

Projet MISTRAL

*Modélisation en Informatique et Systèmes de
Télécommunications*

Sophia Antipolis

THÈME 1B



*R*apport
*d'**A*ctivité

1999

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	4
3	Fondements scientifiques	5
4	Domaines d'applications	5
5	Logiciels	5
5.1	Environnement d'évaluation de performances	5
5.2	Modélisation de trafic Web et expérimentation des serveurs Web	6
6	Résultats nouveaux	6
6.1	Analyse quantitative des protocoles dans les réseaux	6
6.1.1	Contrôle de la congestion	6
6.1.2	Comparaison de TCP Reno et Vegas	7
6.1.3	Prévention de la congestion (RED)	7
6.1.4	IP multipoint	7
6.2	Analyse économique des réseaux	8
6.3	Qualité de service dans les réseaux	8
6.3.1	Contrôle d'admission	9
6.3.2	Services différenciés pour l'Internet	9
6.3.3	Estimation de la congestion	9
6.3.4	Codage redondant	10
6.3.5	Qualité de service et contrôle de flux	10
6.4	Modèle de trafic pour les réseaux	10
6.4.1	Modélisation du trafic d'accès aux serveurs Web	11
6.4.2	Impact de la mémoire longue sur les performances	11
6.5	Réseaux satellitaires et communications mobiles	11
6.5.1	Contrôle d'accès	11
6.6	Evaluation de performances des serveurs Web	12
6.6.1	Evaluation de performances des protocoles HTTP	12
6.6.2	Moteurs de recherche	12
6.7	Analyse des systèmes à événements discrets stochastiques	13
6.7.1	Calcul des exposants de Lyapunov dans l'algèbre $(\max, +)$	13
6.7.2	Propriété de contraction	13
6.7.3	Règle de saturation	14
6.7.4	Systèmes en dimension infinie	14
6.7.5	Réseaux de Jackson	15
6.8	Contrôle et théorie des jeux	15
6.8.1	Processus markoviens contrôlés	15
6.8.2	Contrôle de routage et de flux	16
6.8.3	Limites fluides dans les files d'attente	16

6.8.4	Contrôle et multimodularité	16
6.8.5	Systèmes linéaires quadratiques avec sauts	16
6.9	Ordonnancement	17
6.9.1	Ordonnancement des commutateurs	17
6.9.2	Ordonnancement des transmissions de paquets dans des canaux bruités .	17
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	17
7.1	CTI avec le CNET-Issy	17
7.2	CTI avec le CNET-Sophia	18
7.3	RNRT « Constellations »	18
7.4	INRIA NSF	18
7.5	Projet TMR Alapedes	18
7.6	Projet de l'Institut Lyapounov	18
7.7	Convention de recherche avec la Compagnie des Signaux	19
8	Actions régionales, nationales et internationales	19
8.1	Actions nationales	19
8.2	Actions financées par la Commission Européenne	19
8.3	Réseaux et groupes de travail internationaux	19
8.4	Relations bilatérales internationales	20
8.4.1	Méditerranée, Maghreb et Proche-Orient	20
8.4.2	Russie	20
8.4.3	Chine	20
8.4.4	Amérique du Nord	20
8.4.5	Amérique du Sud et Amérique Centrale	20
8.5	Visites, et invitations de chercheurs	20
9	Diffusion de résultats	21
9.1	Animation de la communauté scientifique	21
9.2	Enseignement universitaire	22
9.3	Participation à des colloques, séminaires, invitations	22
10	Bibliographie	23

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Philippe Nain [DR]

Responsable permanent

Zhen Liu [DR]

Assistante de projet

Ephie Deriche [TR, à temps partiel]

Personnel Inria

François Baccelli [DR (à l'ENS Paris)]

Eitan Altman [CR]

Alain Jean-Marie [DR, détaché à l'Univ. de Montpellier II depuis le 01/10/99]

Chercheurs Post doctorants

Konstantin Avratchenkov [depuis le 01/08/99]

Stefan Haar [Post-Doctorant TMR Alapedes à l'ENS, depuis 11/99]

James Martin [Post-Doctorant TMR Alapedes à l'ENS]

Nicolas Niclausse [depuis le 01/07/99]

Chercheurs doctorants

Sara Alouf [Bourse MESR]

Chadi Barakat [Bourse INRIA]

Thomas Bonald [Ingénieur du CNET, jusqu'au 08/99]

Dohy Hong [Doctorant AMX, École Polytechnique, à l'ENS Paris]

César Jalpa-Villanueva [Bourse de la coopération franco-mexicaine]

Mohamed Malouch [Bourse MESR]

Jörn Migge [Bourse INRIA jusqu'au 28/2/99]

Nicolas Niclausse [Bourse INRIA jusqu'au 30/06/99]

Konstantin Tchoumatchenko [Bourse INRIA, à l'ENS, jusqu'au 11/99]

Chercheurs invités

Rajeev Agrawal [University of Wisconsin, USA, du 20/05/99 au 06/06/99]

Tamer Basar [University of Illinois at Urbana, USA, du 05/03/99 au 22/03/99 et du 15/12/99 au 31/12/99]

Bartolomeij Blaszczyszyn [University of Wroclaw, Pologne, du 01/10/99 au 31/09/2000]

Nimrod Bayer [Ben-Gurion University, Israël, du 01/09/99 au 10/09/99]
Edward Coffman Jr. [Bell Labs, USA, du 08/02/99 au 12/02/99]
Sergueï Foss [University of Novosibirsk, Russie, du 15/09/99 au 17/10/99]
Eugene Feinberg [State University of New York, USA, du 01/08/99 au 08/08/99]
Vladimir Gaitsgory [University of South Australia, du 05/07/99 au 12/07/99]
Arie Hordijk [University of Leiden, Pays-Bas, du 22/02/99 au 19/03/99, du 25/10/99 au 30/10/99 et du 24/12/99 au 23/01/2000]
Hisao Kameda [University of Tsukuba, Japon, du 20/03/99 au 29/03/99]
Ger Koole [Vrije University of Amsterdam, Pays-Bas, du 09/08/99 au 30/08/99]
Takis Konstantopoulos [University of Texas, USA, du 09/10/99 au 16/10/99]
Irina Kurkova [Eurandom, Eindhoven, Pays-Bas, du 26/05/99 au 01/06/99]
Harold Kushner [Brown University, USA, du 28/02/99 au 23/03/99]
Edward Lee [University of Berkeley, USA, du 20/03/99 au 20/07/99]
Ronda Righter [Santa Clara University, USA, du 20/03/99 au 20/07/99]
Michael Shalmon [Université du Québec, Canada, du 14/06/99 au 26/06/99]
Flora Spieksma [University of Leiden, Pays-Bas, du 25/10/99 au 09/11/99]
Kavita Ramanan [Bell Labs, USA, du 26/06/99 au 04/07/99]
Rayadurgam Srikant [University of Illinois, USA, du 11/06/99 au 19/06/99]
Uri Yechiali [University of Tel Aviv, Israël, du 27/01/99 au 03/02/99 et du 01/09/99 au 31/12/99]

Stagiaires

Sara Alouf [UNSA, du 01/03/99 au 30/06/99]
Sylvain Barbier [IIE, Evry, du 01/04/99 au 30/06/99]
Sanjai Bhulay [Vrije University of Amsterdam, Pays-Bas, du 29/05/99 au 20/06/99]
Rachid Elazouzi [Université Mohammed V, Maroc, du 01/06/99 au 31/12/99]
Emmanuel Laborde [Université Pierre et Marie Curie, du 22/02/99 au 31/10/99]
Naceur Malouche [UNSA, du 01/03/99 au 01/09/99]
Magdalena Popescu [CSTB, Sophia Antipolis, du 19/04/99 au 15/10/99]
Victor Ramos Ramos [UNSA, depuis le 01/10/99]
Sekou Sidibe [INT, Evry, du 25/05/99 au 23/10/99]
Menno Van Drielen [Leiden University, Pays-Bas, du 28/09/98 au 31/03/99]

2 Présentation et objectifs généraux

La modélisation des systèmes informatiques et de télécommunications connaît actuellement de nombreux développements tant du point de vue théorique que de celui des applications industrielles. Plusieurs formalismes sont utilisés par le projet : les réseaux de files d'attente, les réseaux de Petri et la géométrie aléatoire.

Les actions de recherche de 1998–99 ont porté sur :

- la modélisation de systèmes de télécommunications, notamment dans le cadre de conventions de recherche avec le CNET ainsi que dans le cadre du projet RNRT sur les constellations de satellites,
- la modélisation du trafic Web dans le cadre d’une collaboration avec le W3C et d’une convention de recherche avec la Compagnie des Signaux (devenue Communications et Systèmes),
- la modélisation de systèmes synchronisés, notamment dans le cadre du projet TMR Alapedes et en relation avec le groupe Tropical,
- l’élaboration de politiques de contrôle optimal pour ces systèmes, fondées entre autres sur la théorie des jeux et sur le calcul d’asymptotiques et de bornes,
- la réalisation d’outils logiciels pour l’évaluation de performances.

3 Fondements scientifiques

Les principaux outils mathématiques du projet sont :

- la théorie des processus aléatoires : processus de Markov, processus ponctuels et mesures de Palm, géométrie aléatoire, grandes déviations,
- la théorie des systèmes à événements discrets : réseaux de files d’attente, réseaux de Petri, graphes de tâches,
- la théorie du contrôle et de l’ordonnancement : programmation dynamique, contrôle stochastique, théorie des jeux, ordonnancement déterministe et stochastique, processus de décision markoviens.

4 Domaines d’applications

Le principal domaine d’applications du projet est celui des communications. L’axe le plus développé est celui de la modélisation et de l’optimisation de protocoles et d’architectures de réseaux. Cela concerne :

- l’Internet : routage point à point et multipoint, protocole TCP et HTTP, mécanismes de différenciation de services, IP sur liaisons satellites, trafic et serveurs Web,
- les réseaux ATM : contrôle d’accès et qualité de service, simulation de commutateurs, ordonnancement.

Un autre axe sur les questions de coût et de tarification se développe depuis quelques années dans le cadre de conventions de recherche.

5 Logiciels

5.1 Environnement d’évaluation de performances

Participant : Alain Jean-Marie.

Mots clés : réseau de Petri, simulation.

Une deuxième distribution de l'environnement de modélisation ERS a eu lieu en 1999. Cette nouvelle version apporte des nouvelles fonctionnalités pour les interfaces graphiques (comme la possibilité de spécifier des distributions temporelles variées et celle de visualiser les cycles critiques dans les réseaux de Petri). Également, de nouveaux outils de résolution pour les chaînes de Markov ont été adjoints. Les distributions de ERS sont disponibles à l'adresse : <http://www-sop.inria.fr/mistral/soft/ers.html>.

5.2 Modélisation de trafic Web et expérimentation des serveurs Web

Participants : Zhen Liu, Nicolas Niclausse, César Jalpa-Villanueva.

Mots clés : modèle de trafic, serveur Web, benchmark.

C. Jalpa-Villanueva, Z. Liu et N. Niclausse ont poursuivi leur effort de développement de WAGON (Web trAffic GeneratOr and beNchmark), un banc d'essai des serveurs Web [46]. Il se compose d'un générateur de trafic Web, d'un robot pour l'envoi et l'analyse des requêtes et d'un *monitoring*. Cet outil peut être utilisé en particulier pour étudier les performances des serveurs et des protocoles de communication dans le Web. Les originalités du logiciel par rapport aux outils concurrents résident dans sa capacité à analyser de nouveaux modèles de trafic Web et dans sa faculté d'expérimentation de multiple types de trafics et de multiple sites d'émission.

Le logiciel WAGON est utilisé pour générer du trafic sur un réseau expérimental composé de 9 PC interconnectés par un commutateur Ethernet à 100Mb/s, mis en place et exploité en partenariat avec l'ENST et le projet FRACTALE dans le cadre de l'ARC EPSILON (<http://www-sop.inria.fr/mistral/pub/EPSILON/>). L'objectif de EPSILON est de proposer et de montrer la faisabilité d'une nouvelle approche pour l'évaluation des performances des réseaux (qualité de service, trafics, architectures, protocoles).

6 Résultats nouveaux

6.1 Analyse quantitative des protocoles dans les réseaux

Participants : Eitan Altman, Kostya Avratchenkov, Thomas Bonald, Chadi Barakat, Rachid Elazouzi.

Mots clés : TCP/IP, RED, prévention/contrôle de la congestion.

6.1.1 Contrôle de la congestion

E. Altman et ses co-auteurs ont étudié le contrôle de flux et de congestion dans l'Internet et dans les réseaux ATM (pour le trafic ABR (Available Bit Rate)).

Dans [50], E. Altman, C. Barakat et K. Avratchenkov ont analysé les performances de TCP en présence de pertes aléatoires sur un canal, modélisées par un processus markovien à

deux états Dans [41, 40], plusieurs phénomènes de congestion ont été identifiés et analysés, notamment l'existence de goulots d'étranglement multiples et l'occurrence de phases *slow-start* consécutives. Ces phénomènes sont fréquents dans les réseaux à grand produit "délai-bande passante", comme les réseaux satellitaires ayant une composante géo-stationnaire. Pour chaque problème identifié, des solutions ont été proposées.

Dans [49], plusieurs versions de TCP sont étudiées, mettant, là encore, en évidence des mauvais fonctionnements pour lesquels nous proposons des améliorations. Dans [19, 34], nous utilisons la théorie du contrôle optimal pour obtenir des contrôleurs de flux décentralisés pour une architecture de type ATM (services ABR), où le contrôle se fait par le réseau. Cette approche est basée sur une modélisation de type ARMA (Auto Regressive Moving Average) du flux exogène non-contrôlé. Des méthodes innovantes sont proposées dans [31] pour l'estimation des paramètres du modèle ARMA. Dans [30] sont étudiés des phénomènes de congestion observés dans des contrôleurs ABR.

6.1.2 Comparaison de TCP Reno et Vegas

Dans [25], T. Bonald compare les performances de l'actuelle version de TCP (TCP Reno) à une version récente et non déployée (TCP Vegas). Ces deux protocoles se différencient essentiellement par l'algorithme de variation de la fenêtre de congestion : alors que TCP Reno utilise uniquement les pertes de paquets comme indication de congestion, TCP Vegas utilise en plus des mesures de délais de transmission des paquets pour ajuster la fenêtre à une valeur quasi-optimale. Nous montrons que cette modification de TCP, mineure en terme de complexité et compatible avec la version actuelle, en améliore considérablement la stabilité et les performances, en termes d'utilisation des ressources du réseau et d'équité du partage de la bande passante.

6.1.3 Prévention de la congestion (RED)

Pour faire face aux déficiences de TCP, et pour éviter de modifier ce protocole clé de l'Internet, l'IETF a recommandé dans la RFC 2309 le déploiement de mécanismes de gestion active des files d'attente dans les routeurs tels que le mécanisme RED (Random Early Detection). Dans ^[MBB] et [43], T. Bonald, en collaboration avec M. May et J. Bolot du projet RODEO, a montré que ce mécanisme, non seulement ne suffit pas à compenser les défauts de TCP (inéquité du partage de la bande passante, synchronisation des flux,...), mais est également susceptible de dégrader de manière significative les performances de l'Internet, en provoquant des oscillations des tailles des files d'attente dans les routeurs et en favorisant l'arrivée des paquets en rafale, ce qui a pour conséquence un taux de pertes plus élevé à intensité de trafic égale, et donc une utilisation moins efficace des ressources du réseau.

6.1.4 IP multipoint

En collaboration avec E. Lety et T. Turetletti (Rodeo), F. Baccelli a étudié l'organisation optimale des arbres multipoints dans le contexte d'environnements virtuels à grande échelle dans

[MBB] M. MAY, T. BONALD, J. BOLOT, « Analytic evaluation of RED performance », à paraître dans IEEE INFOCOM'2000.

l'Internet [55]. Le but de cette étude est de proposer une architecture de communication pour des applications de réalité virtuelle ayant un grand nombre de participants. Nous proposons une approche au niveau de la couche transport qui utilise des agents et un ensemble de groupes multipoints. Notre architecture utilise un découpage dynamique en cellules de l'environnement virtuel ainsi que l'association de ces cellules avec des groupes multipoints. La théorie des processus ponctuels dans le plan permet de déterminer une taille de cellule appropriée. Cette taille de cellule est choisie de manière à limiter le trafic reçu par participant, ainsi que le nombre des franchissements de cellules par unité de temps.

6.2 Analyse économique des réseaux

Participants : François Baccelli, Konstantin Tchoumatchenko, Sergueï Zuyev.

Mots clés : modélisation spatiale, processus ponctuel, géométrie aléatoire, calcul de Palm, pavage de Voronoï, arbre couvrant, analyse économique des réseaux.

K. Tchoumatchenko et S. Zuyev ont continué les études sur la modélisation des réseaux d'accès hiérarchiques et de la répartition des zones entre leurs éléments. Le modèle introduit dans [59] se base sur une opération d'agrégation d'une suite de pavages aléatoires. Plusieurs caractéristiques des cellules agrégées (probabilités de couverture, d'extinction, d'expansion, degré de la variabilité de la frontière fractale) ont été étudiées pour des pavages réguliers et des pavages de Poisson-Voronoï. Une condition d'existence du pavage limite a été obtenue sous des hypothèses générales d'indépendance et de la stationnarité.

Pour analyser des situations de compétition entre deux opérateurs de télécommunications, nous avons étudié le pavage obtenu par intersection de deux pavages de Poisson-Voronoï du plan, dans le but d'obtenir des expressions en moyenne pour ses principales caractéristiques géométriques [52]. Pour ce pavage intersection, nous distinguons six types de cellules, suivant qu'elles contiennent ou non les noyaux des deux pavages de départ. L'intensité et la surface moyenne de chaque type de cellule sont calculées soit de manière explicite, soit au moyen de développements asymptotiques. Ce modèle permet de représenter les zones locales de deux opérateurs de télécommunications en compétition sur le même territoire. Les coûts d'interconnexion entre les abonnés dépendent alors du type de cellule où ils se trouvent, les cellules étant précisément définies comme celles du pavage intersection associé à ces deux systèmes de zones locales.

6.3 Qualité de service dans les réseaux

Participants : Sara Alouf, Eitan Altman, François Baccelli, Alain Jean-Marie, Zhen Liu, Naceur Malouch, Philippe Nain.

Mots clés : services différenciés, FEC, multi-RED, estimation.

6.3.1 Contrôle d'admission

Dans [32, 18, 20], nous avons étudié l'intégration de services à bande passante garantie avec ceux de type « best effort ». En particulier, nous appliquons dans [18] des méthodes développées par M. F. Neuts pour l'évaluation de performances de politiques de réservations ; une généralisation aux transmissions multipoints est proposée dans [32]. Dans [20] un problème de contrôle optimal d'admission des sessions à bande passante garantie est traité à l'aide d'approximations par des processus de diffusion.

6.3.2 Services différenciés pour l'Internet

Les services différenciés (*diffserv*) ont été proposés comme une solution permettant d'offrir une qualité de service différenciée à certaines applications (ou flots) de l'Internet. Parmi les différentes techniques proposées au sein de l'IETF, celle appelée *token bucket marking* (TBM) a été étudiée dans [58]. Avec TBM, les paquets d'un flot TCP sont marqués vert ou rouge par les routeurs périphériques selon que le flot émet ou pas au débit contracté avec le réseau. Le marquage est réalisé par un mécanisme de type *token bucket*. En cas de congestion dans les routeurs internes du réseau, les paquets rouges sont rejetés en premier. Ceci peut se faire en implémentant une version multiseuil du protocole *RED*, appelée multi-RED. Dans [58] nous montrons que TBM ne garantit pas au flot marqué le débit contracté avec le réseau ; nous montrons également qu'il est difficile de réguler la qualité de service offerte en jouant sur les nombreux paramètres du protocole multi-RED. Nous étudions aussi l'impact de la taille des tampons dans les routeurs sur le service offert. A la fin, nous proposons certaines pistes pour le choix des paramètres de TBM qui assurent un débit donné au flot marqué, pourvu que ce débit soit réalisable. Ce travail, toujours en cours, est le fruit d'une collaboration entre P. Nain, D. Towsley et S. Sahu (Université du Massachusetts), C. Diot (Sprint ATL) et V. Firoiu (Bay Architecture Lab.).

Dans son stage de DEA, et sous la direction scientifique de Z. Liu, N. Malouch a étudié les protocoles qui ont été proposés dans le cadre des services différenciés. Il a installé et configuré, en collaboration avec le projet RODEO, une plateforme de tests contenant des fonctions de contrôle de trafic, qui a permis de bâtir plusieurs environnements relatifs aux services différenciés, notamment les mécanismes d'ordonnancements PS et CBQ, les mécanismes de gestion de buffer RED_n et les mécanismes de classification par flux. Il a effectué plusieurs expérimentations afin de valider certains modèles déjà proposés [62]. La poursuite de ce travail s'inscrit dans le cadre de la thèse de N. Malouch qui a démarré en octobre 1999. Nous travaillons notamment sur un nouveau modèle du protocole TCP fonctionnant en présence de services différenciés (RIO, Token Bucket).

6.3.3 Estimation de la congestion

Savoir estimer les caractéristiques dynamiques et/ou statiques d'une connexion peut s'avérer très utile dans un certain nombre de contextes. Cela peut permettre, par exemple, d'optimiser le taux de redondance (FEC) dans les medias continus comme la téléphonie sur Internet

ou d'optimiser le contrôle de flux. Dans [ANT99] et [60], S. Alouf et P. Nain, en collaboration avec D. Towsley (Université du Massachusetts), proposent une approche par modèle d'inférence où la connexion est modélisée par un goulot d'étranglement ; l'objectif est d'estimer certaines caractéristiques de ce goulot d'étranglement dont on pense qu'elles ont un impact déterminant sur les performances. En modélisant le goulot d'étranglement par une file d'attente M/M/1/K ou M/D/1/K alimentée par un trafic transverse et par un trafic sonde, nous obtenons plusieurs schémas pour l'estimation de la capacité de la file et pour l'intensité du trafic transverse. Des campagnes de simulations à l'aide du logiciel *ns-2* (Network Simulator) ont été menées pour différentes topologies et sous différentes conditions de trafic afin d'évaluer et de classer les estimateurs obtenus. La prochaine étape consistera en des tests grandeur nature sur un réseau expérimental mis en place dans le projet. La poursuite de ce travail s'inscrit dans le cadre de la thèse de S. Alouf qui a démarré en octobre 1999.

6.3.4 Codage redondant

Outre les mécanismes de contrôle réactif, tel que TCP, il existe des mécanismes de contrôle prédictif, tel que l'ajout de redondance. Ce genre de contrôle est surtout important pour les liens satellitaires. Nous avons analysé dans [17] les processus de pertes en présence de redondance ce qui nous a permis d'optimiser la quantité de redondance requise pour pallier les phénomènes de pertes dues à la congestion.

6.3.5 Qualité de service et contrôle de flux

Pour analyser les problèmes de QoS dans l'internet, F. Baccelli et R. Agrawal (Motorola) ont proposé dans [AB] un nouveau modèle de réseau avec une superposition de sources *on-off* en entrée, et/ou des routeurs avec vitesse variable dans le temps. Lorsque les durées des périodes *on* des sources et celles des périodes *off* des routeurs sont sous-exponentielles, il est possible de donner les asymptotiques des queues des distributions stationnaires pour les délais de bout en bout dans un tel réseau. Ces résultats s'étendent au cas où l'on prend en compte un mécanisme de contrôle de flux de type TCP.

6.4 Modèle de trafic pour les réseaux

Participants : Zhen Liu, César Jalpa-Villanueva, Philippe Nain, Nicolas Niclausse.

Mots clés : modèle de trafic, trafic HTTP, mémoire longue, borne, distribution sous-exponentielle, dimensionnement, multiplexage statistique.

[ANT99] S. ALOUF, P. NAIN, D. TOWSLEY, « Inferring network characteristics via moment-based estimators », soumis à ACM Sigmetrics'2000, 1999.

[AB] R. AGRAWAL, F. BACCELLI, « Dominating tails in a tandem of queues with long range dependent arrival and service processes », Communication présentée au workshop Eurandom sur les phénomènes de mémoire longue et les distributions sous exponentielles. A paraître dans ISCAS 2000.

6.4.1 Modélisation du trafic d'accès aux serveurs Web

Dans le cadre des thèses de N. Niclausse [13] et de C. Jalpa-Villanueva, nous avons développé un modèle probabiliste du comportement des utilisateurs des serveurs Web. A partir des données des traces d'accès aux serveurs Web, nos analyses statistiques ont permis de définir trois paramètres caractéristiques : l'intensité des arrivées de sessions, le nombre de clics dans une session, et le délai entre chaque clic. Dans ce cadre, il apparaît que le processus d'arrivée des sessions est un processus de renouvellement – la plupart du temps poissonnien – contrairement au processus des requêtes HTTP. Les deux autres paramètres se représentent par des distributions à queue lourde (lognormale, Pareto, etc.). Un autre aspect du modèle est de prédire quelles sont les pages visitées par les clients. Ceci dépend de la structure de graphe des documents hypertextes du serveur. Notre modèle prend un serveur donné et évalue, toujours à partir des traces d'accès, les probabilités de routage sur les différentes pages (ainsi que la probabilité de débiter une session sur telle ou telle page). En prenant en compte tous ces aspects, on peut alors simuler ou reproduire le trafic HTTP, afin d'évaluer les performances des serveurs ou du protocole. Ces travaux ont été publiés dans [28].

6.4.2 Impact de la mémoire longue sur les performances

Dans [Nai99], P. Nain s'est intéressé à l'impact des trafics dits « à mémoire longue » sur les performances des réseaux. Cet impact est étudié au travers un modèle simple de file d'attente alimentée par un processus à mémoire longue, le processus de Cox. Les différences entre les performances obtenues dans ce contexte et celles obtenues pour le même modèle mais alimentée par un processus « classique » à composantes faiblement corrélées, sont mises en évidence.

6.5 Réseaux satellitaires et communications mobiles

Participants : Eitan Altman, Chadi Barakat.

Mots clés : réseau satellitaire.

En collaboration avec J. Galtier et A. Ferreira du projet SLOOP, E. Altman vient de publier un ouvrage synthétisant les architectures, les techniques de dimensionnement et les choix technologiques des réseaux satellitaires [9]. En partenariat avec W. Dabbous du RODEO, C. Barakat et E. Altman ont analysé les performances de TCP/IP sur les liens satellitaires [53, 42], ce qui leur a permis de détecter un certain nombre de dysfonctionnements souvent préjudiciables aux performances. Des modifications ont été proposées et leur impact analysé dans [42].

6.5.1 Contrôle d'accès

Nous considérons dans [37] le problème de contrôle d'accès à un canal dans un environnement de communication mobile. La station de base, connaissant le nombre de paquets à transmettre

[Nai99] P. NAIN, « Impact of unsmooth traffic on network performance », soumis à *Statistical Inference in Stochastic Processes*, 1999.

par les mobiles, doit décider à chaque instant quel mobile aura accès au canal. Nous proposons une approximation par des processus de diffusion pour résoudre ce problème en présence de périodes aléatoires de coupure de connexion.

6.6 Evaluation de performances des serveurs Web

Participants : Zhen Liu, César Jalpa-Villanueva, Philippe Nain, Nicolas Niclausse, Jérôme Talim, Sylvain Barbier.

Mots clés : multimédia, serveur Web, HTTP, cache, politique de remplacement de pages, moteur de recherche, ordonnancement.

6.6.1 Evaluation de performances des protocoles HTTP

Avec l'outil WAGON, Z. Liu, N. Niclausse et C. Jalpa-Villanueva ont poursuivi les travaux d'expérimentation pour comparer les performances respectives des protocoles HTTP/1.0 et HTTP/1.1 et pour évaluer les performances des serveurs Web [28]. Ces expérimentations ont été réalisées avec différents types de contenus hypertexte du serveur Web, différentes intensités de trafic et différents types de connexions (caractérisées par la bande passante disponible et le délai de transmission). Il s'avère que, d'une manière générale, pour ce qui concerne le temps de réponse des requêtes, le protocole HTTP/1.0 est toujours meilleur que HTTP/1.1, même si ce dernier dispose de plusieurs connexions parallèles avec un peu plus de bande passante, tandis que le premier ne dispose qu'une seule connexion. Les performances s'améliorent si le mécanisme de pipeline est utilisé dans HTTP/1.1. L'écart de performances varie en fonction des types de connexions et des types de contenus hypertexte du serveur Web. D'autres expériences sont en cours de réalisation.

6.6.2 Moteurs de recherche

Cette étude consacrée aux moteurs de recherche du Web et à l'activité de leurs robots a pour objectif l'optimisation de la mise à jour des bases de données de ces moteurs. Il s'agit de déterminer le nombre optimal de robots à utiliser pour la minimisation d'une fonction de coût qui fait intervenir les probabilités de perte et de famine au niveau du moteur d'indexation. Une modélisation par files d'attente a été proposée à la fois dans le cas où le nombre de robots reste constant au cours du temps ^[TLNCJ99] et dans le cas où ce nombre varie dynamiquement en fonction de l'état du système ^[TLNCJ]. Les résultats obtenus montrent qu'un contrôle dynamique du nombre des serveurs en activité peut améliorer de façon conséquente les performances du système. Ces travaux ont été réalisés par J. Talim dans le cadre de sa thèse [14] en collaboration avec Z. Liu, P. Nain et E. G. Coffman Jr. (Bell Labs).

[TLNCJ99] J. TALIM, Z. LIU, P. NAIN, E. G. COFFMAN JR, « Optimizing the number of robots for Web search engines », à paraître dans *Telecommunication Systems*, 1999.

[TLNCJ] J. TALIM, Z. LIU, P. NAIN, E. G. COFFMAN JR, « Controlling robots in Web search engines », soumis à *Performance Evaluation*.

6.7 Analyse des systèmes à événements discrets stochastiques

Participants : François Baccelli, Thomas Bonald, Dohy Hong, James Martin.

Mots clés : algèbre $(\max, +)$, exposant de Lyapounov, réseau de Petri stochastique, contraction, non-expansivité, analyticité, relation de récurrence vectorielle, règle de saturation, théorie ergodique, système en dimension infinie.

6.7.1 Calcul des exposants de Lyapunov dans l'algèbre $(\max, +)$

Les exposants de Lyapounov sont les taux de croissance linéaire asymptotiques des vecteurs d' tats d'un système à événements discrets stochastiques dont la dynamique est décrite par une relation de récurrence vectorielle. Dans le cas déterministe, ils coïncident avec la notion de vecteur de temps de cycle. De manière générale, le calcul des exposants de Lyapunov est une question difficile dans l'algèbre conventionnelle. Dans l'article [BH98a], nous donnons un développement explicite de l'exposant de Lyapounov $\gamma(p)$ d'une suite de matrices aléatoires i.i.d. dans le semi-anneau $(\max, +)$, tirées selon un mécanisme de Bernoulli et dépendant d'un petit paramètre p . Une hypothèse clef est que l'une des matrices possède un unique vecteur propre. Cette hypothèse nous permet d'utiliser une représentation de $\gamma(p)$ comme la moyenne d'une variable aléatoire, puis un analogue discret des méthodes de perturbations pour obtenir ce développement. Nous proposons plusieurs extensions, notamment au cas multinomial et au cas d'itérées d'opérateurs aléatoires non-expansifs. La connaissance des coefficients du développement nous permet aussi d'évaluer une borne inférieure du rayon de convergence du développement analytique. Plusieurs exemples sont considérés, en particulier dans le domaine du contrôle de fenêtre. Nous montrons comment calculer les coefficients de la série de Taylor et en déduisons une approximation de l'exposant de Lyapounov.

6.7.2 Propriété de contraction

Dans [BH98b], nous nous intéressons à l'analyticité du comportement asymptotique d'une classe de systèmes dynamiques définis par itération d'opérateurs aléatoires non-expansifs, incluant le cas des exposants de Lyapounov. Il s'agit d'étudier la dépendance analytique par rapport aux paramètres qui gouvernent la loi des opérateurs aléatoires. Les propriétés de contraction par rapport à certaines semi-normes projectives sont utilisées pour aborder ce problème. Pour les exposants de Lyapounov dans $(\max, +)$, cette approche donne une meilleure approximation du domain d'analyticité. Mais, elle permet aussi d'étudier les exposants de Lyapounov dans l'algèbre conventionnelle ou encore ceux associés aux systèmes dynamiques non-linéaires qui apparaissent dans les problèmes de contrôles stochastiques. Pour la classe des opérateurs réductibles (définie dans [BH98b]), nous obtenons des résultats sur l'analyticité de l'espérance des fonctionnelles du comportement limite en fonction des paramètres de la loi :

[BH98a] F. BACCELLI, D. HONG, « Analytic Expansions of $(\max, +)$ Lyapunov Exponents », *RR n  3427*, INRIA, Sophia Antipolis, mai 1998, à paraître dans *Annals of Appl. Prob.*

[BH98b] F. BACCELLI, D. HONG, « Analyticity of Iterates of Random Non-Expansive Maps », *RR n  3558*, INRIA, Sophia Antipolis, mars 1998, à paraître dans *Adv. in Appl. Prob. March 2000, Vol.32 No.1.*

dans ce cas la contraction est établie par rapport à la norme infinie. Nous donnons plusieurs applications sur l'analyticité du temps de réponse stationnaire dans certaines files d'attente en fonction de l'intensité du processus d'arrivée et des paramètres de la loi des services. Dans [GH], D. Hong et S. Gaubert (ENSTA) montrent que l'exposant de Lyapounov est analytique dans le domaine de convergence absolue d'un objet combinatoire simple : une somme sur les éléments d'un monoïde défini par des générateurs et des relations. Lorsque l'ensemble des relations est rationnel, cette somme définit une fonction rationnelle, qui peut être calculée explicitement en utilisant des outils de la théorie d'automates. En outre, on montre que cette estimation de la région d'analyticité est dans un certain sens optimale. Une revue de ces méthodes ([38]) a été présentée à Allerton.

6.7.3 Règle de saturation

Dans sa thèse [11], T. Bonald montre la règle de saturation « en boucle fermée » pour les systèmes *monotones-invariants*, généralisation des systèmes monotones-homogènes à un environnement stochastique stationnaire. Ce résultat peut s'exprimer ainsi : le taux d'arrivée maximum des clients caractérisant la région de stabilité d'un système monotone-invariant est égal à la limite du débit de ce système en boucle fermée à K clients, lorsque K tend vers l'infini. Cette règle de saturation en boucle fermée donne en particulier une preuve de stabilité des systèmes monotones-homogènes et séparables (réseaux de files d'attente de type Jackson, réseaux de Petri à choix libre,...), alternative de la règle de saturation « en boucle ouverte » de F. Baccelli et S. Foss, sous des hypothèses stochastiques très générales (seule la stationnarité du processus d'arrivée est requise). Mais la règle de saturation en boucle fermée s'applique également à des systèmes non-homogènes (et donc pas nécessairement non-expansifs), tels que les graphes d'événements avec compétition locale ou certains réseaux de files d'attente multi-classes de type Kelly.

6.7.4 Systèmes en dimension infinie

Les travaux sur les systèmes en dimension infinie se sont concentrés sur les réseaux $(\max, +)$ linéaires, où des liens avec la théorie de la percolation sont établis. Le calcul des temps de passage se ramène à l'analyse des chemins de poids maximal dans un certain graphe aléatoire, ou encore à l'étude du temps de dernier passage en percolation.

Dans le cas de files en série, J. Mairesse, A. Borovkov et F. Baccelli ont montré dans [51] l'existence de limites hydrodynamiques sur des séries infinies de files d'attente à capacité infinie, sous certaines conditions de moment pour les lois des services.

Dans un travail en cours, J. Martin étudie le cas d'un réseau infini de files à capacité limitée avec blocage. Ce problème a des liens directs avec le modèle de K -exclusion totalement asymétrique considéré par exemple par Seppäläinen.

Les problèmes qui se posent sont de diverses natures : limites hydrodynamiques, propagation d'une onde de choc, existence et calcul des débits asymptotiques, lois d'occupation, processus

[GH] S. GAUBERT, D. HONG, « Series Expansions of Lyapunov Exponents and Forgetful Monoids », Article en cours de rédaction.

ponctuels limites, etc. Un des outils centraux dans ce cadre est la théorie des « lattice animals » de Gandolfi et Kesten.

6.7.5 Réseaux de Jackson

Dans [BH], on considère un modèle simple de Jackson slotté dont on donne une description complète de l'évolution par des équations de récurrence du type non-linéaires. L'exploitation de ces équations reste néanmoins possible grâce à la propriété de monotonie du processus « backward ».

À partir de la construction « backward », nous donnons des conditions de stabilité et d'instabilité qui généralisent des résultats de Loynes. De plus, l'application directe de [BH98b] nous donne des résultats sur l'analyticité de l'espérance de la taille de file d'attente en stationnaire. Enfin, une approximation de la distribution de queue est proposée.

6.8 Contrôle et théorie des jeux

Participants : Eitan Altman, Sanjay Bhulay, Rachid Elazouzi, Philippe Nain.

Mots clés : processus markoviens contrôlés, jeux stochastiques, contrôle hybride, multimodularité.

6.8.1 Processus markoviens contrôlés

L'optimisation d'un seul critère dans les systèmes dynamiques relevant de l'ingénierie est souvent insuffisante pour décrire les objectifs réels du processus de décision. On est donc amené à étudier l'optimisation d'un objectif accompagné de contraintes. Les chaînes de Markov contrôlées avec contraintes offrent un cadre mathématique naturel et puissant pour ce type d'optimisation. Un ouvrage de synthèse, écrit par E. Altman, vient de paraître [10] sur ce sujet. Le lecteur y trouvera un grand nombre de techniques et de résultats nouveaux. Parmi les nouveautés, on trouvera l'étude de nouveaux critères de coût, des résultats pour des espaces infinis et de nouvelles méthodes de résolution numérique.

Contrôler un réseau de files d'attente dès que le nombre de files dépasse 4 ou 5 est quasiment impossible à l'aide des outils standards de la programmation dynamique pour des raisons d'explosion combinatoire. Dans ce cas, on se contente d'approximer au mieux la politique optimale. Parmi les approches possibles, celle qui consiste à approximer la politique optimale par la politique résultant d'une seule itération de l'algorithme *policy iteration* donne souvent de bons résultats (on parle de politiques *rollout* dans ce cas). Les résultats sont d'autant meilleurs (précision, espace mémoire nécessaire) que la politique avec laquelle l'algorithme est initialisé est « proche » de la politique optimale. Dans [45] P. Nain en collaboration avec G. Koole (Université Libre d'Amsterdam) a appliqué cette approche à un modèle classique de files

[BH] F. BACCELLI, D. HONG, « Slotted Jackson Networks », Article en cours de rédaction.

[BH98b] F. BACCELLI, D. HONG, « Analyticity of Iterates of Random Non-Expansive Maps », *RR n° 3558*, INRIA, Sophia Antipolis, mars 1998, à paraître dans *Adv. in Appl. Prob.* March 2000, Vol.32 No.1.

d'attente à *polling* pour lequel la politique optimale de service est difficile à calculer pour les raisons invoquées précédemment. Partant de la politique initiale connue sous le nom de *μ -rule*, une caractérisation complète de la fonction de coût pénalisée qui lui est associée permet, après une itération de l'algorithme de *policy iteration*, de trouver une politique remarquablement proche de la politique optimale. Le travail dans [45] a porté sur deux files d'attente ; une extension à trois files a été obtenue récemment. Le cas d'un nombre arbitraire de files est à l'étude. Ces travaux peuvent être vus comme une étape vers l'application des techniques de la programmation neurodynamique au contrôle des files d'attente.

6.8.2 Contrôle de routage et de flux

Dans [33], nous étudions le problème de calcul des équilibres dans des réseaux où le flux et le routage sont contrôlés par les sources. Nous caractérisons l'équilibre en présence d'un grand nombre d'utilisateurs.

Dans [44], nous étudions un paradoxe de type de Braess dans un problème de partage de charge distribuée pour le calcul parallèle. Nous ramenons ce problème à un problème équivalent de routage. Nous montrons que l'augmentation de la capacité des liens de communication peut entraîner une baisse des performances de tous les usagers.

Dans [35], nous étudions le contrôle optimal du routage en absence d'information d'état, et, dans [21], nous considérons une approche de jeux à somme nulle pour étudier un problème de routage sous les pires conditions de service.

6.8.3 Limites fluides dans les files d'attente

Dans [36] nous utilisons des méthodes empruntées à la théorie des processus de décision markoviens pour comparer le comportement de files d'attentes à leurs limites fluides. En utilisant la méthode de *value iteration*, nous montrons que la limite fluide donne une borne inférieure pour charge dans le système réel.

6.8.4 Contrôle et multimodularité

Dans un article datant de 1985 et intitulé « Extremal splitting of point processes », B. Hajek a introduit une propriété de convexité appelée multimodularité. Cette notion est définie pour les fonctions sur les entiers d'un espace euclidien multidimensionnel. En couplant ce concept de multimodularité à des méthodes classiques des processus de décision markoviens, nous avons pu résoudre plusieurs problèmes de contrôle de systèmes à événements discrets sans information d'état [35].

6.8.5 Systèmes linéaires quadratiques avec sauts

Nous avons étudié dans [29] un système contrôlé avec dynamique linéaire (par rapport à l'état et aux actions) où les paramètres sont des fonctions d'une chaîne de Markov, elle aussi contrôlée. Nous avons analysé le comportement asymptotique de ce système quand la fréquence des transitions dans la chaîne de Markov contrôlée devient très grande.

6.9 Ordonnancement

Participant : Zhen Liu.

Mots clés : calcul parallèle, commutateur ATM, multicast, ordonnancement.

6.9.1 Ordonnancement des commutateurs

En collaboration avec R. Righter (Université de Santa Clara), E. Altman et Z. Liu [ALR] ont étudié un problème d'ordonnancement des commutateurs qui ont des tampons à l'entrée. A cause du blocage en tête de ligne ("head-of-line blocking"), la conception de politique d'ordonnancement dans les commutateurs est particulièrement importante. En effet, le débit du commutateur en dépend d'une manière sensible et peut varier de l'ordre de 40%. Nous démontrons des propriétés de dominance de certaines classes de politique et nous obtenons des solutions optimales dans des cas spéciaux.

6.9.2 Ordonnancement des transmissions de paquets dans des canaux bruités

En collaboration avec G. Koole (Université libre d'Amsterdam) et R. Righter (Université de Santa Clara), Z. Liu [54] a étudié un problème d'ordonnancement des transmissions de paquets dans des canaux bruités. Des politiques simples ont été proposées et analysées. A l'aide de la programmation dynamique, nous avons démontré l'optimalité de ces politiques sous certaines hypothèses.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 CTI avec le CNET-Issy

Participants : François Baccelli, Dohy Hong, Konstantin Tchoumatchenko, Sergueï Zuyev.

La CTI sur la géométrie stochastique s'est orientée sur de nouveaux axes de recherche concernant l'optimisation de protocoles ayant des composantes spatiales, notamment le multipoint. Nous nous sommes intéressés avec D. Kofman et J.L. Rougier (ENST) à l'optimisation des arbres HCBT et avec T. Turlitti et E. Lety (RODEO) à l'optimisation de la taille des groupes multipoints dans un jeu distribué. Les travaux sur l'analyse économique des réseaux connaissent aussi de nouveaux développements, notamment dans le domaine de la représentation des cellules de desserte, pour lesquelles K. Tchoumatchenko a proposé un nouveau modèle avec S. Zuyev (Université de Strathclyde), et dans celui de la compétition entre opérateurs, où un modèle fondé sur la superposition de diagrammes de Voronoï a été analysé en collaboration avec C. Gloaguen (CNET) et S. Zuyev. K. Tchoumatchenko soutient sa thèse sur ce sujet le 15 décembre.

[ALR] E. ALTMAN, Z. LIU, R. RIGHTER, « Scheduling of Input-Queued Switch to Achieve Maximal Throughput », à paraître dans *Probability in the Engineering and Information Sciences*.

7.2 CTI avec le CNET-Sophia

Participants : Eitan Altman, Kostya Avratchenkov.

Cette convention de recherche (CNET-INRIA CTI 97 1B 206) porte sur le thème « Performance et contrôle des réseaux multimédia ». Pendant la deuxième année, nous avons travaillé en particulier sur le contrôle de trafic des réseaux ATM et de l'Internet.

7.3 RNRT « Constellations »

Participants : François Baccelli, Chadi Barakat, Eitan Altman.

Une convention de recherche et coopération entre l'INRIA, le CNES, l'ENST, l'INT, Alcatel, France Télécom, et d'autres groupes, a démarré en 1999 dans le cadre du RNRT intitulé « Constellations ». Il s'agit de l'étude des réseaux de télécommunications par constellations de satellites. C. Barakat et E. Altman participent à ce RNRT où ils analysent l'Internet par satellites [42, 53].

7.4 INRIA NSF

Participants : Eitan Altman, François Baccelli, Dohy Hong, Zhen Liu, James Martin.

La proposition INRIA/NSF avec Georgia Tech est acceptée pour un an.

La proposition INRIA/NSF avec l'Université de l'Illinois entre dans sa deuxième année.

7.5 Projet TMR Alapedes

Participants : François Baccelli, Thomas Bonald, Stefan Haar, Dohy Hong, James Martin.

L'évaluation intermédiaire du projet TMR Alapedes est positive, et le projet est reconduit pour sa deuxième moitié. Les travaux actuels se concentrent sur l'analyse des systèmes $(\max, +)$ linéaires en dimension infinie (travaux de J. Martin), et sur l'étude de réseaux multiclassés avec synchronisation (travaux de T. Bonald et de S. Haar). Un autre axe important concerne le calcul des exposants de Lyapunov dans $(\max, +)$. Des résultats nouveaux sur ce sujet ont été obtenus par F. Baccelli, D. Hong et S. Gaubert. Thomas Bonald a soutenu sa thèse à l'École Polytechnique sur le contrôle de flux en octobre 1999 [11]. Actuellement, deux post-doctorants travaillent à l'ENS dans le cadre de ce projet : J. Martin et S. Haar.

7.6 Projet de l'Institut Lyapounov

Participants : François Baccelli, Dohy Hong.

Le projet de l'Institut Lyapounov (avec S. Foss, A. Borovkov et S. Rybko) est prolongé pour un an. S. Foss a séjourné à l'ENS en septembre et octobre 1999. Les travaux sur les processus semi-markoviens généralisés (GSMP), en collaboration avec J. Mairesse, ont été prolongés à cette occasion. Un nouvel axe de recherche sur les réseaux de Jackson généralisés avec des lois

de service sous-exponentielles a aussi été initié. S. Foss était avec T. Konstantopoulos éditeur invité d'un numéro spécial de QUESTA sur le sujet de notre projet Lyapounov, à savoir la stabilité des réseaux stochastiques. Un article de F. Baccelli et T. Bonald est publié dans ce numéro spécial. Ce projet complète le projet INTAS auquel participent plusieurs groupes en Europe : Cambridge, CWI, Universités d'Ulm, de Braunschweig et de Lund.

7.7 Convention de recherche avec la Compagnie des Signaux

Participants : Zhen Liu, Nicolas Niclausse, Sylvain Barbier.

Durant l'année 1999, nous avons travaillé avec la Compagnie des Signaux dans le cadre d'une convention de recherche portant sur la modélisation du trafic Internet et, en particulier, du trafic Web.

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Actions nationales

MISTRAL participe aux Actions de Recherche Coopératives suivantes : "MADDES" avec les projets INRIA META2 et TRIO, "EPSILON" (coordinateur P. Nain) avec le projet INRIA FRACTALES et l'ENST, et "COMMOBIL" avec les projets INRIA SLOOP, ALGO, HIPERCOM et les laboratoires LIAFA, LRI et LIMOS (cf. <http://www.inria.fr/Recherche/actionsDS-fra.html> pour plus d'informations sur ces ARC).

Dans le cadre de l'ARC MADDES, un workshop international de deux jours, organisé à Sophia Antipolis, a rassemblé 25 participants. Fruit de la collaboration entre SLOOP et MISTRAL dans l'ARC COMMOBIL, un livre intitulé « Les réseaux satellitaires de communications » vient de paraître chez Dunod [9].

8.2 Actions financées par la Commission Européenne

MISTRAL a participé pendant deux ans au projet de coopération franco-hollandais « Van-Gogh ». Nos partenaires côté hollandais étaient les professeurs A. Hordijk de l'Université de Leiden et G. Koole de l'Université Libre d'Amsterdam. Ce projet qui s'est achevé courant 1999 a porté sur la multimodularité et le contrôle des systèmes à événements discrets. Une extension de cette coopération sera soumise en 2000.

8.3 Réseaux et groupes de travail internationaux

E. Altman, F. Baccelli, Z. Liu et P. Nain sont membres du groupe de travail IFIP W.G. 7.3.

Z. Liu est membre extérieur de la commission d'évaluation de l'Académie des Sciences de Chine.

8.4 Relations bilatérales internationales

8.4.1 Méditerranée, Maghreb et Proche-Orient

Mistral participe à la coopération franco-israélienne No. 8827-1-96 sur les autoroutes de l'information, cofinancée par le ministère français de la Recherche et de la Technologie et le ministère israélien de la Science et de la Technologie. Nos partenaires en France sont Ascom et le Département Réseaux de l'ENST Paris, et nos partenaires en Israël sont les professeurs U. Yechiali (Université de Tel-Aviv), N. Shimkin et A. Orda (Technion, Haifa). Plusieurs voyages et visites ont été effectués en 1999, notamment par des stagiaires et des doctorants des deux côtés. Les résultats de la coopération ont été soumis à des revues et à des conférences internationales. La coopération a permis d'inviter le professeur U. Yechiali pendant 4 mois en 1999.

Nous avons également entamé une coopération avec le professeur M. Abbad de l'Université de Rabbat au Maroc. Dans ce cadre, le projet Mistral a accueilli R. Elazouzi, doctorant, pendant 7 mois.

8.4.2 Russie

Le projet de l'Institut Lyapounov (avec S. Foss, A. Borovkov et S. Rybko) est prolongé pour un an.

8.4.3 Chine

Dans le cadre du laboratoire franco-chinois LIAMA, nous avons entamé un travail en collaboration avec Communications et Systèmes et avec l'Institut de logiciel de l'Académie des Sciences de Chine. La coopération porte sur la modélisation et la mise en place d'un système de caches dans des réseaux nationaux en Chine.

8.4.4 Amérique du Nord

Notre coopération avec les professeurs T. Basar et R. Srikant de l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign, sur le contrôle dans les réseaux à haut débit s'est renforcée grâce au financement INRIA/NSF obtenu pour deux ans.

8.4.5 Amérique du Sud et Amérique Centrale

8.5 Visites, et invitations de chercheurs

Europe B. Blaszczyzyn (University of Wroclaw, Pologne, du 01/10/99 au 31/09/2000), S. Foss (University of Novosibirsk, Russie, du 15/09/99 au 17/10/99), A. Hordijk (University of Leiden, Pays-Bas, du 22/02/99 au 19/03/99, du 25/10/99 au 30/10/99 et du 24/12/99 au 23/01/2000), G. Koole (Vrije University of Amsterdam, Pays-Bas, du 09/08/99 au 30/08/99), I. Kurkova (Eurandom, Eindhoven, Pays-Bas, du 26/05/99 au 01/06/99), F. Spieksma (University of Leiden, Pays-Bas, du 25/10/99 au 09/11/99),

Visites de courte durée (inférieure à 1 semaine): C. Lindemann (Univ. Dortmund), H. Thorison (University of Iceland), O. Cappet, E. Moulines, S. Vaton (ENST).

Amérique R. Agrawal (University of Wisconsin, USA, du 20/05/99 au 06/06/99), T. Basar (University of Illinois at Urbana, USA, du 05/03/99 au 22/03/99 et du 15/12/99 au 31/12/99), E. G. Coffman Jr. (Bell Labs, USA, du 08/02/99 au 12/02/99), E. Feinberg (State University of New York, USA, du 01/08/99 au 08/08/99), T. Konstantopoulos (University of Texas, USA, du 09/10/99 au 16/10/99), H. Kushner (Brown University, USA, du 28/02/99 au 23/03/99), E. Lee (University of Berkeley, USA, du 20/03/99 au 20/07/99), R. Righter (Santa Clara University, USA, du 20/03/99 au 20/07/99), M. Shalmon (Université du Québec, Canada, du 14/06/99 au 26/06/99), K. Ramanan (Bell Labs, USA, du 26/06/99 au 04/07/99), R. Srikant (University of Illinois, USA, du 11/06/99 au 19/06/99).

Visites de courte durée (inférieure à 1 semaine) : M. Squillante, C. Xia, L. Zhang (IBM Yorktown Heights).

Méditerranée, Maghreb et Proche-Orient N. Bayer (Ben-Gurion University, Israël, du 01/09/99 au 10/09/99), U. Yechiali (University of Tel Aviv, Israël, du 27/01/99 au 03/02/99 et du 01/09/99 au 31/12/99).

Asie H. Kameda (University of Tsukuba, Japon, du 20/03/99 au 29/03/99).

Océanie V. Gaitsgory (University of South Australia, du 05/07/99 au 12/07/99).

9 Diffusion de résultats

9.1 Animation de la communauté scientifique

E. Altman a été co-organisateur de 4 sessions et membre du comité de programme de 1999 IEEE Conference on Decision and Control (CDC'99), décembre 1999, Phoenix, Arizona, USA, de International Workshop on Markov processes and controlled Markov chains (Changsha, Hunan, Chine, 22-28 août 1999), de Performance'99, the IFIP WG. 7.3 Conference on Modeling and Performance Evaluation of Computer Systems and Networks (Istanbul, Turquie, 15-17 octobre 1999) et du workshop sur la programmation dynamique et les systèmes à événements discrets, INRIA, Sophia-Antipolis, novembre 1999. Il est membre du comité de programme de la conférence IEEE Infocom 2000 (Tel-Aviv, Israël), de "International Conference on the Performance and QoS of Next Generation Networking (P&QNet'2000)" Nagoya, Japon, novembre 2000, du 9ème International Symposium on Dynamic Games, Adelaide, Australie, décembre 2000. Il a participé au jury de thèse de J. L. Costeux (Eurecom).

F. Baccelli a été coorganisateur du workshop TCP, ENS, décembre 1998. Il a participé à l'évaluation du CWI d'Amsterdam les 1,2 et 3 en juin 1999 ; il est membre de la Commission 3 du RNRT et membre du comité de programme d'Infocom 2000. Il a participé au jury de thèse de J.L. Rougier (ENST) et de F. Guillemin (Paris 6, Informatique, Habilitation), de T. Bonald (Ecole Polytechnique, Mathématiques Appliquées), de J. Migge (UNSA, Mathématiques) et de K. Tchoumatchenko (UNSA, Informatique).

T. Bonald a été coorganisateur du workshop TCP, ENS, décembre 98.

- Z. Liu** a organisé une session spéciale sur la qualité de service dans l'Internet pour le congrès Performance'99 et il a fait partie du comité de programme du congrès Performance'99 (Istanbul, Turquie, 15-17 octobre 1999) et du 8ème congrès du World Wide Web. Il a participé au jury de thèse de J. Talim (UNSA), de G. Pierre (Université d'Evry-Val d'Essonne), de N. Niclausse (UNSA) et de J. Gafsi (ENST).
- P. Nain** a participé aux jurys de thèse de J. Talim (UNSA, Informatique) et N. Niclausse (UNSA, Informatique) comme examinateur, ainsi qu'à celui de S. Le Potier (Univ. Rennes, Traitement du signal) comme rapporteur. Il est membre de la 27ème Section de la Commission des Spécialistes de l'Université de Nice Sophia Antipolis (UNSA).

9.2 Enseignement universitaire

- DEA IRO, PARIS 6** Cours de modèles stochastiques des réseaux de communications (Z. Liu et P. Nain, 24H).
- ESSI, UNSA** Cours d'évaluation des performances (P. Nain, 30H).
- DEA RSD, UNSA** Cours sur les communications par satellites (E. Altman, 15H).
Cours sur la qualité de service dans les réseaux (Z. Liu, P. Nain, 24H).
Cours de modélisation des systèmes informatiques (P. Nain, 24H).
- DEA Optimisation, Paris 6, Paris 10, École Polytechnique** Cours sur l'équilibre et l'optimisation dans les réseaux (E. Altman, 15H).
- DEA Probabilités, Paris 6** Cours sur la stabilité des réseaux (F. Baccelli, J. Mairesse, 32H).
- Ecole Polytechnique** Cours sur la simulation et la modélisation des réseaux de communication, commun aux deux majeures de deuxième année : Mathématiques Appliquées et Algèbre, Informatique et Applications (F. Baccelli, 32H).
- Ecole Normale Supérieure** Cours sur l'analyse des performances en deuxième année du magistère MMFAI (F. Baccelli, 28H).

9.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations

- E. Altman** a séjourné une semaine aux USA, dans le cadre de la coopération NSF/INRIA avec l'Université de l'Illinois. Il a effectué une visite aux Pays-Bas de deux semaines dans le cadre du projet Van Gogh au mois de juillet, et une visite de deux semaines en Israël dans le cadre de la coopération franco-israélienne. Il a présenté des communications lors des conférences suivantes : *38th IEEE Conference on Decision and Control* (Phoenix, Arizona, USA, décembre 1999), *10th INFORMS Applied Probability Conference* (Ulm, Allemagne, Juillet 1999).
- F. Baccelli** a donné une conférence plénière à INFORMS Applied probability 99 (Université d'Ulm) sur les réseaux stochastiques et une conférence plénière sur la géométrie aléatoire et les réseaux de communication à l'ITC 16 à Edinburg en juin 99. Il a été *keynote speaker* sur la modélisation des arbres multipoints au workshop Eurandom "Stochastics of integrated-services communication networks" (novembre 1999). Il a participé à la conférence Infocom 1999, ainsi qu'aux conférences à Bell Labs, à Sprint Labs, et à Stanford en juin 1999.

- T. Bonald** a participé aux journées tropicales (Paris, 29-31 mars 1999) et à International Workshop on Quality of Service (IWQoS'99, Londres, 31 mai-4 juin 1999).
- D. Hong** a participé aux colloques suivants : Workshop algèbres tropicales, ENS (novembre 98) ; Workshop TCP, ENS (novembre 98), Workshop Algèbres tropicales, ENS (mars 99) ; Convention annuelle ALAPEDES, ENS (mars 99). Il a présenté des communications aux conférences et séminaires suivants : Stochastic Workshop, Söllerhaus, Allemagne (janvier 99), séminaire CMAP, Ecole Polytechnique (avril 99), *10th INFORMS Applied Probability Conference* (Ulm, Allemagne, Juillet 1999), *37th Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing*, USA (septembre 99) ; séminaire Bell-Labs, Lucent Technologies, Murray Hill NJ, USA (octobre 99).
- Z. Liu** a donné des séminaires à AT&T Research Labs (Florham Park, USA.) et à IBM Watson Research Center (Yorktown Heights, USA). Par ailleurs, il a effectué des présentations aux conférences suivantes : *Performance'99* (octobre 1999, Istanbul, Turquie), *7th International Conference on Telecommunication Systems* (Nashville, TN, USA), *10th INFORMS Applied Probability Conference* (Ulm, Allemagne, juillet 1999)
- P. Nain** a séjourné 2 semaines dans le département d'Informatique de l'Université du Massachusetts à Amherst (Septembre 1999) et 1 semaine à l'Université Libre d'Amsterdam (Décembre 1999). Il a participé aux conférences suivantes : *10th INFORMS Applied Probability Conference* (Ulm, Allemagne, juillet 1999), Algotel'99 (Roscoff, mai 1999).
- K. Tchoumatchenko** a donné des exposés au séminaire de l'Université d'Ulm (Allemagne, avril 99), ainsi qu'à *10th INFORMS Applied Probability Conference* (Ulm, Allemagne, juillet 1999). Il a organisé un groupe de travail et mis au point une page Web sur les applications de la géométrie stochastique aux problèmes de modélisation des réseaux de télécommunication (<http://www.dmi.ens.fr/mistral/sg>).

10 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] E. ALTMAN, A. HORDIJK, « Zero-sum Markov games and worst-case optimal control of queueing systems », *QUESTA* 21, 1995, p. 415–447, Numéro spécial sur « Optimization of queueing systems », Ed. S. Stidham.
- [2] E. ALTMAN, D. KOFMAN, « Bounds for Performance Measures of Token Rings », *IEEE/ACM Transactions on Networking*, avril 1996, p. 292–299.
- [3] F. BACCELLI, P. BRÉMAUD, *Elements of Queueing Theory*, Série: *Applications of Mathematics*, Springer Verlag, 1994.
- [4] F. BACCELLI, G. COHEN, G. OSLDER, J. QUADRAT, *Synchronization and Linearity an Algebra for Discrete Event Systems*, Wiley, 1992.
- [5] P. CHRÉTIENNE, E. COFFMAN, J. LENSTRA, Z. LIU, *Scheduling Theory and Its Applications*, Wiley, 1995.
- [6] A. JEAN-MARIE, S. LEFEBVRE-BARBAROUX, C. CHAOUIYA, « Real-Time Scheduling of Periodic Tasks », in : *Scheduling Theory and its Applications*, P. C. et Z. Liu (éditeur), Wiley, octobre 1995, p. 167–191, Rapport de recherche INRIA RR 1576, janvier 1992.

- [7] Z. LIU, P. NAIN, D. TOWSLEY, « Sample Path Methods in the Control of Queues », *Queueing Systems* 21, 1995, p. 293–335, Numéro spécial sur « Optimization of queueing systems », Ed. S. Stidham.
- [8] Z. LIU, P. NAIN, D. TOWSLEY, « Exponential Bounds with Applications to Call Admission », *Journal of the ACM* 44, 3, mai 1997, p. 366–394.

Livres et monographies

- [9] E. ALTMAN, A. FERREIRA, J. GALTIER, *Les Réseaux Satellitaires de Télécommunication. Technologies et Service, Informatiques – Réseaux et Télécom*, Dunod, 1999.
- [10] E. ALTMAN, *Constrained Markov Decision Processes*, Chapman and Hall/CRC, 1999.

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [11] T. BONALD, *Stabilité des systèmes dynamiques à événements discrets. Application et contrôle de flux dans les réseaux de télécommunication*, thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, octobre 1999.
- [12] J. MIGGE, *L'ordonnancement sous contraintes temps réel : un modèle à base de trajectoires*, thèse de doctorat, université de Nice Sophia Antipolis, novembre 1999.
- [13] N. NICLAUSSE, *Modélisation, évaluation de performances et dimensionnement du World Wide Web*, thèse de doctorat, université de Nice Sophia Antipolis, juin 1999.
- [14] J. TALIM, *Contrôle et optimisation dans les réseaux multimedia*, thèse de doctorat, université de Nice Sophia Antipolis, février 1999.
- [15] K. TCHOUMATCHENKO, *Modélisation de réseaux de communication par la géométrie stochastique*, thèse de doctorat, université de Nice Sophia Antipolis, décembre 1999.

Articles et chapitres de livre

- [16] R. AGRAWAL, A. MAKOWSKI, P. NAIN, « On a Reduced Load Equivalence for Fluid Queues under Subexponentiality », *QUESTA* 33, 1999, p. 5–41, Numéro spécial sur le thème "Queues with Heavy-Tailed Distributions".
- [17] O. AÏT-HELLAL, E. ALTMAN, A. JEAN-MARIE, I. KURKOVA, « On Loss Probabilities in Presence of Redundant Packets and Several Traffic Sources », *Performance Evaluation* 35-36, 1999, p. 485–518, actes de la conférence *PERFORMANCE'99*, Istanbul.
- [18] E. ALTMAN, D. ARTIGES, K. TRAORE, « On the Integration of Best-Effort and Guaranteed Performance Services », *European Transactions on Telecommunications, Special Issue on Architectures, Protocols and Quality of Service for the Internet of the Future* 10, 2, mars-avril 1999, p. 125–134.
- [19] E. ALTMAN, T. BASAR, R. SRIKANT, « Congestion Control as a Stochastic Control Problem with Action Delays », *Automatica*, décembre 1999.
- [20] E. ALTMAN, H. KUSHNER, « Admission Control for Combined Guaranteed Performance and Best Effort Communications Systems Under Heavy Traffic », *SIAM J. Control and Optimization* 37, 6, 1999, p. 1780–1807.
- [21] E. ALTMAN, « A Markov Game Approach for Optimal Routing into a Queueing Network », *Anal. of Dynamic Games: Stochastic and Differential Games, Theory and Numerical Methods* 5, 1999.
- [22] F. BACCELLI, T. BONALD, « Window Flow Control in FIFO Networks with Cross Traffic », *Questa* 32, 1999, p. 195–231.

- [23] F. BACCELLI, S. HASENFUSS, V. SCHMIDT, « Differentiability of Functionals of Poisson Processes via Coupling », *Stochastic Processes and their Applications* 81, 1999, p. 299–321.
- [24] F. BACCELLI, S. SCHLEGEL, V. SCHMIDT, « Asymptotics of Stochastic Networks with Subexponential Service Times », *QUESTA* 33, 1999, p. 205–232, Numéro spécial sur le thème "Queues with Heavy-Tailed Distributions".
- [25] T. BONALD, « Comparison of TCP Reno and TCP Vegas: Efficiency and fairness », *Performance Evaluation* 36-37, 1999, actes de la conférence *PERFORMANCE'99*, Istanbul.
- [26] A. JEAN-MARIE, M. TIDBALL, M. ESCALANTE, V. LEONI, H. PONCE DE LEÓN, « On the Influence of Resequencing on the Regularity of Service », *Performance Evaluation* 35-36, 1999, p. 115–135, actes de la conférence *PERFORMANCE'99*, Istanbul.
- [27] Z. LIU, P. NAIN, D. TOWSLEY, Z.-L. ZHANG, « Asymptotic Behavior of a Multiplexer Fed by a Long-Range Dependent Process », *Journal of Applied Probability* 36, 1999, p. 105–118.
- [28] Z. LIU, N. NICLAUSSE, C. JALPA-VILLANUEVA, « Web Server Benchmarking and Web Traffic Modeling », *In System Performance Evaluation: Methodologies and Applications, E. Gelenbe (Ed.)*, 1999.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [29] M. ABBAD, R. ELAZOUZI, E. ALTMAN, « Perturbation for Differential Games with Hybrid Controls », *in: Proceedings of the 2nd International Conference on Operations Research (CIRO'99)*, Marrakech, Maroc, mai 1999.
- [30] O. AIT-HELLAL, A. ALTMAN, « Performance Evaluation of the Rate-Based Flow Control Mechanism for ABR Service: Generalization », *in: Proceedings of the IEEE INFOCOMM'99 Conference*, p. 819–826, New-York, mars 1999.
- [31] O. AIT-HELLAL, E. ALTMAN, T. BASAR, « A Robust Identification Algorithm for Traffic Models in Telecommunications », *in: Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control (CDC'99)*, Phoenix, Arizona, décembre 1999.
- [32] G. ALPAN, E. ALTMAN, H. MAGROUN, D. KOFMAN, « Call Admission Control in the Presence of Point-to-Multipoint Best Effort Connections », *in: Proceedings of IEEE ICC'99*, Vancouver, Canada, juin 1999.
- [33] E. ALTMAN, T. BASAR, R. SRIKANT, « Nash Equilibria for Combined Flow Control and Routing in Networks: Asymptotic Behavior for a Large Number of Users », *in: Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control (CDC'99)*, Phoenix, Arizona, USA, décembre 1999.
- [34] E. ALTMAN, T. BASAR, R. SRIKANT, « A Team-Theoretic Approach to Congestion Control », *in: Proceedings of the 14th IFAC Congress, J*, p. 259–264, Beijing, P.R. China, juillet 1999.
- [35] E. ALTMAN, S. BHULAI, B. GAUJAL, H. HORDIJK, « Optimal Routing to M parallel queues with no buffers », *in: Proceedings of the 33rd Allerton Conference on Communication, Control and Computing*, Illinois, USA, septembre 1999.
- [36] E. ALTMAN, G. KOOLE, T. JIMÉNEZ, « Comparing tandem queueing systems and their fluid limits », *in: Proceedings of the 33rd Allerton Conference on Communication, Control and Computing*, Illinois, USA, septembre 1999.
- [37] E. ALTMAN, H. KUSHNER, « Control of Polling in Presence of Vacations in Heavy Traffic with Applications to Satellite and Mobile Radio Systems », *in: Proceedings of the 33rd Allerton Conference on Communication, Control and Computing*, Illinois, USA, septembre 1999.
- [38] F. BACCELLI, S. GAUBERT, D. HONG, « Representation and Expansion of (Max,Plus)–Lyapunov Exponents », *in: Proceedings of 37th Annual Allerton Conf. on Communication, Control and Computing*, Allerton Park, septembre 1999.

- [39] F. BACCELLI, D. KOFMAN, J.-L. ROUGIER, « Self Organizing Hierarchical Multicast Trees and their Optimization », *in: Proceedings of the 1999 IEEE INFOCOM Conference*, New York, mars 1999.
- [40] C. BARAKAT, E. ALTMAN, « Analysis of TCP with Several Bottleneck Nodes », *in: Proceedings of IEEE Globecom*, Rio de Janeiro, Brésil, décembre 1999.
- [41] C. BARAKAT, E. ALTMAN, « Impact of Network Buffers on TCP Start-Up », *in: Proceedings of the IEEE Middle East Workshop on Networking*, Beyrouth, Liban, novembre 1999.
- [42] C. BARAKAT, N. CHAHER, W. DABBOUS, E. ALTMAN, « Improving TCP/IP over Geostationary Satellite Links », *in: Proceedings of IEEE Globecom*, Rio de Janeiro, Brésil, décembre 1999.
- [43] T. BONALD, M. MAY, « Drop Behavior of RED for Bursty and Smooth Traffic », *in: Proceedings of Int. Work. on Quality of Service (IWQoS'99)*, Londres, juin 1999.
- [44] H. KAMEDA, E. ALTMAN, T. KOZAWA, « A Case Where a Paradox Like Braess's Occurs in the Nash Equilibrium But Does Not Occur in the Wardrop Equilibrium - A Situation of Load Balancing in Distributed Computer Systems », *in: Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control (CDC'99)*, Phoenix, Arizona, USA, décembre 1999.
- [45] G. KOOLE, P. NAIN, « On the Value Function of a Priority Queue with an Application to a Controlled Polling Model », *in: Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control (CDC'99)*, Phoenix, Arizona, USA, décembre 1999. Version longue à paraître dans QUESTA.
- [46] Z. LIU, N. NICLAUSSE, C. JALPA-VILLANUEVA, « WAGON: A Web Server Benchmarking tool », *in: Poster Proceedings of the 8th World Wide Web Conference*, Toronto, Canada, mai 1999.
- [47] M. MAY, J.-C. BOLOT, D. C., A. JEAN-MARIE, « Simple Performance Models of Differentiated Service Schemes for the Internet », *in: Proceedings of the 1999 IEEE INFOCOM Conference*, New York, mars 1999. <http://www.inria.fr/RRRT-3238.html>.

Rapports de recherche et publications internes

- [48] H. AHYAN, F. BACCELLI, « Expansions for Joint Laplace Transforms of Stationary Waiting Times in (max plus) Linear Systems with Poisson Input », *rapport de recherche n° J-99-01*, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, 1999, à paraître dans QUESTA.
- [49] O. AIT-HELLAL, E. ALTMAN, « Fonctionnement de TCP: Problèmes et Améliorations », *RR n° 3603*, INRIA, Sophia Antipolis, 1999.
- [50] E. ALTMAN, K. AVRACHENKOV, C. BARAKAT, « TCP in Presence of Bursty Losses », *RR n° 3740*, INRIA, Sophia Antipolis, 1999.
- [51] F. BACCELLI, A. BOROVKOV, J. MAIRESSE, « Asymptotic Results on Infinite Tandem Queueing Networks », *RR n° 99/15*, LIAFA, 1999, à paraître dans Prob. Theory Related Fields.
- [52] F. BACCELLI, C. GLOAGUEN, S. ZUYEV, « Superposition of Planar Voronoi Tessellations », *RR n° 3729*, INRIA, Sophia Antipolis, 1999, à paraître dans Stochastic Models.
- [53] C. BARAKAT, E. ALTMAN, W. DABBOUS, « On TCP Performance in an Heterogeneous Network: A Survey », *RR n° 3737*, INRIA, Sophia Antipolis, 1999.
- [54] G. KOOLE, Z. LIU, R. RIGHTER, « Optimal Transmission Policies for Noisy Channels », *TR n° WS-515*, Faculteit der Exacte Wetenschappen, Vrije Universiteit Amsterdam, 1999, à paraître dans Operations Research.
- [55] E. LETY, T. TURLETTI, F. BACCELLI, « Cell-Based Multicast Grouping in Large-Scale Virtual Environments », *RR n° 3729*, INRIA, Sophia Antipolis, 1999.
- [56] J. MIGGE, A. JEAN-MARIE, « Real-Time Scheduling: Non-preemption, Critical Sections and Round Robin. », *RR n° 3678*, INRIA, Sophia Antipolis, avril 1999, <ftp://ftp.inria.fr/INRIA/publication/RR/RR-3678.ps.gz>.

-
- [57] J. MIGGE, A. JEAN-MARIE, « Real-Time Scheduling: Non-Preemption, Critical Sections and Round Robin », *RR n° 3678*, INRIA, Sophia Antipolis, avril 1999.
 - [58] S. SAHU, P. NAIN, D. TOWSLEY, C. DIOT, V. FIRIOU, « On Achievable Service Differentiation with Token Bucket Marking for TCP », *Compsci Tech Report n° 99-72*, université du Massachusetts, Amherst, USA, novembre 1999, soumis à ACM Sigmetrics'2000.
 - [59] K. TCHOUMATCHENKO, S. ZUYEV, « Aggregate and Fractal Tessellations », *RR n° 3699*, INRIA, Sophia Antipolis, 1999, soumis a Prob. Theory Related Fields.

Divers

- [60] S. ALOUF, *Inferring congestion in the Internet via moment-based estimators*, Rapport de DEA réseaux et systèmes distribués, université de Nice Sophia Antipolis, juin 1999.
- [61] S. BARBIER, *Modélisation du trafic Web*, Rapport de stage, CNAM, juin 1999.
- [62] N. MALOUCH, *Etudes des performances des services différenciés dans l'Internet*, Rapport de DEA réseaux et systèmes distribués, université de Nice Sophia-Antipolis, juin 1999.