

Projet MISTRAL

*Modélisation en Informatique et Systèmes de
Télécommunications :
Recherche et Applications Logicielles*

Sophia Antipolis

THÈME 1B



*R*apport
d'Activité

2001

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	4
3	Fondements scientifiques	4
4	Domaines d'applications	5
4.1	Panorama	5
5	Logiciels	5
5.1	WAGON : Un générateur de trafic Web	5
6	Résultats nouveaux	5
6.1	Analyse quantitative des protocoles	5
6.1.1	Protocole TCP	5
6.1.2	FEC pour la voix sur IP	6
6.1.3	Politique de rejet sélectif pour les réseaux ATM	6
6.2	Qualité de service dans les réseaux	7
6.2.1	Équité dans l'allocation des ressources	7
6.2.2	Services différenciés pour l'Internet	7
6.2.3	Techniques pour garantir les délais des applications multipoints	8
6.2.4	Modèles d'inférences	8
6.3	Optimisation multicritère dans les réseaux	9
6.4	Contrôle et théorie des jeux	9
6.4.1	Systèmes linéaires quadratiques avec sauts	9
6.4.2	Jeux stochastiques	10
6.4.3	Processus de décision markoviens	10
6.5	Localisation d'agents mobiles	11
6.6	Réseaux mobiles	12
6.7	Résultats théoriques sur les files d'attente	12
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	13
7.1	CTI avec France Télécom R&D-Issy Les Moulineaux	13
7.2	Conventions de recherche avec Alcatel Space Industries	13
7.2.1	Modélisation du trafic multimedia pour les réseaux satellitaires	13
7.2.2	Planification et optimisation des communications par satellites	13
7.3	RNRT « CONSTELLATIONS »	14
7.4	RNRT « VTHD »	14
7.5	RNRT « ESQUIMAUX »	15
7.6	INRIA NSF	15

8	Actions régionales, nationales et internationales	15
8.1	Actions nationales	15
8.2	Réseaux et groupes de travail internationaux	16
8.3	Relations bilatérales internationales	16
8.3.1	PAI Van Gogh avec les Pays-Bas	16
8.3.2	Collaboration ARC-en-Ciel avec Israël	16
8.3.3	Amérique du Nord	16
8.4	Visites et invitations de chercheurs	16
9	Diffusion de résultats	17
9.1	Animation de la communauté scientifique	17
9.2	Enseignement universitaire	17
9.3	Participation à des colloques, séminaires, invitations	17
10	Bibliographie	19

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Philippe Nain [DR]

Responsable permanent

Konstantin Avratchenkov [CR]

Assistante de projet

Ephie Deriche [TR, à temps partiel avec le projet MASCOTTE]

Personnel Inria

Eitan Altman [DR]

Ingénieurs Experts

Rachid El Azouzi [CTI/France Télécom R&D, depuis le 01/11/01]

Eric Thibault [RNRT ESQUIMAUX, depuis le 16/11/01]

Ingénieurs Associés

Maria Ladoue [depuis le 01/09/01]

Christophe Rétière [jusqu'au 30/04/01]

Chercheurs Post doctorants

Rachid El Azouzi [CTI/France Télécom R&D, jusqu'au 31/10/01]

Nidhi Hegde [RNRT VTHD, depuis le 29/10/01]

Eric Thibault [RNRT ESQUIMAUX, jusqu'au 15/11/01]

Chercheurs doctorants

Sara Alouf [Bourse MESR, 3ème année]

Chadi Barakat [Bourse INRIA, 3ème année jusqu'en avril 01]

Thomas Boulogne [Bourse MESR, 1ère année jusqu'en septembre 01]

Parijat Dube [Bourse INRIA/Ambassade de France en Inde, 2ème année]

Robin Groenevelt [1/2 bourse centre, 1/2 bourse RNRT VTHD, 1ère année]

Naceur Malouch [Bourse MESR, 3ème année]

Corinne Touati [Allocataire moniteur, 2ème année, en commun avec MASCOTTE]

Chercheurs invités

Tamer Başar [university of Illinois at Urbana Champaign, USA, du 21/04/04 au 29/04/01]

Shalabh Bhatnagar [Vrije university, Pays-Bas, du 02/07/01 au 07/07/01]

Sandjai Bhulai [Vrije university, Pays-Bas, du 05/02/01 au 08/02/01 et du 23/07/01 au 27/07/01]

Moshe Haviv [university of Sidney, Australie, du 25/01/01 au 26/01/01]

Bernd Heidergott [Eurandom, Pays-Bas, du 12/02/01 au 17/02/01]

Ger Koole [Vrije university, Pays-Bas, 23/01/01 au 29/02/01 et du 16/07/01 au 03/08/01]

Tirunallai Lakshman [Bell Labs, USA, du 03/04/01 au 09/04/01]

Rob van der Mei [Vrije university, Pays-Bas, du 11/11/01 au 16/11/01]

Rudesindo Núñez Queija [CWI, Pays-Bas, du 01/08/01 au 31/08/01]

Georgy Schevlyakov [St.-Petersburg State Technical university, Russie, du 22/10/01 au 05/11/01]

Don Towsley [university of Massachusetts, USA, du 04/11/01 au 07/11/01]

Nikita Vilchevsky [St.-Petersburg State Technical university, Russie, du 22/10/01 au 05/11/01]

Uri Yechiali [université de Tel Aviv, Israël, du 29/08/01 au 09/09/01]

Sergueï Zouev [université de Stratchclyde, GB, du 10/05/01/ au 12/05/01]

Stagiaires

Urtzi Ayesta [Columbia university, USA, du 01/08/01 au 30/11/01]

Guillaume Gamba [INSA, Lyon, du 04/06/01 au 31/08/01]

Adil Iraqi [ISIMA, Clermont Ferrand II, du 29/05/01 au 29/08/01]

Bachar Zouari [DEA RSD ESSI, du 01/03/01 au 30/06/01]

Collaborateur extérieur

Tania Jiménez [univ. de Los Andes, Mérida, Venezuela]

2 Présentation et objectifs généraux

La modélisation, l'évaluation des performances et le contrôle des systèmes informatiques et de télécommunications connaissent actuellement de nombreux développements tant du point de vue théorique qu'applicatif. Plusieurs formalismes sont utilisés par le projet : les réseaux de files d'attente et plus généralement les processus stochastiques, ainsi que la théorie des jeux et les processus de décision markoviens.

Les actions de recherche de 2000–2001 ont porté sur :

- la modélisation de systèmes de télécommunications, notamment dans le cadre du projet RNRT sur les constellations de satellites, d'une action ARC-en-Ciel avec Israël et d'une coopération franco-américaine NSF ITR,
- la génération de trafic Web dans le cadre du projet RNRT VTHD,
- l'élaboration de politiques de contrôle optimal pour les réseaux notamment dans le cadre d'une convention de recherche avec France Télécom R&D et dans un PAI avec les Pays-Bas,
- la modélisation du trafic IP, l'optimisation et la planification des réseaux satellitaires dans le cadre d'une convention de recherche avec Alcatel Space Industries et dans le projet RNRT ESQUIMAUX,
- 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, grandes déviations,
- la théorie des systèmes à événements discrets : réseaux de files d'attente, réseaux de Petri, approximations fluides,
- 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

4.1 Panorama

Le principal domaine d'applications du projet est celui des réseaux de 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, protocoles TCP et HTTP, voix sur IP, mécanismes de différenciation de services, IP sur liaisons satellites, trafic et serveurs Web, estimations et mesures,
- les réseaux ATM : contrôle d'accès et qualité de service, ordonnancement.

5 Logiciels

5.1 WAGON : Un générateur de trafic Web

Participants : Guillaume Gamba, Adil Iraqi.

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

WAGON est un logiciel, développé dans le projet MISTRAL (cf. rapports d'activités précédents) qui génère du trafic Web (requêtes HTTP adressées, via un réseau, à un serveur). Il peut être utilisé, par exemple, comme *benchmark* de serveurs Web ou pour la production de trafic Web "à la demande." WAGON est utilisé dans le projet RNRT "VTHD" pour la génération d'un trafic de fond significatif (de l'ordre de 1Gb/s) et représentatif d'une grande partie du trafic IP (voir Section 7.4).

Cette année nous avons achevé l'implantation dans WAGON des résultats de la thèse de C. Jalpa-Villanueva (ex-doctorant MISTRAL, cf. le rapport d'activités 2000) sur le mélange fini de distributions. WAGON est maintenant capable d'identifier une combinaison linéaire de distributions de probabilités qui représente "au mieux" (au sens du maximum de vraisemblance) un jeu de données (nombre de clics, taille des documents, etc.). Les distributions usuelles (lois exponentielle, Pareto, normale, log-normale, inverse gaussienne, Weibull, géométrique, etc.) ainsi que leurs mélanges sont maintenant disponibles.

6 Résultats nouveaux

6.1 Analyse quantitative des protocoles

Participants : Eitan Altman, Konstantin Avratchenkov, Chadi Barakat, Parijat Dube.

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

6.1.1 Protocole TCP

Analyse du comportement non-linéaire de TCP Une approche classique pour la modélisation de TCP consiste à utiliser un modèle fluide, où la fenêtre de congestion entre deux

pertes consécutives croît linéairement. Suite à une campagne de mesures sur l'Internet, nous avons conclu que ces modèles linéaires ne correspondaient pas à la réalité pour des connexions TCP de courte distance. Des non-linéarités apparaissent, conséquences du comportement de la taille de la fenêtre de congestion et des délais de propagation dans les périodes de forte congestion. Dans [18, 19], E. Altman, C. Barakat, K. Avratchenkov, en collaboration avec R. Núñez Queija (CWI, Amsterdam), ont proposé de nouveaux modèles qui prennent en compte ces non-linéarités, obtenu des expressions analytiques pour le débit de TCP et les ont validées expérimentalement.

TCP sur liens bruités Dans le cadre du projet RNRT CONSTELLATIONS (voir Section 7.3), E. Altman et C. Barakat ont étudié le comportement du protocole TCP en présence de liens bruités. Ils se sont intéressés à l'impact, sur les performances de TCP, de solutions de rajout de redondance au niveau de la couche liaison. Ils ont obtenu des expressions pour le débit en fonction de la quantité de redondance ajoutée et des caractéristiques du processus de pertes [24]. Ces résultats ont été obtenus à la fois dans le cas où les pertes sont indépendantes et dans le cas où elles sont modélisées par un processus dont l'intensité est modulée par une chaîne de Markov à deux états (MMPP).

6.1.2 FEC pour la voix sur IP

Les mécanismes de FEC (Forward Error Correction) sont indispensables dans les applications de transmission de la voix en temps-réel afin de pallier les pertes de paquets. Ces mécanismes doivent être simples à mettre en œuvre; de plus, les processus de codage et de décodage ne doivent pas introduire une surcharge qui diminuerait l'interactivité. Dans [21, 20] E. Altman et C. Barakat, en collaboration avec V. Ramos (doctorant à l'Institut Eurécom) ont étudié un mécanisme classique de FEC, où une partie de l'information significative contenue dans chaque paquet est retransmise dans un autre paquet. La qualité de la copie ainsi reconstruite dépendra de la quantité de FEC transmise. Ils ont proposé une analyse détaillée de ce mécanisme par files d'attente qui repose sur un théorème de ballot. Des expressions simples, donnant la qualité de la transmission audio en fonction de la quantité de redondance et l'éloignement d'un paquet arbitraire de celui qui contient sa FEC, ont été trouvées. L'analyse montre que pour une fonction d'utilité linéaire par rapport à la quantité d'information, il n'est pas recommandé d'utiliser ce mécanisme. Ils ont également introduit de nouvelles fonctions d'utilité mieux adaptées aux caractéristiques de ce type d'applications.

6.1.3 Politique de rejet sélectif pour les réseaux ATM

Dans [26, 25] E. Altman et P. Dube considèrent des paquets qui arrivent à une file d'attente à capacité finie selon un processus de Poisson. Souvent, dans les réseaux, un groupe de paquets contigus forme une trame, et la perte d'un seul paquet de la trame entraîne la perte de la trame entière. C'est le cas dans les réseaux ATM, où un protocole de la couche transport (la couche AAL) est responsable de ce regroupement. Donc, les paquets d'une trame qui arrivent après une perte ayant eu lieu dans cette même trame sont inutiles et il est avantageux de les rejeter. Des formules exactes pour les performances de plusieurs types de politiques de rejet et

des approximations fluides pour le régime de forte charge ont été obtenues. Ces résultats s'appliquent pour le dimensionnement des tampons dans les réseaux et permettent de garantir une borne sur le taux de pertes. Une généralisation de ce travail aux processus d'arrivée ON/OFF a également été proposée.

6.2 Qualité de service dans les réseaux

Participants : Sara Alouf, Eitan Altman, Naceur Malouch, Philippe Nain, Corinne Touati.

Mots clés : services différenciés, RED, multi-RED, théorie des jeux, équilibre de Nash, allocation de la bande passante, modèles d'inférences, estimation, filtrage.

6.2.1 Équité dans l'allocation des ressources

Le concept de Nash Bargaining Solution (NBS), né de la théorie des jeux coopératifs, est utilisé depuis plus de dix ans dans les réseaux pour permettre le partage équitable des ressources. Grâce à ses propriétés intéressantes, il a récemment été utilisé dans des problèmes d'allocation de bande passante dans des réseaux aux topologies quelconques où se côtoient des applications aux fonctions d'utilité linéaires. Dans [40], E. Altman et C. Touati, en collaboration avec J. Galtier du projet MASCOTTE, utilisent le NBS dans le cadre de l'allocation de bande passante entre des applications aux fonctions d'utilité concaves quelconques. Ils étudient l'impact de la concavité sur l'allocation et présentent des méthodes calculatoires pour obtenir des allocations équitables dans une topologie générale, basées sur une approche de dual Lagrangien et de programmation semi-définie positive.

6.2.2 Services différenciés pour l'Internet

En collaboration avec Z. Liu (IBM J. Watson Research Center, USA), N. Malouch a développé un modèle qui permet d'estimer le débit d'une connexion TCP dans un réseau contenant les principaux éléments offrant les services différenciés. Le modèle prend en entrée les paramètres suivants : les probabilités de pertes des différentes classes de services, le temps aller-retour moyen des paquets TCP, la taille du tampon du marqueur et le débit de génération des jetons du marqueur. Précisons que le marqueur peut être constitué de plusieurs *token buckets* en cascade. Les expressions de débit obtenues ont été validées par simulations[28].

Sous l'hypothèse où les paquets traversent un goulot d'étranglement, ce qui revient à considérer un seul routeur, et où ce routeur est équipé du mécanisme de différenciation de service RED, il a développé un modèle, à arrivées poissonniennes, qui permet de calculer l'occupation moyenne du routeur sous forme explicite ^[LM]. Des résultats de simulations attestent du bon comportement du modèle et, en particulier, de la pertinence de l'hypothèse poissonnienne sur les arrivées de paquets.

[LM] Z. LIU, N. MALOUCHE, « Using TCP analysis for network design with QoS constraints », article en préparation.

6.2.3 Techniques pour garantir les délais des applications multipoints

Plusieurs mécanismes ont été développés pour garantir les délais dans les protocoles multipoint (*multicast*). Ces mécanismes nécessitent une nouvelle infrastructure du réseau utilisant des routeurs multicast. Une solution qui utilise uniquement les protocoles de point-à-point déjà existants est de réaliser les fonctions de communication au niveau de l'application. Néanmoins, les mêmes besoins en termes de qualité de service doivent être pris en compte. N. Malouch, en collaboration avec Z. Liu, S. Sahu (IBM T. J. Watson Research Center, USA), D. Rubenstein et V. Misra (univ. of Columbia, USA), a développé de nouveaux algorithmes qui permettent de construire des arbres multipoint en garantissant les délais imposés par les applications. Ils ont trouvé, dans certains cas, la solution optimale minimisant les délais de bout en bout [LMRS01], [LMM⁺01].

6.2.4 Modèles d'inférences

Estimation de la taille d'un groupe multipoint S. Alouf, E. Altman et P. Nain ont poursuivi le travail sur l'estimation de la taille d'un groupe multipoint dynamique (cf. rapport de l'an dernier). Sous l'hypothèse de trafic fort, l'évolution temporelle de la taille du groupe multipoint a été modélisée par un processus de diffusion de type Ornstein-Ühlenbeck. De là, un filtre de Kalman a été construit, qui calcule, à chaque pas de temps, un estimateur optimal de la taille du groupe. À l'aide de simulations, ils ont constaté la bonne robustesse de l'estimateur aux hypothèses du modèle (trafic faible, évolution non-markovienne de la taille du groupe). Ils ont testé leur estimateur sur des traces réelles et ont obtenu des résultats très satisfaisants [31]. Des extensions de ce travail en cours visent à introduire différentes contraintes (sur le nombre moyen d'acquittements autorisés, sur la qualité minimale de l'estimateur, etc.) ainsi qu'à intégrer la probabilité d'échantillonnage dans le schéma d'estimation, de façon à ce que l'estimateur puisse s'adapter à toute variation importante de la taille de la population multipoint.

Estimation de la congestion Dans [16], S. Alouf et P. Nain, en collaboration avec D. Towsley (univ. of Massachusetts, USA), ont développé deux modèles d'inférence pour estimer certaines caractéristiques du réseau (capacité de la mémoire disponible et intensité du trafic transverse). Onze schémas ont été définis et le meilleur d'entre eux a été identifié par simulations à l'aide du logiciel *ns-2*. Le modèle M/M/1/K présenté dans [16] peut également être utilisé pour estimer le taux de service du goulot d'étranglement. Cela donne neuf schémas d'estimation possibles. Malheureusement, aucun des estimateurs provenant de ces neuf schémas ne s'est avéré robuste aux hypothèses du modèle. Ceci est essentiellement dû au fait que l'estimateur utilise trois estimations intermédiaires augmentant ainsi l'erreur finale sur l'estimation.

[LMRS01] Z. LIU, N. MALOUCH, D. RUBENSTEIN, S. SAHU, « Delay-bounded end-system multicast with proxy support », soumis pour publication, juillet 2001.

[LMM⁺01] Z. LIU, N. MALOUCH, V. MISRA, D. RUBENSTEIN, S. SAHU, « Bandwidth sharing schemes for multiple multi-party sessions », soumis pour publication, novembre 2001.

6.3 Optimisation multicritère dans les réseaux

Participants : Eitan Altman, Thomas Boulogne, Rachid El Azouzi.

Mots clés : théorie des jeux, équilibre de Nash, équilibre de Wardrop, paradoxe de Braess.

L'activité de recherche sur l'optimisation du routage dans les réseaux a été poursuivie ; nous nous sommes intéressés en particulier aux problèmes d'optimisation multicritère et multiagent, en nous appuyant sur les fondements de la théorie des jeux. Cette activité, initialisée dans le cadre de la coopération INRIA–NSF avec l'université de l'Illinois (Urbana Champaign, USA), s'est étendue dans le cadre d'une convention de recherche avec France Télécom R&D qui a débuté en 2001, en partenariat avec le projet MIAOU (O. Pourtallier). Nous avons de plus poursuivi notre coopération sur ce thème avec des collègues de l'université de Tsukuba (Japon) et, en particulier, avec le prof. H. Kameda. Les résultats obtenus cette année sur cet axe de recherche sont décrits ci-dessous.

E. Altman et H. Kameda ont étudié l'existence et l'unicité d'équilibres de type Nash dans des réseaux à topologies générales, où le coût des liens peut varier d'un usager à l'autre [23]. Rappelons qu'à l'équilibre de Nash aucune déviation unilatérale n'est profitable : chaque usager qui dévie de cet équilibre ne pourra améliorer ses performances. E. Altman et R. El Azouzi ont découvert qu'en présence de contraintes de qualité de service il n'y a plus d'unicité de l'équilibre [27]. Néanmoins, sous certaines conditions, il est possible d'obtenir l'unicité de l'utilisation des liens.

Une question importante qui se pose est de savoir si l'équilibre est atteint lorsque le réseau n'est pas à l'équilibre à l'instant initial. Cette question a été abordée par E. Altman, en collaboration avec T. Jiménez (univ. de Los Andes, Mérida, Venezuela) et T. Başar (univ. Illinois, USA) et N. Shimkin (Technion, Israël), et des résultats de convergence asymptotique ont été obtenus sur un réseau de liens parallèles.

Des paradoxes intéressants se produisent dans les réseaux à cause du caractère non-coopératif des usagers. Les paradoxes les plus frappants sont ceux de type Braess : en ajoutant un lien au réseau ou en augmentant la capacité d'un lien, les performances de tous les usagers se dégradent. De tels scénarios sont examinés en détail dans [22] par E. Altman, R. El Azouzi et O. Pourtallier du projet MIAOU.

6.4 Contrôle et théorie des jeux

Participants : Eitan Altman, Rachid El Azouzi, Philippe Nain.

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

6.4.1 Systèmes linéaires quadratiques avec sauts

Dans [14] E. Altman et R. El Azouzi, en collaboration avec M. Abbad (univ. de Rabat, Maroc), ont étudié un problème de perturbation des systèmes linéaires quadratiques de dimension

finie mais arbitraire, où les paramètres sont fonctions d'une chaîne de Markov. La dynamique continue est contrôlée ; il y a un coût quadratique (en l'état et l'action) et le but est de le minimiser. Le comportement asymptotique de ce système quand le taux de transition de la chaîne de Markov contrôlée devient grand a été analysé en ramenant l'étude à la résolution d'une équation de Riccati perturbée. La solution de cette équation a été obtenue sous la forme d'une série de Taylor.

6.4.2 Jeux stochastiques

Dans le cadre de notre activité en théorie de jeux, E. Altman en collaboration avec E. Feinberg (univ. de New York à Stony Brook, USA), J. Filar et V. Gaitsgory (tous deux de l'univ. de South Australia), a étudié dans [9] les limites des fonctions de valeurs et des politiques dans des jeux quand un paramètre dont dépendent les coûts tend vers zero. Les résultats ont été appliqués à des jeux stochastiques où les coûts, ainsi que les probabilités de transition, sont perturbés.

6.4.3 Processus de décision markoviens

Les processus de décision markovien dans les réseaux E. Altman a rédigé un état-de-l'art sur l'application des processus de décision markoviens (MDP) à l'analyse et au contrôle des réseaux de télécommunications, qui vient de paraître dans [12]. Dans ce travail, E. Altman recense les problèmes de contrôle dans les réseaux qui ont été résolus grâce aux MDP ainsi que ceux qui pourraient l'être. Il fait également le point sur les différentes approches possibles pour l'application de ces techniques aux réseaux, en parlant d'information, de décentralisation, de compétition et de contraintes.

Limites fluides dans les files d'attentes Dans [11] E. Altman, en collaboration avec T. Jiménez (univ. de Los Andes, Mérida, Venezuela) et G. Koole (Vrije univ., Pays-Bas), ont utilisé des méthodes empruntées aux processus de décision markoviens pour comparer le comportement de files d'attente avec leurs limites fluides. En utilisant la méthode d'itération par la valeur (*value iteration*), ils ont prouvé que la limite fluide est une borne inférieure pour la charge dans le système réel.

Contrôle d'admission Dans [10] E. Altman, en collaboration avec T. Jiménez (univ. de Los Andes, Mérida, Venezuela) et G. Koole (Vrije univ., Pays-Bas), ont étudié un problème de contrôle d'accès à un canal commun. Les appels sont regroupés en classe, les classes se distinguant les unes des autres par le taux d'arrivée des appels, la bande passante demandée ou la structure de coût. Le problème est de trouver une politique d'admission des appels qui maximise le revenu. A l'aide de la programmation dynamique, des propriétés de sous-modularité de la politique optimale ont été identifiées pour deux classes d'appels. Un modèle fluide de ce système est ensuite proposé et utilisé pour construire des politiques d'admission quasi-optimales.

Contrôle des files d'attente Les travaux de P. Nain et de G. Koole (Vrije univ., Pays-Bas) sur le calcul explicite de la fonction de valeur pénalisée et du vecteur de biais (pour le coût moyen) dans un modèle de type *polling* avec arrivées poissonniennes ont été achevés [KN01]. La structure de coût comprend une pénalité lorsque le serveur passe d'une classe de clients à une autre (*switching cost*) et un coût moyen (*holding cost*) par classe et par unité de temps pour chaque client dans le système. Les clients sont servis selon la discipline *preemptive resume priority*. La fonction de valeur pénalisée est calculée pour des distributions de services générales, dépendant de la classe. De là, l'application d'un théorème Taubérien donne le vecteur de biais, à condition toutefois que les temps de service soient distribués selon une loi exponentielle, de paramètre dépendant de la classe (nous pensons que notre résultat reste valide pour des temps de service généraux mais n'avons pas pu le montrer). Ce travail a été soumis à *QUESTA*. Une approche directe qui donne le vecteur de biais dans le cas de deux classes de clients a été proposée dans [GKN01] par R. Groenevelt et P. Nain, en collaboration avec G. Koole (Vrije univ., Pays-Bas). Dans [KN00] et [GKN01] il est montré comment la connaissance sous forme explicite de la fonction de valeur et du vecteur de biais pour une politique de service donnée (ici la μc -rule) permet le calcul de politiques de service sous-optimales, dans des cas où l'approche traditionnelle de la programmation dynamique ne s'applique pas à cause du trop grand nombre d'états.

6.5 Localisation d'agents mobiles

Participants : Sara Alouf, Philippe Nain.

Mots clés : agent/code mobile, chaînes de Markov.

S. Alouf et P. Nain, en collaboration avec F. Huet du projet OASIS, ont poursuivi l'évaluation et la comparaison de deux approches de localisation d'agents mobiles, entamé en 2000. Une approche est distribuée et basée sur des *forwarders*, l'autre est centralisée et s'appuie sur un seul serveur. Dans les deux cas, une analyse markovienne a permis le calcul du temps de réponse moyen du système, soit explicitement (*forwarders*) soit numériquement (serveur central). F. Huet a mis en place des expériences de mobilité à l'INRIA (réseau LAN) ainsi qu'entre l'INRIA et l'École d'Ingénieurs en Informatique de l'Université de Nice–Sophia Antipolis (réseau MAN). L'exécution de la mobilité des agents repose sur l'utilisation de *ProActive PDC*, une librairie Java développée dans le projet OASIS, qui contient toutes les primitives nécessaires à la mobilité. Les résultats expérimentaux, présentés dans [AHN01], valident les modèles proposés et indiquent que l'approche centralisée donne les meilleurs résultats, tout au moins dans un réseau de type LAN ou MAN.

-
- [KN01] G. KOOLE, P. NAIN, « An explicit solution for the value function of a priority queue », soumis à *QUESTA*, novembre 2001.
- [GKN01] R. GROENEVELT, G. KOOLE, P. NAIN, « On the bias vector of a two-class preemptive priority queue », à paraître dans *Mathematical Methods of Operations Research*, novembre 2001.
- [KN00] G. KOOLE, P. NAIN, « On the value function of a priority queue with an application to a controlled polling model », *QUESTA*, 34, p. 199-204, 2000.
- [AHN01] S. ALOUF, F. HUET, P. NAIN, « Forwarders vs. centralized server: an evaluation of two approaches for locating mobile agents », soumis à la conférence ACM Sigmetrics'2002, novembre 2001.

6.6 Réseaux mobiles

Participant : Eitan Altman.

Mots clés : réseaux mobiles, UMTS.

MISTRAL a entamé une activité de recherche sur les réseaux mobiles.

Dans [15] E. Altman, en collaboration avec O. Sharon (univ. de Haifa, Israël), a proposé et analysé les performances d'un protocole à jeton. Le protocole utilise deux anneaux logiques qui correspondent aux stations actives et inactives. Ainsi, le jeton ne visitera que les stations actives contrairement aux protocoles à jeton classiques où le jeton peut visiter des stations inactives, d'où des délais de transmission accrus. Une modélisation par file d'attente est proposée dans [15] qui permet le calcul de bornes sur les performances. Le modèle est également validé par simulations.

Dans [17], un problème de contrôle de puissance est considéré par E. Altman, en collaboration avec T. Alpcan, T. Başar et R. Srikant (tous trois de l'univ. de l'Illinois, USA). Le contrôle de la puissance est réalisée de manière distribuée par chaque mobile sur le lien montant. La puissance de transmission de chaque mobile se présente comme un bruit qui gêne les autres mobiles. Chaque mobile détermine sa puissance de façon à maximiser la qualité du signal (qui est fonction du rapport de sa puissance de transmission à l'interférence), choisie comme étant la capacité de Shannon et à minimiser la puissance de transmission. E. Altman et ses collègues ont identifié l'équilibre unique de ce problème en utilisant la théorie des jeux non-coopératifs. Ils ont également proposé de nouvelles méthodes de tarification.

6.7 Résultats théoriques sur les files d'attente

Participants : Sara Alouf, Philippe Nain.

Mots clés : files d'attente, processus MMPP, processus auto-similaire.

Le travail sur l'analyse d'une file d'attente en environnement semi-markovien (voir Section 6.3.2 du rapport d'activités 2000) s'est poursuivi en 2001. Sous l'hypothèse où l'intensité de trafic est strictement inférieure à 1 quand le système est dans l'état "off", P. Nain et R. Núñez Queija (CWI, Pays-Bas) ont calculé la fonction génératrice du nombre de clients [29] en résolvant un problème aux limites de Riemann-Hilbert. Une procédure numérique a été développée par S. Alouf pour calculer le nombre moyen de clients en attente (résultats numériques présentés lors de la conférence ACM Sigmetrics 2001/Performance 2001). Le cas général (intensités de trafic arbitraires, sous la condition de stabilité) est à l'étude. Rappelons qu'un des intérêts de ce modèle est qu'il permet de caractériser la distribution limite (sous la forme d'une fonction génératrice) en présence d'un processus d'arrivée asymptotiquement auto-similaire, et ainsi de constater l'impact sur les performances d'un tel processus d'arrivée. Seuls des résultats de nature asymptotique avaient été établis à ce jour dans ce contexte.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 CTI avec France Télécom R&D-Issy Les Moulineaux

Participants : Eitan Altman, Thomas Boulogne, Rachid El Azouzi.

Une CTI sur l'optimisation multicritère pour une durée de trois ans a été signée fin 2000. Elle porte sur l'application d'outils de la théorie des jeux aux problèmes de routage non-coopératif dans les réseaux. T. Boulogne a commencé sa thèse doctorale sur ce sujet et a étudié de nouveaux concepts d'équilibre dans ces réseaux, ainsi que des équilibres dans le contexte de communications multipoint. R. El Azouzi poursuit ce travail dans le cadre d'un post-doctorat dans le projet MISTRAL. Les responsables scientifiques de cette convention sont E. Altman et O. Pourtallier (du projet MIAOU).

7.2 Conventions de recherche avec Alcatel Space Industries

Le projet MISTRAL participe à deux conventions de recherche avec Alcatel Space Industries (ASPI). La première porte sur la modélisation du trafic multimédia dans un contexte satellitaire. La seconde, en partenariat avec le projet MASCOTTE, porte sur la planification et l'optimisation des communications par satellites

7.2.1 Modélisation du trafic multimedia pour les réseaux satellitaires

Participants : Kostya Avratchenkov, Parijat Dube, Philippe Nain, Eric Thibault.

Cette convention entre MISTRAL et ASPI porte sur la modélisation du trafic multimedia dans un contexte satellitaire. Elle a débuté en novembre 2000 et s'achèvera à la fin de l'année 2001. Le projet MISTRAL est chargé de proposer des modèles mathématiques de trafic multimedia à intégrer dans le démonstrateur système de SAGAM (SaVac) ainsi que dans le logiciel de simulation de trafic ATS (STS) de ASPI. Nous avons tout d'abord classifié les différents types de trafic susceptibles d'être transmis sur le réseau satellitaire de ASPI [35]. Dans [32], nous avons caractérisé et modélisé différents flux unitaires IP au niveau applicatif : flux audio et vidéo, transfert de fichier (FTP) et trafic Web (HTTP).

Dans [33], des modèles agrégés de ces flux ont été proposés et un modèle de TCP/IP en boucle fermée a été introduit [34]. Dans un routeur ATM embarqué la probabilité de perte des cellules doit être très faible (inférieure à 10^{-8}). Les méthodes utilisées par ASPI ne permettaient pas d'estimer cette quantité dans un délai raisonnable. En nous inspirant d'une technique développée pour la simulation des événements rares (changement de mesure de probabilité qui "accélère" l'apparition des événements rares), nous avons proposé dans [36] un algorithme efficace pour l'estimation de cette probabilité de perte.

7.2.2 Planification et optimisation des communications par satellites

Participants : Eitan Altman, Corinne Touati.

Cette convention, d'une durée de deux ans, entre MISTRAL et MASCOTTE d'une part,

et ASPI d'autre part, a débuté en avril 2001. Les résultats escomptés sont la définition d'algorithmes d'optimisation et des propriétés sur l'optimisation du codage. (voir Section 6.2.1).

7.3 RNRT « CONSTELLATIONS »

Participants : Eitan Altman, Chadi Barakat.

Le projet RNRT CONSTELLATIONS a débuté en 1999 et s'achèvera à la fin de 2001. Il regroupe, notamment, l'INRIA (MASCOTTE, MISTRAL, PLANETE), le CNES, l'ENST, l'INT, ALCATEL, France Télécom R&D et porte sur l'étude des réseaux de télécommunications par constellations de satellites. Dans le cadre de ce projet E. Altman et C. Barakat analysent l'Internet par satellites. E. Altman était le responsable de la tâche sur la qualité de service dans l'ATM et l'Internet par satellites.

7.4 RNRT « VTHD »

Participants : Guillaume Gamba, Adil Iraqi, Maria Ladoue, Philippe Nain, Christophe Rétière.

L'objectif de la plate-forme expérimentale VTHD (Vraiment Très Haut Débit), soutenue par le RNRT et représentée par le consortium regroupant France Télécom R&D, le GET, l'INRIA et l'Hôpital Georges Pompidou, est d'assurer le déploiement des réseaux Internet de seconde génération (à très haut débit). La tâche de MISTRAL est de déployer le logiciel WAGON de génération de trafic HTTP (voir section Logiciels) sur VTHD dans le but de générer à la demande un trafic de fond significatif. Pour ce faire, le logiciel WAGON a été installé sur 53 stations de travail (933Ghz, biprocesseur) toutes situées à Sophia Antipolis (7 à l'Institut Eurécom, 7 chez France Telecom R&D, le reste à l'INRIA). Ces 53 PC transmettent des requêtes HTTP à 8 serveurs (des PC identiques aux "PC WAGON"), localisés soit en région parisienne (2 à l'INRIA Rocquencourt, 1 à l'INT) soit en Bretagne (3 à l'IRISA, 2 à l'ENST-Bretagne). Une partie du serveur Web de l'INRIA (env. 400Mb) a été installée sur chacun de ces 8 serveurs. Les documents envoyés par ces serveurs en réponse aux requêtes des PC WAGON produisent ainsi un trafic important dans le sens "nord-sud." Voir [37] pour plus de détails.

La totalité des stations de travail n'ayant été disponible que durant l'été 2001, un retard a été pris dans la mise en place de WAGON sur VTHD. Tous les PC (serveurs et clients) sont maintenant connectés à la plate-forme. Des tests partiels récents mettant en œuvre une trentaine de PC ont permis d'atteindre un débit de 500Mb/s, laissant espérer un débit total de 1Gb/s lorsque tous les PC seront actifs simultanément.

Des outils de visualisation (*monitoring*) du trafic WAGON utilisant MRTG ont été installés à l'INRIA-Sophia, en collaboration avec N. Sayer, Ingénieur expert INRIA sur le projet VTHD. Ils permettent de visualiser le débit instantané des machines WAGON (en isolation ou en totalité), l'occupation des mémoires (serveurs et clients), le taux d'erreur par interface, le nombre de sessions TCP ouvertes, etc.

7.5 RNRT « ESQUIMAUX »

Participants : Eric Thibault, Philippe Nain.

Le projet RNRT ESQUIMAUX vise à développer un environnement de modélisation pour l'évaluation des performances des flux, notamment audio-visuels, dans un réseau de type IP/MPLS. Outre le projet MISTRAL, il regroupe CEGETEL, CS-SI, DELTA-PARTNERS, l'ENST et le LAAS. MISTRAL est chargé d'enrichir le logiciel NetQuad (développé et commercialisé par DELTA-PARTNERS), qui servira de noyau à l'environnement de modélisation, de modèles de trafic qui permettront de traiter un grand nombre de flux IP.

Nous avons tout d'abord développé, des modèles sources permettant de représenter des flux de type audio, vidéo et données [39]. Les flux unitaires et agrégés (homogènes et hétérogènes) sont considérés. Les algorithmes de génération événementielle des modèles proposés sont aussi présentés. Ces modèles, de type ON-OFF, MMPP ou $M/G/\infty$, ont été implémentés, testés, et validés dans NetQuad (travail en collaboration avec le LAAS).

Nous avons ensuite proposé des modèles représentant des flux TCP en boucle ouverte [38]. Cette modélisation suppose une indépendance entre le débit d'une connexion et les pertes associées. Nous considérons en effet que les processus de pertes associés au réseau sont connus et qu'un flux TCP n'influence pas ces processus. Nous travaillons actuellement sur la modélisation des flux TCP en boucle fermée afin de tenir compte de la dépendance entre le débit d'un flux TCP et les pertes qui lui sont associées.

Dans le but notamment d'évaluer les performances d'un réseau IP/MPLS, nous avons récemment entamé une série de tests sur Netquad afin de caractériser les flux agrégés (globaux ou inter-classes) à différents niveaux du réseau (accès utilisateur, accès fournisseur de services et dans le cœur de réseau).

7.6 INRIA NSF

Participant : Eitan Altman.

Bien qu'officiellement terminée fin 2000, la collaboration INRIA/NSF entre l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign et le projet MISTRAL a permis de financer le séjour d'une semaine du Prof. T. Başar à l'INRIA (21/4/01-29/4/01). Cette coopération portait sur l'application de la théorie des jeux au contrôle des réseaux de télécommunications.

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Actions nationales

L'ARC EPSILON à laquelle participait le projet FRACTALES (J. Levy-Véhel), le groupe Réseaux à Haut Débit de l'ENST (D. Kofman) et le projet MISTRAL s'est achevée le 30 juin 2001. Un réseau expérimental constitué d'une dizaine de stations de travail interconnectées par un commutateur Ethernet à 100Mb/s a été mis en place dans le cadre de cette ARC. Diverses expériences y ont été menées concernant la validation de modèles pour l'évaluation

des performances des réseaux IP et notamment celles d'architectures *diff-serv* (le protocole RED, en particulier), ainsi que la génération de trafics fractales et multifractales.

8.2 Réseaux et groupes de travail internationaux

E. Altman et P. Nain sont membres du groupe de travail IFIP W.G. 7.3.

8.3 Relations bilatérales internationales

8.3.1 PAI Van Gogh avec les Pays-Bas

Le Programme d'Actions Intégrées (PAI) Van Gogh entre l'université libre d'Amsterdam (Prof. Ger Koole) et le projet MISTRAL (P. Nain) vient d'être prolongée d'une année. Cette collaboration, qui a débuté le 1/1/01, porte sur l'application de la programmation neuro-dynamique au contrôle de certains systèmes à événements discrets.

8.3.2 Collaboration ARC-en-Ciel avec Israël

Une collaboration ARC-en-Ciel entre le département de statistique et de recherche opérationnelle de l'université de Tel-Aviv (Prof. U. Yechiali) et le projet MISTRAL (E. Altman et K. Avratchenkov) d'une durée de deux ans a débuté au cours de l'été 2001. Elle porte sur le développement de techniques de routage optimal dans les réseaux en présence d'informations retardées ou partielles.

8.3.3 Amérique du Nord

Outre la coopération INRIA/NSF entre le projet MISTRAL et l'université de l'Illinois mentionnée dans la section 7.6, le projet MISTRAL est formellement associé à un projet NSF ITR (Information Technology Research) intitulé "Qualité de service dans le futur Internet" et qui regroupe R. Guérin (univ. of Pennsylvania), J. Kurose et D. Towsley (univ. of Massachusetts) et Z.-L. Zhang (univ. of Minnesota). Ce projet, d'une durée de 5 ans, a débuté en 2001. Les deux séjours que P. Nain a effectués à l'université du Massachusetts en 2001 ont été partiellement financés par cette coopération.

8.4 Visites et invitations de chercheurs

Europe S. Bhatnagar (Vrije university, Pays-Bas, du 02/07/01 au 07/07/01), S. Bhulai (Vrije university, Pays-Bas, du 05/02/01 au 08/02/01 et du 23/07/01 au 27/07/01), B. Heidergott (Eurandom, Pays-Bas, du 12/02/01 au 17/02/01), G. Koole (Vrije University, Pays-Bas, du 23/01/01 au 29/02/01, 16/07/01 au 03/08/01, 11/12/01 au 13/12/01), R. Núñez Queija (CWI, Pays-Bas, du 01/08/01 au 31/08/01), R. van der Mei (Vrije University, Pays-Bas, du 11/11/01 au 16/11/01), G. Schevlyakov (St.-Petersburg State Technical university, Russie, du 22/10/01 au 05/11/0), N. Vilchevsky (St.-Petersburg State Technical university, Russie, du 22/10/01 au 05/11/01), S. Zoyev (université de Stratchclyde, GB, du 10/05/01/ au 12/05/01).

Amérique T. Başar (university of Illinois at Urbana Champaign, USA, du 21/04/01 au 29/04/01), T. Lakshman (Bell Labs, USA, du 03/04/01 au 09/04/01), D. Towsley (university of Massachusetts, USA, du 04/11/01 au 07/11/01)

Méditerranée, Maghreb et Proche-Orient U. Yechiali (université de Tel Aviv, Israël, du 29/08/01 au 09/09/01).

Océanie M. Haviv (university de Sidney, Australie, du 25/01/01 au 26/01/01).

9 Diffusion de résultats

9.1 Animation de la communauté scientifique

E. Altman a été membre du comité de programme de IEEE INFOCOM 2001, Anchorage, Alaska, April, 2001.

P. Nain a été membre du comité de programme de ACM SIGMETRICS 2001 - PERFORMANCE 2001 (Boston, juin 2001) et de IEEE INFOCOM 2002 (qui se déroulera à New York en juin 2002). Il est membre du comité scientifique de ECOTEL'2001 (Antibes, décembre 2001).

P. Nain est membre du conseil scientifique de Alcatel Space Industries depuis 2000. Il est également responsable du DEA Réseaux et Systèmes Distribués (RSD) de l'Université de Nice-Sophia Antipolis (UNSA).

9.2 Enseignement universitaire

DEA RSD, UNSA Cours d'option sur les réseaux satellitaires (E. Altman, 9h). Cours d'évaluation des performances des systèmes informatiques (P. Nain, 24h). Travaux pratiques de simulation à l'aide du logiciel *ns-2* (N. Malouch, 9H).

DEA IRO, Paris 6 Cours de modélisation et d'optimisation des réseaux (P. Nain, 12h).

Institut Eurécom Cours de files d'attente (P. Nain, 12h). Travaux dirigés de files d'attente et initiation au logiciel MODLINE (S. Alouf, 11h).

9.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations

S. Alouf a présenté une communication lors de la conférence IEEE INFOCOM 2001 (22/4/01-26/4/01, Anchorage, Alaska). Elle a en outre assisté à la 5ème édition de l'école d'été des Réseaux Haut Débit et Multimédia, RHDM 2001 (6/5/01 au 12/5/01, Calcatoggio, Corse).

E. Altman a séjourné 7 mois à l'université de Los Andes à Mérida (Venezuela). Il y a donné plusieurs séminaires sur la théorie des jeux et ses applications. Il a également été invité 10 jours à l'université de Tel Aviv par le Prof. U. Yechiali.

- K. Avratchenkov** a participé à la conférence IEEE INFOCOM 2001 (22/4/01-26/4/01, Anchorage, Alaska) et a présenté une communication à l'Int. Linear Algebra Conference (25/06/01-29/06/01, Haifa, Israël). Il a été invité à l'université libre d'Amsterdam (Vrije univ.) par le Prof. G. Koole du 5/10/01 au 17/10/01 dans le cadre d'un PAI Van Gogh. Il a rendu visite à Alcatel Space Industries (ASPI) à Toulouse les 25 et 26 mars 2001, dans le cadre de la collaboration industrielle de MISTRAL avec ASPI.
- R. El Azouzi** a présenté des communications lors des conférences suivantes : 17th Int. Teletraffic Congress (2/12/01-7/12/01, Salvador de Bahia, Brésil), 39th Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (3/10/01-5/10/01, Urbana-Champaign, USA), 2ème journée d'Optimisation et de Tarification des Réseaux (26/03/01, Versailles). Il a été invité à l'université d'Illinois (USA) par le Prof. T. Başar du 5/10/01 au 21/10/01.
- C. Barakat** a présenté deux communications lors de la conférence IEEE INFOCOM 2001 (22/4/01-26/4/01, Anchorage, Alaska), ainsi qu'une autre lors de l'IEEE Int. Conference on Networking (ICN'01) qui s'est déroulée à Colmar, France, du 9/7/01 au 13/7/01.
- T. Boulogne** a présenté des communications lors du ISDG Workshop on Dynamic Games and Applications (17/7/01 au 20/7/01, Cargèse, France) et lors du Séminaire de Théorie des Jeux de l'Institut Henri Poincaré (Paris, France). Il a rendu visite à E. Altman à l'université de Los Andes, Mérida, Venezuela, du 4/6/01 au 15/6/01.
- P. Dube** a présenté des communications lors des conférences suivantes : 9th IFIP Working Conference on Performance Modeling and Evaluation of ATM & IP Networks (27/06/01-29/06/01, Budapest, Hongrie), 11th INFORMS Applied Probability Society Conference (25/07/01-21/07/01, New York), 7ème Atelier d'Evaluation de Performances (28/05/01-1/06/01, Paris). Il a été invité au TATA Institute of Fundamental Research (T.I.F.R., Mumbai, Inde) par le Prof. V. Borkar du 26/02/01 au 10/04/01 ainsi qu'à université libre d'Amsterdam (Vrije univ., 23/11/01-29/11/01) où il était invité du par le Prof. G. Koole dans le cadre d'un PAI Van Gogh.
- N. Malouch** a séjourné 2 mois à IBM à Yorktown Heights (juin-juillet 2001) dans le département d'optimisation et d'analyse des systèmes. Il a présenté deux communications lors du 17th International Teletraffic Congress (2/12/01-7/12/01, Salvador de Bahia, Brésil).
- P. Nain** a participé aux conférences ACM SIGMETRICS 2001 - PERFORMANCE 2001 (18/6/01-20/6/01, Boston) et IEEE INFOCOM 2001 (22/4/01-26/4/01, Anchorage, Alaska). Il a été invité deux semaines à l'université du Massachusetts à Amherst (16/4/01-20/4/01 et 11/6/01-17/6/01) par le Prof. D. Towsley dans le cadre d'un projet NSF ITR, et une semaine à l'université libre d'Amsterdam (Vrije univ., 24/9/01-28/9/01) par le Prof. G. Koole dans le cadre d'un PAI Van Gogh. Il a également participé en tant que conférencier aux Journées de Statistiques organisées par l'INRIA (15/11/01-16/11/01, Rennes, France).
- C. Touati** a assisté aux conférences suivantes : 2ème Journée Optimisation et Tarification des Réseaux (Paris le 26/3/01), 3èmes Rencontres Francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (Algotel 2001, 28/5/01-30/5/01, Saint-Juan de Luz, France), 19ème Conférence et Exposition Internationales sur les Systèmes de Communications par Satellites (ICSSC-19, 17/4/01-20/4/01, Toulouse, France). Elle a rendu visite à E. Altman à l'université de Los Andes, Mérida, Venezuela, du 9/7/01 au 20/7/01.

10 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] R. AGRAWAL, A. M. MAKOWSKI, P. NAIN, « On a reduced load equivalence for fluid queues under subexponentiality », *QUESTA* 33, 1-3, 1999, p. 5–41, Numéro spécial sur «Queues with Heavy-Tailed Distributions », Ed. K. Sigman.
- [2] E. ALTMAN, K. AVRACHENKOV, C. BARAKAT, « A stochastic model of TCP/IP with stationary random losses », in : *Proceedings ACM Sigcomm 2000 Conference, Computer Communication Review*, 30, 4, p. 231–242, Stockholm, Suède, août 2000.
- [3] E. ALTMAN, A. FERREIRA, J. GALTIER, *Réseaux Satellitaires de Télécommunications*, Dunod, 1999.
- [4] E. ALTMAN, *Constrained Markov Decision Processes*, Chapman and Hall/CRC, 1999.
- [5] O. A. HELLAL, E. ALTMAN, A. JEAN-MARIE, I. KURKOVA, « On loss probabilities in presence of redundant packets and several traffic sources », *Performance Evaluation* 36-37, 1999, p. 486–518.
- [6] A. JEAN-MARIE, Z. LIU, P. NAIN, D. TOWSLEY, « Computational aspects of the workload distribution in the MMPP/G/1 queue », *IEEE Transactions on Selected Areas in Communications* 16, 5, 1998, p. 640–652.
- [7] Z. LIU, P. NAIN, D. TOWSLEY, « Sample path methods in the control of queues », *QUESTA* 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, May 1997, p. 366–394.

Articles et chapitres de livre

- [9] E. ALTMAN, E. FEINBERG, J. FILAR, V. GAITSGORY, « Perturbed zero-sum games with applications to stochastic and repeated games », in : *Advances of Dynamic Games and Applications*, E. Altman et O. Pourtallier (éditeurs), Birkhauser, 2001, p. 165–181.
- [10] E. ALTMAN, G. KOOLE, T. JIMÉNEZ, « On optimal call admission control in a resource-sharing system », *IEEE Transactions on Communications* 49, 9, 2001.
- [11] E. ALTMAN, G. KOOLE, T. JIMÉNEZ, « On the comparison of queueing systems with their fluid limits », *Probability in the Engineering and Informational Sciences* 15, 2001, p. 165–178.
- [12] E. ALTMAN, « Applications of Markov decision processes in communication networks : a survey », in : *Markov Decision Processes, Models, Methods, Directions, and Open Problems*, E. Feinberg et A. Shwartz (éditeurs), Kluwer, 2001, p. 488–536.
- [13] K. AVRACHENKOV, M. HAVIV, P. HOWLETT, « Inversion of analytic matrix functions that are singular at the origin », *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications* 22, 4, 2001, p. 1175–1189.
- [14] R. EL AZOUZI, M. ABBAD, E. ALTMAN, « Perturbation of linear multidimensional quadratic systems with jump parameters and hybrid controls », *IEEE Transactions on Automatic Control* 46, 10, 2001, p. 1666–1671.
- [15] O. SHARON, E. ALTMAN, « On efficient polling MAC for wireless LANs », *IEEE/ACM Transactions on Networking* 9, 4, August 2001.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [16] S. ALOUF, P. NAIN, D. TOWSLEY, « Inferring network characteristics via moment-based estimators », *in : Proceedings IEEE INFOCOM'2001, Vol. 2*, p. 1045–1054, Anchorage, Alaska, USA, April 2001.
- [17] T. ALPCAN, T. BAŞAR, R. SRIKANT, E. ALTMAN, « CDMA uplink power control as a noncooperative game », *in : 40th IEEE Conference on Decision and Control*, Orlando, Florida, U.S.A., December 2001.
- [18] E. ALTMAN, K. AVRACHENKOV, C. BARAKAT, R. NÚÑEZ QUEIJA, « State dependent M/G/1 queueing analysis for congestion control in data networks », *in : Proceedings IEEE INFOCOM'2001, Vol. 3*, p. 1350–1359, Anchorage, Alaska, USA, April 2001.
- [19] E. ALTMAN, K. AVRACHENKOV, C. BARAKAT, R. NÚÑEZ QUEIJA, « TCP modeling in the presence of nonlinear window growth », *in : Proceedings of the 17th International Teletraffic Congress (ITC'17)*, Salvador da Bahia, Brazil, December 2001.
- [20] E. ALTMAN, C. BARAKAT, V. RAMOS, « On the utility of FEC mechanisms for audio applications », *in : Proceedings of QofIS'2001, Second International Workshop on Quality of Future Internet Services*, Coimbra, Portugal, 24-26 September 2001.
- [21] E. ALTMAN, C. BARAKAT, V. RAMOS, « Queueing analysis of simple FEC schemes for IP telephony », *in : Proceedings IEEE INFOCOM'2001, Vol. 2*, p. 796–804, Anchorage, Alaska, USA, April 2001.
- [22] E. ALTMAN, R. EL AZOUZI, O. POURTALLIER, « Avoiding paradoxes in routing games », *in : Proceedings of the 17th International Teletraffic Congress (ITC'17)*, Salvador da Bahia, Brazil, December 2001.
- [23] E. ALTMAN, H. KAMEDA, « Equilibria for multiclass routing in multi-agent networks », *in : 40th IEEE Conference on Decision and Control*, Orlando, Florida, U.S.A., December 2001.
- [24] C. BARAKAT, E. ALTMAN, « Bandwidth tradeoff between TCP and link-level FEC », *in : Proceedings of IEEE International Conference on Networking*, Colmar, France, July 2001.
- [25] P. DUBE, E. ALTMAN, « On the workload process in a fluid queue with bursty input and selective discarding », *in : Proceedings of the 17th International Teletraffic Congress (ITC'17)*, Salvador da Bahia, Brazil, December 2001.
- [26] P. DUBE, E. ALTMAN, « Queueing and fluid analysis of partial message discard policy », *in : Proceedings of 9th IFIP Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of ATM and IP Networks*, Budapest, Hungary, June 2001.
- [27] R. EL AZOUZI, E. ALTMAN, « Traffic equilibrium in competitive routing with hard side constraints », *in : 39th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, Allerton, Illinois, USA, 3-5 October 2001.
- [28] N. MALOUCH, Z. LIU, « On steady state analysis of TCP in networks with differentiated services », *in : Proceedings of the 17th International Teletraffic Congress (ITC'17)*, Salvador da Bahia, Brazil, December 2001.
- [29] P. NAIN, R. NÚÑEZ QUEIJA, « An M/M/1 queue in a semi-Markovian environment », *in : Proceedings the ACM Sigmetrics 2001 / Performance 2001 Conf., Performance Evaluation Review, 29, 1*, p. 268–278, Boston, MA, USA, June 2001.
- [30] J. TALIM, Z. LIU, P. NAIN, E. G. COFFMAN JR., « Controlling the robots of Web search engines », *in : Proceedings the ACM Sigmetrics 2001 / Performance 2001 Conf., Performance Evaluation Review, 29, 1*, p. 236–244, Boston, MA, USA, June 2001.

Rapports de recherche et publications internes

- [31] S. ALOUF, E. ALTMAN, P. NAIN, « Optimal on-line estimation of the size of a dynamic multicast group », *Rapport de Recherche n°4329*, INRIA, Sophia Antipolis, novembre 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4329>.
- [32] K. AVRACHENKOV, P. NAIN, E. THIBAUT, E. ALTMAN, P. DUBE, « Models of Internet traffic at the application level (the case of open loop) », *Livrable no. 2, Convention de recherche avec Alcatel Space Industries*, INRIA Sophia Antipolis, juillet 2001.
- [33] K. AVRACHENKOV, P. NAIN, E. THIBAUT, E. ALTMAN, P. DUBE, « Models of the aggregated Internet Traffic (the case of open loop) », *Livrable no. 3, Convention de recherche avec Alcatel Space Industries*, INRIA Sophia Antipolis, novembre 2001.
- [34] K. AVRACHENKOV, P. NAIN, E. THIBAUT, P. DUBE, « Modeling short TCP transfers (the case of closed loop) », *Livrable no. 5, Convention de recherche avec Alcatel Space Industries*, INRIA Sophia Antipolis, décembre 2001.
- [35] K. AVRACHENKOV, P. NAIN, « Critical remarks on SAGAM specifications and outline of traffic modeling », *Livrable no. 1, Convention de recherche avec Alcatel Space Industries*, INRIA Sophia Antipolis, février 2001.
- [36] P. DUBE, K. AVRACHENKOV, P. NAIN, « On-line estimation of very low loss probabilities : A fast Simulation Approach », *Livrable no. 4, Convention de recherche avec Alcatel Space Industries*, INRIA Sophia Antipolis, novembre 2001.
- [37] P. NAIN, C. RÉTIÈRE, « Livrable WAGON », *Livrable Projet RNRT VTHD*, INRIA Sophia Antipolis, avril 2001.
- [38] P. NAIN, E. THIBAUT, « Modélisation des flux TCP en boucle ouverte », *Livrable no. 2, Projet RNRT ESQUIMAUX*, INRIA Sophia Antipolis, septembre 2001.
- [39] E. THIBAUT, « Etat de l'art de la modélisation des flux multimédia », *Livrable no. 1, Projet RNRT ESQUIMAUX*, INRIA Sophia Antipolis, mars 2001.
- [40] C. TOUATI, E. ALTMAN, J. GALTIER, « On fairness in bandwidth allocation », *Rapport de Recherche n°4269*, INRIA, Sophia Antipolis, septembre 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4269>.