

Projet MISTRAL

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

Sophia Antipolis

THÈME 1B



*R*apport
d'Activité

2000

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	5
3	Fondements scientifiques	5
4	Domaines d'applications	5
4.1	Panorama	5
5	Logiciels	6
5.1	WAGON: Un générateur de trafic Web	6
6	Résultats nouveaux	6
6.1	Analyse quantitative des protocoles dans les réseaux	6
6.1.1	Problèmes liés à l'utilisation de TCP dans un réseau hétérogène	6
6.1.2	Lien entre processus de pertes et débit du protocole TCP	7
6.1.3	Etude de l'interaction d'un grand nombre de sessions TCP	7
6.1.4	Evaluation des performances des réseaux IP	8
6.1.5	Analyse de l'agressivité de TCP dans sa phase Slow Start	8
6.1.6	Filtrage des acquittements dans TCP	9
6.1.7	Analyse de mécanismes de redondance pour la téléphonie sur Internet	9
6.1.8	Partage de ressources entre trafic élastique et trafic temps-réel	9
6.1.9	Analyse de politiques de rejets sélectifs	10
6.1.10	Ordonnancement dans les commutateurs ATM	10
6.2	Qualité de service dans les réseaux	10
6.2.1	Services différenciés pour l'Internet	10
6.2.2	Méthodes pour l'estimation en ligne des performances	11
6.3	Modèles de trafic pour les réseaux	12
6.3.1	Caractérisation du trafic Web	12
6.3.2	Modèle de trafic auto-similaire	13
6.4	L'optimisation multicritère dans les réseaux	13
6.5	Contrôle et théorie des jeux	14
6.5.1	Contrôle et multimodularité	14
6.5.2	Systèmes linéaires quadratiques avec sauts	14
6.5.3	Jeux stochastiques à somme nulle	15
6.5.4	Processus de décision markoviens	15
6.6	Évaluation de différentes méthodes de localisation d'agents mobiles	15
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	15
7.1	CTI France Télécom R&D-Sophia Antipolis	15
7.2	CTI avec France Télécom R&D-Issy Les Moulineaux	16
7.3	Convention de recherche avec Alcatel Space Industries	16
7.4	RNRT « CONSTELLATIONS »	16

7.5	RNRT « VTHD »	16
7.6	RNRT « ESQUIMAUX »	17
7.7	INRIA NSF	17
8	Actions régionales, nationales et internationales	17
8.1	Actions nationales	17
8.2	Réseaux et groupes de travail internationaux	17
8.3	Relations bilatérales internationales	17
8.3.1	Europe	17
8.3.2	Amérique du Nord	18
8.4	Visites, et invitations de chercheurs	18
9	Diffusion de résultats	18
9.1	Animation de la communauté scientifique	18
9.2	Enseignement universitaire	19
9.3	Participation à des colloques, séminaires, invitations	19
10	Bibliographie	20

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

Philippe Nain [DR]

Responsable permanent

Zhen Liu [DR, jusqu'au 31/07/00]

Assistante de projet

Ephie Deriche [TR, à temps partiel]

Personnel Inria

Eitan Altman [DR]

Konstantin Avratchenkov [CR, depuis le 01/10/00]

Chercheurs Post doctorants

Konstantin Avratchenkov [CTI/France Télécom R& D, jusqu'au 30/09/00]

Rachid El Azouzi [CTI/France Télécom R&D, depuis le 01/11/00]

César Jalpa-Villanueva [RNRT VTHD, du 01/07/00 au 31/12/00]

Rudesindo Núñez Queija [CWI, Pays-Bas, du 01/02/00 au 06/07/00 et du 21/08/00 au 03/09/00]

Eric Thibault [RNRT ESQUIMAUX, depuis le 15/11/00]

Chercheurs doctorants

Sara Alouf [Bourse MESR, 2ème année]

Chadi Barakat [Bourse INRIA, 3ème année]

Thomas Boulogne [Bourse MESR, 1ère année]

Parijat Dube [Bourse INRIA/Ambassade de France en Inde, 1ère année]

César Jalpa-Villanueva [RNRT VTHD, jusqu'au 30/06/00]

Naceur Malouch [Bourse MESR, 2ème année]

Corinne Touati [Bourse MESR, 1ère année]

Chercheurs invités

Vyacheslav Abramov [Advanced Data Systems Ltd, Israël, du 04/05/00 au 02/07/00]

Tamer Basar [université de l'Illinois à Urbana-Champaign, USA, du 23/07/00 au 28/07/00]

Moche Haviv [université de Sydney, Australie, du 10/06/00 au 15/06/00]

Arie Hordijk [université de Leiden, Pays-Bas, du 04/01/00 au 04/02/00]

Hisao Kameda [université de Tsukuba, Japon, du 07/08/00 au 18/08/00]

Ger Koole [Vrije university, Pays-Bas, du 06/08/00 au 22/08/00]

Anurag Kumar [IISc, Inde, Inde du 07/09/00 au 13/09/00]

Sven Ostring [université de Canterbury-Christchurch, Nouvelle-Zélande, du 17/04/00 au 14/05/00]

Thiru Parthasarathy [IISc, Inde, du 15/08/00 au 08/09/00]

Ingénieur associé

Christophe Rétière [depuis le 01/10/00]

Stagiaires

Thomas Boulogne [université Paris VI, du 01/05/00 au 30/09/00]

Rachid El Azouzi [université Mohammed V, Maroc, du 02/01/00 au 31/08/00]

Srikanth Kakani [IIT Kanpur, Inde, du 01/05/00 au 31/07/00]

Fatma Louati [DEA RSD UNSA, du 01/03/00 au 30/06/00]

Mohit Mittal [IIT Delhi, Inde, du 01/06/00 au 31/08/00]

Mohammed Qaddi [École Polytechnique, du 04/04/00 au 04/07/00]

Vivek Rai [IIT Guwahati, Inde, du 27/11/00 au 31/12/00]

Victor Ramos Ramos [DEA RSD UNSA, du 01/04/00 au 31/08/00]

2 Présentation et objectifs généraux

La modélisation, l'évaluation des performances et le contrôle 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, la théorie des jeux et les processus de décision markoviens.

Les actions de recherche de 1999–2000 ont porté sur :

- la modélisation de systèmes de télécommunications, notamment dans le cadre de conventions de recherche avec France Télécom R&D ainsi que dans le cadre du projet RNRT sur les constellations de satellites,
- 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,
- la modélisation du trafic IP, l'optimisation et la planification des réseaux satellitaires, notamment dans le cadre d'une convention de recherche avec Alcatel Space Industries,
- 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 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, 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 : Zhen Liu, César Jalpa-Villanueva.

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

Dans le cadre de sa thèse [9], César Jalpa-Villanueva a poursuivi le développement et l'enrichissement du logiciel WAGON. Rappelons que cet outil de génération de trafic Web est utilisé, par exemple, comme *benchmark* pour l'évaluation de performances des serveurs Web et pour la génération de trafic IP. Cette année, nous avons intégré l'algorithme EM (pour *Expectation-Maximization*) pour l'estimation de paramètres de mélanges de distributions. Le module est aussi capable d'effectuer plusieurs tests d'ajustement.

Le logiciel WAGON est en cours de déploiement dans le réseau à très haut débit VTHD où il sera utilisé à la fois comme générateur de trafic de fond et pour l'étude du comportement des protocoles IP/WDM dans un contexte de très hauts débits. Le logiciel WAGON est aussi utilisé sur le réseau expérimental du projet (réseau EPSILON), notamment dans le cadre de l'action coopérative EPSILON, en collaboration avec Daniel Kofman de l'ENST et Jacques Levy-Véhel du projet FRACTALES.

6 Résultats nouveaux

6.1 Analyse quantitative des protocoles dans les réseaux

Participants : Eitan Altman, Kostya Avratchenkov, Chadi Barakat, Parijat Dube, Rachid El-Azouzi, Zhen Liu, Philippe Nain, Sindo Núñez Queija, Victor Ramos-Ramos.

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

6.1.1 Problèmes liés à l'utilisation de TCP dans un réseau hétérogène

Les nouveaux supports de transmission utilisés dans l'Internet présentent des caractéristiques physiques différentes de ceux pour lesquels TCP a été conçu. Ceci engendre une dégradation des performances de TCP en termes d'utilisation des ressources (bande passante) et de délai. Dans [19], nous indiquons les principaux problèmes liés à TCP et les solutions que nous proposons. L'originalité de notre approche réside dans le fait que les solutions proposées sont indépendantes du support de transmission, contrairement à la plupart des travaux réalisés dans ce domaine ou, par exemple, des liens satellitaires ou des liens terrestres sans fil étaient considérés. Dans ce travail, nous identifions quatre caractéristiques du chemin traversé par la connexion TCP (délai de propagation, asymétrie, bande passante, erreurs de transmissions) qui déterminent les performances de TCP et en étudions l'impact. Ceci nous a permis de mettre en évidence certains problèmes intrinsèques de TCP, les limites des solutions proposées, et les

modifications nécessaires pour rendre TCP capable de s'adapter à un réseau hétérogène tout en respectant le principe de bout en bout.

6.1.2 Lien entre processus de pertes et débit du protocole TCP

TCP utilise la perte de paquets comme indicateur de congestion dans le réseau; ainsi, il diminue la taille de sa fenêtre de congestion, définie comme le nombre maximal de packets d'une connexion TCP qui peuvent circuler dans le réseau à chaque instant, dès qu'une perte est détectée. Cette diminution provoque une dégradation des performances du protocole lorsque les paquets TCP sont perdus pour d'autres raisons que la congestion (par exemple à cause des erreurs de transmission liées à des phénomènes physiques). Les modèles de pertes étudiés jusqu'à maintenant l'ont été sous des hypothèses simplificatrices qui ne prenaient en compte que le taux moyen de perte. Dans [24, 10], nous développons un modèle mathématique qui nous permet d'étudier non seulement l'effet du taux moyen des pertes sur les performances du protocole, mais aussi le rôle joué par leur distribution. Des expressions explicites du débit et de ses moments sont calculées en fonction des paramètres du processus de pertes. Notre résultat principal indique que le débit d'une connexion TCP augmente lorsque les pertes tendent à se produire en rafale même si le taux moyen des pertes par unité de temps reste le même. Nos modèles mathématiques ont ensuite été validés par des simulations réalisées avec le logiciel `ns-2`.

Dans [23], un modèle stochastique pour un protocole de contrôle de flux, de type TCP, est proposé et analysé. Le protocole modélisé augmente linéairement le débit de transmission entre deux instants d'indication de congestion et divise par deux la taille de la fenêtre d'émission aux instants d'indication de congestion. Ce fonctionnement est similaire à celui de TCP où la congestion est détectée par l'apparition d'une perte d'un paquet. On modélise le processus d'indication des pertes par un processus aléatoire stationnaire, ergodique et indépendant du flux contrôlé. Aucune hypothèse markovienne n'est formulée. On obtient une expression explicite du débit moyen en fonction des paramètres du processus de pertes. Dans le cas où une borne existe sur la fenêtre de congestion, des bornes inférieure et supérieure sont obtenues sur le débit. Ce modèle est ensuite généralisé de façon à prendre en compte le mécanisme de pertes sur temporisation (*timeout*).

Dans [38], nous considérons toujours le calcul du débit mais cette fois en supposant que la taille de la fenêtre d'émission est bornée. On considère notamment le cas où les pertes surviennent en rafales et le processus d'arrivée des rafales est poissonnien. Par analogie avec l'analyse de la file d'attente M/G/1, l'expression du débit ainsi que la distribution de la taille de la fenêtre ont pu être obtenues. Les résultats ont été validés par des mesures sur Internet.

6.1.3 Etude de l'interaction d'un grand nombre de sessions TCP

En collaboration avec François Baccelli et Dohy Hong (projet MCR), Zhen Liu ^[BHL00] a étudié l'interaction d'un grand nombre de sessions TCP. L'objectif est de calculer le débit d'une session TCP particulière qui se trouve en compétition pour l'utilisation des ressources

[BHL00] F. BACCELLI, D. HONG, Z. LIU, «Fixed Point Methods for the Simulation of the Sharing of a Local Loop by a Large Number of Interacting TCP Connections», soumis pour publication, juillet 2000.

avec un grand nombre d'autres sessions TCP. L'analyse repose sur l'obtention, puis sur la résolution, d'une équation de point fixe. Cette équation est obtenue à partir d'une description exacte d'une connexion TCP et d'une description simplifiée de l'interaction avec les autres connexions (approche de type champs moyen). Cette approche a été validée à l'aide du logiciel de simulation `ns-2`.

6.1.4 Evaluation des performances des réseaux IP

La formule dite "TCP amicale" établit une relation entre la probabilité de perte et le temps aller et retour sur une connexion TCP, d'une part, et le débit de cette connexion, d'autre part. Chadi Barakat et Philippe Nain ont utilisé cette relation pour calculer les performances d'un réseau IP équipé de routeurs *droptail* (probabilité de perte, congestion dans les routeurs, délai de bout en bout pour chaque connexion, débit de chaque connexion), de topologie arbitraire et traitant un nombre arbitraire de sessions TCP^[BN00]. Chaque routeur du réseau est représenté par une file d'attente M/D/1/K dont l'intensité des arrivées est calculée à l'aide de la formule évoquée ci-dessus, en résolvant une équation de point fixe. Les performances du réseau sont alors obtenues en faisant appel aux résultats classiques sur la file d'attente M/D/1/K. Des campagnes de simulation réalisées à l'aide du logiciel `ns-2` montrent que les résultats obtenus sont remarquablement précis eu égard aux nombreuses hypothèses faites sur le modèle afin de le rendre analysable. Des expériences sur le réseau expérimental du projet MISTRAL sont en cours de réalisation. Notre approche peut s'étendre à des réseaux hybrides équipés de routeurs *droptail* et RED (pour *Random Early Detection* – voir Section 6.2.1). Ce travail est réalisé en collaboration avec Don Towsley et Tian Bu (univ. du Massachusetts) qui ont développé une approche similaire à la notre pour les réseaux uniquement munis de routeur *RED*.

6.1.5 Analyse de l'agressivité de TCP dans sa phase Slow Start

Il est connu que le protocole TCP transmet des paquets en rafales pendant la phase dite de *slow-start*. On parle de trafic sporadique. Ces rafales sont le résultat naturel d'une augmentation rapide de la fenêtre. Il est aussi connu que, pour améliorer la performance des transferts TCP, il faut franchir le plus rapidement possible cette phase de *slow-start*. Ceci est particulièrement important pour les transferts courts et pour les chemins à grand délai. Il y a donc un compromis à réaliser entre l'augmentation rapide de la taille de la fenêtre qui permettrait des débits plus importants et une augmentation plus lente de la fenêtre qui diminuerait la sporadicité du trafic. Un tel compromis a été étudié dans [28]. Après avoir montré que la politique d'augmentation utilisée actuellement n'est pas optimale, nous avons proposé un nouveau mécanisme d'augmentation de la taille de la fenêtre de congestion ainsi qu'un algorithme permettant de l'intégrer au protocole existant. Les résultats obtenus à l'aide du simulateur `ns-2` montrent que les performances du protocole modifié sont notablement meilleures que celles du protocole existant.

[BN00] C. BARAKAT, NAIN, «Performance Evaluation of Droptail Networks», article en préparation, 2000.

6.1.6 Filtrage des acquittements dans TCP

Plusieurs problèmes ont été relevés lorsque le chemin retour d'une connexion TCP ne dispose pas d'une bande passante suffisante pour traiter tous les acquittements (ACK) générés par le récepteur. C'est typiquement le cas lorsque des utilisateurs téléchargent des documents de l'Internet à travers un lien haut débit, comme un lien satellite ou bien un câble, et envoient les requêtes et les ACKs sur un lien de bas débit, comme une ligne téléphonique. Une congestion apparaît alors sur le chemin retour, causant une détérioration du débit de la connexion et générant des problèmes d'iniquité, par exemple, lorsque plusieurs connexions sont en compétition pour le chemin retour. Le filtrage des ACKs à l'entrée du goulot d'étranglement a été proposé pour diminuer cette congestion. Un ACK qui arrive à un routeur et qui trouve un certain nombre d'ACKs de la même connexion en attente d'émission, "efface" quelques ACKs et prend leur place. Dans la littérature un seul cas est étudié, celui d'un ACK qui efface tous les ACKs de la même connexion en attente dans le routeur. Dans [27], nous avons étudié le problème de filtrage des ACKs dans son cas le plus général. Nous montrons que l'effacement de tous les ACKs est une opération très agressive qui a des effets néfastes sur la phase de *slow-start* du protocole TCP. Nous déterminons le nombre d'ACKs à conserver dans le routeur de façon à ne pas affecter la phase de *slow-start* de la source. Ceci constitue une première famille d'algorithmes qui utilisent le nombre des ACKs dans le routeur comme information. On présente ensuite une autre famille d'algorithmes qui se servent de l'utilisation de la bande passante comme information. Des simulations réalisées avec le simulateur `ns-2` montrent le gain de performance qu'apportent ces algorithmes.

6.1.7 Analyse de mécanismes de redondance pour la téléphonie sur Internet

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 [39, 43], on étudie un mécanisme de FEC simple mais très utilisé, où une partie de l'information significative contenue dans chaque paquet est transmise dans un autre paquet. La qualité de la copie ainsi reconstruite dépendra de la quantité de FEC transmise. Nous proposons une analyse détaillée par files d'attente de ce mécanisme, basée sur un théorème de ballot. Nous obtenons des expressions simples donnant la qualité de la transmission audio en fonction de la quantité de redondance et l'éloignement un paquet arbitraire et celui qui contient sa FEC. 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. Nous présentons et analysons d'autres fonctions d'utilité pour obtenir une fonction de qualité mieux adaptée aux caractéristiques de ce type d'applications.

6.1.8 Partage de ressources entre trafic élastique et trafic temps-réel

Dans [18], nous analysons l'évolution dynamique du nombre de sessions de type BE (Best Effort) et de type GP (Guaranteed Performance) dans un réseau. Nous supposons qu'il y a des applications qui peuvent, selon la situation dans le réseau, choisir de se présenter soit

comme une session BE soit comme une session GP. Nous analysons les conditions d'équilibre et proposons une politique d'admission qui garantit que cet équilibre soit atteint.

6.1.9 Analyse de politiques de rejets sélectifs

Nous considérons dans [40] 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, qui a eu lieu dans cette même trame, sont inutiles et il est avantageux de les rejeter. Nous obtenons des formules exactes pour les performances d'une telle politique de rejet et des approximations fluides pour le régime de forte charge. Nos résultats s'appliquent pour le dimensionnement des tampons dans les réseaux et permettent de garantir une borne sur le taux de pertes. Nous généralisons ces résultats au cas de processus ON/OFF dans [31].

6.1.10 Ordonnancement dans les commutateurs ATM

Dans les commutateurs ATM, les cellules arrivant à un port d'entrée peuvent être routées vers n'importe quel port de sortie, ce routage dépendant du circuit virtuel (VC) établi à l'initialisation de la connexion. Toutefois, comme chaque port de sortie ne peut transmettre qu'une cellule à la fois, il faut décider à chaque instant quelle cellule transmettre parmi celles candidates au même port de sortie. Dans [17], nous proposons un algorithme de multiplexage qui optimise le débit du commutateur.

6.2 Qualité de service dans les réseaux

6.2.1 Services différenciés pour l'Internet

Participants : Sara Alouf, Eitan Altman, Zhen Liu, Fatma Louati, Naceur Malouch, Mohit Mittal, Philippe Nain.

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

Plusieurs architectures ont récemment été proposées afin d'introduire un service différencié dans les réseaux IP. Le scénario principal est le suivant : les paquets sont marqués à l'entrée du réseau, puis ils sont envoyés dans les routeurs où ils sont traités selon leur marquage. Le but est d'offrir une qualité de service de bout en bout sans pour autant traiter chaque flux individuellement.

Différents problèmes ont cependant été détectés dans ces architectures. Dans [26], on présente une étude comparative de la qualité du service obtenu par le trafic TCP dans les différentes architectures. Nous nous appuyons pour cela sur un modèle markovien paramétrable que nous résolvons de façon numérique.

Dans le cadre de sa thèse, Naceur Malouch (sous la direction de Zhen Liu) étudie l'impact de ces mécanismes sur les performances de bout en bout des flux TCP et les limites de la différenciation entre flux. Dans l'architecture Diffserv considérée, les paquets TCP sont

marqués par un ou plusieurs mécanismes appelés *token buckets*. Ces derniers créent plusieurs classes de paquets, les paquets les plus prioritaires étant ceux qui se conforment le mieux aux débits négociés à l'établissement de la connexion. Dans les routeurs du coeur du réseau, nous avons gardé la politique d'ordonnancement habituelle FIFO (First-In-First-Out) mais avons remplacé le mécanisme de gestion des pertes classique *Drop Tail* par le mécanisme *Random Early Detection* (RED). En cas de congestion, les paquets de basse priorité sont rejetés avec des probabilités plus fortes que les autres. Dans ^[ML00], nous avons calculé le débit d'une source TCP en fonction des paramètres des *tokens buckets* (débits moyens autorisés et tailles des rafales autorisées), le temps de transmission aller-retour (RTT) et les probabilités de pertes des différentes classes. Ce travail complète les recherches menées l'année dernière sur ce sujet [36].

Le protocole RED mentionné ci-dessus vise, d'une part, à prévenir la congestion des routeurs de l'Internet et, d'autre part, à répartir les pertes de paquets équitablement entre les sessions actives. À chaque routeur où il est implanté, RED maintient une estimation, de type moyenne mobile, de la taille moyenne de sa file d'attente et rejette les paquets avec une probabilité qui est une fonction croissante de cet estimateur. Ainsi, des paquets peuvent être rejetés alors que le routeur n'est pas plein. L'idée de ce mécanisme est d'éviter les pertes en rafales qui surviennent en cas de congestion dans les routeurs classiques (*droptail*). Dans le cadre de son stage de DEA [42], Fatma Louati a validé expérimentalement un modèle mathématique, récemment proposé dans la littérature, qui évalue les performances des routeurs RED. L'expérience a été menée sur le réseau expérimental EPSILON du projet MISTRAL (grappe de PC sous *FreeBSD* connectés par un commutateur Ethernet rapide) et a nécessité le développement de différents outils, notamment un concepteur de topologie de réseaux, un outil de gestion de configuration des routeurs, un générateur de connexions TCP et un collecteur de résultats. Une extension de cette plate-forme expérimentale réalisée par Mohit Mittal (IIT Delhi) nous permet maintenant de considérer des réseaux mixtes (routeurs *droptail* et RED), comme indiqué dans la section 6.1.4.

6.2.2 Méthodes pour l'estimation en ligne des performances

Participants : Eitan Altman, Sara Alouf, Philippe Nain.

Mots clés : modèles d'inférence, filtrage.

Estimation de la congestion Ayant déjà développé dans ^[Alo99] deux modèles d'inférence pour l'estimation des caractéristiques du réseau (capacité de la mémoire disponible et intensité du trafic transverse) et défini onze schémas différents, nous avons identifié le meilleur de ces schémas grâce à des simulations réalisées avec *ns-2*. Une étude statistique des estimateurs a été faite. Leur robustesse à différentes architectures du réseau et aux hypothèses statistiques a également été étudiée. Nous avons, en particulier, considéré le cas où le trafic transverse

[ML00] N. MALOUCHE, Z. LIU, « TCP Throughput Analysis for Networks with Differentiated Services », soumis pour publication, juillet 2000.

[Alo99] S. ALOUF, « Inferring network characteristics via moment-based estimators », rapport de DEA Réseaux et Systèmes Distribués, université de Nice-Sophia Antipolis, 1999.

provient de l'agrégation de plusieurs flux FTP/TCP ainsi que de la superposition de plusieurs flux ON/OFF possédant la propriété de mémoire longue. Dans tous les cas considérés, le schéma impliquant la probabilité de perte et le temps de réponse moyen donne les meilleurs résultats [37].

Estimation de la taille d'une population multipoint La connaissance en temps-réel d'un estimateur de la taille d'un groupe multipoint peut servir au fournisseur de service à améliorer la qualité du service (par exemple, en ajustant les temporisateurs à la taille estimée de la population ce qui permettra d'accroître les débits) ainsi, par exemple, qu'à convaincre ses annonceurs du bien-fondé de ses investissements ("audimat" dans le cas de la TV sur Internet). Dans le cas de très grands groupes multipoints (plusieurs millions d'abonnés) il n'est pas envisageable que chaque abonné avertisse la source de son arrivée ou de son départ du groupe, la signalisation qui en résulterait pouvant congestionner le réseau et dégrader les performances. Des techniques ont été proposées récemment pour l'estimation de la taille d'une population statique. Dans un travail en cours [AAN00], nous considérons l'estimation en ligne de la taille d'une population dynamique. Nous modélisons l'évolution temporelle de la taille du groupe multipoint par une file d'attente M/M/ ∞ et montrons qu'en trafic fort le problème d'estimation peut être résolu à l'aide d'un filtre de Kalman. Des simulations réalisées à l'aide du logiciel `ns-2` vont nous permettre de vérifier la qualité de l'estimateur obtenu ainsi que sa robustesse aux hypothèses du modèle (notamment dans le cas où la durée d'une connexion ne suit pas une loi exponentielle).

6.3 Modèles de trafic pour les réseaux

Participants : Zhen Liu, César Jalpa-Villanueva.

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

6.3.1 Caractérisation du trafic Web

Nous avons poursuivi les activités de caractérisation du trafic Web. Nous avons proposé de modéliser les variables caractéristiques par un mélange de distributions au lieu d'une distribution simple. Les paramètres du mélange ont été estimés avec l'algorithme EM (Expectation Maximization). En comparant la qualité d'ajustement du mélange avec celle d'une distribution simple nous avons constaté que le mélange est un modèle plus précis. Les variables que nous avons analysées, en plus de la taille des fichiers, sont les variables du modèle de trafic de WAGON. Nous avons trouvé, en général, qu'un mélange de trois distributions suffit pour modéliser fidèlement ces variables et que, dans le cas des inter-arrivées de sessions, la distribution dominante est la distribution exponentielle [9].

[AAN00] S. ALOUF, E. ALTMAN, P. NAIN, «On-Line Estimation of the Size of Multicast Group», article en préparation, 2000.

6.3.2 Modèle de trafic auto-similaire

Dans [NNQ00], Philippe Nain et Rudensindo Núñez Queija ont étudié une file d'attente qui évolue dans un environnement semi-markovien. Le processus des arrivées est un processus de type ON/OFF où les durées des périodes ON et OFF suivent des lois de probabilité générales. Dans chaque période les arrivées sont Poisson et les temps de service suivent une loi exponentielle. Un attrait du processus des arrivées est sa capacité à reproduire des corrélations statistiques sur plusieurs échelles de temps, une caractéristique très recherchée en modélisation des réseaux. Par exemple, si la durée des périodes ON est à queue lourde, alors le processus des arrivées est (asymptotiquement) auto-similaire. La transformée de la fonction génératrice du nombre de clients est calculée en ayant recours à la théorie des problèmes aux limites de Riemann-Hilbert. C'est la première fois, à notre connaissance, qu'un tel calcul est réalisé pour une file d'attente alimentée par un processus de nature auto-similaire. Jusqu'à maintenant, seul le comportement asymptotique de ce type de files d'attente était caractérisé [Nai00] ce qui ne permettait pas, par exemple, de calculer le nombre moyen de clients.

6.4 L'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.

Nous avons intensifié cette année l'activité de recherche sur l'optimisation du routage dans les réseaux ; 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 Urbana Champaign (USA), s'est étendue dans le cadre d'une convention de recherche (CTI) avec France Télécom R&D, en partenariat avec le projet Miaou (Odile 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. Tout d'abord, nous avons étudié l'existence, l'unicité et l'efficacité d'équilibres de type Nash dans les réseaux à topologies générales et pour une classe de coûts polynomiaux [25]. 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.

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 dans [30] et des résultats de convergence asymptotique ont été obtenus sur quelques exemples de réseaux.

Dans [35, 29, 41], nous avons introduit et analysé un concept d'équilibre qui permet de modéliser à la fois un grand nombre d'utilisateurs ayant chacun une influence négligeable

[NNQ00] P. NAIN, R. NUNEZ-QUEIJA, « An M/M/1 Queue in a Semi-Markovian Environment », soumis à la conférence ACM Sigmetrics'2001-Performance'2001, October 2000.

[Nai00] P. NAIN, « Impact of Bursty Traffic on Queues », à paraître dans *Statistical Inference in Stochastic Processes*, 2000.

sur les coûts des autres usagers et un nombre plus réduit de "grands" usagers (par exemple, des fournisseurs de service) ayant une influence importante sur les performances des autres usagers. Nous avons étudié l'existence et l'unicité d'un équilibre et l'avons calculé pour des cas particuliers de réseaux.

Des paradoxes intéressants se produisent dans les réseaux dus au 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 détails dans [34].

6.5 Contrôle et théorie des jeux

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

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

6.5.1 Contrôle et multimodularité

Dans un article datant de 1985 et intitulé « Extremal splitting of point processes », Bruce Hajek a introduit une propriété de convexité appelée multimodularité. Cette notion est définie pour les fonctions sur les entiers d'un espace euclidien multidimensionnel. Partant de cette notion, nous établissons les fondements d'une théorie générale de contrôle des systèmes à événements discrets qui s'avère particulièrement bien adaptée au contrôle dynamique des files d'attente sans information d'état. Les bases théoriques ont paru dans [16, 15]. De nombreuses applications ont été étudiées dans [16, 14, 15, 11] et [AGH⁰⁰], comme en particulier des problèmes de contrôle d'admission, de routage, d'ordonnancement et de vacances ou pannes dans des réseaux généraux (des réseaux à évolution linéaire dans l'algèbre max-plus). Le cadre théorique et les résultats sur la structure des politiques optimales ne nécessitent aucune hypothèse markovienne. On suppose uniquement que les processus d'arrivée et de charge (service) sont stationnaires et ergodiques.

6.5.2 Systèmes linéaires quadratiques avec sauts

Dans [20], nous considérons un problème de perturbation des systèmes linéaires quadratiques où les paramètres sont des fonctions d'une chaîne de Markov. Le joueur 1 contrôle la dynamique continue, tandis que le joueur 2 contrôle le taux de transition de la chaîne de Markov. Le joueur 1 désire minimiser un coût quadratique et le joueur 2 désire minimiser ou maximiser la même quantité. Nous analysons le comportement asymptotique de ce système quand le taux de transition de la chaîne de Markov contrôlée devient grand, ce qui se ramène à l'étude d'une équation de Riccati. Nous obtenons une série de Taylor comme solution de l'équation de Riccati perturbée. La structure quadratique ne s'applique que dans le cas où le système continu est de dimension 1. Le cas de dimension supérieure est considéré dans [33, 32].

[AGH00] E. ALTMAN, B. GAUJAL, A. HORDIJK, « Optimal Open-Loop Control of Vacations, Polling and Service Assignment », *Queueing Systems*, 2000, à paraître.

6.5.3 Jeux stochastiques à somme nulle

Nous avons étudié dans [12] le problème de perturbations de jeux à somme nulle, c'est-à-dire la convergence de la fonction de valeur et des politiques optimales. Les résultats ont été appliqués à des problèmes de jeux répétés avec plusieurs taux d'actualisation ainsi qu'à des jeux stochastiques. Dans [13], nous avons étudié le problème de jeux stochastiques à information parfaite avec plusieurs taux d'actualisation et avons caractérisé la fonction de valeur et les politiques optimales.

6.5.4 Processus de décision markoviens

Processus de décision markoviens sous contrainte Dans [22], nous avons étudié la convergence des fonctions de valeurs et des solutions de problèmes d'optimisation convexe. Les résultats obtenus ont ensuite été appliqués aux processus de décision markoviens sous contraintes.

Contrôle des files d'attente Les travaux menés par Philippe Nain et Ger Koole (université Libre d'Amsterdam) sur le contrôle d'une file d'attente multiclasse de type *polling* [21] ont été généralisés à un nombre arbitraire de classes.

6.6 Évaluation de différentes méthodes de localisation d'agents mobiles

Participants : Sara Alouf, Philippe Nain.

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

Pour assurer la communication avec un agent mobile, deux approches sont possibles, l'une centralisée et l'autre distribuée. Nous utilisons le formalisme des chaînes de Markov pour évaluer et comparer ces deux approches, l'objectif final étant d'identifier la meilleure approche pour un système réel donné. Pour ce faire, nous recherchons, pour chaque approche, les conditions de stabilité du système, puis nous évaluons le temps de localisation de l'agent. Ce travail est réalisé en collaboration avec Fabrice Huet, doctorant dans le projet OASIS. Dans l'approche centralisée, une chaîne de Markov à 22 états a été identifiée et résolue. La solution est obtenue sous forme explicite et fait appel au logiciel de calcul formel MAPLE. Des expérimentations sur un système réel, développé par Fabrice Huet, nous ont permis de valider notre modèle. Dans l'approche distribuée, nous établissons une formule close pour le temps de réponse du système. Des expériences sont en cours pour la validation de l'approche.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 CTI France Télécom R&D-Sophia Antipolis

Participants : Eitan Altman, Kostya Avratchenkov.

Cette convention de recherche avec France Télécom R&D-Sophia Antipolis (CNET-INRIA CTI 97 1B 206) porte sur les «Performances et le contrôle des réseaux multimedia». Pendant

la deuxième année, nous avons travaillé sur les processus de pertes dans les connexions TCP et avons analysé les liens existants entre ce processus et le débit de la connexion.

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

Participants : Eitan Altman, Thomas Boulogne, Rachid El-Azouzi, Odile Pourtallier.

Une CTI sur l'optimisation multicritère pour une durée de trois ans est en cours de signature. Elle porte sur l'application d'outils de la théorie des jeux aux problèmes de routage non-coopératif dans les réseaux. T. Boulogne a effectué un stage de DEA sur ce sujet et a étudié des nouveaux concepts d'équilibre dans ces réseaux. 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).

7.3 Convention de recherche avec Alcatel Space Industries

Participants : Eitan Altman, Kostya Avratchenkov, Philippe Nain.

Le projet MISTRAL, en partenariat avec le projet MASCOTTE, participe à une nouvelle convention de recherche avec ALCATEL SPACE INDUSTRIES. Cette convention, qui porte sur un période de deux ans, comporte deux volets : le développement de méthodes et d'outils pour la modélisation et la simulation de trafic TCP (Kostya Avratchenkov et Philippe Nain), et l'optimisation des couches d'accès et la planification des réseaux satellitaires (Eitan Altman et Jérôme Galtier du projet MASCOTTE).

7.4 RNRT « CONSTELLATIONS »

Participants : Eitan Altman, Chadi Barakat.

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

7.5 RNRT « VTHD »

Participants : Christophe Rétière, Cesar Jalpa-Villanueva, Zhen Liu, Philippe Nain.

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 (i.e. très haut débit). MISTRAL participe à ce projet et est notamment chargé de déployer le logiciel de génération de trafic WAGON sur le réseau.

7.6 RNRT «ESQUIMAUX»

Participants : Philippe Nain, Eric Thibault.

Le projet RNRT ESQUIMAUX, qui a officiellement débuté en novembre 2000, vise à développer un environnement de modélisation pour l'évaluation des performances des flux, notamment audio-visuels, dans un réseau IP. Outre le projet MISTRAL, il regroupe CEGETEL, CS TELECOM, 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. Un post-doctorant (E. Thibault) vient d'être recruté sur ce projet pour une période d'un an.

7.7 INRIA NSF

Participants : Eitan Altman.

Nous avons poursuivi notre collaboration avec les professeurs T. Basar et R. Srikant de l'université de l'Illinois. Durant cette deuxième année de coopération nous avons travaillé sur le contrôle des réseaux de télécommunications en utilisant des outils de la théorie des jeux.

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Actions nationales

MISTRAL participe à l'Action de Recherche Coopérative "EPSILON" (coordinateur P. Nain) avec le projet FRACTALES (J. Levy-Véhel) et le groupe réseaux à haut débit de l'ENST (D. Kofman). Un réseau expérimental 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. Sur ce réseau des expériences sont menées concernant la validation de modèles pour l'évaluation de performances des réseaux IP, la qualité de service, la téléphonie sur IP, la nature fractale et multifractale du trafic.

8.2 Réseaux et groupes de travail internationaux

Eitan Altman, Zhen Liu et Philippe Nain sont membres du groupe de travail IFIP W.G. 7.3.

8.3 Relations bilatérales internationales

8.3.1 Europe

Un Programme d'Actions Intégrés (PAI) Van Gogh vient d'être accepté entre le projet MISTRAL et l'université Libre d'Amsterdam. La collaboration porte sur l'application de la programmation neuro-dynamique au contrôle des systèmes à événements discrets, et sera menée avec le prof. Ger Koole et ses collaborateurs.

8.3.2 Amérique du Nord

En plus de la coopération INRIA/NSF avec l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign, mentionnée dans la Section 7.7, le projet MISTRAL est formellement associé à un projet NSF ITR (Information Technology Research) qui a été accepté pour une durée de 5 ans. Il porte sur "La qualité de service dans le futur Internet". Nos partenaires américains sont R. Guerin (univ. Pennsylvania), J. Kurose et D. Towsley (univ. Massachusetts) et Z.-L. Zhang (univ. Minnesota).

8.4 Visites, et invitations de chercheurs

Europe V. Abramov (Advanced Data Systems Ltd, Israël du 04/05/00 au 02/07/00), B. Gaujal (projet TRIO, INRIA Lorraine, 10 jours en juin 2000), G. Koole (Vrije university of Amsterdam, Pays Bas, 20 jours en août 2000), R. Nunez-Queija (CWI, Amsterdam, Pays-Bas, du 01/02/00 au 06/07/00 puis du 21/08/00 au 03/09/00), A. Hordijk (université de Leiden, Pays-Bas, du 04/01/00 au 04/02/00).

Amérique J. Baras (university of Maryland, College Park, USA, août 2000), T. Basar (university of Illinois at Urbana Champaign, USA, deux semaines en juillet 2000); A. Poznjak (CINVESTAV-IPN, Mexico, une semaine, août 2000).

Asie H. Kameda (université de Tsukuba, Japon, du 07/08/00 au 18/08/00), A. Kumar (Indian Institute of Science, du 07/09/00 au 15/09/00), T. Parthasarathy (Indian Statistical Institute et membre de l'Académie des Sciences Indienne, 3 semaines, août-septembre 2000),

9 Diffusion de résultats

9.1 Animation de la communauté scientifique

E. Altman a co-organisé 3 sessions de IEEE Conference on Decision and Control (CDC'2000, Sydney, Australie, décembre 2000). Il a été membre du comité de programme de International Conference on Performance and QoS of Next Generation Networking (P&QNET 2000, Nagoya, Japon, 27-30 novembre 2000), de l'International Conference on Information Society in the 21 Century Emerging Technologies and New Challenges (université Aizu, Fukushima, Japon, 3-5 novembre 2000), du 9th International Symposium on Dynamic Games and Applications (Adélaïde, Australie, décembre 2000), et de la conférence IEEE INFOCOM 2001 (Anchorage, Alaska, avril 2001). Il a été co-organisateur du 2ème workshop sur la modélisation des flux TCP (ENS, Paris, 5-7 septembre 2000).

Z. Liu a participé aux comités de programme des conférences suivantes: Asian Computing Science Conference (ASIAN'00, Penang, Malaisie, 25-27 novembre 2000), Symposium on Advanced Performance Methods (SAPM'2000, Orlando, FL, 31 octobre - 2 novembre 2000), ACM Sigmetrics'2000 (Santa Clata, CA, juin 2000), 9th World Wide Web Conference (WWW9, Amsterdam, mai 2000). Il a participé au jury de thèse de C. Jalpa-

Villanueva (dir. de thèse) Il est membre externe de la commission d'évaluation de l'Académie des Sciences de Chine.

P. Nain a été le co-président du comité de programme de la conférence ACM Sigmetrics'2000 (Santa Clara, Californie, juin 2000), co-organisateur du 2ème workshop sur la modélisation des flux TCP (ENS, Paris en 5-7 septembre 2000), membre du comité de programme du Symposium on Advanced Performance Methods (SAPM'2000, Orlanda, FL, 31 octobre - 2 novembre 2000) et membre du comité scientifique de ECOTEL'2000 (Antibes, décembre 2000). Il est co-éditeur d'un numéro spécial de la revue CPRSR. Il a présidé le jury d'habilitation à diriger des recherches de E. Biersack (Eurecom), été rapporteur de la thèse de P. Rodriguez (EPLF) et examinateur de la thèse de C. Jalpa-Villanueva (UNSA). Il est responsable du DEA Réseaux et Systèmes Distribués (RSD) de l'université de Nice-Sophia Antipolis (UNSA) depuis la rentrée 2000 et membre de la 27ème section de la Commission des Spécialistes de l'UNSA depuis 1998. En septembre 2000, P. Nain a été nommé au conseil scientifique de Alcatel Space Industries.

9.2 Enseignement universitaire

DEA RSD, UNSA Cours de tronc commun de modélisation des systèmes informatiques (P. Nain, 24h), cours d'option sur la qualité de service dans les réseaux (Z. Liu 12h, P. Nain, 12h), cours d'option sur les réseaux satellitaires (E. Altman, 4h), cours d'option sur l'optimisation des réseaux (E. Altman, 3h), TP sur le simulateur des réseaux ns (C. Barakat, 4h), cours d'option TCP sur satellites (C. Barakat, 3h).

DEA IRO, Paris 6 Cours d'option sur les modèles stochastiques des réseaux de communications (Z. Liu 12H, P. Nain, 12h).

9.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations

S. Alouf a séjourné 1 mois dans le département d'Informatique de l'université du Massachusetts à Amherst (novembre 2000). Ce séjour entre dans le cadre d'une collaboration NSF.

E. Altman a présenté des communications lors des conférences suivantes : 39th IEEE Conference on Decision and Control (Sydney, Australie, décembre 2000), IEEE Infocom 2000 (Tel-Aviv, Israël), 2ème workshop TCP, (ENS, Paris). E. Altman a donné un cours tutoriel lors de 9th International Symposium on Dynamic Games (ISDG, Adélaïde, Australie, décembre 2000).

K. Avratchenkov a présenté des communications lors des conférences suivantes : 2nd International Workshop on Multidimensional Systems (NDS 2000, Zielona Gora, Pologne, 27-30 juin 2000), 5th Workshop on Discrete Event Systems (WODES 2000, Gent, Belgique, 21-23 août 2000), International Conference on the Performance and QoS of Next Generation Networking (P&QNET 2000, Nagoya, Japon, 27-30 novembre), 39th IEEE Conference on Decision and Control (Sydney, Australie, décembre 2000). Il a en outre assisté à la conférence ACM Sigcomm'2000 (Stockholm, août 2000).

- C. Barakat** a présenté des communications lors des conférences suivantes : Performance of Communication Protocols (Networking 2000) (Paris, mai 2000), ACM Sigmetrics'2000 (Santa Clara, CA, juin 2000), ACM Sigcomm'2000 (Stockholm, août 2000), International Workshop on Quality of future Internet Services (QOFIS Berlin, septembre 2000). Lors de cette dernière conférence, C. Barakat a reçu le prix du meilleur article étudiant (*Best PhD Student Paper*).
- T. Boulogne** a présenté des communications lors de la conférence suivante : 9th International Symposium of Dynamics Games (Adélaïde, Australie, décembre 2000).
- R. El Azouzi** a présenté des communications lors des conférences suivantes : 9th International Symposium of Dynamics Games (ISDG, Adélaïde, Australie, décembre 2000), 39th IEEE Conference on Decision and Control (Sydney, Australie, décembre 2000).
- Z. Liu** a été invité au workshop sur les réseaux avancés organisé par les académies des sciences chinoises et française. Il a quitté l'INRIA le 30 juillet 2000 pour le centre de recherche de IBM aux USA (IBM T.J. Watson Research Center).
- P. Nain** a séjourné une semaine dans le département d'Informatique de l'université du Massachusetts à Amherst (janvier 2000). Il a participé à la conférence ACM Sigmetrics'2000 (Santa Clara, CA, juin 2000) et au 2ème workshop TCP (ENS, Paris, septembre 2000).

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, mai 1997, p. 366–394.

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [9] C. JALPA-VILLANUEVA, *Modélisation et Optimisation du Web*, thèse de doctorat, université de Nice-Sophia Antipolis, décembre 2000.

Articles et chapitres de livre

- [10] E. ALTMAN, C. BARAKAT, K. AVRACHENKOV, «TCP in presence of bursty losses», *Performance Evaluation* 42, 2000, p. 129–147.
- [11] E. ALTMAN, S. BHULAI, B. GAUJAL, A. HORDIJK, «Optimal Routing to M Parallel Servers with no Buffers», *Journal of Applied Probability* 37, 3, septembre 2000, p. 668–684.
- [12] E. ALTMAN, E. FEINBERG, J. FILAR, V. GAITSGORY, «Perturbed Zero-Sum Games with Applications to Stochastic and Repeated Games», *Advances of Dynamic Games and Applications*, 2000.
- [13] E. ALTMAN, E. FEINBERG, A. SHWARTZ, «Weighted Discounted Stochastic Games with Perfect Information», *Annals of Dynamic Games*, 2000, p. 303–323, Eds V. Gaitsgory, J. Filar and K. Mizukami.
- [14] E. ALTMAN, B. GAUJAL, A. HORDIJK, «Admission Control in Stochastic Event Graphs», *IEEE Trans. on Automatic Control* 45, 5, 2000, p. 854–867.
- [15] E. ALTMAN, B. GAUJAL, A. HORDIJK, «Balanced Sequences and Optimal Routing», *Journal of the ACM* 47, 2000, p. 752–775.
- [16] E. ALTMAN, B. GAUJAL, A. HORDIJK, «Multimodularity Convexity and Optimization Properties», *Math. of Opns Research* 25, 2000, p. 324–347.
- [17] E. ALTMAN, Z. LIU, R. RIGHTER, «Scheduling of an Input-Queued Switch to Achieve Maximal Throughput», *Probability in the Engineering and Informational Sciences* 14, 2000, p. 327–334.
- [18] E. ALTMAN, A. ORDA, N. SHIMKIN, «Bandwidth Allocation for Guaranteed Versus Best Effort Service Categories», *QUESTA*, 2000.
- [19] C. BARAKAT, W. DABBOUS, E. ALTMAN, «On TCP Performance in a Heterogeneous Network: A Survey», *IEEE Communication Magazine*, 2000.
- [20] R. EL-AZOUZI, M. ABBAD, E. ALTMAN, «Perturbation of Linear Quadratic Systems with Jump Parameters and Hybrid Controls», *ZOR - Methods and Models in Operations Research* 51, 3, 2000, p. 399–417.
- [21] G. KOOLE, P. NAIN, «On the Value Function of a Priority Queue with an Application to a Controlled Polling Model», *QUESTA*, 34, 2000, p. 199–214.
- [22] M. TIDBALL, A. LOMBARDI, O. POURTALLIER, E. ALTMAN, «Continuity of Optimal Values and Solutions for Control of Markov Chains with Constraints», *SIAM J. Control and Optimization* 38, 4, 2000, p. 1204–1222.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [23] 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.
- [24] E. ALTMAN, K. AVRACHENKOV, C. BARAKAT, «TCP in Presence of Bursty Losses», *in: Proceedings of ACM Sigmetrics 2000 Conference, Performance Evaluation Review*, 28, 1, p. 102–109, Santa-Clara, Californie, USA, juin 2000.
- [25] E. ALTMAN, T. BAŞAR, T. JIMENEZ, N. SHIMKIN, «Competitive Routing in Networks with Polynomial Cost», *in: Proceedings of IEEE Infocom 2000*, Tel-Aviv, Israël, 2000.
- [26] C. BARAKAT, E. ALTMAN, «A Markovian Model for TCP Analysis in a Differentiated services network», *in: Proceedings of the First International Workshop on Quality of Future Internet Services (QOFIS)*, Berlin, Allemagne, septembre 2000.
- [27] C. BARAKAT, E. ALTMAN, «On ACK Filtering on a Slow Reverse Channel», *in: Proceedings of the First International Workshop on Quality of Future Internet Services (QOFIS)*, Berlin, Allemagne, septembre 2000.
- [28] C. BARAKAT, E. ALTMAN, «Performance of Short TCP Transfers», *in: Proceedings of IFIP-TC6 Networking Conference*, Paris, France, mai 2000.
- [29] T. BOULOGNE, E. ALTMAN, H. KAMEDA, O. POURTALLIER, «Mixed Equilibrium for Multiclass Routing Games», *in: Proceedings of the 9th International Symposium on Dynamic Games and Applications*, Adelaïde, Australie, décembre 2000.
- [30] T. BOULOGNE, E. ALTMAN, O. POURTALLIER, «On the Convergence to Equilibrium in a Problem of Parallel Computing», *in: Proceedings of the 9th International Symposium on Dynamic Games and Applications*, Adelaïde, Australie, décembre 2000.
- [31] P. DUBE, E. ALTMAN, «On Fluid Analysis of Queues», *in: Proceedings of the Allerton Conference*, Allerton, Illinois, USA, octobre 2000.
- [32] R. EL-AZOUZI, M. ABBAD, E. ALTMAN, «A Taylor Series Expansion for H^∞ Control of Perturbed Markov Jump Linear Systems», *in: Proceedings of the 9th International Symposium on Dynamic Games and Applications*, Adelaïde, Australie, décembre 2000.
- [33] R. EL-AZOUZI, E. ALTMAN, V. GAITSGORY, «The Averaging Principle for Perturbations of Continuous Time Control Problems with Fast Controlled Jump Parameters», *in: Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control (CDC'00)*, Sydney, Australie, décembre 2000.
- [34] H. KAMEDA, E. ALTMAN, O. POURTALLIER, J. LI, Y. HOSOKAWA, «Paradoxes in Performance Optimization of Distributed Systems», *in: Proceedings of SSGRR 2000 Computer and ebusiness conference*, l'Agua, Italie, juillet 2000.
- [35] H. KAMEDA, E. ALTMAN, O. POURTALLIER, «Analytic Study of Mixed Optima in Symmetric Distributed Computer Systems», *in: Proceedings of the 9th International Symposium on Dynamic Games and Applications*, Adelaïde, Australie, décembre 2000.
- [36] S. SAHU, P. NAIN, D. TOWSLEY, C. DIOT, V. FIRIOU, «On Achievable Service Differentiation with Token Bucket Marking for TCP», *in: Proceedings of ACM Sigmetrics 2000 Conference, Performance Evaluation Review*, 28, 1, p. 23–33, Santa-Clara, Californie, USA, juin 2000.

Rapports de recherche et publications internes

- [37] S. ALOUF, P. NAIN, D. TOWSLEY, « Inferring Network Characteristics via Moment-Based Estimators », *Compsci Report n° 00-60*, université du Massachusetts, Amherst, USA, 2000, à paraître dans les actes de la conférence IEEE Infocom'2001, Anchorage, AL, USA.
- [38] E. ALTMAN, K. AVRACHENKOV, C. BARAKAT, R. NUNEZ-QUEIJA, « State-Dependent M/G/1 Type Queueing Analysis for Congestion Control in Data Networks », *TR n° PNA-R0005*, CWI, Amsterdam, Pays-Bas, juillet 2000.
- [39] E. ALTMAN, C. BARAKAT, V. RAMOS RAMOS, « Queueing Analysis of Simple FEC Schemes for IP Telephony », *rapport de recherche n° 3998*, INRIA, Sophia Antipolis, France, septembre 2000.
- [40] P. DUBE, E. ALTMAN, « Queueing Analysis of a Partial Discard Policy », *rapport de recherche n° 3993*, INRIA, Sophia Antipolis, France, septembre 2000.

Divers

- [41] T. BOULOGNE, « Equilibre Mixte dans les Jeux de Réseaux Multiclasse », rapport de DEA Optimisation, Jeux, Modélisation en Économie, université Paris 6, septembre 2000.
- [42] F. LOUATI, « Contrôle de Congestion dans l'Internet. Etude Expérimentale du mécanisme RED: Random Early Detection », rapport de DEA Réseaux et Systèmes Distribués, université de Nice-Sophia Antipolis, juillet 2000.
- [43] V. RAMOS RAMOS, « Queueing Analysis of Simple FEC Schemes for IP Telephony », rapport de DEA Réseaux et Systèmes Distribués, université de Nice-Sophia Antipolis, septembre 2000.