
Projet SAGEP

Simulation, Analyse et Gestion des Systèmes de Production

Localisation : *Lorraine, Antenne de Metz*

Mots-clés : Conception de systèmes de fabrication, Gestion des stocks, Gestion hiérarchisée, Evaluation de systèmes dynamiques, Modélisation de systèmes dynamiques, Optimisation de systèmes discrets, Ordonnancement, Planification, Réseau de Petri, SAGEP.

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Jean-Marie Proth, DR 1 Inria

Secrétaire

Christel Carmier, TR Inria

Personnel Inria

Chengbin Chu, CR 1 Inria, jusqu'au 30 août 1996

Xiaolan Xie, CR 1 Inria

Ingénieur expert

Nathalie Sauer, jusqu'au 30 août 1996

Chercheurs doctorants

Julien Antonio, boursier Inria

Fabrice Chauvet, boursier Inria - Conseil Régional, depuis le 1er septembre 1996

Névine Hafez, boursière Inria, avec Praxitèle

Philippe Wolff, boursier Inria, jusqu'au 31 mai 1996

Collaborateurs extérieurs

Haoxun Chen, Professeur associé, Université de Jiaotong, Xi'an (R.P. Chine)

Michael Fu, Professeur associé, College of Business and Management, Université du Maryland (USA)

Ahmedou Haouba, Professeur, Université de Nouakchott (Mauritanie)

Jeffrey W. Herrmann, Professeur associé, Université du Maryland (USA)

George Ioannou, Professeur assistant, Virginia Tech (USA)

Ioannis Minis, Professeur associé, Université du Maryland (USA)

Rakesh Nagi, Professeur assistant, Université de Buffalo (USA)

Yorai Wardi, Professeur, Georgia Institute of Technology (USA)

Autres personnels

Jean-Marc Février, Stagiaire du 1er avril au 30 septembre 1996, préparation d'un DESS à l'Université de Savoie

Olivier Florian, Stagiaire du 1er juin au 31 octobre 1996, préparation du diplôme d'ingénieur mathématicien à l'INSA Rouen

Hervé Willaume, Stagiaire du 8 juillet au 31 août 1996, préparation d'un DUT en formation professionnelle continue à l'IUT de Metz

2 Présentation du projet

Les recherches développées par SAGEP s'intéressent essentiellement à la modélisation, l'évaluation du comportement et la gestion (essentiellement la gestion hiérarchisée) des systèmes discrets complexes.

Ce thème général inclut (mais ne se limite pas à) la gestion des stocks, l'ordonnancement, la maintenance (qui est une opération désormais intégrée dans les gammes de fabrication), et en particulier la maintenance prédictive.

Les outils intervenant dans nos travaux sont la recherche opérationnelle, la théorie des graphes, les statistiques, les séries temporelles, l'analyse des données, les réseaux de Petri. L'analyse combinatoire est au centre de nos préoccupations.

SAGEP, qui évolue dans le domaine du génie industriel, a pour vocation de s'approprier les disciplines citées ci-dessus et de les développer en vue de leur application dans l'étude des systèmes industriels.

Les travaux développés cette année peuvent se résumer comme suit :

- poursuite de la recherche des propriétés des systèmes manufacturiers à l'aide des réseaux de Petri,
- poursuite des travaux sur la maintenance prédictive,
- approfondissement des travaux sur l'ordonnancement (en particulier par l'utilisation de supports théoriques nouveaux), et extension à l'ordonnancement des tâches de bureau,
- consolidation de nos travaux sur les systèmes de gestion hiérarchisée,
- développement d'algorithmes pour les problèmes de découpe à une et deux dimensions qui sont soumis aux contraintes industrielles réelles,
- enfin, début d'une recherche en logistique dans le cadre de Praxitèle.

Les trois derniers points ont vu leur application dans l'industrie.

Nous continuons par ailleurs à nous intéresser à l'analyse des perturbations et ses prolongements. Nous abordons enfin l'utilisation des systèmes neuronaux pour l'ordonnancement (une première tentative a eu lieu dans le cadre du projet ESPRIT HIMAC).

3 Actions de recherche

3.1 Ordonnancement

Cette année a vu l'introduction des réseaux neuronaux dans la recherche d'ordonnements. Nous avons également développé une recherche sur l'ordonnement des tâches de bureau, lesquelles présentent des caractéristiques particulières. Nous avons aussi proposé un algorithme efficace pour la minimisation du *makespan* en ateliers. Enfin, nous avons montré comment il est possible de contrôler un ordonnancement en agissant sur des paramètres externes.

3.1.1 Utilisation des réseaux de neurones en ordonnancement

Participant : Chengbin Chu

Les problèmes d'ordonnancement sont en général NP-complets, si bien qu'il est nécessaire de développer des heuristiques pour obtenir des solutions aussi proches que possible de l'optimum. D'autre part, il est possible de développer une multitude d'heuristiques, et aucune d'entre elles n'est globalement meilleure que les autres, c'est à dire ne fournit la meilleure solution pour un critère donné quelles que soient les données du problème. D'où la nécessité d'être capable de choisir la meilleure heuristique en fonction des données du problème.

Notre approche se base sur l'hypothèse que les performances des heuristiques sont fonction des caractéristiques des données. Nous utilisons les réseaux de neurones pour établir la correspondance entre caractéristiques des données et efficacité des heuristiques.

3.1.2 Ordonnancement des tâches de bureau

Participants : Jeffrey W. Herrmann, Jean-Marie Proth, Nathalie Sauer

Une tâche de bureau peut être exécutée sur différents processeurs (i.e. par différents employés), mais son temps de réalisation varie d'un processeur à l'autre (i.e. d'un employé à l'autre). Il existe également des contraintes de précédence entre certaines tâches, mais ces contraintes sont peu nombreuses. L'objectif est de minimiser le temps d'activité des processeurs (i.e. l'instant où le dernier employé a terminé ses tâches). Lorsque le nombre de tâches est important, il n'est pas possible d'obtenir la solution optimale en un temps raisonnable. Nous avons donc développé plusieurs heuristiques.

La première heuristique affecte les tâches aux processeurs et ordonnance simultanément les tâches sur les processeurs. Son principe est d'exécuter en premier les tâches qui pourraient retarder l'ordonnancement d'autres tâches dans le futur. Cette heuristique est très rapide quelle que soit la taille du problème et donne dans certains cas la solution optimale. Malheureusement, dans certaines circonstances, la solution obtenue est très éloignée de la solution optimale.

Le second type d'heuristiques résout le problème en trois étapes. Dans un premier temps, on détermine la solution optimale sans considérer les contraintes de précédences et en utilisant une procédure par séparation et évaluation. Puis, à partir de cette répartition des tâches sur les processeurs, et en tenant compte des contraintes de précédence, on ordonnance les tâches sur les processeurs. Pour cela, deux méthodes sont utilisées. La première essaie d'améliorer le *makespan* en modifiant le chemin critique. La seconde utilise un algorithme comparable à la première heuristique mais en tenant compte du fait que les tâches sont déjà affectées aux processeurs. Finalement, on essaie encore d'améliorer le *makespan* en utilisant un recuit simulé.

Plusieurs bornes inférieures de la solution optimale ont été établies et permettent d'évaluer la qualité des solutions obtenues.

3.1.3 Minimisation du "makespan" dans un "job-shop"

Participants : Chengbin Chu, Jean-Marie Proth, Chengen Wang

Ce problème a été étudié depuis longtemps par de nombreux chercheurs, non seulement pour son intérêt théorique puisque la solution de ce problème fournit des idées pour solutionner d'autres problèmes d'ordonnancement, mais aussi pour des raisons pratiques puisque la minimisation du *makespan* conduit à la maximisation de la productivité.

On sait depuis longtemps qu'un problème d'ordonnancement peut être représenté par un graphe disjonctif, qu'une solution peut être représentée par un graphe conjonctif, et que le *makespan* correspondant est la longueur d'un chemin critique. A partir de cette représentation, nous avons développé une approche qui consiste à inverser des arcs (qui revient à permuter l'ordre d'exécution de deux opérations sur une machine) de manière à réduire la longueur d'un chemin critique dans le graphe résultat.

Nous avons démontré que la réduction ne peut se faire qu'en inversant un arc qui fait partie d'un chemin critique. Nous avons également démontré que l'inversion d'un tel arc conduit toujours à une solution réalisable, c'est à dire à l'absence de circuit dans le graphe résultat. A partir de ces résultats, nous avons mis en évidence une condition suffisante pour qu'un arc améliore le *makespan* si on l'inverse.

Ces résultats théoriques nous ont permis de construire un algorithme approché qui consiste à inverser un arc dans un chemin critique jusqu'à ce qu'aucune inversion ne conduise à une solution améliorante, auquel cas on est sûr d'avoir obtenu au moins un optimum local.

3.1.4 Contrôle d'un système à partir de paramètres externes

Participants : Jean-Marie Proth, Nathalie Sauer

Nous nous sommes intéressés à l'ordonnancement de *job-shops*. Comme il est souvent très difficile de modifier le système existant (car cela consomme du temps, perturbe les habitudes des gens, ..), nous avons adopté une nouvelle approche. L'idée est de forcer le système existant à prendre de *bonnes décisions* en contrôlant l'arrivée des ordres de fabrication dans le système de production. En d'autres termes, le contrôle du système de fabrication est considéré comme une boîte noire, et les seuls degrés de liberté sont les dates auxquelles les ordres de fabrication sont envoyés dans le système.

Nous avons supposé que les arrivées des ordres dans le carnet de commandes sont aléatoires. Le critère que l'on souhaite minimiser est la somme des coûts de stockage et de rupture des produits finis et des en-cours.

Nous avons utilisé deux types de paramètres de contrôle : les paramètres qui contrôlent les entrées des produits dans le système et les paramètres qui contrôlent les en-cours. Ces paramètres sont ajustés itérativement en utilisant la simulation.

3.2 Les réseaux de Petri

Les réseaux de Petri (RdP) constituent pour nous un support puissant pour la modélisation, l'évaluation et la gestion des systèmes de production. Dans le passé, nous avons montré qu'ils permettent d'évaluer sans difficulté majeure le comportement des systèmes de production à fonctionnement cyclique, que les temps opératoires soient déterministes ou stochastiques. Nous avons également montré l'importance des réseaux de Petri pour la modélisation des systèmes à fonctionnement non cyclique. L'intérêt est ici la continuité entre les modèles de planification et les modèles d'ordonnancement, et le fait que la modélisation des problèmes d'ordonnancement sous forme de RdP permet la mise en œuvre d'une heuristique nouvelle.

L'ensemble de ces travaux a été résumé dans un ouvrage cité plus loin.

Les travaux suivants ont pour objectif l'approfondissement des RdP en vue de leur application aux systèmes de production.

3.2.1 Supervision des systèmes de production

Participant : Xiaolan Xie

Nous considérons dans ce travail de recherche un système de production dans lequel la production est déclenchée par des ordres de fabrication. Les principales caractéristiques des systèmes considérés sont (i) l'existence d'opérations d'assemblage et de désassemblage, (ii) l'existence d'opérations nécessitant la présence simultanée de plusieurs ressources, (iii) l'utilisation par un même produit d'une ressource pour plusieurs opérations consécutives. Le problème de supervision consiste à vérifier si le lancement d'un ordre de fabrication conduit à un blocage. Nous avons proposé une approche réseaux de Petri basée sur les siphons, les trappes et la programmation linéaire. Cette approche garantit qu'aucun produit n'est bloqué, que chaque ordre de fabrication peut être lancé, et qu'il est toujours possible de revenir à l'état initial du système.

3.2.2 Vérification de l'absence de blocage dans les réseaux de Petri

Participant : Xiaolan Xie

Notre approche est basée sur la notion structurale de siphons. Au cours des années précédentes, nous avons montré qu'il est possible de vérifier l'absence de blocage des réseaux de Petri à l'aide des siphons, des trappes et de la programmation linéaire. Malheureusement, cette approche nécessite l'énumération des siphons dont le nombre croît de manière exponentielle lorsque le nombre de places augmente. Elle ne peut donc pas traiter les réseaux de Petri de grande taille.

Afin de vérifier si les réseaux de Petri de grande taille sont sans blocage, nous avons montré qu'un siphon peut être caractérisé à l'aide d'un système linéaire en variables 0-1. Cela nous a permis de transformer le problème de vérification de l'absence de blocage en un problème de programmation mathématique pour un réseau de Petri général, et en un problème de programmation linéaire en variables mixtes pour un réseau de Petri structurellement borné. A l'aide d'un logiciel commercial d'optimisation, nous avons pu analyser des réseaux de Petri de 200 places et 200 transitions en moins d'une minute CPU sur une station de travail.

3.2.3 Sensibilité des réseaux de Petri stochastiques

Participant : Xiaolan Xie

Il s'agit d'évaluer la sensibilité (i.e. dérivées ou différences) des performances d'un réseau de Petri stochastique à l'aide de la simulation. Dans un premier temps, nous avons étudié les dérivées des performances par rapport aux temps de franchissement des transitions, aussi appelés paramètres temporels. En nous basant sur les résultats récents obtenus dans le cadre des processus semi-Markoviens généralisés, nous avons établi des estimateurs sans biais des dérivées. Malheureusement, l'évaluation de ces estimateurs nécessite des simulations supplémentaires. Néanmoins, pour les réseaux de Petri à choix libre et pour une large classe de mesures de performances, nous avons montré qu'une seule simulation suffit pour évaluer les performances et leurs dérivées.

3.2.4 Gestion d'un "job-shop" général à l'aide des réseaux de Petri

Participants : Jean-Marie Proth, Nathalie Sauer

Ce travail en est à ses débuts. Nous considérons un système capable de fabriquer plusieurs types de produits sous les hypothèses suivantes :

- certaines machines peuvent effectuer plusieurs opérations différentes,
- une opération donnée peut être effectuée sur plusieurs machines, éventuellement avec des performances différentes,
- les ratios de production sont connus.

L'objectif est de maximiser la productivité. Une approche hiérarchisée est en cours de développement. Elle consiste à définir d'abord les ratios d'utilisation des différentes gammes (représentées par des t -invariants) et de calculer les en-cours minimaux qui permettent d'atteindre la productivité maximale, c'est à dire de saturer la machine goulot.

3.3 Maintenance prédictive

Participants : Chengbin Chu, Jean-Marie Proth, Philippe Wolff

L'objet de cette recherche est de prévoir l'occurrence d'un dysfonctionnement en analysant les signaux émis par un système. Le système observé peut être, par exemple, un moteur, un train de laminage, une centrale nucléaire, etc.

Cette année, nous avons généralisé le modèle de maintenance pour les systèmes à dégradation graduelle que nous avons proposé précédemment en prenant en compte des niveaux de maintenance multiples et des fonctions coût de maintenance et de réparation quelconques.

Nous avons démontré, sous des hypothèses très peu restrictives, que la politique optimale de maintenance est de type *limites de contrôle multiples*. Il existe donc des seuils de maintenance L^i et L^{i+1} tels qu'il est optimal d'effectuer une maintenance à un niveau M^i uniquement si la valeur de l'état de dégradation du système est comprise entre les valeurs L^i et L^{i+1} (avec $L^0 < L^1 < \dots < L^{i-1} < L^i < L^{i+1} < \dots < L^n$ et $M^0 > M^1 > \dots > M^{i-1} > M^i > M^{i+1} > \dots > M^n$).

Cette approche a été étendue au systèmes constitués de deux unités stochastiquement indépendantes mais économiquement dépendantes. Nous avons réussi à caractériser en partie la forme de la politique optimale de maintenance dans le cas d'une politique de remplacement. Lorsque la politique de maintenance est quelconque, nous avons proposé une méthode de calcul de la forme de la politique optimale basée sur la programmation dynamique. L'intérêt du modèle général de maintenance a été illustré par un exemple d'application : dans le cas du problème du développement de fissures sur des ailes d'avions de chasse, la maintenance prédictive permet une réduction de plus de 35 % du coût de maintenance par rapport à une maintenance préventive classique.

3.4 Problèmes de découpe (Bin-Packing)

Participants : Julien Antonio, Chengbin Chu, Jean-Marie Proth, Nathalie Sauer

Le travail effectué cette année a d'abord consisté à consolider les algorithmes heuristiques de découpe dans R^1 qui tiennent compte des contraintes industrielles réelles. Ces algorithmes, mis au point l'année précédente, s'appuient à la fois sur une approche dichotomique (à partie très inégales) et sur une idée proche de la programmation dynamique. Ils permettent de prendre en compte des problèmes de très grande taille et aboutissent à des résultats particulièrement intéressants. Ils sont désormais implantés sur plusieurs sites, et leur dissémination est en cours dans des entreprises analogues.

Nous avons poursuivi notre activité en étudiant les problèmes de découpe dans R^2 en prenant en compte les contraintes qui se posent aux sous-traitants de la sidérurgie, à savoir que :

- L'activité de refendage doit tenir compte du temps (important) demandé par le réglage des cisailles. Ce réglage doit pouvoir s'appliquer, moyennant une éventuelle translation, au refendage de plusieurs *bras* successifs ;
- L'activité de refendage doit tenir compte et tirer profit de la *flexibilité* des quantités commandées ;
- L'activité de refendage est contrainte par le niveau de qualité des bobinots que l'on souhaite obtenir, d'où des problèmes de choix de bobines, de *bandes de rives* et d'affranchissement, etc.

Les logiciels obtenus sont implantés dans l'industrie et en phase de test.

3.5 Véhicules urbains individuels en libre service

Participants : Fabrice Chauvet, Jean-Marc Février, Olivier Florian, Névine Hafez, Jean-Marie Proth

L'action de développement *Praxitèle* (consortium industriel regroupant la CGEA, Dassault, EDF, l'INRETS, l'INRIA et Renault) étudie et réalise un nouveau mode de transport public. Il s'agit de Clio électriques mises en libre service en complément des transports en commun. La première expérimentation de Praxitèle aura lieu dans la ville de Saint Quentin en Yvelines au début de l'année 1997.

Notre intérêt se situe à la fois au niveau de la conception du système (nombre de voitures, taille des sites, etc.) et de sa gestion. Deux actions sont en cours :

- Mise en place d'un simulateur qui tient compte de toutes les contraintes connues du système et qui permet d'évaluer la probabilité que le système atteigne un horizon donné sans intervention externe. Ce programme permet de définir l'ensemble des états favorables (i.e. des répartitions de voitures dans les sites qui permettent d'atteindre un horizon éloigné avec une forte probabilité et sans intervention extérieure) et des états défavorables (i.e. des répartitions de voitures dans les sites qui conduiront à une situation de rupture dans au moins un des sites, à un horizon proche, avec une forte probabilité).
- Etude de la phase de rééquilibrage, c'est à dire des transferts à effectuer pour passer d'un état défavorable à un état favorable aussi rapidement que possible.

Les hypothèses faites sont suffisamment larges pour englober toutes les situations réelles qui peuvent se présenter : on suppose que des ressources de transport (ex : camions, minibus, etc.) sont chargées de ce transfert, et que plusieurs capacités de camions sont disponibles en fonction des trajets à effectuer ; il est en outre possible de fixer le nombre de bornes de recharge par induction, d'utiliser des temps de déplacement stochastiques, d'introduire n'importe quelles probabilités de demandes au cours du temps, etc. L'algorithme proposé se déroule alors en deux étapes :

- définition des transferts à effectuer pour que la distance totale à charge soit minimale,
- calcul des tournées des ressources de transport, qui inclut les transports à vide.

La première partie de l'algorithme est terminée et a donné lieu à des résultats théoriques intéressants. Pour l'instant, une heuristique est envisagée pour la seconde partie.

3.6 Evaluation des en-cours en fonction des tailles des lots

Participants : Ioannis Minis, Jean-Marie Proth

Un problème important lorsque l'on conçoit un système de production est d'évaluer les en-cours en fonction des tailles des lots traités. Peu de résultats théoriques existent qui satisfassent aux exigences industrielles, et seule la simulation est en mesure de répondre à la question dans le cas général.

Nous souhaitons examiner systématiquement les cas qui se produisent dans l'industrie. Pour l'instant, nous nous intéressons aux cas suivants :

- arrivée poissonnienne et lot de taille fixe,
- période séparant deux arrivées successives aléatoire et lot de taille fixe.

4 Actions industrielles

4.1 Projet ESPRIT HIMAC n° 8141

Participants : Chengbin Chu, Jean-Marie Proth, Nathalie Sauer

Dans ce projet européen, il s'agit de développer des méthodes de gestion hiérarchique. Nous avons proposé de nouveaux concepts en distinguant deux types de hiérarchies : hiérarchie structurelle et hiérarchie conceptuelle. La hiérarchie structurelle est étroitement liée aux gammes de fabrication de produits, donc correspond à des implantations physiques du système de production. Les flux entre les différents niveaux de la hiérarchie sont des flux de matière. La hiérarchie conceptuelle, quant à elle, est liée à la prise de décisions. Les flux entre les différents niveaux de la hiérarchie sont donc des flux d'information. Nous avons proposé des méthodes d'agrégation pour construire ces deux types de hiérarchies.

4.2 Contrat POEM (Groupe d'Huart)

Participants : Julien Antonio, Chengbin Chu, Jean-Marie Proth, Nathalie Sauer

Le problème a été introduit dans la section 3.4. Deux algorithmes de découpe dans R^1 sont actuellement implantés dans deux usines du groupe d'Huart et disséminés dans d'autres usines. Un algorithme de découpe dans R^2 est actuellement implanté dans une troisième usine du même groupe où il est en cours de test.

Ce contrat se termine.

4.3 Contrat ModExpPer 2 (Renault)

Participant : Xiaolan Xie

Contrat entre le projet SAGEP et la Direction de Pièces de Rechange, Renault. L'objectif est d'améliorer le système de prévision des ventes et d'expression des besoins. Ce contrat d'un an fut terminé au début de l'année 1995 avec succès. Le travail de cette année (nouveau contrat) a consisté à aider notre partenaire à valider l'implantation sur site. Renault utilise désormais le logiciel que nous avons conçu pour la prévision des ventes.

4.4 Contrats NSF (National Science Foundation) / INRIA

Participants : Chengbin Chu, Jean-Marie Proth, Xiaolan Xie

Deux contrats ont été établis dans ce cadre.

Le premier concerne une collaboration entre SAGEP et le laboratoire CIM de l'Université du Maryland à College Park. Le sujet est la gestion de production hiérarchisée et l'ordonnancement. Notre contact est le Professeur Minis. Ce contrat a abouti à plusieurs publications et à la conception d'un logiciel testé dans une entreprise américaine (Pangborn Corporation).

Le second concerne une collaboration entre SAGEP et Georgia Tech (Atlanta). L'objectif est l'étude de la théorie des perturbations. Notre contact est le Professeur Wardi. Un tutorial commun sera présenté lors de la conférence ETFA'96.

4.5 Contrat LY (Péchiney)

Participant : Nathalie Sauer

Un logiciel d'agencement des cellules de fabrication a été développé, il y a quelques années, au sein du projet SAGEP. Péchiney ayant besoin de restructurer un atelier, nous avons modifié le programme existant pour prendre en compte les nouvelles contraintes de Péchiney. Nous avons ensuite fait tourner le programme avec les machines existantes, puis avec de nouvelles machines, en faisant varier les contraintes de rapprochement et d'éloignement ainsi que la position des entrées et sorties de l'atelier. Pour vérifier la stabilité des solutions, nous avons également fait varier les flux entre les machines. Les différents résultats obtenus ont été proposés à Péchiney qui a retenu une de ces solutions.

4.6 Contrat "Order release policy for job-shop loading and scheduling" (Westinghouse ESG)

Participants : Jeffrey W. Herrmann, Ioannis Minis, M. Narayanaswamy, Philippe Wolff

Ce projet, qui a débuté l'année dernière, a pour but d'améliorer le fonctionnement de l'atelier de fabrication de radars de la société Westinghouse ESG (Baltimore, USA) en modifiant les méthodes de planification à court terme. La date de lancement en fabrication d'une commande est donnée par un système MRP. Celui-ci ne prend pas en compte l'état actuel de l'atelier ce qui entraîne un haut niveau

d'en-cours et des dépassements des délais de fabrication. Nous avons donc proposé une politique générale de lancement en fabrication basée sur l'analyse de l'état des en-cours devant les machine-goulots. Cette année, notre étude s'est concentrée sur la détermination d'une politique de lancement robuste vis-à-vis des changements de la demande et donc de l'évolution de l'utilisation des machines.

Ce projet est soutenu par l'Etat du Maryland (Maryland Industrial Partnerships [MIPS]).

5 Actions nationales et internationales

5.1 Actions nationales

Expertises en productique auprès de la région Rhône-Alpes (J.-M. Proth)

Participation à des jurys de thèse (C. Chu (2), J.-M. Proth (3), X. Xie (1)) et d'habilitation à diriger des recherches (J.-M. Proth (1)).

Contacts avec les écoles et universités suivantes : Ecole des Mines de Nancy, Université de Tours, Ecole Centrale de Paris, Projet AMII du CRIN, Université de Technologie de Compiègne, Université de Franche-Comté, Université de Technologie de Troyes, Institut Polytechnique de Sévenans, ENSAM, INPG (C. Chu, J.-M. Proth, N. Sauer, X. Xie).

Contacts avec les sociétés suivantes : Groupe d'Huart, Péchiney, Michelin, CNES (C. Chu, J.-M. Proth, N. Sauer, X. Xie).

5.2 Actions internationales

5.2.1 Europe de l'Ouest

Université de Karlsruhe (Allemagne), Université Technique de Crète (Grèce), EICAS (Italie) : Collaboration dans le cadre d'un projet ESPRIT (C. Chu, J.-M. Proth, N. Sauer).

Université de Valence (Espagne) : Préparation d'une proposition Brite-Euram (J.-M. Proth).

Université d'Athènes (Grèce) : Préparation d'une proposition Brite-Euram (J.-M. Proth).

5.2.2 Europe de l'Est

Participation à un programme TEMPUS avec l'*University of Mining and Metallurgy* de Cracovie (Pologne) (C. Chu, J.-M. Proth).

5.2.3 Amérique

Collaboration INRIA/NSF avec l'*Institute for Systems Research* de l'Université du Maryland à College Park (USA) sur la gestion hiérarchisée et l'ordonnancement (J.-M. Proth).

Collaboration INRIA/NSF avec Georgia Tech (Atlanta, USA) sur l'analyse des perturbations en gestion de la production (J.-M. Proth, X. Xie).

Rédacteur adjoint de la revue *IEEE Transactions on Robotics and Automation* (J.-M. Proth).

Rédacteur adjoint de la revue *Applied Stochastic Models and Data Analysis* (J.-M. Proth).

Membre de l'*International Advisory Board* de la revue *Journal of Intelligent Manufacturing* (J.-M. Proth).

Membre de l'*Editorial Board* de la revue *International Journal of Production Economics* (J.-M. Proth).

5.2.4 Asie et Océan Pacifique

Actions d'expertise pour le compte de l'Université de Hongkong (J.-M. Proth).

Actions de recherche avec l'Université de Xi'an Jiaotong et avec le *Shenyang Institute of Automation*, Chine (C. Chu, J.-M. Proth).

6 Diffusion des résultats

6.1 Actions d'enseignement

Programmation en langage C, Ecole des Mines de Nancy (C. Chu).

Recherche opérationnelle, DESS Université de Metz (J.-M. Proth).

Analyse des données, DESS Université de Metz (J.-M. Proth).

TD de probabilités, ESIAL Université de Nancy I (N. Sauer).

Automatique, Département de Maintenance Industrielle de l'IUT de Metz (X. Xie).

6.2 Participation à des colloques

IEEE Mediterranean Symposium on New Directions in Control and Automation, Chania, Crète, Grèce, 10-13 juin 1996 (C. Chu, J.-M. Proth).

IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, Beijing, Chine, 14-17 octobre 1996 (C. Chu).

WODES'96, International Workshop on Discrete Event Systems, University of Edinburgh, Grande Bretagne, 19-21 août 1996 (N. Sauer, X. Xie).

CESA'96 IMACS Multiconférence, Lille, 9-12 juillet 1996 (N. Sauer, X. Xie).

5th IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'96), Kauai, Hawaii, 18-21 novembre 1996 (J.-M. Proth).

35th IEEE Conference on Decision and Control, Kobé, Japon, 11-13 décembre 1996 (C. Chu)

4th International Conference on Automation Technology, Hsinchu, Taïwan, Chine, 8-11 juillet 1996 (J.-M. Proth).

13th IFAC World Congress, San Francisco, USA, 30 juin - 5 juillet 1996 (X. Xie).

6.3 Conférences invitées, tutoriaux, cours, etc.

Tutorial intitulé *Design, Control and Optimization of Manufacturing Systems: Modelling Methodologies and Algorithmic Techniques*, ETFA'96, Kauai, Hawaii, 18-21 novembre 1996 (J.-M. Proth, Y. Wardi).

Tutorial intitulé *Scheduling of Manufacturing Systems*, TEMPUS Workshop, Zakopane, Pologne, 6-11 octobre 1996 (C. Chu).

Tutorial intitulé *Petri Nets and Manufacturing Systems*, TEMPUS Workshop, Zakopane, Pologne, 6-11 octobre 1996 (J.-M. Proth).

6.4 Diffusion de logiciels

Les logiciels correspondant aux contrats cités plus haut sont implantés chez les contractants.

7 Publications

Livres et monographies

- [215] J.-M. PROTH, X. XIE, *Petri nets: A tool for design and management of manufacturing systems*, Wiley and Sons, 1996.

Thèses

- [216] P. WOLFF, *Maintenance prédictive : une approche stochastique*, thèse de doctorat, Université de Metz, septembre 1996.

Articles et chapitres de livre

- [217] H. CHEN, C. CHU, J.-M. PROTH, «Cyclic scheduling of a hoist with time window constraints», *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 12(6), décembre 1996.
- [218] C. CHU, J.-M. PROTH, C. WANG, «Efficient heuristic and optimal approaches for $n/2/F/\Sigma C_i$ scheduling problems», *International Journal of Production Economics* 44(3), 1996.
- [219] C. CHU, J.-M. PROTH, «Single machine scheduling with chain structured constraints and windows on separation times», *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 12(6), décembre 1996.
- [220] C. CHU, «A new class of scheduling criteria and their applications», *RAIRO Recherche Opérationnelle / Operations Research* 30(2), 1996.
- [221] A. DOLGUI, M.-C. PORTMANN, J.-M. PROTH, «Planification de systèmes d'assemblage avec approvisionnements aléatoires en composants», *Revue des Systèmes de Décision* 4(4), 1995.
- [222] A. HAUBA, X. XIE, «Flow control of two-level assembly lines», *International Journal of Production Research* 34(9), septembre 1996.
- [223] A. MEHRA, I. MINIS, J.-M. PROTH, «Hierarchical production planning for complex manufacturing systems», *Advances in Engineering Software* 26, 1996.
- [224] J.-M. PROTH, N. SAUER, Y. WARDI, X. XIE, «Marking optimization of stochastic timed event graphs using IPA», *Journal of Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications* 6, 1996.
- [225] N. SAUER, X. XIE, «Asymptotic properties of stochastic timed event graphs», *Journal of Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications* 6(2), mars 1996.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [226] H. CHEN, C. CHU, J.-M. PROTH, «A branch and bound approach for earliness-tardiness scheduling problems with different due dates», in : *Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control*, Kobe, Japon, 1996.
- [227] H. CHEN, C. CHU, J.-M. PROTH, «Cyclic part scheduling in a robotic cell», in : *Proceedings of the IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics*, p. 2922–2927, Pékin, Chine, 1996.
- [228] H. CHEN, C. CHU, J.-M. PROTH, «Sequencing of parts in robotic cells», in : *Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control*, Kobe, Japon, 1996.
- [229] C. CHU, «Production scheduling and control: a unified framework», in : *Proceedings of the 4th IEEE Mediterranean Symposium on New Directions in Control and Automation*, p. 381–385, Chania, Crète, Grèce, 1996.
- [230] P. FOURNET-FAYARD, J.-M. PROTH, N. SAUER, «Distributed and hierarchical system dedicated to scene recognition», in : *Proceedings of the 4th International Conference on Automation Technology*, p. 539–545, Taïwan, Chine, 1996.

- [231] J.-W. HERMMANN, J.-M. PROTH, N. SAUER, «On unrelated machine scheduling with precedence constraints», in: *Proceedings WODES'96, International Workshop on Discrete Event Systems*, p. 63–68, Université d'Edinbourg, Royaume Uni, 1996.
- [232] J.-W. HERRMANN, I. MINIS, M. NARAYANASWAMY, P. WOLFF, «Work order release in job shops», in: *Proceedings of the 4th IEEE Mediterranean Symposium on New Directions in Control and Automation*, p. 733–736, Chania, Crète, Grèce, 1996.
- [233] J.-M. PROTH, N. SAUER, «Continuous approach of scheduling problems based on Petri nets», in: *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, Kauai, Hawaii, 1996.
- [234] J.-M. PROTH, N. SAUER, «Sensitivity analysis for job-shop scheduling», in: *Actes de CESA'96 IMACS Multiconférence*, p. 208–211, Lille, 1996.
- [235] J.-M. PROTH, N. SAUER, «Sensitivity analysis for scheduling manufacturing systems», in: *Proceedings of the 4th IEEE Mediterranean Symposium on New Directions in Control and Automation*, p. 743–747, Chania, Crète, Grèce, 1996.
- [236] L. WANG, X. XIE, «Boundedness control of Petri nets», in: *Proceedings WODES'96, International Workshop on Discrete Event Systems*, p. 184–188, Université d'Edinbourg, Royaume Uni, 1996.
- [237] X. XIE, «Deadlock-free dispatching control of manufacturing systems using Petri nets», in: *Proceedings of the 13th IFAC World Congress*, p. 507–512, San Francisco, USA, 1996.
- [238] X. XIE, «Sensitivity analysis of stochastic free-choice nets», in: *Actes de CESA'96 IMACS Multiconférence*, p. 340–345, Lille, 1996.
- [239] X. XIE, «Supervision of manufacturing order release using Petri nets», in: *Actes de CESA'96 IMACS Multiconférence*, p. 444–449, Lille, 1996.

Rapports de recherche et publications internes

- [240] J.-W. HERMMANN, J.-M. PROTH, N. SAUER, «On unrelated scheduling with precedence constraints», *rapport de recherche n°2773*, Inria, janvier 1996.
- [241] J.-M. PROTH, N. SAUER, «Continuous approach of scheduling problems based on Petri nets», *rapport de recherche n°2822*, Inria, mars 1996.

8 Divers

Chengbin CHU est désigné pour le prix R. Faure qui récompense un jeune chercheur pour ses activités de recherche et de transfert.

Rakesh NAGI a reçu le prix de la NSF (National Science Foundation) intitulé "Best Career Award" qui récompense le meilleur jeune chercheur de l'année aux USA.

9 Abstract

The SAGEP project focuses on the preliminary design and the management of manufacturing systems. The main research directions are the following ones:

- Modelling and evaluation of discrete event systems. Most of the research done in this area is based on Petri nets;
- Management of manufacturing systems. This area includes, but is not limited to, scheduling and hierarchical management.

Two recent research areas are predictive maintenance and design/management of self-serviced urban electric vehicles.

An important effort has been made to develop and implement bin-packing software tools for subcontractors of steel companies. This industrial activity provided the opportunity to introduce a new approach for large-size multicriteria bin-packing problems in \mathbb{R}^1 .

