
PROJET MISTRAL

Modélisation en Informatique et Systèmes de Télécommunications

Localisation : *Sophia Antipolis*

Mots-clés : modélisation, système à événements discrets, réseau de file d'attente, réseau de Petri, système informatique, système de télécommunication, protocole de communication, parallélisme, ordonnancement, processus stochastique, simulation.

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

François Baccelli, directeur de recherche

Responsable permanent

Philippe Nain, directeur de recherche

Assistante de projet

Ephie Deriche, technicien de recherche, à temps partiel

Personnel INRIA

Eitan Altman, chargé de recherche
Alain Jean-Marie, directeur de recherche
Zhen Liu, chargé de recherche

Ingénieurs experts

Héry Rakotoarisoa, jusqu'au 17/03/96
Sergueï Zuyev

Chercheurs post-doctorants

Damien Artiges, Post-doc industriel INRIA avec ASCOM SRL, 12/02/96–11/02/97
Douglas Down, Boursier ERCIM, 16/02/96–15/08/96
Ger Koole, Boursier HCM jusqu'au 31/03/96

Chercheurs doctorants

Omar Ait-Hellal, Boursier CIES
Damien Artiges, Moniteur Normalien jusqu'au 11/02/96
Thomas Bonald, Corps des Télécom. depuis le 01/09/96
Lucian Finta, Boursier MESR jusqu'au 19/01/96
Jörn Migge, Boursier HCM jusqu'au 31/10/96
Nicolas Niclausse, Boursier INRIA
Jérôme Talim, Boursier INRIA
Konstantin Tchoumatchenko, Boursier CIES

Stagiaires

Thomas Bonald, DEA et stage EURECOM, du 1/03/96 au 31/08/96
Mohammed Erramdani, coopération Franco-Marocaine, du 15/11/96 au 15/01/97
Driss El Oudghiri, coopération Franco-Marocaine, du 12/11/96 – 12/01/97

2 Présentation du projet

La modélisation des systèmes informatiques et de télécommunication donne actuellement lieu à de nombreux développements de la théorie des systèmes à événements discrets. Deux formalismes sont utilisés par le projet : 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 et 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 protocoles de communication.

Les actions de recherche de 1995–96 ont porté sur :

- la modélisation de systèmes de télécommunications, notamment dans le cadre de conventions de recherche avec le CNET,
- la modélisation de systèmes de multiprocesseurs, notamment dans le cadre des projets ESPRIT PEPS et TMR Alapedes,
- l'étude mathématique de classes de systèmes à événements discrets, ainsi que l'élaboration de politiques de contrôle optimal pour ces systèmes,
- la réalisation d'outils logiciels pour l'évaluation de performances.

Les activités sur la simulation parallèle et distribuée initialisées dans le projet MISTRAL par Philippe Mussi et Bruno Gaujal sont maintenant reprises par le projet SLOOP nouvellement créé comme projet commun CNRS-INRIA-UNSA.

3 Actions de recherche

3.1 Analyse de réseaux de communication

Mots-clés : processus stochastique, système téléinformatique, réseau à haut débit, contrôle de transmission.

3.1.1 Modélisation et contrôle des réseaux à hauts débits

Participants : Omar Ait-Hellal, Eitan Altman, François Baccelli, Thomas Bonald, Zhen Liu, Philippe Nain, Rhonda Righter, Jérôme Talim

Mots-clés : réseau à haut débit, qualité de service, multiplexage statistique, bande passante équivalente, grandes déviations.

Qualité de service et contrôle de flux. La conception de mécanismes de contrôle de flux efficaces pour des applications multimédias sur l'Internet demande la connaissance des caractéristiques des connexions (bandes passantes disponibles, capacité des routeurs, délai, pertes, charge, etc.), ainsi que leurs évolutions dans le temps. Pour ce faire, on ne dispose en général que de mesures de bout en bout. Dans le cas où il n'existe qu'un seul goulot d'étranglement sur une connexion (ce qui est souvent le cas sur l'Internet), P. Nain, J. Bolot (Rodeo) et D. Towsley (univ. Massachusetts) se sont intéressés à l'exploitation de ces mesures pour l'estimation en temps réel de certaines caractéristiques du routeur congestionné, notamment sa capacité, sa charge et la bande passante disponible du lien de sortie. L'approche choisie consiste à modéliser le routeur par une file d'attente à capacité finie (file $M+M/M/1/K$), à écrire des formules explicites pour les principales mesures de performance (probabilité de perte d'un paquet de l'application, probabilité conditionnelle de perte, nombre de paquets de l'application perdus consécutivement), à estimer ces quantités à partir des mesures de bout en bout et à en déduire les caractéristiques cherchées du routeur. Ces travaux se poursuivent actuellement dans plusieurs directions, notamment pour couvrir le cas où les paquets de l'application sont générés périodiquement (file $D+M/M/1/K$), ce qui est le cas pour les applications audio.

Bornes exponentielles. Les bornes exponentielles pour $\text{Prob}(X_n > x)$ obtenues en 1994/95 par Z. Liu, P. Nain et D. Towsley dans le cas où (X_n) vérifie une équation récursive du type $X_{n+1} = \max(X_n + U_n, 0)$, ont été étendues au cas où les incréments (U_n) sont de type Markov additifs [262]. Cette extension permet maintenant de calculer des bornes inférieures et supérieures pour la queue de distribution du temps d'attente stationnaire W dans des files d'attente de type MMPP/G(M)/1 avec arrivées et services Markov modulés. Ces bornes fournissent ainsi une alternative intéressante au calcul exact de $\text{Prob}(W > x)$ qui, lorsqu'il est possible, nécessite la mise en œuvre d'algorithmes complexes à base d'inversions de transformées de Laplace souvent numériquement instables, notamment lorsque x est grand (problème d'estimation d'événements rares) ou lorsque le nombre d'états du processus MMPP est grand.

L'impact des politiques de rejet des cellules. Z. Liu et R. Righter [263] ont entamé une étude sur l'impact des politiques de rejet des cellules dans un commutateur ATM. Les critères de performance considérés sont le délai des cellules transmises (non perdues), la gigue (variation du délai des cellules transmises), et le processus de rafales des pertes (nombre de cellules perdues consécutivement). Différentes politiques de rejet des cellules ont été analysées. Z. Liu et R. Righter prouvent d'une part que la politique de rejet « rear dropping », qui écarte systématiquement les cellules trouvant un tampon plein, maximise le délai et minimise la gigue pour l'ordre stochastique, et d'autre part que la politique « front dropping », qui rejette la cellule en tête du tampon minimise le délai pour l'ordre stochastique. Ils proposent aussi des politiques générant à la fois des faibles délais et des courtes rafales de cellules perdues.

Leaky bucket et bornes de Yaron et Sidi. Dans le cadre de sa thèse, J. Talim a montré que les sommes cumulées des sorties de deux « leaky buckets » disposant d'un même taux de jetons sont bornées par la différence des tailles de leurs buffers de jetons. Cela expliquerait l'absence de ce deuxième paramètre dans certaines formules analytiques telles que les bandes passantes équivalentes. D'une façon générale, les techniques qui s'intéressent au comportement du leaky bucket à l'infini ou sur de grands intervalles de temps peuvent ignorer, ou en tout cas rendre imperceptible, l'impact de ce paramètre. Par la suite, J. Talim a proposé une fonction de dimensionnement du leaky bucket, lorsque le

processus d'entrée est décrit par les bornes de Yaron et Sidi. L'objectif est d'améliorer la caractérisation du flux de sortie, notamment au niveau du taux de décroissance, dans les bornes exponentielles d'une part, et d'étendre l'étude à un réseau de serveurs d'autre part.

Contrôle de flux à fenêtre dans les réseaux à commutation de paquets. Dans le cadre d'un stage de DEA [259], T. Bonald a étudié la stabilité et les performances d'un mécanisme de contrôle de flux à fenêtre type TCP/IP. Ce mécanisme permet à une source d'adapter son débit aux conditions de trafic du réseau, modélisé par une unique file d'attente représentant le goulot d'étranglement de la connexion. Dans le cas d'une fenêtre de taille fixe, on montre que la stabilité du modèle, c'est-à-dire l'existence et l'unicité d'un régime stationnaire pour le nombre de clients dans la file, et la convergence vers ce régime stationnaire pour toute condition initiale ne dépendent pas de la source contrôlée. Sous des hypothèses markoviennes, ce résultat se généralise au cas de files en tandem et de systèmes de polling sous différents régimes. Ces travaux se poursuivent dans le cadre d'une thèse où l'on considère notamment le cas d'une fenêtre variable.

Modélisation et évaluation de performance du protocole TCP/IP. Cette étude 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 CNET - Sophia Antipolis, et fait partie d'une nouvelle C.T.I. avec le CNET sur le thème « Performance et contrôle des réseaux multimédias ». De nouveaux modules ont été développés autour du simulateur REAL afin d'y intégrer le nouveau protocole VEGAS, ainsi que des modules de contrôle de l'ATM. Cela a permis de valider des travaux de modélisation et d'évaluation de performances de plusieurs mécanismes de contrôle de flux dans l'ATM et l'Internet. En particulier, les protocoles de contrôle Reno et Vegas (de contrôle de flux sur l'Internet) ont été étudiés [243]. Des problèmes de dysfonctionnement de ces protocoles ont été identifiés, et des solutions ont été proposées pour les résoudre [244].

Contrôle à base de débit dans les réseaux ATM. Dans [242, 256, 245, 246] E. Altman et ses coauteurs proposent des contrôleurs efficaces pour les réseaux ATM, et en particulier des contrôleurs de flux à base de débit adaptés à l'architecture qui a été standardisée par l'ATM Forum. Dans [242], la stabilité d'un de ces contrôleurs est étudiée. Dans [256], la théorie du contrôle H^∞ est utilisée pour définir un contrôleur robuste, qui permet de s'adapter à des conditions de congestion variables, en présence de trafics exogènes dont les paramètres ne sont pas connus. Un contrôleur adaptatif est aussi proposé, combinant l'identification et le contrôle. Dans [245, 246], la théorie du contrôle hybride est étudiée dans le cas d'une composante quadratique linéaire. Cette théorie permet de concevoir un contrôleur pour le contrôle simultané de flux et d'admission.

3.1.2 Modèles macroscopiques de réseaux de communication

Participants : François Baccelli, Konstantin Tchoumatchenko, Sergueï Zuyev

Mots-clés : réseau de télécommunications, géométrie aléatoire, analyse des perturbations, processus ponctuel, géométrie aléatoire, analyse variationnelle.

L'étude d'architectures de réseaux de télécommunications, fondée sur des méthodes de processus ponctuels aléatoires et de géométrie aléatoire, se poursuit. Les principaux résultats obtenus cette année sont les suivants:

Optimisation d'architecture de réseaux. Le problème de l'optimisation de l'architecture de raccordement des abonnés a été abordé dans le cadre du modèle hiérarchique avec plusieurs niveaux introduit dans [235]. Dans [253], F. Baccelli et S. Zuyev ont obtenu des formules explicites pour les fonctions de

coût, qui ont permis de déterminer les paramètres optimaux de divers modèles de structure de raccordement. Ils ont également obtenu des résultats analytiques et numériques pour le modèle à trois niveaux avec des liaisons directes, qui est plus proche de la réalité que le modèle purement hiérarchique.

Communications mobiles. L'approche proposée s'avère être aussi utile pour la modélisation de systèmes de télécommunications mobiles. L'article [236] introduit plusieurs modèles dans le cadre desquels sont étudiées les distributions de variables importantes, comme le nombre des mobiles gérés par une station de base et le nombre franchissements de frontières (« hand-over »). L'article [253] contient aussi une étude du problème d'optimisation des zones de LAC, qui sont utilisées pour la mise à jour des bases de données de localisation des mobiles.

Algorithmes des gradients stochastiques. L'optimisation de l'architecture de réseaux qui possèdent un très grand nombre de paramètres nécessite de nouvelles méthodes de simulation. Dans l'approche proposée, l'évaluation et l'optimisation des différentes grandeurs caractéristiques du réseau peuvent se baser sur le calcul des moyennes de diverses fonctionnelles des processus ponctuels représentant les stations et les abonnés, et sur le calcul de leurs gradients par rapport à certains paramètres du modèle. Dans [266], S. Zuyev, P. Desnoguès (Prisme) et H. Rakotoarisoa ont développé un algorithme de gradient stochastique dont la base théorique est décrite dans l'article de F. Baccelli, M. Klein, et S. Zuyev, « Perturbation analysis of functionals of random measures » *Adv. Appl. Prob.* 27, 1995, p. 306–325.. Cet algorithme est utilisé dans le simulateur de réseau ARC développé dans le cadre de la convention INRIA-CNET. L'expression de la variance asymptotique de cet algorithme est aussi donnée dans l'article cité.

Économie des réseaux. Les méthodes de géométrie aléatoire développées pour l'analyse des fonctions de coût des réseaux dans [253] et [235] ont récemment été proposées par la direction du plan et de la stratégie de France Télécom pour l'évaluation du coût de la partie distribution de son réseau. D'autres applications à l'économie sont en cours d'étude. Ainsi l'équilibre économique des réseaux de télécommunications, a récemment été étudié dans ce cadre par M. Lebourges qui propose de caractériser l'utilité économique comme solution d'un système d'équations intégrales. Dans [267], K. Tchoumatchenko et S. Zuyev montrent comment résoudre ces équations dans le cas d'un espace des phases fini, où la solution est unique. Pour un espace des phases infini, il existe un nombre infini de solutions non-bornées. Une évaluation numérique de cette utilité économique a été effectuée par France Télécom dans le stage d'option de C. Prost et N. Benhameur (École Polytechnique, Dépt. de Mathématiques Appliquées, Modèle mathématique du couplage entre valeur économique de l'espace et réseau de transport, avec et sans télécommunications, rapport de stage d'option, 1996.

3.1.3 Analyse des caches dans le Web

Participants : Zhen Liu, Philippe Nain, Nicolas Niclausse

Mots-clés : multimédia, cache, World Wide Web.

La croissance exponentielle du nombre de serveurs Web et du trafic HTTP pose des problèmes de saturation des liens de communication, et des serveurs Web. Du fait de la nature distribuée du Web, où de nombreux clients se situant dans le même réseau local (ou national) accèdent fréquemment aux mêmes serveurs distants, un cache commun à ces clients peut diminuer dans une large mesure le trafic sur le réseau (et notamment sur les liens transatlantiques, les plus saturés), ainsi que le temps de latence perçu par le client.

Un des problèmes qui se pose donc est de savoir quels documents garder en priorité dans le cache. La politique utilisée par la plupart des caches est actuellement LRU (Least Recently Used), qui consiste à garder les documents les plus récemment accédés, sans tenir compte, par exemple, du temps mis pour récupérer ces documents. Différentes politiques, prenant en compte un certain nombre de paramètres

(durée des connections, taille des documents, fréquence d'accès, ...), sont simulées et analysées afin d'optimiser les performances (latence perçue par les utilisateurs, bande passante utilisée). Il apparaît que la politique LRU n'est pas optimale. Une étude est également poursuivie sur l'utilisation de caches en mémoire vive (beaucoup plus rapide qu'un disque) pour les serveurs Web (où on observe, notamment sur les statistiques d'accès de serveur du WWW Consortium, qu'un cache même de faible taille peut être très efficace).

3.2 Analyse et contrôle de systèmes à événements discrets

3.2.1 Ordonnancement multiprocesseur

Participants : Lucian Finta, Zhen Liu, Rhonda Righter

Mots-clés : système parallèle, ordonnancement, placement, complexité algorithmique.

Ordonnancement optimal sous contraintes de communication. L. Finta et Z. Liu ont poursuivi l'étude sur l'ordonnancement dans les systèmes multiprocesseurs avec communication entre processeurs. Ce problème a été prouvé \mathcal{NP} -difficile quand on suppose que la capacité de communication entre processeurs est infinie. L. Finta et Z. Liu ont analysé le cas de capacité fixe de communication [260]. Deux variantes du problème ont été étudiées : les communications avec sémantique de données indépendantes et celles avec sémantique de données communes. Ils prouvent que, même pour des sous-problèmes spécifiques, c'est-à-dire l'ordonnancement des graphes généraux sur deux processeurs et l'ordonnancement des arborescences binaires sur une infinité de processeurs, la minimisation de la durée d'ordonnancement pour les programmes parallèles dans un tel système multiprocesseur est \mathcal{NP} -difficile. Ces résultats ont été établis d'abord pour le cas de capacité 1 (le cas du système avec bus unique), puis étendus au cas général de capacité fixe.

Ordonnancement dynamique. Le problème de l'ordonnancement dynamique suscite de plus en plus d'intérêt dans la communauté du parallélisme. Dans ce problème, les graphes de tâches utilisés pour représenter les programmes parallèles sont connus au fur et à mesure de l'exécution de ces derniers. Z. Liu [264] a étudié un problème d'ordonnancement où le graphe de tâches est généré d'une manière aléatoire. Il a étendu son résultat de l'année dernière et a obtenu des algorithmes simples et optimaux pour le cas où le graphe de tâche est une arborescence. D'autres extensions sont en cours d'étude en collaboration avec R. Righter.

3.2.2 Algèbre (max,+)

Participants : François Baccelli, Alain Jean-Marie, Jean Mairesse

Mots-clés : processus stochastique, algèbre (max,+), réseau de Petri, réseau de file d'attente.

Stabilité. Dans [234] F. Baccelli, S. Foss et J. Mairesse ont étudié les réseaux de Jackson généralisés. Diverses propriétés contre-intuitives ont été mises en évidence, comme l'existence de plusieurs régimes stationnaires, même dans le cas ouvert, la non-monotonie des débits asymptotiques en fonction de la population dans le cas fermé, ou encore la non-concavité de ces débits. Plusieurs nouveaux résultats fondés sur la théorie ergodique prolongeant ceux obtenus en 1994 sont présentés. Une nouvelle méthode de construction et de représentation des régimes stationnaires est aussi proposée.

Graphes d'événements avec des entrées de Poisson. F. Baccelli poursuit les travaux sur les graphes d'événements ouverts avec des entrées Poisson en collaboration avec V. Schmidt et S. Hasenfuss, de l'université d'Ulm (Allemagne). Les résultats récents portent sur le calcul de développement de Taylor des moyennes de fonctions quelconques des variables d'état, tant dans le cas stationnaire que dans le cas transitoire. Comme cas particuliers, les moments d'ordre quelconque, les transformées de Laplace

et les queues des distributions ont été particulièrement étudiés [258]. Par ailleurs, les restes des développements ont pu être analysés, suite à la mise en évidence de nouvelles propriétés combinatoires des polynômes qui sont à la base de ces représentations [252]. Le premier article de cette série vient de paraître: F. Baccelli et V. Schmidt, « Taylor Expansions for Poisson Driven (max, +)-Linear Systems », *Annals of Applied Probability*, Vol. 6 N. 1, pp. 138-185, 1996.

Une étude analytique des systèmes à événements discrets de type (max,+) dont les services sont déterministes (ou connus) et les arrivées poissonniennes, a aussi été menée par A. Jean-Marie. Les résultats permettent de calculer les distributions transitoires du temps d'attente de ces systèmes, et les distributions stationnaires quand les services sont asymptotiquement périodiques. Les applications incluent les graphes d'événements déterministes avec source poissonnienne, ainsi que certains réseaux de files d'attente avec des services et cycliques [261].

Réseaux à choix libres. En collaboration avec B. Gaujal (SLOOP), F. Baccelli a continué le travail initialisé sur les réseaux à choix libre. La condition de vivacité de ces réseaux (théorèmes de Commoner) a été établie directement à partir du formalisme algébrique, et une caractérisation algébrique du nombre total de tir des transitions a été mise en évidence [257]. Un article de synthèse sur ce sujet vient de paraître : F. Baccelli, S. Foss et B. Gaujal, « Free Choice Petri Nets, an Algebraic Approach », *IEEE Aut. Cont.*, Vol. 41 N. 12, Déc. 1996.

3.2.3 Théorie des jeux et contrôle

Participants : Eitan Altman, Philippe Nain

Mots-clés : jeu stochastique, contrôles de files d'attentes, contrôle hybride, contrôle de processus markoviens.

Jeux stochastique. Les jeux stochastiques non-coopératifs avec plusieurs critères ont été étudiés par E. Altman dans [247] et [248]. Dans [247], il s'agit de jeux à somme nulle où le critère est la somme de plusieurs coûts, chacun ayant un facteur d'actualisation propre. Outre les algorithmes permettant de résoudre le problème, les conditions nécessaires et suffisantes d'optimalité sont établies. Dans [248], le cas où plusieurs joueurs ont chacun plusieurs fonctions de coûts (coûts actualisés ou coûts moyens) est aussi considéré. L'objectif de chaque joueur est de minimiser une de ses fonctions de coût, sous des contraintes sur les valeurs de ses autres fonctions. Des conditions suffisantes sont proposées pour l'existence d'un équilibre parmi les politiques stationnaires, par réduction du problème à celui de plusieurs programmes linéaires couplés.

Contrôle de files d'attentes. Dans [232], E. Altman et P. Nain étudient le problème du contrôle des vacations d'un serveur. Des paquets arrivent à une file d'attente et sont servis par un serveur exponentiel. Quand la file se vide, le serveur part en vacance. A chaque retour de vacance, le serveur peut choisir, selon l'état (et l'histoire) de la file d'attente, de procéder soit à une nouvelle vacance, soit à une nouvelle période d'activité. La politique optimale minimisant la somme pondérée du nombre moyen de paquets dans la file et des coûts de redémarrage est établie.

Contrôle des systèmes stochastiques hybrides. Dans [241], E. Altman étudie des systèmes stochastiques hybrides en temps continu dans un intervalle de temps fini, dans le cas de coûts non-linéaires de l'espérance de la trajectoire. La dynamique de l'état est non-linéaire, et les paramètres qui déterminent la dynamique varient selon un processus markovien de saut contrôlé. Des contrôleurs qui sont optimaux asymptotiquement (quand le nombre de sauts devient grand) sont obtenus en étudiant le contrôle d'un système déterministe limite. Une autre classe de modèles hybrides est étudiée dans [245, 246]. Il s'agit de contrôle quadratique linéaire où les paramètres qui déterminent la dynamique et le coût varient selon un processus de saut markovien contrôlé. Plusieurs méthodes de résolution de ce problème sont proposées : des schémas itératifs, ainsi qu'une programmation quadratique (avec un nombre fini

de variables). Les résultats sont appliqués aux problèmes de contrôle d'admission et de débit dans les réseaux de télécommunications.

La théorie du contrôle sous contraintes. Dans [230], E. Altman étudie le comportement des processus de décision markoviens sous contraintes en fonction du facteur d'actualisation. Dans le cas d'espaces d'états et d'actions finis, la valeur est une fonction analytique par morceaux du facteur d'actualisation, sur l'intervalle $[0,1)$, et il existe un développement de la valeur en série de Laurent. Les questions de continuité et de robustesse du problèmes d'optimisation sous contraintes sont étudiées dans [265]. Les conditions nécessaires et suffisantes de continuité des solutions optimales et des valeurs sont établies. Ces résultats sont appliqués au contrôle de processus de Markov contrôlés sous contraintes.

3.2.4 Théorème de la limite centrale

Participant : Konstantin Tchoumatchenko

Mots-clés : théorème central limite, distributions lissées.

Dans [240], K. Tchoumatchenko montre que sous l'hypothèse du théorème de la limite centrale, la convergence dans L_1 des densités lissées pour une certaine classe de distributions implique que le support de la densité lissante est borné.

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

Participant : Alain Jean-Marie, Héry Rakotoarisoa

3.3.1 Outils d'analyse de systèmes à événements discrets

Participant : Alain Jean-Marie

L'environnement de modélisation ERS a été enrichi de modules analytiques basés sur l'analyse des systèmes déterministes à arrivées Poisson (voir §3.2.2).

Le développement de modules de résolution analytique basés sur les travaux de Baccelli, Hasenfuss et Schmidt, a été entrepris en commun avec l'université d'Ulm (Allemagne). L'environnement ERS y a été installé à cet effet.

3.3.2 Simulation équationnelle et distribuée

Participant : Alain Jean-Marie

Partage de charge. Le développement d'un outil générique de partage de charge, support des simulations équationnelles distribuées, a été poursuivi. Cet outil, DCAO (Distributed Computation of Associative Operations), se présente comme une bibliothèque de fonctions facilement connectable à une application séquentielle adéquate. Les algorithmes de partage de charge disponibles sont en cours d'optimisation.

Simulation équationnelle de réseaux de Petri. Un simulateur séquentiel pour réseaux de Petri en temps discret a été adjoint à l'environnement ERS. En collaboration avec Bruno Gaujal et Günther Siegel (projet SLOOP), ce simulateur a ensuite été modifié afin de permettre des simulations *mixtes* équationnelles et conventionnelles, en utilisant l'environnement PROSIT. Cette technique doit permettre de profiter à la fois de la grande rapidité de la simulation équationnelle et de la flexibilité de la programmation PROSIT.

La faisabilité de cette opération, et son intérêt du point de la vitesse de simulation, ont été prouvés sur un modèle simple de commutateur ATM [254]. La distribution de cette simulation mixte devrait permettre de mettre en œuvre des simulations de réseaux ATM de grande taille. Des premières expériences confirmant cette idée ont été effectuées.

3.3.3 Simulateur ARC

Participant : Héry Rakotoarisoa

Le simulateur ARC (Architecture de Réseaux de Communication), développé dans le cadre de la convention de recherche CNET-INRIA CTI 94 1B 104, est un prototype destiné à l'étude et l'optimisation de grands réseaux de communications. L'évaluation et l'optimisation des différentes grandeurs caractéristiques d'un tel réseau se basent sur le calcul des moyennes de diverses fonctionnelles des processus ponctuels représentant les stations et les abonnés, et de leurs gradients par rapport à certains paramètres du modèle. L'estimation des gradients utilise une généralisation de la technique dite d'analyse de perturbations de processus ponctuels (ou « Rare Perturbation Analysis ») décrite dans l'article de F. Baccelli, M. Klein, S. Zuyev « Perturbation analysis of functionals of random measure », *Adv. Appl. Probab.*, 1995. On peut citer comme exemples de grandeurs à évaluer les caractéristiques géométriques des zones de desserte d'un commutateur (surface, longueur de la frontière, etc.), et comme exemple d'optimisation le calcul de l'intensité du processus ponctuel correspondant à un niveau hiérarchique donné pour minimiser le coût global de raccordement dans le réseau.

Le prototype ARC a été réalisé en collaboration avec Pascal Desnoguès du projet PRISME, notamment pour la partie stockage et manipulation des éléments du modèle, utilisant la construction aléatoire de l'arbre de Delaunay décrite dans l'article de J.D. Boissonnat, et M. Teillaud, « On the Randomized Construction of the Delaunay Tree », *Theoretical Computer Science* **112**, pp. 339-354, 1993. Son interface graphique est basée sur la bibliothèque de structures de données géométriques LEDA (S. Nabel, « The LEDA User Manual - Version 3.1 », Max-Planck-Institut für Informatik - 66123 Saarbrücken, Allemagne), à la construction de laquelle collabore le projet PRISME.

Le simulateur ARC est maintenant utilisé par le CNET.

4 Actions industrielles

4.1 Coopération avec le CNET-Issy

Participants : François Baccelli, Héry Rakotoarisoa, Konstantin Tchoumatchenko, Sergueï Zuyev

Mots-clés : géométrie aléatoire, processus ponctuel.

Cette convention de recherche (CNET-INRIA CTI 94 1B 104) avec le CNET Issy-les-Moulineaux (Maurice Klein, ATR), entre dans sa troisième année. Une collaboration avec la direction de la stratégie et du plan de France Télécom (Marc Lebourges) a permis de poser et de résoudre partiellement certains problèmes d'optimisation économique dans le cadre des modèles proposés dans la convention. Un article de synthèse sur les activités des deux premières années est paru dans les *Annales des Télécommunications* [235].

4.2 Coopération avec le CNET-Sophia

Participants : Philippe Nain, Eitan Altman, Omar Ait-Hellal

Mots-clés : réseau à haut débit.

Cette convention de recherche (CTI) avec le CNET, en cours de signature, porte sur le thème « Performance et contrôle des réseaux multimédias ». Omar Ait-Hellal sera financé par cette CTI. Nous allons travailler en particulier sur le contrôle de trafic dans les réseaux ATM et sur l'Internet.

4.3 Coopération avec EDF

Participants : François Baccelli, Alain Jean-Marie, Jörn Miggé

Dans le cadre d'une convention conclue avec EDF, les études sur les systèmes temps-réel à priorités se sont poursuivies. La méthode basée sur les *fonctions d'arrivée de travail* a été étendue pour permettre de calculer des bornes sur le temps de réponse dans le cas de tâches cycliques avec contraintes de déphasage, et dans le cas où l'activité des tâches est gouvernée par l'arrivée de messages passant dans un tampon. Cette méthode a également été utilisée pour trouver des bornes *stochastiques* sur les temps de réponse de tâches. Il s'avère en effet que les bornes déterministes sont en général éloignées du comportement « typique » observé, ce qui motive une analyse stochastique du problème.

4.4 Collaboration avec ASCOM SRL

Participant : Damien Artiges

Une collaboration avec ASCOM Sophia Research Lab (SRL) a été établie, sous la forme de la bourse post-doctorale industrielle de Damien Artiges. Le laboratoire ASCOM SRL étudie les problèmes de gestion des réseaux, et le travail de Damien Artiges porte en particulier sur la gestion de la comptabilité dans les réseaux ATM. Les principaux problèmes rencontrés dans ce domaine sont : l'évaluation des ressources consommées par un trafic donné, le lien avec un algorithme de CAC (Call Admission Control), la définition d'une bonne politique de tarification, l'architecture du système de gestion. Ce travail sur la gestion de la comptabilité dans ATM s'inscrit dans le cadre d'une participation de ASCOM SRL au projet de recherche européen CASHMAN (ACTS project AC-039). Dans le cadre de ce projet, la contribution de ASCOM SRL est le développement d'une MIB (Management Information Base) et d'un agent CMIP (Common Management Information Protocol) pour la plate-forme de gestion expérimentale du projet. En outre, une proposition d'architecture de réseau de gestion pour la comptabilité dans ATM selon le modèle TMN (Telecommunications Management Network) de l'ITU-T a été définie dans [249].

5 Actions nationales et internationales

5.1 Actions nationales

5.1.1 PRS

MISTRAL est partenaire du PRC PRS (Parallélisme, Réseaux et Systèmes) à deux titres :

A. Jean-Marie est le responsable du thème « Évaluation Quantitative de PRS ». Z. Liu et L. Finta participent au thème « Ordonnancement pour le Parallélisme », qui a pour but le développement d'algorithmes d'ordonnancement.

5.1.2 TROPICAL

MISTRAL participe au PRC sur les algèbres tropicales animé par S. Gaubert. Deux exposés du projet ont déjà été présentés dans ce cadre.

5.2 Actions européennes

5.2.1 Alapedes

Le projet Mistral est partenaire du projet TMR ALAPEDES (Algebraic Approach for Discrete Event Systems), avec l'Inria Rocquencourt (Meta2), HP labs de Bristol (Grande-Bretagne), le LITP, l'université de Delft (Pays-Bas), le laboratoire de l'École des Mines de Fontainebleau, l'université de Groningen (Pays-Bas), l'université de Liège (Belgique). Ce projet, qui vient de commencer en octobre 1996, porte sur $(\max, +)$ et ses extensions. F. Baccelli en est le responsable scientifique pour Sophia. L'embauche d'un Post-Doc est prévue sur trois ans.

5.2.2 PEPS

Le projet Mistral a participé au projet ESPRIT III PEPS (Performance Evaluation of Parallel Systems) comme contractant associé de Simulog. Les autres partenaires du projet PEPS étaient Thomson Sintra, INTECS Systemi, l'université de Warwick (Grande-Bretagne), National Physics Laboratory (Grande-Bretagne). Zhen Liu en était le responsable scientifique du côté Inria.

Les objectifs du projet étaient de développer des techniques et outils pour prédire les performances des applications software sur 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 pour la modélisation, la caractérisation et le « monitoring » des systèmes parallèles pour quelques machines parallèles européennes.

Le projet a duré trois ans et demi et s'est conclu en mars 1996. Dans ce cadre, l'Inria a développé en particulier une méthode d'analyse de performances des applications parallèles avec structure de communication type maître-esclaves. Une approche hybride a été proposée pour calculer le temps de réponse de telles applications sur les machines parallèles où les processeurs sont connectés selon une grille. Cette approche consiste à d'abord calculer avec des équations récursives les temps de communication entre le maître et les esclaves. Ces temps de communications ainsi que les temps de traitement des processus esclaves sont ensuite utilisés comme les paramètres temporels d'un graphe série-parallèle représentant la structure de l'application parallèle, pour laquelle on peut calculer analytiquement le temps de réponse. Cette méthode a été implémentée et intégrée dans PEPS-tool. Les résultats numériques ont été obtenus et comparés avec des mesures pour une application financière sur une machine de Parsytec avec un protocole de communication *Store-and-forward*.

5.2.3 Projet INTAS

Participants : François Baccelli, Jean Mairesse

Le projet INTAS dans lequel collaborent deux laboratoires russes (l'université de Novosibirsk et l'IPIT à Moscou) et quatre laboratoires d'Europe de l'Ouest (CWI (Pays-Bas), universités de Cambridge (Grande-Bretagne) et de Braunschweig (Allemagne), INRIA) vient d'être prolongé de deux ans. F. Baccelli et S. Foss en sont les coordinateurs. Les travaux ont porté sur la stabilité stochastique de systèmes à événements discrets (avec S. Foss) et sur l'analyse de grands systèmes (avec A. Borovkov).

5.2.4 Projet PROCOPE

Participant : François Baccelli

Le projet Procope avec l'Allemagne se termine fin 96. 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, et plus particulièrement sur l'analyse de perturbation de systèmes (max, +)-linéaires.

5.3 Actions internationales

5.3.1 Coopération avec l'Israël

Participant : Eitan Altman

Cette coopération sur les autoroutes de l'information porte sur l'analyse des performances et l'administration des réseaux à haut débit. Ce projet de deux ans est en collaboration avec le département réseaux de l'E.N.S.T. (Paris) et ASCOM Sophia-Antipolis, sous la responsabilité de Samir Tohmé. Du côté israélien les participants sont le Prof. U. Yechiali (responsable) de l'université de Tel-Aviv et les Dr. N. Shimkin et A. Orda du Technion. Ce projet commence le Déc. 1996. Les recherches porteront sur la gestion et l'allocation des ressources et du trafic dans les réseaux ATM et l'Internet.

5.3.2 Séjours

E. Altman a séjourné 4 semaines à l'université de Tel-Aviv et au Technion, (Israël), département de Recherche Opérationnelle, mai 1996, 2 semaines à l'université de l'Illinois (USA) au Coordinated Science Laboratory, College of Engineering. Il a aussi séjourné à l'E.N.S.T. Paris, département réseaux, et à l'École Polytechnique, Dépt. de Génie Électrique et de Génie Informatique, Montréal, (Canada).

F. Baccelli a séjourné à l'université d'Ulm (Allemagne), département de mathématiques, et à l'université du Colorado (USA), département de statistiques.

A. Jean-Marie a séjourné à l'université Nationale de Rosario, (Argentine), du 01/10/96 au 24/11/96.

Z. Liu a séjourné à BELL LABS, Innovations for Lucent Technologies (USA), du 03/09/96 au 01/11/96.

P. Nain a séjourné à l'univ. du Massachusetts (USA), dépt. d'informatique, du 01/07/96 au 31/08/96, et à l'École Polytechnique de Montréal (Canada), en mai 1996.

5.4 Organisation de séminaires

Dans le cadre des séminaires du projet MISTRAL: « Modélisation et évaluation de performances », organisés par Z. Liu, une trentaine de scientifiques nationaux et internationaux sont intervenus cette année.

Un séminaire sur la modélisation des systèmes multiprocesseurs a été organisé par F. Baccelli et O. Boxma dans le cadre du groupe de travail WG7.3 de l'IFIP à Lausanne (Suisse), en octobre 1996. Parmi les orateurs, on comptait I. Mitrani, V. Schmidt, T. Ott, B. Ycart, W. Sanders, J.Y. Le Boudec.

F. Baccelli a participé à l'organisation d'une conférence du groupe MAS (Modélisation Aléatoire et Statistique) de la SMAI, qui a eu lieu en septembre à Toulouse.

5.5 Visiteurs de courte durée

Le projet a accueilli:

Tamer Basar (25/7/96 – 11/8/96), Jacek Blazewicz (18/01/96 – 21/01/96), Alexander Borovkov (12/10/96 – 19/10/96), David McDonald (08/09/96 – 22/09/96), Berndt Heidergott (30/09/96 –

01/10/96), Daniel Kofman (25/08/96 – 31/08/96), Irina Kourkova (28/08/96), Guenter Last (02/11/96 – 09/11/96), Anatolii Pukhalski (27/10/96 – 02/11/96), Alexandre Rybko (02/11/96 – 09/11/96), Volker Schmidt (19/08/96 – 23/08/96), Yutaka Takahashi (24/11/95), Vincent de Valk (29/08/96 – 07/09/96), Uri Yechiali (09/04/96 – 12/04/96), Bernard Ycart (26/01/96).

5.6 Visiteurs de longue durée

Le projet a accueilli:

Arie Hordijk depuis le 03/09/96 pour une durée de 6 mois, Nahum Shimkin (12/08/96–12/9/96), Wojciech Szpankowski (27/05/96–19/07/96), Rhonda Righter (01/04/96–30/06/96), Don Towsley (28/01/96–03/02/96) et (05-09/96–31/12/96 en collaboration avec le projet Rodeo), Zhi-Li Zhang (01/12/96–22/12/96).

6 Diffusion des résultats

6.1 Formation

6.1.1 Enseignement universitaire

ESSI, (UNSA) Cours de modélisation des systèmes informatiques, 3ème année (P. Nain, 30h).

DEA/DESS, UNSA Cours sur l'optimisation de la qualité de service dans les RNIS, DEA Réseaux et systèmes distribués (Z. Liu, P. Nain, 24H). Cours sur les Réseaux Locaux, DEA Réseaux et systèmes distribués (E. Altman, G. Koole, 24H).

PARIS 6 Cours de modèles stochastiques des réseaux de communication, DEA d'Informatique et recherche opérationnelle (Z. Liu et P. Nain, 24h). Cours de DEA sur les systèmes à événements discrets (F. Baccelli et P. Brémaud 30h), DEA de probabilités.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE Cours de mineure de modélisation aléatoire, dans le cadre de la Maieure SCS (F. Baccelli et P. Brémaud, 30h). F. Baccelli est maître de conférences dans le département de mathématiques appliquées.

UNR (université Nationale de Rosario, Argentine) cours d'évaluation de performances appliquées (A. Jean-Marie, 40h).

6.1.2 Thèses

- Le projet est équipé d'accueil des formations doctorales : DEA modélisation aléatoire, DEA probabilités (École Polytechnique), DEA informatique (UNSA), DEA informatique et recherche opérationnelle (université Paris VI), DEA réseaux et systèmes distribués (UNSA).
- Deux thèses ont été soutenues dans le projet :
 1. D. Artiges « Contrôle et évaluation des réseaux de télécommunications » (UNSA, 9 février 1996).
 2. L. Finta, « Ordonnancement dans les systèmes multiprocesseurs » (UNSA, 19 janvier 1996).
- Les thèses suivantes sont en cours dans le projet :
 1. O. Ait-Hellal « Contrôle de flux dans les réseaux à haut débit », UNSA.
 2. T. Bonald « Contrôle de flux à fenêtre : stabilité et performances », École Polytechnique.
 3. J. Migge « Études de systèmes à événements discrets », UNSA.

4. N. Niclausse « Modélisation, analyse de performances et dimensionnement du WWW », UNSA.
 5. J. Talim « Analyse des performances et contrôle d'admission pour réseaux multimédia », UNSA.
 6. K. Tchoumatchenko « Modélisation stochastique des réseaux mobiles », UNSA.
- Les membres du projet ont participé aux jurys des thèses suivantes :
1. D. Artiges, UNSA (E. Altman, membre du jury, P. Nain, directeur de thèse).
 2. L. Finta, UNSA (Z. Liu, directeur de thèse).
 3. V. Dumas, École Polytechnique (F. Baccelli membre du jury).
 4. M. Brilman, IMAG (F. Baccelli rapporteur).
 5. J. Guibert, Paris 6, Labo de probabilités (F. Baccelli directeur).
 6. S. Halberstadt, ENST (P. Nain, rapporteur).

6.1.3 Stages

- T. Bonald, « Étude d'un modèle de contrôle de flux : stabilité et performances » (stage de DEA et stage EURECOM) (01/03/96–31/08/96).
- M. Erramdani, « Évaluation de performances de protocoles de transports sur l'Internet » (coopération Franco-Marocaine), (15/11/96 – 15/01/97).
- D. El Ouadghiri, « Évaluation de performances de protocoles de transports sur l'Internet » (coopération Franco-Marocaine), (12/11/96 – 12/01/97).

6.2 Conférences

6.2.1 Conférences invitées, séminaires

E. Altman : « Columbia Workshop on Telecommunications » (New York, USA, mars, 1996), « 35th IEEE Conference on Decision and Control » (Kobe, Japon, déc. 1996), « 7th International Symposium on Dynamic Games and Applications » (Kanagawa, Japon, déc. 1996).

D. Artiges : Exposé à l'ENST, Paris (17 janvier 1996) et à l'IEE Colloquium « Charging for ATM » (Londres, Grande-Bretagne, 12 nov. 1996).

F. Baccelli : Conférence plénière à la CDC (Nouvelle Orléans, USA, déc. 1995). Conférence invitée au Séminaire Irisa, au Workshop AMS sur les modèles stochastiques en productique (Williamsburgh, USA, juin 1996) et au Séminaire EPFL-Berkeley sur le Multimedia Networking (Lausanne, Suisse, juil. 1996). Tutorial sur la modélisation des architectures parallèles à Europar 96 (ENS Lyon). Conférences à l'université Paris 6 dans le cadre du groupe de travail tropical, à l'université d'Ulm (Allemagne), à l'École des Mines de Paris dans le cadre du groupement C2A et à l'université du Colorado (USA).

A. Jean-Marie : « 8ème Atelier d'évaluation de performances » (Versailles, nov. 96).

Z. Liu : « Workshop on Scheduling in Parallel and Distributed Systems » (Marseille, juin 1996).

P. Nain : « 28ème Journées de statistique » (univ. de Laval, Québec, mai 1996).

K. Tchoumatchenko : Réunions de CTI (CNET Issy les Moulineaux, janvier, mars, mai 96), séminaire du groupe de probabilités à l'université de Novosibirsk (Russie, sept. 96).

S. Zuyev : Visite à l'université de Moscou, séminaire à l'ENST, Paris (mai 1996), réunion des CTI, CNET, Paris (janv, mars, mai 1996) et séminaires META2 (Rocquencourt, janvier, mars 96), « Séminaire Européen de Statistique » (Toulouse, mai 1996), « Journées MAS » (Toulouse, sept. 1996).

6.2.2 Présentations à des conférences

E. Altman : « ITC Seminar on Available Bit Rate Services over ATM and Related Issues » (Montréal, Canada, 26 avr. 1996), « 1996 Conference on Information Sciences and Systems » (Princeton, NJ, USA, 1996).

D. Artiges : « PERFORMANCE'96 » (Lausanne, Suisse, oct. 1996), « 35th IEEE CDC » (Kobe, Japon, déc. 1996).

F. Baccelli : « 34th IEEE Conf. on Decision and Control » (New Orleans, USA, déc. 1995).

Z. Liu : « INFOCOM'96 » (San Francisco, USA, janv. 1996).

P. Nain : « 34th IEEE Conf. on Decision and Control » (New Orleans, USA, déc. 1995), « INFOCOM'96 » (San Francisco, USA, mars 1996).

S. Zuyev : « 4ème conférence INFORMS » (Nashville, USA, mars 1996), « workshop MMT'96 » (ENST, mai 96), colloque international « Avancées de la théorie et des applications des ensembles aléatoires » (Fontainebleau, oct. 1996).

6.2.3 Participations à des comités de lecture

F. Baccelli : Journaux : Annals of Applied Probability, Queuing Systems, Zeitschrift für Operations Research, Mathematics of Operations Research, Journal of Dynamic Discrete Event Systems.

P. Nain : Membre du comité de programme de CDC'95 et organisateur d'une session aux Journées MAS (Toulouse, sept. 1996)

7 Publications

Thèses

[228] D. ARTIGES, *Contrôle et évaluation des réseaux de télécommunications*, thèse de doctorat, UNSA, Nice, France, février 1996, (<http://www.inria.fr/mistral/personnel/Damien.Artiges/these.html>).

[229] L. FINTA, *Ordonnement dans les Systèmes Multiprocesseurs*, thèse de doctorat, UNSA, Nice, France, janvier 1996.

Articles et chapitres de livre

[230] E. ALTMAN, A. HORDIJK, L. KALLENBERG, «On the value in constrained control of Markov chains», *ZOR - Methods and Models in Operations Research*, 1996, parution prévue en 96.

[231] E. ALTMAN, Z. LIU, «Improving the Stability Characteristics of Asynchronous Traffic in FDDI Token Ring», *Performance Evaluation* 26, 1996, p. 219–234.

[232] E. ALTMAN, P. NAIN, «Optimality of a Threshold Policy in the M/M/1 Queue with Repeated Vacations», *ZOR - Mathematical Methods of Operations Research* 44, Issue 2, 1996, p. 75–96.

[233] D. ARTIGES, P. NAIN, «Upper and Lower Bounds for the Multiplexing of Multiclass Markovian On/Off Sources», *Performance Evaluation* 27&28, octobre 1996, p. 673–698.

[234] F. BACCELLI, S. FOSS, J. MAIRESSE, «Stationary Ergodic Jackson Network», *in: Oxford University Press*, F. Kelly (éd.), 1996, p. 281–307.

[235] F. BACCELLI, M. KLEIN, M. LEBOURGES, S. ZUYEV, «Géométrie aléatoire et architecture de réseaux de communications», *Annales des Télécommunications* 51, 1996, p. 158–179.

[236] F. BACCELLI, S. ZUYEV, «Stochastic geometry models of mobile communication networks», *in: Frontiers in queueing. Models, Methods and Problems*, J. Dshalalow (éd.), CRC Press, 1996, ch. 7.

- [237] L. FINTA, Z. LIU, I. MILIS, E. BAMPIS, «Scheduling UET-UCT Series-Parallel Graphs on Two Processors», *Theoretical Computer Science* 162, juillet 1996, p. 323–340, special issue on Parallelism and Irregularly Structured Problems.
- [238] L. FINTA, Z. LIU, «Single Machine Scheduling Subject to Precedence Delays», *Discrete Applied Mathematics*, 1996, INRIA RR–2198.
- [239] Z. LIU, T. Y. SUNG, «Routing and Transmitting Problems in de Bruijn Networks», *IEEE Trans. on Computers* 45, septembre 1996, p. 1056–1062.
- [240] A. SAKHANENKO, K. CHUMACHENKO, «On conditions for convergence of the densities of smoothed distributions in the Central Limit Theorem», *Siberian Mathematical Journal* 33, 1996.
- [241] P. SHI, V. GAITSGORY, E. ALTMAN, «Optimization for A Class of Nonlinear Stochastic Hybrid Systems», *Mathematics of Operations Research*, 1996, parution prévue en 96.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [242] O. AIT-HELLAL, E. ALTMAN, T. BASAR, «Rate based flow control with bandwidth information», in : *35th IEEE Conference on Decision and Control*, Kobe, Japon, décembre 1996.
- [243] O. AIT-HELLAL, E. ALTMAN, «Evaluation of TCP-Vegas: Analytic Approach and Comparison to TCP-Reno», in : *JDIR'96 – Journées Doctorales Informatique & Réseaux*, p. 7.1–7.6, ENST, Paris, septembre 1996.
- [244] O. AIT-HELLAL, E. ALTMAN, «Problems in TCP Vegas and TCP Reno», in : *DNAC Congress – De Nouvelles Architectures pour les Communications*, UVSQ, Paris, décembre 1996.
- [245] E. ALTMAN, T. BASAR, Z. PAN, «Admission and flow control in telecommunication networks as a hybrid control problem», in : *Proc. 1996 Conference on Information Sciences and Systems, II*, p. 705–710, Princeton, NJ, 1996.
- [246] E. ALTMAN, T. BASAR, Z. PAN, «Piecewise–Deterministic Differential Games with Hybrid Controls», in : *7th International Symposium on Dynamic Games and Applications*, Kanagawa, Japon, décembre 1996.
- [247] E. ALTMAN, E. FEINBERG, A. SHWARTZ, «Weighted discounted stochastic games with perfect information», in : *7th International Symposium on Dynamic Games and Applications*, Kanagawa, Japon, décembre 1996. invited paper.
- [248] E. ALTMAN, A. SHWARTZ, «Constrained Markov Games: Nash Equilibria», in : *7th International Symposium on Dynamic Games and Applications*, Kanagawa, Japon, décembre 1996. invited paper.
- [249] D. ARTIGES, K. TRAORE, «TMN Based Accounting Management Architecture», in : *IEE Colloquium on Charging for ATM*, London, UK, novembre 1996.
- [250] D. ARTIGES, «Analysis of the ARB (Adaptive Rate Based) Congestion Avoidance Algorithm», in : *35nd IEEE Conference on Decision and Control*, Kobe, Japon, décembre 1996.
- [251] F. BACCELLI, S. FOSS, B. GAUJAL, «Free Choice Nets, the Algebraic Approach», in : *34th IEEE Conference on Decision and Control*, New Orleans, USA, décembre 1995.
- [252] F. BACCELLI, S. HASENFUSS, V. SCHMIDT, «Expansions for Steady-State Characteristics in $(\max, +)$ –Linear Systems», in : *26th AMS–SIAM Summer Seminar in Applied, Mathematics of Stochastic Manufacturing Systems*, Williamsburg, Virginia, USA, juin 1996. Rapport INRIA N0. 2785, soumis à IEEE Automatic Control.
- [253] F. BACCELLI, S. ZUYEV, «Poisson-Voronoi Spanning Trees with Applications to the Optimization of Communication Networks», in : *UCBerkeley–EPFL Workshop on Multimedia Networking*, Lausanne–Suisse, juillet 1996. Rapport INRIA 3040, soumis à Operations Research.
- [254] B. GAUJAL, A. JEAN-MARIE, P. MUSSI, G. SIEGEL, «High Speed Simulation of Discrete Event Systems by Mixing Process Oriented and Equational Approaches», in : *Environments and Tools for Parallel Scientific Computing*, Lyon–France, août 1996.

- [255] Z. LIU, P. NAIN, D. TOWSLEY, «Bounds on Finite Horizon QoS Metrics with Application to Call Admission», in : *Proc. INFOCOM '96*, San Francisco, USA, mars 1996.
- [256] Z. PAN, E. ALTMAN, T. BASAR, «Robust Adaptive Flow Control in High Speed Telecommunication Networks», in : *35th IEEE Conference on Decision and Control*, Kobe, Japon, décembre 1996.

Rapports de recherche et publications internes

- [257] F. BACCELLI, B. GAUJAL, «Liveness in Free-Choice Petri Nets, An Algebraic Approach», *RR n°2839*, INRIA, 1996.
- [258] F. BACCELLI, S. HASENFUSS, V. SCHMIDT, «Transient and Stationary Waiting Times in $(\max, +)$ -Linear Systems with Poisson Input», *RR n°3022*, INRIA, 1996, soumis à QUESTA.
- [259] T. BONALD, *Etude d'un modèle de contrôle de flux : Stabilité et Performances*, Rapport de stage, UNSA, août 1996, Dea, Réseaux et Systèmes Distribués.
- [260] L. FINTA, Z. LIU, «Complexity of Task Graph Scheduling with Fixed Communication Capacity», *RR n°2959*, INRIA, 1996.
- [261] A. JEAN-MARIE, «On Poisson-Driven Deterministic Systems», *RR n°0000*, INRIA, 1996.
- [262] Z. LIU, P. NAIN, D. TOWSLEY, «Exponential Bounds with Applications to Call Admission», *RR n°2865*, INRIA, Sophia Antipolis, 1996.
- [263] Z. LIU, R. RIGHTER, «The Impact of Cell Dropping Policies in ATM Networks», *RR n°3047*, INRIA, 1996.
- [264] Z. LIU, «Dynamic Scheduling of Parallel Computations», *RR n°3048*, INRIA, 1996.
- [265] M. TIDBALL, E. ALTMAN, «Robustness of convex optimization with applications to controlled Markov chains», *RR n°2933*, INRIA, 1996, soumis à SIAM.
- [266] S. ZUYEV, P. DESNOGUES, H. RAKOTOARISOA, «Simulations of large telecommunication networks based on probabilistic modeling», *RR n°2787*, INRIA, janvier 1996.

Divers

- [267] K. TCHOUMATCHENKO, S. ZUYEV, «A note on Economic Utility», Document de travail, juin 1996.

8 Abstract

The MISTRAL project is devoted to the elaboration and the analysis of mathematical models for performance evaluation of communication systems and of parallel and distributed systems. The research of the project focuses on two main formalisms: queueing networks and Petri nets. Two complementary approaches are used: the development of (stochastic) mathematical models, and simulation. The research consists of analytical and probabilistic studies of discrete event dynamic systems, scheduling and mapping studies in multiprocessor networks, and control and optimization problems in communication networks.

