. AGGOUNE. *Ordonnancement d'ateliers sous contraintes de disponibilité des machines*. thèse de doctorat, Université de Metz, Décembre, 2002.
- [5] M. A. ALOULOU. *Structure flexible d'ordonnancements à performances contrôlées pour la conception d'un pilotage d'atelier à deux niveaux en présence de perturbations*. thèse de doctorat, Ecole des mines de Nancy, Décembre, 2002.
- [6] A. GHAFARI. *Les réseaux de Petri pour la synthèse de contrôle des systèmes à événements discrets*. thèse de doctorat, Université de Metz, Décembre, 2002.
- [7] Y. MATI. *Les Problèmes d'Ordonnancement dans les Systèmes de Production Automatisés : Modèles, Complexité et Approches de Résolution*. thèse de doctorat, Université de Metz, Juin, 2002.

Articles et chapitres de livre

- [8] R. AGGOUNE. *Minimizing the Makespan for the Flow Shop Scheduling Problem with Availability Constraints*. in « European Journal of Operational Research (à paraître) », 2002.
- [9] M. A. ALOULOU, AL.. *Flexibilité et Robustesse en Ordonnancement*. in « Le bulletin de la ROADEF n° 8. pp.10-12 », 2002.

- [10] C. ARTIGUES, C. BRIAND, M.-C. PORTMANN, R. FRANÇOIS. *Pilotage d'atelier basé sur un ordonnancement flexible. Méthodes du pilotage des systèmes de production*. Hermes Lavoisier, 2002, pages 61-97.
- [11] L. BERRAH, F. VERNADAT. *Perception et évaluation de la production, approche de la performance dans le pilotage*. in « Fondements du Pilotage des Systèmes de Production (P. Pujo et J.P. Kieffer, coordinateurs) », Hermès, Paris, Chap. 6. 25 pages, 2002.
- [12] C. BLOCH, M.-C. PORTMANN, A. VIGNIER. *Application des algorithmes génétiques à l'ordonnement de la production. Métaheuristiques et outils nouveaux pour la recherche opérationnelle*. éditeurs HERMES., in « Hermes », 2002, à paraître.
- [13] D. CHEN, F. VERNADAT. *Enterprise interoperability : A standardisation view*. éditeurs J. N. A. O. B. K. KOSANKE., in « Enterprise Inter- and Intra-Organizational Integration : Building International Consensus », Kluwer Academic Press, 2002, pages 273-282, à paraître.
- [14] D. CHEN, F. VERNADAT. *Standards on Enterprise Integration and Engineering - A state of the art*. in « soumis à International Journal of Computer Integrated Manufacturing », 2002.
- [15] P. DARONDEAU, X. XIE. *Linear Control of Live Marked Graphs*. in « Automatica », 2002, à paraître.
- [16] M. FU, X. XIE. *Derivative estimation for buffer capacity of continuous transfer lines subject to operation-dependent failures*. in « Journal of Discrete Event Dynamic Systems, vol. 12, 447-469 », 2002.
- [17] A. GHAFARI, N. REZG, X. XIE. *Design of live and maximally permissive Petri net controller using theory of regions*. in « IEEE Transactions on Robotics and Automation », 2002, à paraître.
- [18] A. GHAFARI, N. REZG, X. XIE. *Feedback control logic for forbidden state problem of marked graphs : Application to a real manufacturing system*. in « IEEE Transactions on Automatic Control », 2002, à paraître.
- [19] A. GHAFARI, N. REZG, X. XIE. *Theory of regions based synthesis of the maximally permissive and non blocking supervisory control*. in « Journal Européen des Systèmes automatisés, vol 36. n° 7. pp.919-930. », 2002.
- [20] M. HARZALLAH, F. VERNADAT. *IT-based competency modeling and management : From theory to practice in enterprise engineering and operations*. in « Computers in Industry, Vol. 48, No. 2, 157-179 », 2002.
- [21] A. JANIAC, M. KOVALYOV, M.-C. PORTMANN. *Single machine group scheduling with resource dependent setup and processing times*. in « European Journal of Operational Research », 2002, à paraître.
- [22] M. JENG, X. XIE, M. PENG. *Process Nets with Resources for Manufacturing Modeling and Their Analysis*. in « IEEE Trans. on Robotics and Automation », 2002, à paraître.
- [23] Y. MATI, X.-L. XIE. *On the Complexity of the Two-job Shop Problems with Resource Flexibility*. in « European Journal of Operational Research (à paraître) », 2002, à paraître.

- [24] M.-S. OUALI, N. REZG, X.-L. XIE. *Maintenance Préventive et Optimisation des Flux d'un Système de Production*. in « Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA), 36/1, pp. 97-116 », 2002.
- [25] L. OZDAMAR, S. BIRBIL, M.-C. PORTMANN. *Technical note : new results for the capacitated lot sizing problem with overtime decisions and setup times* . in « Production Planning and Control, vol. 13, No. 1, pp. 2-10 », 2002.
- [26] Y. SOTSKOV, A. DOLGUI, M.-C. PORTMANN. *Stability analysis of optimal balance for assembly line with fixed cycle time*. in « European Journal of Operational Research », 2002, à paraître.
- [27] F. VERNADAT. *Enterprise Modelling and Integration : From fact modelling to Enterprise Interoperability*. éditeurs J. N. A. O. B. K. KOSANKE., in « Enterprise Inter- and Intra-Organizational Integration : Building International Consensus », Kluwer Academic Press, 2002, pages 25-33, à paraître.
- [28] F. VERNADAT. *Enterprise Modeling and Integration (EMI) : Current status and research perspectives*. in « Annals Reviews of Control, Vol. 26 », 2002.
- [29] X. XIE. *Evaluation and optimization of two-stage continuous transfer lines subject to time-dependent failures*. in « Journal of Discrete Event Dynamic Systems, 12/01, pp. 109-122 », 2002.
- [30] X.-L. XIE. *Fluid stochastic event graphs for evaluation and optimization of discrete event systems with failures*. in « IEEE Trans. Robot. Automat. vol. 18, No. 3, pp. 360-366 », 2002.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [31] R. AGGOUNE, M.-C. PORTMANN. *A heuristic approach for the job shop scheduling problem with availability constraints*. in « XV Conference of the European Chapter on Combinatorial Optimization - ECCO'2002 », 2002.
- [32] R. AGGOUNE, M.-C. PORTMANN. *A New Heuristic for the Flow Shop Scheduling Problem with Availability Constraints* . in « International Symposium on Combinatorial Optimization - CO'02, Paris-France », 2002.
- [33] M. A. ALOULOU. *On the reactive scheduling design using flexible predictive schedules*. in « IEEE Conference on Systems Mans and Cybernetics - SMC », 2002.
- [34] M. A. ALOULOU, M.-C. PORTMANN, A. VIGNIER. *Predictive-Reactive Scheduling for the Single Machine Problem*. in « Eighth International Workshop on Project Management and Scheduling - PMS », 2002.
- [35] H. AMET. *Placements de formes pour l'industrie*. in « 4ème Congrès de la ROADEF (Paris) », 2002.
- [36] F. DEPPNER. *Problème de Job-shop de taille industrielle avec contraintes d'écart maximal entre opérations*. in « 4ème Congrès de la ROADEF (Paris) », 2002.
- [37] F. DEPPNER, O. DUPUIS. *Affectation de ressources humaines dans un environnement multi-ressources*. in « 4ème Congrès de la ROADEF (Paris) », 2002.

- [38] A. DOLGUI, B. FINEL, N. GUSCHINSKY, G. LEVIN, F. VERNADAT. *A Transfer Line Design and Balancing Approach*. in « Proc. Int. Conf. on Digital Enterprise Technology (DET), Durham, UK, 16-18 September », 2002.
- [39] A. DOLGUI, B. FINEL, N. GUSCHINSKY, G. LEVIN, F. VERNADAT. *Load Balancing for Transfer Lines : new algorithms and some comparisons*. in « Proceedings of the International Conference on Production System Design, Supply Chain Planning and Optimization, Szczecin, Poland, 23-25 October », 2002.
- [40] J. FONDREVELLE. *Ordonnancement de produits périssables*. in « CONFERE 2002. (Nancy, France) », 2002.
- [41] A. GHAFFARI, N. REZG, X. XIE, F. BEN NJIMA. *Design and coordination of partial control modules*. in « IEEE conference on Systems Man and Cybernetics - SMC'02 », 2002.
- [42] A. GHAFFARI, N. REZG, X. XIE. *Algebraic and geometric characterization of Petri net controllers using the theory of regions*. in « The 6th workshop on discrete event systems - WODES'02, pp.219-224 », 2002.
- [43] A. GHAFFARI, N. REZG, X. XIE. *Live and maximally permissive controller synthesis using the theory of regions*. in « Symposium of the supervisory control of discrete event systems. (Paris, France) », Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [44] A. GHAFFARI, N. REZG, X. XIE. *Net transformation and theory of regions for optimal control of Petri nets*. in « IFAC World Congress on Automatic Control. (Barcelone, Espagne) », IFAC World Congress on Automatic Control, (Barcelone, Espagne), 2002.
- [45] M. HARZALLAH, G. BERIO, F. VERNADAT. *A formal model for assessing individual competence in enterprises*. in « Proc. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Hammamet, Tunisia, October 6-9 », 2002.
- [46] Y. MATI, N. REZG, X.-L. XIE. *Greedy Heuristic and Genetic Algorithms for the Multi-resource Shop Scheduling with Resource Flexibility*. in « Proc. 8th International Workshop on Project Management and Scheduling, PMS », 2002.
- [47] M.-C. PORTMANN, M. KOVALYOV, H. AMET. *Dominance properties for permutation flow shop problems*. in « Eighth International Workshop on Project Management and Scheduling, pp.297-300 », International Workshop on Project Management and Scheduling, (Valencia, Spain), 2002.
- [48] G. THISSELIN, A. VIGNIER. *A lower bound computation for the "farmer problem"*. in « The International Symposium on Combinatorial Optimization - CO'2002 », 2002.
- [49] G. THISSELIN, A. VIGNIER. *A Scheduling Problem with Multiple Purposes and Unrelated Resources ("The Farmer Problem")*. in « Eighth International Workshop on Project Management and Scheduling - PMS, (Valencia, Spain) », 2002.
- [50] F. VERNADAT. *Enterprise Modelling and Integration : From fact modelling to Enterprise Interoperability*. in « Proc. 3rd International Conference on Enterprise Integration and Modelling Technology (Invited paper), Valencia, Spain, 24-26 April », 2002.

Rapports de recherche et publications internes

- [51] H. ALJAZEARI. *Méthode d'évaluation de performances pour la conception d'un réseau logistique basée sur la simulation*. Stage de DEA Génie Industriel de l'UTT de Troyes, 2002.
- [52] M. A. ALOULOU, M.-C. PORTMANN. *A genetic algorithm to achieve scheduling flexibility for a single machine problem*. Soumis à RAIRO - Operations Research, 2002.
- [53] L. BOUSLAMI. *Modélisation et résolution d'un problème d'ordonnancement dynamique observé en mode de production et livraison synchrones*. Stage de DEA Recherche Opérationnelle, INPGrenoble, 2002.
- [54] J. FONDREVELLE. *Ordonnancement de produits périssables*. Stage de DEA. ENSGSI, Nancy, 26 p, 2002.
- [55] J. FONDREVELLE. *Résolution exacte d'un problème d'ordonnancement de produits périssables : cas du flowshop de permutation*. Soumis à la Quatrième conférence francophone de Modélisation et Simulation - MOSIM'03, (Toulouse, France), 2002.
- [56] G. THISSELIN. *Fiabilité, Maintenance, Simulation et Combinatoire*. Stage de DEA Informatique de Lorraine, 2002.
- [57] G. THISSELIN, A. VIGNIER. *A Scheduling Problem with Multiple Purpose and Unrelated Resources ("The Farmer Problem")*. Soumis à (EJOR) European Journal of Operational Research, 2002.

Bibliographie générale

- [58] G. ALPAN. *Design and Analysis of Supervisory Controllers for Discrete Event Dynamic Systems*. Ph.D. Thesis, Rutgers University, New Brunswick, New Jersey, May, 1997.
- [59] AMICE. *CIMOSA : Open System Architecture for CIM, second revised and extended edition*. Springer-Verlag, Berlin, 1993.
- [60] F. BACCELLI, G. COHEN, G. OLSDER, J. QUADRAT. *Linearity and Synchronization*. John Wiley & Sons, New York, 1992.
- [61] K. BAKER. *Introduction to Sequencing and Scheduling*. John Wiley, New York, NY, 1974.
- [62] P. BERNUS, L. N. (EDS.). *Modelling and Methodologies for Enterprise Integration*. Chapman & Hall, London, 1996.
- [63] J. BLAZEWICZ, K. ECKER, E. PESCH, G. SCHMIDT, J. WEGLARZ. *Scheduling Computer and Manufacturing Processes*. Springer Verlag, Berlin, 1996.
- [64] B. BRANDIN, W. WONHAM. *Supervisory control of timed discrete event systems*. in « IEEE Trans. On Automatic Control », numéro 2, volume 39, 1994, pages 329-342.

-
- [65] J. BUZACOTT, J. SHANTHIKUMAR. *Models of production systems*. éditeurs G. SALVENDY., in « Handbook of Industrial Engineering », IIE, New-York, 1992.
- [66] J. BUZACOTT, J. SHANTHIKUMAR. *Stochastic Models of Manufacturing Systems*. Prentice-Hall Pub., Englewood Cliffs, NJ, 1992.
- [67] J. CARLIER, P. CRETENNE. *Problèmes d'Ordonnancement*. Masson, Paris, 1988.
- [68] G. COHEN, P. MOLLER, J.-P. QUADRAT, M. VIOT. *Algebraic tools for the performance evaluation of discrete event systems*. in « Proceedings of the IEEE », numéro 1, volume 77, 1989, pages 38-58.
- [69] R. CONWAY, W. MAXWELL, R. MILLER. *Theory of Scheduling*. Addison-Wesley, reading, MA, 1967.
- [70] R. DAVID, H. ALLA. *Du Grafset aux Réseaux de Petri*. édition 2, Hermès, Paris, 1992.
- [71] A. DESROCHERS. *Modeling and Control of Automated Manufacturing Systems*. IEEE Computer Society Press, Washington, DC, 1990.
- [72] F. DICESARE, G. HARHALAKIS, J.-M. PROTH, M. SILVA, F. VERNADAT. *Practice of Petri Nets in Manufacturing*. Chapman & Hall, London, 1993.
- [73] L. DUPONT. *La Gestion Industrielle*. Hermès, Paris, 1998.
- [74] S. FRENCH. *Sequencing and Scheduling : An Introduction to the Mathematics of the Job Shop*. Horwood, Chichester, 1982.
- [75] V. GIARD. *Gestion de la Production*. volume 2ème édition, Economica, Paris, 1988.
- [76] GOTHA. *Les problèmes d'ordonnancement*. in « Recherche Opérationnelle/Operations Research », numéro 1, volume 27, 1993, pages 77-150.
- [77] 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 », volume 4, pages 3069-3074, Oct. 22-25, 1995.
- [78] D. HAREL. *Statecharts : a visual formalism for complex systems*. in « Sci. Comput. Program. », volume 8, 1987, pages 231-274.
- [79] Y. HO, X. CAO. *Perturbation Analysis of Discrete Event Dynamic Systems*. Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [80] Y. HO. *Special issue on Discrete Event Dynamic Systems*. in « Proceedings of the IEEE », numéro 1, volume 77, 1989.
- [81] Y. HO. *Discrete Event Dynamic Systems*. IEEE Press, 1992.

- [82] C. HOARE. *Communicating Sequential Processes*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.
- [83] L. HOLLOWAY, B. KROGH. *Synthesis of feedback control logic for a class of controlled Petri nets*. in « IEEE Trans. Automatic Control », numéro 5, volume 37, 1992, pages 692-697.
- [84] K. INAN, P. VARAIYA. *Finitely recursive process models for discrete event systems*. in « IEEE Trans. Automatic Control », numéro 7, volume AC-33, 1988, pages 626-639.
- [85] M. JENG, X.-L. XIE. *Synthesis of resource control nets using siphons*. in « IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetic », pages 435-440, october, 1997.
- [86] R. KUMAR, V. GARG. *Modeling and Control of Logical Discrete Event Systems*. Kluwer Press, Boston, 1995.
- [87] Z. MANNA, A. PNUELI. *The Temporal Logic of Reactive and Concurrent Systems*. Springer-Verlag, Berlin, 1992.
- [88] R. MILNER. *A Calculus for Communicating Systems*. Springer-Verlag, New-York, 1980.
- [89] C. MOODIE, R. UZSOY, Y. YIH. *Manufacturing Cells : A Systems Engineering View*. Taylor & Francis, London, 1995.
- [90] T. MURATA. *Petri Nets : Properties, Analysis and Applications*. in « Proceedings of IEEE », numéro 4, volume 77, 1989, pages 541-580, CD-ROM.
- [91] J. ORLICKY. *Material Requirements Planning*. McGraw Hill, 1975.
- [92] J. OSTROFF, W. WONHAM. *A framework for real-time discrete event control*. in « IEEE Trans. Automatic Control », numéro 4, volume AC-35, 1990, pages 386-397.
- [93] C. PETRIE. *Enterprise Integration Modeling*. The MIT Press, Cambridge, MA, 1993.
- [94] M. PINEDO. *Scheduling, In Handbook of Industrial Engineering*. John Wiley, New York, NY, 1992, pp. 2131-2153.
- [95] 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...
- [96] P. RAMADGE, W. WONHAM. *Supervisory control of a class of discrete-event processes*. in « SIAM J. Contr. Optimiz. », numéro 3, volume 25, 1987, pages 206-230.
- [97] P. RAMADGE, W. WONHAM. *The control of discrete event systems*. in « Proceedings of the IEEE », numéro 1, volume 77, 1989, pages 81-98.
- [98] G. SALVENDY. *Handbook of Industrial Engineering*. John Wiley, New York, 1992.

-
- [99] T. SCHAEEL. *Théorie et Pratique du Workflow*. Springer Verlag, 1996.
- [100] F. VERNADAT. *Enterprise Modeling and Integration : Principles and Applications*. Chapman & Hall, London, 1996.
- [101] L.-M. WANG, X.-L. XIE. *Modular Modelling Using Petri Nets*. in « IEEE Transactions on Robotics and Automation », numéro 5, volume 12, october, 1996, pages 800-809.
- [102] T. WILLIAMS. *The Purdue Enterprise Reference Architecture*. Instrument Society of America, 1992.
- [103] M. ZHOU, F. DICESARE. *Petri Net Synthesis for Discrete Event Control of Manufacturing Systems*. Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, 1993.