

Rapport INRIA 1994 — Programme 1
Modélisation en Informatique et Systèmes de
Télécommunications

PROJET MISTRAL

3 mai 1995

PROJET MISTRAL

Modélisation en Informatique et Systèmes de Télécommunications

Localisation : *Sophia-Antipolis*

Mots-clés : analyse des perturbations (6), contrôle de transmission (4), géométrie aléatoire (6), modélisation (1), ordonnancement (1), parallélisme (1), processus stochastique (1, 4, 8), protocole de communication (1), réseau à haut débit (4), réseau de file d'attente (1), réseau de Petri (1), réseau de télécommunications (6), simulation (1), système à événement discret (1), système informatique (1), système téléinformatique (1, 4).

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

François Baccelli, directeur de recherche

Responsable permanent

Philippe Nain, directeur de recherche, (à partir du 01/08/94)

Secrétaire

Ephie Deriche

Conseiller Scientifique

Jean-Claude Bermond, CNRS-I3S

Personnel UR INRIA

Eitan Altman, chargé de recherche
Bruno Gaujal, chargé de recherche, à partir du 01/10/94
Alain Jean-Marie, chargé de recherche
Zhen Liu, chargé de recherche
Philippe Mussi, chargé de recherche

Chercheurs invités

Alexander Borovkov, Université de Novosibirsk, Russie, du
21/09/93 au 31/03/94
Rhonda Righter, Université de Santa Clara, USA, du 01/09/94
au 31/12/94

Ingénieurs experts

Sophie Lefevre-Barbaroux, depuis le 01/09/94
Sergueï Zouev

Chercheurs post-doctorant

Richard Boucherie, Boursier HCM du 10/03/94 au 31/08/94
Ger Koole, Boursier HCM depuis 09/94

Chercheurs doctorant

Damien Artiges, Moniteur Normalien, au Service National
jusqu'au 1er juin 1994
Miguel Canales, Boursier CIES, jusqu'au 31/03/94
Lucian Finta, Boursier MESR
Jean Mairesse, Boursier DRET
Hery Rakotoarivoa, Boursier CIES, jusqu'au 28/02/94
Günther Siegel, Boursier MESR

Collaborateurs extérieurs

Marc Badel, DTAT
Pierre Brémaud, CNRS

Stagiaires

Adnan Aboulalaâ, stagiaire de DEA, École Polytechnique, du
06/07/94 au 04/11/94
Frédéric Boccara, stagiaire de DEA, Université PARIS XI, du
06/06/94 au 06/09/94
Stéphane Crépey, stagiaire du DEA IMA, depuis le 15/08/94
Nathalie Furmento, stagiaire de DEA, ESSI, Université de
Nice-Sophia-Antipolis, du 01/07/94 au 30/09/94

Lassâad Gannoun, stagiaire de DEA, Université de Nice-Sophia-Antipolis, du 16/02/94 au 31/07/94
Patrick Giraud, stagiaire en maîtrise à la Faculté des Sciences Marseille, du 05/04/94 au 05/09/94
Pierre Hirth, stagiaire de 3ème année ESSI, Université de Nice-Sophia-Antipolis, du 15/12/93 au 31/03/94
Philippe Jaouen, stagiaire de DESS, ESSI, Université de Nice-Sophia-Antipolis, du 15/04/94 au 02/09/94
Michel Mangel, stagiaire de DESS, ESSI, Université de Nice-Sophia-Antipolis, du 15/04/94 au 30/09/94
Sylvain Mazeau, stagiaire de 3ème année ESSI, Université de Nice-Sophia-Antipolis, du 15/4/94 au 15/09/94
Raïssa Révérend, stagiaire de 3ème année ESSI, Université de Nice-Sophia-Antipolis, du 15/12/93 au 31/03/94
Christophe Samtmann, stagiaire de 3ème année ESSI, Université de Nice-Sophia-Antipolis, du 15/4/94 au 30/09/94

2 Présentation du projet

La modélisation des systèmes informatiques et télématiques, des systèmes de production et des problèmes de trafic donne actuellement naissance à une nouvelle *théorie des systèmes à événements discrets*. Divers formalismes concurrents sont utilisables dans le cadre de cette théorie. Les travaux du projet se concentrent sur deux d'entre eux: les réseaux de files d'attente et les réseaux de Petri. Dans le premier formalisme, on décrit le système comme un ensemble de stations de service où les serveurs représentent les ressources logiques ou physiques du système considéré, et où les entités circulant entre les stations représentent les requêtes, messages, programmes partageant ces ressources. Le formalisme des réseaux de Petri permet de représenter de manière fine les phénomènes de synchronisation et de concurrence propres à l'informatique répartie ou aux problèmes de productique. Les actions de recherche de 1994 ont porté sur

- la modélisation de systèmes de télécommunications, notamment dans le cadre de conventions de recherche ;
- l'étude mathématique de classes de systèmes à événements discrets, notamment dans le cadre du projet BRA QMIPS ;

- l'élaboration de politiques de contrôle optimal (contrôle classique, ordonnancement et placement, jeux) pour ces systèmes ;
- la réalisation d'outils logiciels pour l'évaluation de performances, et tout particulièrement de simulateurs parallèles.

3 Actions de recherche

3.1 Analyse de réseaux de communication

3.1.1 Réseaux à hauts débits

Participants : Eitan Altman, Damien Artiges, Alain Jean-Marie, Zhen Liu, Philippe Nain

Contrôle d'admission Les contraintes temps-réel dans les réseaux multimédia sont en général de la forme $\beta(b) = P(X > b) < q$ où typiquement X représente un temps de réponse ou un temps d'attente. Dans certain cas, $\beta(b)$ donne aussi une borne supérieure de la probabilité de perte d'un paquet/appel. La quantité $\beta(b)$ fournit donc un indicateur de la *qualité de service* offerte aux utilisateurs. Développer des mécanismes d'admission de nouvelles sessions dans le réseau de façon à garantir une qualité minimale de service aux utilisateurs tout en utilisant au mieux les capacités de transmission du réseau est un problème non trivial et largement ouvert. Dans [46] Z. Liu et P. Nain – en collaboration avec D. Towsley de l'Université du Massachusetts – ont abordé le problème du contrôle des admissions dans le cas d'une ressource unique (un canal de communication) partagée entre des utilisateurs/applications hétérogènes (voix, vidéo, etc.). S'appuyant sur les calculs de bornes exponentielles entamés l'année dernière pour des quantités du type $P(X_n > b)$ où X_n représente le nombre de paquets en attente de transmission à l'instant n (cas du modèle à temps discret) ou le temps d'attente du n -ième paquet entré dans le système (cas du modèle à temps continu) ils ont obtenu (en particulier) des critères de décision pour l'admission ou le rejet de nouvelles sessions basés sur la notion de débits équivalents (*effective bandwidth*). Ces travaux fournissent un cadre général pour tous les résultats de ce type déjà obtenus par des collègues des Bell Laboratories, d'IBM et de l'Université de Berkeley, en particulier.

Ces travaux ont aussi mis en évidence de façon quantitative le côté conservatif (tendance à rejeter trop de sessions) des critères de coût

asymptotiques de la forme $\lim_{b \rightarrow \infty} (1/b) \log P(X > b)$ par opposition aux critères de coût “naturels” du type mentionné ci-dessus.

Les résultats obtenus dans [46, 27] sont en cours d’extension dans le cas de réseaux acycliques pour lesquels très peu de résultats sur le contrôle des admissions existent. En parallèle, Z. Liu, P. Nain et D. Towsley ont généralisé leurs résultats [47] dans le cas où le processus de Markov régissant l’environnement aléatoire du modèle a un espace d’état arbitraire (dans [46] l’espace d’état était dénombrable). Ces résultats fournissent ainsi une généralisation des travaux de Kingman.

Contrôle de congestion L’algorithme ARB (Adaptive Rate-Based algorithm) est un mécanisme de contrôle de congestion développé par IBM, Research Triangle Park, en Caroline du Nord. Cet algorithme, destiné à contrôler chaque connexion d’un réseau, repose sur l’échange périodique d’information entre la source et la destination de la connexion: au début de chaque période, la source émet un paquet de requête, et lorsque cette requête parvient à la destination, un paquet de réponse est retourné à la source. L’information contenue dans la réponse est le taux reçu par la destination et le délai relatif du paquet de requête par rapport au précédent paquet de requête. Le taux d’émission de la source est alors adapté en fonction de cette information. L’algorithme ARB a été étudié par Damien Artiges lors de son séjour à North Carolina State University. Un exemple simple de réseau a été considéré et modélisé par une chaîne de Markov. Des bornes sur le temps de réponse et le taux d’émission à la source sont obtenues, et la convergence géométrique du système vers un régime stationnaire est établie [6].

Contrôle de flux avec information bruitée et retardée. Dans [4] E. Altman a considéré un modèle général de contrôle d’une marche aléatoire avec information bruitée et retardée d’une unité de temps, pour lequel il a obtenu la structure des politiques optimales. Ces résultats sont appliqués au contrôle d’un flux en présence de plusieurs flux non contrôlés, et au contrôle de taux de service. Dans [34] un modèle plus général ayant deux actions est considéré. La structure des politiques optimales quand l’information arrive après un retard arbitraire est obtenue. De plus, on considère dans [34] le cas d’un retard d’action.

Analyse de pertes de messages dans les réseaux. E. Altman et A. Jean-Marie ont analysé dans [18] l’effet de l’ajout de redondance sur

les probabilités de pertes de messages dans les réseaux. Nous obtenons des formules explicites pour les probabilités de pertes, et analysons leurs comportements asymptotique. Nous montrons que dans les cas extrêmes, où la charge est grande ou bien faible, la redondance a comme effet de diminuer les probabilités de pertes.

Etude des délais de transmission de messages Dans une seconde étude, E. Altman et A. Jean-Marie ont considéré le délai nécessaire pour transmettre un message constitué d'un ensemble de paquets individuels. En partant d'une récurrence obtenue par Cidon *et al.*, et en utilisant des techniques analytiques à base de transformées, nous obtenons cette distribution sous forme close.

3.1.2 Modèles macroscopiques de réseaux de communication

Participants: Adnan Aboulalaâ, François Baccelli, Stéphane Crépey, Sergueï Zouev

Les modèles macroscopiques de réseaux de communication proposés par MISTRAL font l'objet d'un article de synthèse à paraître dans les Annales des Télécommunications [8]. L'analyse de ces modèles est fondée sur des méthodes de géométrie aléatoire et de processus ponctuels, qui permettent de prendre en compte et de mesurer les fluctuations dans la répartition spatiale des abonnés et des concentrateurs.

Un outil logiciel de simulation fondé sur cette approche est en cours de développement; les buts principaux de cet outil sont la prédiction des caractéristiques de réseaux en évolution rapide et l'optimisation de leur architecture.

Des résultats nouveaux ont été obtenus sur le problème des liaisons redondantes, sur l'analyse des pertes [30], et sur les problèmes de mobiles.

Une modélisation d'un système de communications mobiles s'intègre naturellement dans ce cadre via l'ajout de modèles géométriques de systèmes routiers, de trafic des mobiles sur les routes, et de raccordement des mobiles aux concentrateurs.

Pour les deux premiers points, nous considérons dans [39] des processus de Poisson de droites, où chaque droite représente une route et est caractérisée par des paramètres de position, de type et de trafic.

La distribution des vitesses des mobiles dépend généralement de tous ces paramètres. Nous avons pu calculer ou estimer la distribution des grandeurs suivantes:

- le nombre des véhicules dans une zone de raccordement d'un commutateur typique;
- le nombre de franchissements de frontières de zones de raccordement par unité de temps (chaque franchissement de frontière génère un important trafic de contrôle dit trafic de *handover*);
- le nombre des véhicules dans le voisinage de la frontière d'une zone;
- la distribution du temps passé par un véhicule dans une zone.

Réseaux avec des capacités finies et physique statistique Dans le cadre de l'étude macroscopique des réseaux de communication, un modèle présentant des liens avec la physique statistique a été proposé par A. Aboulalaâ dans [30] : le système est vu comme un ensemble de ressources de types différents et en quantités limitées, partagées par un grand nombre de clients (N). Ces clients sont représentés par des processus de sauts à espace d'états fini; à chaque état correspond une énergie qui représente les quantités de ressources utilisées pour chaque type. Si les ressources étaient infinies, ces processus seraient indépendants et identiquement distribués. Le but est alors de trouver la loi de ces processus sous la contrainte de limitation des ressources. Il se trouve que cette contrainte peut s'exprimer, dans certains cas, par une condition sur la moyenne (en N) des énergies. Ce problème a ainsi conduit à l'étude de la version "processus" d'un théorème de limite conditionnelle (principe de conditionnement de Gibbs); on obtient alors des caractéristiques des processus contraints lorsque N tend vers l'infini. Lorsque les utilisateurs sont représentés par des variables aléatoires (ce qui modélise les accès simultanés à des ressources partagées à un instant donné), on obtient des résultats explicites sur les ressources effectivement utilisées.

Optimisation d'architectures de réseaux Dans [9] une méthode d'estimation de gradient de l'espérance d'une fonctionnelle d'une mesure aléatoire (en particulier d'un processus ponctuel) a été proposée. Plusieurs algorithmes basés sur cette méthode ont été mis en oeuvre dans le cadre de la simulation des modèles macroscopiques de réseaux. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils permettent l'estimation du gradient en

utilisant une seule réalisation de la mesure aléatoire. Les estimateurs obtenus sont non-biaisés et cohérents. Dans le cas de processus Poissoniens, on donne aussi la borne inférieure de la taille minimale de la fenêtre d'observation étant donnée la précision souhaitée pour l'estimation.

Les techniques mathématiques développées dans ce cadre ont des implications intéressantes en géométrie aléatoire. Pour un processus ponctuel Poissonien dans un espace général, S. Zouev et J. Möller ont obtenu une expression close pour les dérivées de tous ordres de l'espérance d'une fonctionnelle bornée, par rapport au paramètre d'intensité du processus. Dans le cas de processus homogènes, cette expression permet de prouver que le volume d'un ensemble d'arrêt défini à partir de configurations du processus ponctuel Poissonien suit une distribution Gamma, étant donné le nombre des points du processus qu'il contient. La boule minimale fermée centrée en l'origine qui contient un nombre fixé de points et la "fleur de Voronoï" associée à l'origine sont des exemples de tels ensembles d'arrêt, qui peuvent être considérés comme une généralisation de la notion de temps d'arrêt uni-dimensionnel [52].

3.2 Systèmes à événements discrets et Parallélisme

3.2.1 Stabilité des systèmes à événement discrets

Participants : Eitan Altman, François Baccelli, Jean Mairesse

Méthodes de saturation Deux généralisations de la méthode de saturation proposée par F. Baccelli et S. Foss pour la stabilité de systèmes stochastiques, ont été étudiées :

- une généralisation au cas de variables d'état détaillées du système (compteurs et dateurs) [7];
- une généralisation au cas de processus d'arrivée continus et non plus ponctuels [19].

Des travaux sont en cours sur le cas fermé.

3.2.2 Réseaux de Petri stochastiques

Participants : François Baccelli, Miguel Canales, Bruno Gaujal, Alain Jean-Marie, Zhen Liu, Jean Mairesse

Représentation minimale de graphes d'événements. Un graphe d'événements stochastiques peut être représenté comme une récurrence d'ordre M , où M est le marquage initial maximal d'une place du réseau. Cette récurrence peut être transformée en une récurrence d'ordre 1 en étendant l'espace d'état ou bien en rajoutant des transitions au réseau. Dans [2] B. Gaujal a construit le réseau de Petri de taille minimale qui est équivalent au réseau initial et pour lequel la récurrence est d'ordre 1. Cette construction utilise la coupe minimale compatible dans le graphe de tâches associé au graphe d'événements. L'accroissement du graphe ainsi obtenu peut également être vu comme une généralisation du nombre de Strahler dans un graphe de calcul avec des retards sur les nœuds. Cette construction est polynômiale car elle est le résultat d'un programme linéaire en nombres entiers dont la matrice de contraintes est totalement unimodulaire.

Développement de Taylor des moyennes des délais dans les graphes d'événements Un travail récent de F. Baccelli et de V. Schmidt, de l'Université d'Ulm [38], a permis d'obtenir une formule de type Pollaczek-Khintchine en moyenne, pour les graphes d'événements stochastiques non autonomes soumis à des entrées Poisson. La formule donne les moyennes stationnaires des variables de délai (variables d'ordre deux dans le cadre $(\max, +)$ -linéaire) sous forme d'un développement de Taylor en λ , l'intensité du processus de Poisson. Le coefficient d'ordre n de ce développement est l'espérance mathématique d'un polynôme p_n , donné de manière explicite, des coefficients des matrices A et B du système linéaire associé [38].

Réseaux à choix libres La classe des réseaux à choix libres a fait l'objet d'une étude détaillée de F. Baccelli, S. Foss et B. Gaujal [22], [37], qui couvre à la fois les aspects logiques (vivacité, absence d'interblocages), les aspects temporels et les aspects stochastiques. Le travail est fondé sur un système d'équations d'évolution faisant intervenir deux algèbres: $(\min, +)$ et $(+, \times)$. Ces équations sont obtenues au moyen d'une décomposition du système en composantes graphes d'événements maximales et un réseau de routage, proche d'une machine d'état. Nous donnons des caractérisations algébriques simples de la propriété de séparabilité de ces réseaux, propriété qui permet de calculer un régime stationnaire minimal au moyen de techniques issues de théorie ergo-

dique. Dans le cas où les composantes graphes d'événements sont toutes SI (une seule entrée), nous donnons

- des algorithmes polynômiaux de vérification de la vivacité;
- une caractérisation de la région de stabilité.

Bornes pour réseaux de Petri markoviens En général, les mesures de performances dans les réseaux de Petri sont difficiles à obtenir à cause de la dimension. Z. Liu [49] a proposé une méthode efficace de calcul des bornes inférieures et supérieures pour les débits et les nombres moyens de jetons dans des réseaux de Petri temporisés markoviens. Cette approche est basée sur la technique d'uniformisation et sur la programmation linéaire.

3.2.3 Réseaux de files d'attente

Participants : Eitan Altman, François Baccelli, Jean Mairesse

Réseaux de Jackson J. Mairesse considère le problème de la stabilité des réseaux de Jackson fermés avec temps de service et routage i.i.d. La distribution des temps de service est générale. On obtient des conditions suffisantes d'unicité du régime stationnaire qui améliorent fortement celles connues dans la littérature. Ces conditions s'appuient sur des interactions fines entre propriétés des temps de service et propriétés du routage. On propose d'autre part de nombreux exemples d'existence de multiples régimes stationnaires lorsque ces conditions ne sont pas vérifiées. La démonstration utilise fortement les outils développés pour l'étude des systèmes linéaires (max,+) (conditions nécessaires et suffisantes de stabilité et représentation graphique des éléments propres d'une matrice de dimension 3).

Infinité de files d'attente en tandem Une conjecture classique en théorie des files d'attente dit que le processus de sortie d'un nombre croissant de files d'attente de type $.M/1/\infty/FIFO$ en tandem converge vers un processus de Poisson. Ceci étant vrai pour tout processus ponctuel d'entrée, stationnaire et ergodique. Le but est de montrer, de façon plus générale, que le processus de sortie d'une infinité de files $.GI/1/\infty/FIFO$ en tandem est indépendant du processus stationnaire et ergodique d'entrée. En collaboration avec A. Borovkov, F. Baccelli et J. Mairesse ont démontré une propriété de dualité entre le processus des

temps d'attente des clients et celui des temps d'inactivité des files. On montre également l'existence d'une équation de type récursive pour le temps total passé par un client dans le système entre la file 1 et la file k . Ces résultats constituent une première étape pour la démonstration de la conjecture. Les problèmes ergodiques intervenant dans ce type de structure sont cependant encore loin d'être totalement élucidés [36].

Systèmes de Polling E. Altman a poursuivi ses recherches sur la stabilité dans les systèmes dits de "polling" [5] et de répétition d'appels (en collaboration avec le Prof. A. Borovkov). De nouveaux outils ont été développés pour analyser la stabilité de systèmes non stationnaires, ainsi que des systèmes contrôlés, non Markoviens [33].

3.2.4 Modélisation et évaluation de performances d'applications parallèles

Participants : Bruno Gaujal, Zhen Liu, Jean Mairesse, Sophie Barbaroux

Performances de systèmes parallèles Dans le cadre du projet ESPRIT III PEPS (Performance Evaluation of Parallel Systems), S. Barbaroux et Z. Liu étudient des méthodes d'analyse de performances de systèmes parallèles de moyenne et grande taille. Dans un premier temps, on effectue une étude de l'état de l'art sur les techniques existantes d'analyse de performances qui sont susceptibles de s'appliquer à ces problèmes. Ultérieurement, on mènera des études de modélisation stochastique des applications cibles proposées dans le projet PEPS, et on développera une méthode de résolution pour une application particulière.

Comparaison du temps d'exécution de différents protocoles de communication. Dans le cadre du projet AQSI, une collaboration a vu le jour avec le laboratoire LGI-IMAG de l'Institut National Polytechnique de Grenoble dirigé par B. Plateau. J. Mairesse a passé une semaine à l'INPG à Grenoble (avril 94) et M. Brilman (LGI-IMAG) a passé une semaine à l'INRIA (mars 94).

Dans les architectures parallèles d'ordinateurs, le temps de communication entre processeurs peut être un paramètre extrêmement pénalisant en terme de performance. Notre but est de comparer deux modèles de réseaux d'intercommunication, le graphe complet et le graphe en

anneau. Dans le cas du graphe complet, tous les processeurs peuvent communiquer. Dans le cas de l'architecture en anneau, chaque processeur ne peut communiquer qu'avec ses deux voisins. Un certain nombre de résultats préliminaires ont été démontrés, qui vont dans le sens de la conjecture suivante : le protocole complet est moins efficace que le protocole en anneau. D'autres modèles d'intercommunication, plus complexes, sont également étudiés et comparés aux précédents. Enfin on dispose de bornes sur les performances de ces protocoles obtenues par des techniques de comparaison stochastique.

Les modèles étudiés peuvent également servir à étudier des systèmes dits à mémoire partagée ou encore à étudier la complexité de certains algorithmes de simulation parallèle de type "relaxation synchrone".

3.3 Ordonnancement et contrôle

3.3.1 Ordonnancement optimal dans les systèmes multiprocesseurs

Participants : Lucian Finta, Bruno Gaujal, Zhen Liu

Ordonnancement déterministe sous contraintes de communication Un des nouveaux problèmes d'ordonnancement dans les systèmes multiprocesseurs est l'ordonnancement avec communication entre processeurs. Dans ce cadre, un programme parallèle est représenté par un graphe de tâches, où les sommets représentent les tâches et les arcs les communications entre les tâches. Un temps de communication doit s'écouler quand deux tâches assignées à deux processeurs différents doivent communiquer. Le but de l'ordonnancement est de minimiser la durée d'exécution du programme.

Ce problème a été prouvé NP-difficile en général. Mais, la complexité pour le cas de deux processeurs avec temps d'exécution et temps de communication unitaires est un problème ouvert et qui a attiré l'attention des chercheurs du domaine. L. Finta et Z. Liu ont proposé un algorithme optimal polynômial pour une classe spéciale de graphes de tâches qui comprend les graphes séries-parallèles et les "forescences". Ce résultat a étendu les résultats de la littérature sur les "forescences".

Dans une autre étude, L. Finta et Z. Liu ont étudié un nouveau problème d'ordonnancement où toutes les communications ont lieu sur un bus unique [41]. On prouve que pour des sous-problèmes très spécifiques, la

minimisation de la durée d'exécution du programme dans un tel système multiprocesseur est NP-difficile. Ainsi, le problème général d'ordonnement pour les programmes parallèles avec des contraintes de ressources de communications est NP-difficile. Dans cette étude, plusieurs variantes du problème ont été analysées: les tâches avec ou sans pré-allocation, les communications avec sémantique de données indépendantes ou sémantique de données communes. Les résultats peuvent être étendus au cas des systèmes multiprocesseur à mémoire partagée.

Ordonnement dynamique Les graphes de tâches sont un des modèles les plus utilisés pour représenter les calculs parallèles. Les structures de ces graphes sont parfois obtenues au moment de la compilation. Cependant, dans beaucoup d'autres cas, elles sont déterminées seulement au moment de l'exécution des programmes parallèles. Z. Liu a étudié un problème d'ordonnement quand le graphe de tâches est généré au fur et à mesure de l'ordonnement, et ce d'une manière aléatoire. Un algorithme optimal et simple a été proposé pour le cas où le nombre de successeurs d'un nœud dans le graphe a une distribution géométrique.

Etude de partage de ressource. Le problème de deux processus partageant une ressource en exclusion mutuelle qui a été étudié précédemment a été partiellement généralisé par B. Gaujal au cas de n processeurs partageant une ressource ou n ressources. Dans le premier cas, on montre que l'allocation séquentielle est la pire pour le temps de fin des tâches et on donne des heuristiques pour trouver la meilleure allocation. On montre également en utilisant les techniques de mots les plus réguliers que la borne initiale sur les allocations est atteinte infiniment souvent [26]. Dans le deuxième cas, on montre, sous des conditions restrictives, que l'allocation la plus régulière est optimale [11].

3.3.2 Equilibre de charge dans les systèmes multiprocesseurs

Participants : Zhen Liu, Rhonda Richter

Dans [48], nous considérons le problème d'équilibre de charge d'un système distribué avec des machines homogènes et non fiables. Chaque machine reçoit une suite des tâches des utilisateurs extérieurs dont quelques unes peuvent être redirigées vers d'autres machines. Chaque

machine a un routeur qui n'a d'informations que sur le processus des arrivées des tâches sur la machine locale et les décisions de routage précédentes. Les machines sont homogènes dans le sens où les processus d'arrivée des tâches, des pannes et des réparations sont stochastiquement identiques. Sous des hypothèses générales, nous prouvons que la politique de routage "round robin" qui consiste à diriger les tâches vers les machines qui sont stochastiquement les moins chargées, est optimale dans le sens de minimisation stochastique du nombre de tâches dans le système et du temps de réponse des tâches. Ces résultats étendent le résultat obtenu dans [13] pour le cas d'un routeur central.

3.3.3 Algorithmes de gradient en optimisation combinatoire.

Participants : Stéphane Crépey, Sergueï Zouev

On cherche à minimiser sur le simplexe $\{0, 1\}^n$ une fonction combinatoire réelle φ . L'espérance de cette fonction, vue comme une fonction aléatoire d'un champ de Bernoulli, fournit un polynôme P_φ défini sur l'hypercube $[0, 1]^n$. P_φ a les mêmes propriétés extrémales que $\varphi(\omega)$: ainsi le minimum de P_φ sur l'hypercube est-il atteint sur le simplexe. De plus le gradient de P_φ en tout point est donné par la formule de Russo. On descend alors les gradients de P_φ (projetés sur l'hypercube), afin de minimiser φ . D'où une famille d'algorithmes stochastiques, paramétrée par le pas de la descente, allant d'un algorithme de gradient stochastique, à un algorithme de type tabou. Un algorithme intermédiaire, appliqué au problème du sac à dos et au modèle d'Ising, fournit des implémentations non triviales et efficaces.

3.3.4 Théorie des jeux

Participant : Eitan Altman

Applications des jeux stochastique pour le contrôle des réseaux. Nous étudions des problèmes différents de contrôle des réseaux de télécommunication dans le cadre des jeux à somme nulle [35], [32]. Dans [35] nous étudions le problème de contrôle de routage. Nous considérons des situations d'informations partielles sur des paramètres du problème, qui peuvent varier dans le temps d'une manière non prévisible par le contrôleur. L'objectif est de concevoir des stratégies qui garantissent les meilleures performances sous les pires conditions de paramètres

inconnus. Le problème est posé dans le cadre des jeux stochastiques où le contrôleur joue contre la “nature”. Les structures des politiques optimales sont obtenues. Nous développons dans [35], [32] des nouveaux outils dans les jeux stochastiques pour pouvoir résoudre des problèmes où le coût est non borné. Cela nous permet de résoudre le problème dans [35] ainsi que des problèmes de contrôle de flux, et d’ordonnancement optimal du service, sous des critères de coûts moyens.

Approximations de jeux stochastiques. Dans [16], [54], nous développons des théorèmes généraux pour l’approximation des jeux à somme nulle. Nous étudions la convergence des valeurs des jeux et des politiques (presque) optimales, puis la robustesse des politiques optimales. Nous appliquons des théorèmes généraux pour développer des schémas numériques d’approximations des jeux stochastiques à espace d’état infini par des jeux stochastiques à espace d’état fini. Ces théorèmes généraux permettent aussi la démarche inverse: obtenir des politiques presque optimales pour des jeux stochastiques ayant un espace d’état fini mais grand, à partir des politiques optimales pour le jeu à espace d’état infini, qui est parfois plus simple à résoudre (c.f. des problèmes des jeux dans les files d’attente). Nous considérons dans [16] le coût actualisé, et dans [54], le coût moyen. Nous étudions d’autres problèmes d’approximations de stratégies dans des jeux différentiels dans [54].

Contrôle des systèmes stochastiques hybrides. Nous analysons dans [17] un système stochastique hybride en temps continu dans un intervalle fini de temps. On considère le cas où les coûts sont des fonctions linéaires de l’espérance de la trajectoire. La dynamique de l’état est linéaire, mais les paramètres varient selon un processus contrôlé de saut Markovien, contrôlé par deux joueurs ayant des objectifs opposés. Ce genre de systèmes peut être utilisé pour modéliser un contrôle avec un critère min-max d’admission dans des systèmes de télécommunications.

3.3.5 Contrôle optimal et arguments trajectoriels

Participants: Zhen Liu, Philippe Nain

Les arguments trajectoriels utilisés pour le contrôle des systèmes à événements discrets (SED) comme les réseaux de files d’attente permettent de s’affranchir – lorsqu’ils sont applicables – d’hypothèses markoviennes

souvent contraignantes mais nécessaires à l'utilisation de la théorie des processus de décision markoviens. Si la théorie des processus de décision markoviens est bien établie et ses limites d'application connues, tel n'est pas le cas des arguments trajectoriels. Ceci vient du fait que ces derniers ont souvent été développés de façon ad-hoc pour résoudre des problèmes particuliers. Dans [12], Z. Liu, P. Nain – en collaboration avec D. Towsley de l'Université du Massachusetts – proposent un cadre mathématique rigoureux pour l'utilisation des arguments trajectoriels. Les principales techniques sont présentées dans ce cadre (récurrence en avant, récurrence rétrograde, arguments d'échange, couplage) et illustrées à travers l'étude de nombreux problèmes classiques de contrôle en théorie des files d'attente. Ce travail est la pierre angulaire de la monographie en cours d'écriture sur le sujet par Z. Liu, P. Nain et D. Towsley.

3.4 Outils logiciels pour la simulation et l'évaluation des performances

3.4.1 Simulation de réseaux de Petri

Participants : François Baccelli, Nathalie Furmento, Bruno Gaujal, Alain Jean-Marie, Sylvain Mazeau

Simulation distribuée de graphes d'événements La méthode de simulation équationnelle distribuée dite "temporelle" pour les graphes d'événements a été implémentée par B. Gaujal, A. Jean-Marie et S. Mazeau sur les stations de travail du projet, en utilisant la bibliothèque de primitives PVM. Dans ce type d'environnement, la difficulté principale que l'on rencontre est l'hétérogénéité et la variabilité des vitesses des processeurs. Plusieurs stratégies de partage de charge et de contrôle de l'exécution ont été implémentées et testées. Parallèlement, des modèles d'évolution dynamique d'un calcul distribué ont été imaginés afin de pouvoir optimiser les paramètres de la simulation [25, 51].

Simulation parallèle de réseaux de Petri à choix libres En s'inspirant de la méthode de simulation équationnelle développée pour le logiciel MAGMAS, et en utilisant les équations d'évolution quasi-linéaires des réseaux à choix libres, F. Baccelli, N. Furmento et B. Gaujal ont proposé une méthode de simulation des réseaux à choix libres qui est implémentée sous deux versions. Une première version "data parallèle" qui s'exécute sur la Connexion Machine et une version qui utilise une

décomposition du réseau, actuellement implémentée sous PVM et qui utilise les stations de travail du projet [21]. Cette nouvelle simulation est en cours de développement.

3.4.2 *PARSEVAL*: Parallélisation de la simulation pour l'évaluation de performances

Participants : Patrick Giraud, Pierre Hirth, Philippe Jaouen, Philippe Mussi, Hery Rakotoarisoa, Raïssa Révérend

PARSEVAL est un prototype de simulateur distribué de réseaux de files d'attente. Il utilise un protocole conservatif optimisé selon les caractéristiques propres de ces réseaux pour la synchronisation des processus de simulation. Les nouvelles fonctionnalités de la version 2.2 concernent essentiellement l'introduction de services algorithmiques quelconques [43, 44], écrits en C par l'utilisateur. Un préprocesseur transforme le code utilisateur en un ensemble de fonctions Reactive-C, permettant ainsi l'exécution concurrente de plusieurs instances du code de service, ainsi que le calcul optimal de la prévision du sous-simulateur. L'objectif principal poursuivi est de permettre l'évaluation de l'efficacité de la parallélisation sur des simulations plus représentatives des applications réelles.

3.4.3 Outils d'analyse de systèmes à événements discrets

Participants : Alain Jean-Marie, Michel Mangel, Christophe Samtmann

Le projet a continué le développement d'un système cohérent mais ouvert d'outils logiciels permettant la manipulation de plusieurs formalismes de systèmes à événements discrets et l'exploitation de leurs méthodes de simulation et de résolution.

Dans son état actuel, ce système permet la description de graphes de tâches et de réseaux de Petri, leur analyse et mise sous formes "normales" ainsi que leur simulation, séquentielle, parallèle et distribuée à l'aide de plusieurs outils (voir §3.4.1 et §3.4.1).

Afin d'assister l'utilisateur, une interface manipulable à l'aide d'une souris a été développée. Grâce à l'utilisation des pages de manuel, cette interface permet de proposer à l'utilisateur d'exécuter un grand

nombre de commandes, en ayant accès à tout moment à la liste de leurs paramètres et à une aide sur leur signification [53].

D'un autre côté, la réflexion sur la manière de concevoir des interfaces graphiques flexibles pour la saisie des réseaux de Petri s'est poursuivie. Un éditeur de types pour objets complexes, permettant l'insertion facile de nouveaux sous-graphes génériques dans l'éditeur ERS a été spécifié, et un prototype en a été réalisé [50, 53].

3.4.4 *PROSIT*: Simulation à événements discrets, orientée objets et répartie

Participants : Marc Badel, Lassâad Gannoun, Philippe Mussi, Günther Siegel

Les efforts entrepris dans le cadre du projet MRT PROSIT (en collaboration avec Simulog) ont été poursuivis. Ils ont abouti à la livraison à Simulog d'une version de Qnap2 permettant l'exécution de simulations sur des réseaux de stations de travail par réplication. Les résultats obtenus sont très encourageants et permettent la diffusion de cette extension dans la version commerciale de Qnap2.

La spécification de l'environnement de simulation Prosit a été poursuivie [29] dans trois axes principaux:

- définition des mécanismes parallèles de base nécessaires à l'implémentation efficace du système (appel de méthodes à distance, déplacement d'objets, duplication d'objets, etc.)
- étude de l'introduction de mécanismes de co-routines, permettant l'implémentation efficace et portable de la gestion d'échéanciers.
- étude des méthodes de partage de charge adaptées à la simulation répartie [42].

4 Actions industrielles

4.1 Coopération avec le CNET-Issy

Participants : François Baccelli, Stéphane Crépey, Sergueï Zouev

La convention sur les modèles macroscopiques de réseaux est prolongée par une convention de recherche de trois ans, dans le cadre des consultations thématiques du CNET. Le responsable scientifique de cette étude est S. Zouev. Le travail portera sur les problèmes de mobiles, sur le calcul de gradients dans le cadre proposé lors de l'étude précédente. Le projet comporte une phase de collaboration avec PRISME.

4.2 Coopération avec le CNET-Sophia

Participants : Philippe Nain, Eitan Altman, Frédéric Boccara

Ce contrat, avec CNET - Sophia Antipolis, porte sur la modélisation et l'évaluation des performances de contrôle de flux dans les réseaux à haut débit (le protocole TCP/IP). Le projet s'effectue en collaboration avec le projet RODEO. Nous avons développé dans [31], [40] des modèles simplifiés se focalisant sur une seule station qui constitue le goulot d'étranglement. Nous avons alors proposé plusieurs simplifications supplémentaires pour permettre de résoudre les modèles simplifiés. Des expériences sur les réseaux ainsi que des simulations ont permis de valider nos modèles et nos analyses.

4.3 PEPS

Le projet MISTRAL participe au projet ESPRIT III PEPS (Performance Evaluation of Parallel Systems) en tant que contractant associé de Simulog. Les autres partenaires du projet PEPS sont Thomson Sintra, INTECS Systemi, Université de Warwick, NPL.

Les objectifs du projet sont de développer des techniques et outils pour prédire les performances d'applications logicielles s'exécutant sur des machines parallèles, de démontrer l'impact et l'utilité de ces techniques sur des problèmes du monde réel, et d'assurer la validation des outils de supports de modélisation, de caractérisation et de monitoring des systèmes parallèles pour quelques machines parallèles européennes.

5 Actions nationales et internationales

5.1 Actions nationales

5.1.1 AQSI

A. Jean-Marie est le coordinateur du projet inter-PRC AQSI (Analyse quantitative des systèmes informatiques). Au cours de sa première année, le projet a organisé trois réunions de travail et un colloque qui a réuni une trentaine de personnes à Bordeaux en juin 1994. Dans le cadre de ce projet, des collaborations ont commencé entre MISTRAL et des équipes de l'IMAG et du CNAM.

5.1.2 PRS

MISTRAL participe également au PRC "PRS" (Parallélisme, Réseaux et Systèmes, poursuivant C^3) à deux titres: d'une part dans l'action Evaluation de Performances, dont A. Jean-Marie est le responsable, et d'autre part dans le thème "Ordonnancement pour le Parallélisme" du pôle "Parallélisme". Ce thème, créé cette année, a pour but le développement de bons algorithmes d'ordonnancement en essayant d'exploiter le parallélisme inhérent aux machines parallèles. Deux membres du projet MISTRAL y participent: Z. Liu et L. Finta.

5.2 Actions Internationales

5.2.1 QMIPS

Le projet MISTRAL participe au projet ESPRIT Basic Research QMIPS (Quantitative Modeling in Parallel Systems) en coopération avec les Universités d'Erlangen, Newcastle, Paris 5 (EHEI), Saragosse, Turin, le CWI et l'Imperial College de Londres. F. Baccelli est le coordinateur du projet.

Les objectifs du projet sont de définir et promouvoir une méthodologie d'évaluation des performances des systèmes parallèles, en intégrant les aspects logiciels et les aspects architecturaux.

Le projet a démarré en octobre 1992. Au cours de l'année 1994, deux séminaires ont été organisés, à Londres (avril 1994) et à Newcastle (octobre 1994).

Alors que les travaux de la première année ont insisté sur le recensement et l'évaluation des formalismes de description, la deuxième année a plutôt porté sur l'avancement des méthodes d'analyse.

Dans cet esprit, les membres du projet ont réalisé plusieurs études bibliographiques sur les méthodes de résolution connues pour les systèmes parallèles [20, 23] et sur les problèmes de communication dans les machines multi-processeurs [45] et réalisé de nombreux travaux (voir en particulier la section §3.2 ainsi que §3.3.1).

Le projet QMIPS a passé avec succès sa deuxième évaluation en octobre 1994.

5.2.2 Projets INTAS

Théorie des jeux *Participant* : Eitan Altman

Un projet INTAS a été accepté avec des partenaires Russes d'une part, et des chercheurs italiens et français (projet MIAOU et MISTRAL) d'autre part. La coopération a comme thème principal les méthodes numériques dans la théorie des jeux, et va commencer en janvier 95. Le coordinateur est le Prof. M. Falcone, Dip. Matematica-Roma I.

Stabilité Stochastique *Participants* : François Baccelli, Jean Mairesse

Un projet INTAS où collaborent deux laboratoires russes (l'Université de Novosibirsk et l'IPIT à Moscou) et quatre laboratoires d'Europe de l'Ouest (CWI, Universités de Cambridge et de Braunschweig, INRIA) vient de commencer. F. Baccelli en est le coordinateur. Les travaux prévus portent sur la stabilité stochastique de systèmes discrets.

5.2.3 Projet PROCOPE

Participants : Eitan Altman, François Baccelli, Jean Mairesse

Le projet Procope avec l'Allemagne est prolongé d'un an. Les partenaires sont l'Université d'Ulm (Professeur V. Schmidt) et l'Université de Braunschweig (Professeur R. Schassberger). Les travaux en cours portent sur les méthodes de processus ponctuels.

5.3 Organisation de séminaires

Dans le cadre des séminaires du projet MISTRAL: “Modélisation et Evaluation de Performance”, organisés par Z. Liu, une quarantaine de scientifiques nationaux et internationaux sont intervenus cette année.

Un séminaire hebdomadaire MISTRAL–équipe Aparsa de l’IS est organisé par J.C. Bermond et Ph. Mussi sur les thèmes de la simulation répartie, les langages à objets parallèles et le parallélisme virtuel. Ce séminaire entre dans le cadre de la préparation d’un projet commun Inria/IS (Sloop).

5.4 Visiteurs de courte durée

Le projet a accueilli, dans le cadre de ses séminaires, Arie Hordijk (1/1/94 – 31/1/94), Manuel Silva (21/02/94 – 23/02/94), Zhi-Li Zhang (22/02/94 – 04/03/94), Sean Meyn (17/02/94 – 19/02/94), Mathieu Brilman (21/03/94 – 26/03/94), Xue-Ming Yuan (19/04/94 – 11/07/94), Stéphane Gaubert (02/05/94 – 06/05/94), Sacha Rybko (21/05/94 – 21/06/94), Eugene Pecherskii (26/5/94 – 27/05/94), Herman Thorisson (24/05/94 – 17/06/94), Laurent Massoulié (14/06/94-16/06/94), Ying-Ping Zheng (24/06/94 – 01/07/94), Eugène Feinberg (01/08/94 – 05/08/94), Volker Schmidt (15/08/94 – 31/08/94), Gengi Yamazaki (20/08/94 – 12/09/94), Masakyio Miazawa (04/09/94 – 06/09/94), Mikhail Menshikov (17/09/94 – 21/09/94), Jesper Möller (17/10/94 – 20/10/94), Rolf Schassberger (17/11/94 – 19/11/94), Miguel Canales (05/12/94 – 16/12/94), Don Towsley (05/12/94 – 09/12/94).

6 Diffusion des résultats

6.1 Formation

6.1.1 Enseignement universitaire

ENS Cours réseaux au magistère Math-Info (F. Baccelli et C. Huitema, 24h).

ESSI, Université de Nice-Sophia-Antipolis Cours d’introduction à la modélisation, 2ème année (A. Jean-Marie, 12h).

Cours de Modélisation des Systèmes Informatiques, 3ème année (A. Jean-Marie et B. Gaujal, 24h).

DEA/DESS, Université de Nice-Sophia-Antipolis Cours d'ordonnement (Z. Liu, 10h).

Cours d'algorithmique répartie (P. Mussi, 12h).

EURECOM Cours de performances et disponibilité des réseaux (A. Jean-Marie, 20h).

PARIS 6 Cours d'ordonnement stochastique, DEA d'Informatique (A. Jean-Marie et Z. Liu, 24h).

ECOLE POLYTECHNIQUE Cours de DEA de modélisation aléatoire, DEA IMA et DEA de probabilités (F. Baccelli et P. Brémaud, 30h). F. Baccelli est maître de conférences dans le département de mathématiques appliquées.

ENST-Paris Cours EPR 3ème année sur "Le Contrôle Stochastique dans les Réseaux" (E. Altman, 3h).

6.1.2 Thèses

- Le projet est équipé d'accueil des formations doctorales : DEA Modélisation Aléatoire, DEA Probabilités (Ecole Polytechnique), DEA Informatique (UNSA),
- le projet sera équipé d'accueil de doctorants du futur DEA "Réseaux et systèmes distribués" de l'UNSA
- Trois thèses ont été soutenues dans le projet
 1. M. Canales, "Simulation parallèle de réseaux de Petri stochastiques", Université de Nice Sophia Antipolis, (F. Baccelli (directeur de thèse), P. Mussi (membre du jury)).
 2. B. Gaujal, "Parallélisme et simulation des systèmes à événements discrets", Université de Nice Sophia Antipolis, (F. Baccelli (directeur de thèse)).
 3. H. Rakotoarisoa, "Simulation distribuée de réseaux de files d'attente", Université de Nice Sophia Antipolis, (F. Baccelli (membre du jury), P. Mussi (directeur de thèse)).
- Les membres du projet ont participé au jurys des thèses suivantes :
 1. C. Hanen, "Problèmes d'ordonnement cyclique", Paris 6, (F. Baccelli (rapporteur)).

2. D. Kofman, “Modèles stochastiques, leur solution et leur application à l'évaluation de performances des réseaux RNIS-LB et FDDI”, ENST, (P. Nain (rapporteur) et F. Baccelli (membre du jury)).
3. C. Maziero, “Conception et réalisation d'un noyau de système réparti pour la simulation parallèle”, Université de Rennes 1, (P. Mussi (membre du jury)).
4. N. Sauer, “Les graphes d'événements stochastiques et leur utilisation pour l'évaluation des systèmes de production”, Université de Metz, (F. Baccelli (rapporteur)).
5. N. Revol, “Complexité de l'évaluation parallèle de circuits arithmétiques”, INPG, (F. Baccelli et B. Gaujal (rapporteurs)).

6.1.3 Stages

- A. Aboulalaâ, “Sur un théorème de limite conditionnelle. Application aux systèmes de capacités finies”, DEA Ecole polytechnique, (4 mois).
- F. Boccara, “Analyse et performance au sein d'un réseau utilisant le protocole TCP/IP”, DEA Université Paris Sud, (3 mois).
- S. Crépey, “Algorithme de gradient projeté en optimisation combinatoire”, DEA IMA, (5 mois).
- N. Furmento, “Simulation Parallèle de réseaux de Petri à choix libres”, DEA ESSI Université de Nice Sophia-Antipolis, (3 mois).
- L. Gannoun, “Étude et propositions pour le partage de charge”, DEA Université de Nice Sophia-Antipolis, (5 mois).
- P. Giraud, “Introduction d'un langage de description des services dans PARSEVAL”, Maitrise Faculté des Sciences de Marseille, (5 mois).
- P. Hirth, “Introduction d'un langage de description des services dans PARSEVAL”, 3ème année ESSI Université de Nice Sophia-Antipolis, (3mois).
- P. Jaouen, “Introduction d'un langage de description des services dans PARSEVAL”, DEA ESSI Université de Nice Sophia-Antipolis, (5 mois).

- M. Mangel, “Un éditeur de type pour réseaux de Petri”, DESS ISI, (3 mois).
- S. Mazeau, “Stratégies pour le partage de charge dynamique”, 3ème année ESSI Université de Nice Sophia–Antipolis, (5mois).
- R. Révérend, “Introduction d’un langage de description des services dans PARSEVAL”, 3ème année ESSI Université de Nice Sophia–Antipolis, (3mois).
- C. Samtmann, “Interfaces graphiques en Tcl/Tk”, 3ème année ESSI Université de Nice Sophia–Antipolis, (5mois).

6.2 Conférences

6.2.1 Conférenciers invités

E. Altman : ORSIS Conference (Israël, mai 1994), “Applied probability” (Oberwolfach, Allemagne, décembre 1994), “Stochastic Models”, (Université de Leiden, Pays Bas, décembre 1994).

F. Baccelli : IMA “réseaux stochastiques” (mars 1994), “systèmes stochastiques” (Leiden, avril 1994), “11ème Conférence internationale sur l’analyse et l’optimisation des systèmes” (Sophia Antipolis, juin 1994), “Applied Probability” (Oberwolfach, Allemagne, décembre 1994).

Z. Liu : Workshop DIMACS sur “Interconnection Networks and Mapping and Scheduling Parallel Computation” (New Jersey, février 1994).

6.2.2 Présentations à des Conférences

E. Altman : ITC 14 (Antibes, juin 1994), “International Conference on Game Theory”, (New York, juillet 1994).

F. Baccelli : Workshop Qmips de Newcastle (octobre 1994), “Idempotency” (Bristol, octobre 94), “Stochastic Models” (Ulm, Allemagne, septembre 94).

L. Finta, B. Gaujal, Z. Liu, J. Mairesse : “11ème Conférence internationale sur l’analyse et l’optimisation des systèmes”, (Sophia Antipolis, juin, 1994).

B. Gaujal : “sixièmes rencontres Francophones du Parallélisme” (Lyon, juin 1994), workshop QMIPS de Londres (avril 94) et de Newcastle (octobre 94), “Idempotency” (Bristol, octobre 94), AQSI (Paris, mai 94).

A. Jean-Marie : INFOCOM'94 (Toronto, juin 1994), workshop QMIPS de Londres (avril 94) et de Newcastle (octobre 94), "Idempotency" (Bristol, octobre 94), AQSI (Paris, mai 94).

J. Mairesse : Colloque Jeunes Probabilistes (Aussois, mars 94), AQSI (Paris, décembre 93), "Stochastic Models", (Ulm, Allemagne, septembre 94), "Idempotency", (Bristol, octobre 94).

P. Mussi : Colloque "Object Oriented Simulation" (Tempe, AZ, janvier 94).

P. Nain : CDC'93 (San Antonio, TX, USA, décembre 1993).

S. Zouev : "1994 3-rd Congress of the Bernoulli Society" (Chapel Hill, USA, juin 1994), "Workshop on Stochastic Models" (Ulm, Allemagne, septembre 1994).

6.2.3 Participation à des comités de lecture

F. Baccelli : Journaux : Queuing Systems, Zeitschrift für Operations Research, Mathematics of Operations Research, Journal of Dynamic Discrete Event Systems. Conférences : ITC, 11ème Conférence internationale sur l'analyse et l'optimisation des systèmes.

P. Mussi : "Transputers 94" et "Simulation Symposium 95".

P. Nain : Editeur Associé du journal *IEEE Transactions on Automatic Control*.

7 Publications

Thèses

- [1] M. CANALES, *Simulation parallèle de réseaux de Petri stochastiques*, thèse de doctorat, Université de Nice Sophia Antipolis, février 1994.
- [2] B. GAUJAL, *Parallélisme et simulation des systèmes à événements discrets*, thèse de doctorat, Université de Nice Sophia Antipolis, juin 1994.
- [3] H. RAKOTOARISOA, *Simulation distribuée de réseaux de files d'attente*, thèse de doctorat, Université de Nice Sophia Antipolis, février 1994.

Articles et chapitres de livre

- [4] E. ALTMAN, G. KOOLE, «Control of a random walk with noisy delayed information», *Systems and Control Letters*, A paraître.
- [5] E. ALTMAN, H. LEVY, «Queueing in space», *Advances of Applied Probability*, A paraître.
- [6] D. ARTIGES, «Optimal routing into two heterogeneous service stations with delayed information», *IEEE Trans. Aut. Control*, A paraître.
- [7] F. BACCELLI, S. FOSS, «On the Saturation Rule for the Stability of Queues», *J. Applied Probability*, A paraître.
- [8] F. BACCELLI, M. KLEIN, M. LEBOURGES, S. ZOUEV, «Modèles macroscopiques de réseaux de télécommunications», *Annales des Télécommunications*, A paraître.
- [9] F. BACCELLI, M. KLEIN, S. ZOUEV, «Perturbation analysis of functionals of random measures», *Adv. Appl. Probab.*, A paraître.
- [10] L. FINTA, Z. LIU, «Makespan Minimization of Task Graphs with Random Task Running Times», in : *Interconnection Networks and Mapping and Scheduling Parallel Computations*, H. et al. (réd.), DIMACS, AMS, 1994.
- [11] B. GAUJAL, M. JAFARI, M. BAYKAL-GÜRISOY, G. ALPAN, «Allocation Sequences of Two Processes Sharing a Resource», *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, A paraître.
- [12] Z. LIU, P. NAIN, D. TOWSLEY, «Sample Path Methods in the Control of Queues», *QUESTA, special issue on the Optimization of Stochastic Systems*, 1994, A paraître.
- [13] Z. LIU, D. TOWSLEY, «Optimality of the Round Robin Routing Policy», *Journal of Applied Probability* 31, 1994, p. 466–475.
- [14] J. MAIRESSE, «A Graphical Approach of the Spectral Theory in the $(\max,+)$ Algebra», *IEEE Trans. on Autom. Control*, A paraître.
- [15] P. NAIN, D. TOWSLEY, «Optimal Scheduling in a Machine with Stochastic Varying Processing Rate», *IEEE Trans. Aut. Control* 39, 9, septembre 1994.
- [16] M. TIDBALL, E. ALTMAN, «Approximations in dynamic zero-sum games, I», *SIAM J. Control and Optimization*, A paraître.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [17] E. ALTMAN, V. GAITSGORY, «A Hybrid (differential-stochastic) zero-sum game with fast stochastic part», in : *6th International Symposium on Dynamic Games and Applications*, St-Jovite, Quebec, CANADA, juillet 1994.

- [18] E. ALTMAN, A. JEAN-MARIE, «The loss process messages in an M/M/1/K queue», *in: IEEE INFOCOM'94*, p. 1191–1198, Toronto, Canada, juin 1994.
- [19] E. ALTMAN, «The Baccelli-Foss Saturation Rule for stability for continuous time input processes», *in: 32nd Allerton Conference on Communication, control and computing*, A. House (éd.), Urbana-Champaign, University of Illinois, septembre 1994.
- [20] F. BACCELLI, G. BALBO, R. BOUCHERIE, J. CAMPOS, G. CHIOLA, «Annotated bibliography on stochastic Petri nets», *in: Performance Evaluation of Parallel and Distributed Systems — Solution Methods*, O. Boxma, G. Koole (éd.), *CWI Tract*, 105, p. 1–24, Amsterdam, 1994.
- [21] F. BACCELLI, N. FURMENTO, B. GAUJAL, «Parallel and Distributed Simulation of Free Choice Petri Nets.», *in: QMIPS Workshop, Newcastle*, 1994. Soumis au 9th Workshop on parallel and distributed simulation.
- [22] F. BACCELLI, B. GAUJAL, «Stability of Free Choice Nets», *in: 11ème Conférence internationale sur l'analyse et l'optimisation des systèmes*, Springer-Verlag (éd.), Sophia Antipolis, France, juin 1994.
- [23] O. BOXMA, G. KOOLE, Z. LIU, «Queueing-Theoretic Solution Methods for Models of Parallel and Distributed Systems», *in: Performance Evaluation of Parallel and Distributed Systems — Solution Methods*, O. Boxma, G. Koole (éd.), *CWI Tract*, 105, p. 1–24, Amsterdam, 1994.
- [24] M. CANALES, B. GAUJAL, «Marking Optimization and Parallelism in Marked Graphs», *in: Performance evaluation of parallel and distributed systems – Solution Methods*, O. Boxma, G. Koole (éd.), *CWI Tract*, 105 & 106, CWI, 1994.
- [25] B. GAUJAL, A. JEAN-MARIE, S. MAZEAU, «Strategies for Load Balancing in the Distributed Computation of Associative Operations», *in: Fifth QMIPS Workshop, Newcastle*, octobre 1994.
- [26] B. GAUJAL, «Regular Sequences and Applications in Cyclic Scheduling», *in: Proceedings of the QMIPS Workshop, London*, 1994. Soumis à J. Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications.
- [27] Z. LIU, P. NAIN, D. TOWSLEY, «Exponential Bounds for a Class of Stochastic Processes with Application to Call Admission Control in Networks», *in: 33rd IEEE Conference on Decision and Control*, Orlando, USA, décembre 1994.
- [28] J. MAIRESSE, «Stochastic Linear Systems in the $(\max,+)$ Algebra», *in: 11ème Int. Conf. on Analysis & Optimisation of Systems*, G. Cohen, J. Quadrat (éd.), *Lecture Notes in Control and Information Science 199*, Springer-Verlag, Sophia-Antipolis, 1994.

- [29] P. MUSSI, P. FERRANTE, G. SIEGEL, L. MALLET, «Object Oriented Simulation: Highlights on the PROSIT Distributed Discrete Event Simulator», *in: Object Oriented Simulation Conference*, SCS, janvier 1994. Part of the 1994 Western Simulation Multiconference, Tempe, Arizona.

Rapports de recherche et publications internes

- [30] A. ABOULALAA, «Sur un théorème de limite conditionnelle. Application aux systèmes de capacités finies», *Rapport de recherche n°2389*, INRIA, 1994.
- [31] E. ALTMAN, F. BOCCARA, J. BOLOT, P. NAIN, P. BROWN, D. COLLANGE, «Performance Evaluation of the TCP/IP: Analysis, Simulation and Experimentations», *Rapport technique*, Convention INRIA-CNET, 1994.
- [32] E. ALTMAN, A. HORDIJK, «Zero-sum Markov games and worst-case optimal control of queueing systems», *RR n°TW-94-01*, University of Leiden, 1994, submitted to *QUESTA*, special issue on optimization of queueing systems.
- [33] E. ALTMAN, H. HORDIJK, «Applications of Borovkov's Renovation Theory to Non-Stationary Stochastic Recursive Sequences and their Control», *RR n°TW-94-09*, University of Leiden, 1994.
- [34] E. ALTMAN, S. STIDHAM, «Optimality of Monotonic Policies for Two-Action Markovian Decision Processes, Including Information and Action Delays», *TR n°UNC/OR/TR-94-2*, Université de Caroline du Nord, 1994.
- [35] E. ALTMAN, «A Markov game approach for optimal routing into a queueing network», *RR n°2178*, INRIA, 1994, submitted to *Annals of Dynamic Games*.
- [36] F. BACCELLI, A. BOROVKOV, J. MAIRESSE, «On Infinite Tandem Queueing Networks», Présenté à la conférence d'Oberwolfach, Décembre 1994.
- [37] F. BACCELLI, S. FOSS, B. GAUJAL, «Structural, Timed and Stochastic Properties of Unbounded Free Choice Petri Nets.», *Rapport de recherche n°2411*, INRIA, 1994.
- [38] F. BACCELLI, V. SCHMIDT, «Taylor Expansions for Poisson Driven (max,+)-linear systems», Présenté à la conférence d'Oberwolfach, Décembre 1994.
- [39] F. BACCELLI, S. ZOUDEV, «Crossing borders by vehicles», *Rapport technique n°I.7*, Convention INRIA-CNET, 1994.

- [40] F. BOCCARA, *Analyse et performance au sein d'un réseau utilisant le protocole TCP/IP*, Mémoire, Université Paris Sud, septembre 1994, rapport de DEA.
- [41] L. FINTA, Z. LIU, «Scheduling of Parallel Programs in Single-Bus Multiprocessor Systems», *RR n°2302*, INRIA, 1994, soumis pour publication.
- [42] L. GANNOUN, *Étude et propositions pour le partage de charge*, Mémoire, Université de Nice, septembre 1994, rapport de DEA.
- [43] P. GIRAUD, *Introduction d'un langage de description des services dans PARSEVAL*, rapport de stage, DUII, Université de Marseille - St Jérôme, juin 1994.
- [44] P. JAOUEN, *Introduction d'un langage de description des services dans PARSEVAL*, rapport de stage, ESSI, Université de Nice, septembre 1994.
- [45] A. JEAN-MARIE, P. MUSSI, M. SYSKA, «Communications in Multiprocessor Machines - A Survey», *QMIPS Report n° D W3.T2-T3.19.v1*, INRIA, septembre 1994.
- [46] Z. LIU, P. NAIN, D. TOWSLEY, «Exponential Bounds with an Application to Call Admission», *CMPSSCI TR n°94-63*, Université du Massachusetts, octobre 1994, soumis à *J.A.C.M.*
- [47] Z. LIU, P. NAIN, D. TOWSLEY, «On a Generalization of Kingman's Bounds», *RR n°2423*, INRIA, novembre 1994, soumis pour publication à *Journal of Applied Probability*.
- [48] Z. LIU, R. RIGHTER, «Optimal Load Balancing on Distributed Homogeneous Unreliable Processors», soumis pour publication à *Operations Research*, 1994.
- [49] Z. LIU, «Performance Bounds for Stochastic Timed Petri Nets», soumis à *ICPN'95*, 1994.
- [50] M. MANGEL, *Un éditeur de type pour réseaux de Petri*, Mémoire de DESS-ISI, Université de Nice-Sophia Antipolis, septembre 1994.
- [51] S. MAZEAU, *Stratégies pour le partage de charge dynamique*, Rapport de stage ESSI, Université de Nice-Sophia Antipolis, septembre 1994.
- [52] J. MØLLER, S. ZOUEV, «Gamma-type results and other related properties of Poisson processes.», *Research Reports n°282*, Univ. of Aarhus, 1994.
- [53] C. SAMTMANN, *Interfaces graphiques en Tcl/Tk*, Rapport de stage ESSI, Université de Nice-Sophia Antipolis, septembre 1994.
- [54] M. TIDBALL, O. POURTALLIER, E. ALTMAN, «Approximations in dynamic zero-sum games, II», *RR n°2348*, INRIA, 1994, Submitted to *SIAM J. Control and Optimization*.

8 Abstract

The MISTRAL project is devoted to the elaboration and the analysis of mathematical models for performance evaluation of stochastic discrete event systems.

The modeling of computer systems, computer networking, production systems and traffic problems in communication systems is currently spawning a new *theory of discrete event systems*. Several formalisms are available in the framework of this theory. The research of the project is focused on two of them: queueing networks and Petri nets. Two complementary approaches are used:

- the development of (stochastic) mathematical models and their analytical or numerical solution,
- simulation.

Parallel and distributed systems are of central interest to MISTRAL, both as a source of problems to study and as a tool for their solution.

The research of the project covers fundamental aspects of the stability of discrete event dynamic systems, scheduling and mapping of tasks to multiprocessor networks, as well as control and optimization problems in communication networks.

Table des matières

1	Composition de l'équipe	1
2	Présentation du projet	3
3	Actions de recherche	4
3.1	Analyse de réseaux de communication	4
3.1.1	Réseaux à hauts débits	4
3.1.2	Modèles macroscopiques de réseaux de communi- cation	6
3.2	Systèmes à événements discrets et Parallélisme	8
3.2.1	Stabilité des systèmes à événement discrets	8
3.2.2	Réseaux de Petri stochastiques	8
3.2.3	Réseaux de files d'attente	10
3.2.4	Modélisation et évaluation de performances d'ap- plications parallèles	11
3.3	Ordonnancement et contrôle	12
3.3.1	Ordonnancement optimal dans les systèmes mul- tiprocesseurs	12
3.3.2	Equilibre de charge dans les systèmes multipro- cesseurs	13
3.3.3	Algorithmes de gradient en optimisation combina- toire.	14
3.3.4	Théorie des jeux	14
3.3.5	Contrôle optimal et arguments trajectoriels	15
3.4	Outils logiciels pour la simulation et l'évaluation des performances	16
3.4.1	Simulation de réseaux de Petri	16
3.4.2	<i>PARSEVAL</i> : Parallélisation de la simulation pour l'évaluation de performances	17
3.4.3	Outils d'analyse de systèmes à événements discrets	17

3.4.4	<i>PROSIT</i> : Simulation à événements discrets, orientée objets et répartie	18
4	Actions industrielles	18
4.1	Coopération avec le CNET-Issy	18
4.2	Coopération avec le CNET-Sophia	19
4.3	PEPS	19
5	Actions nationales et internationales	20
5.1	Actions nationales	20
5.1.1	AQSI	20
5.1.2	PRS	20
5.2	Actions Internationales	20
5.2.1	QMIPS	20
5.2.2	Projets INTAS	21
5.2.3	Projet PROCOPE	21
5.3	Organisation de séminaires	22
5.4	Visiteurs de courte durée	22
6	Diffusion des résultats	22
6.1	Formation	22
6.1.1	Enseignement universitaire	22
6.1.2	Thèses	23
6.1.3	Stages	24
6.2	Conférences	25
6.2.1	Conférenciers invités	25
6.2.2	Présentations à des Conférences	25
6.2.3	Participation à des comités de lecture	26
7	Publications	26
8	Abstract	31