

Projet TREC

Théorie des Réseaux et Communications

Rocquencourt

THÈME 1B

R *apport*
d'Activité

2001

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	3
3	Fondements scientifiques	4
4	Domaines d'applications	4
5	Logiciels	5
5.1	Simulateur N2N	5
5.2	Logiciel K2	5
6	Résultats nouveaux	6
6.1	Analyse de protocoles de contrôle de flux dans les réseaux	6
6.1.1	Modélisation de TCP au niveau paquets	6
6.1.2	Modélisation fluide de TCP	6
6.1.3	Contrôle de flux multipoint	7
6.2	Analyse de processus de couverture	8
6.2.1	Modélisation et optimisation de processus de couverture CDMA	8
6.2.2	Simulation de processus de couverture CDMA	9
6.2.3	Un modèle stochastique de la capacité globale de la voie descendante dans le CDMA	9
6.2.4	Analyse du protocole IEEE 802.11	9
6.2.5	Communication multipoint	10
6.3	Théorie des réseaux	10
6.3.1	Propriétés des exposants de Lyapunov	10
6.3.2	Calcul d'asymptotiques sous-exponentielles	11
6.3.3	Equations d'évolution de réseaux de Petri temporisés avec compétition	12
6.3.4	Analyse des réseaux (max,plus)-linéaires	12
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	12
7.1	CTI avec France Télécom R&D	12
7.2	RNRT Georges	13
7.3	Opération Stratégique Conjointe avec Alcatel Bell	13
8	Actions régionales, nationales et internationales	15
8.1	Actions financées par la Commission Européenne	15
8.1.1	Projet TMR Alapedes	15
8.1.2	Projet INTAS <i>Asymptotics of Stochastic Networks</i>	15
8.2	Réseaux et groupes de travail internationaux	15
8.3	Visites et invitations de chercheurs	15

9	Diffusion de résultats	16
9.1	Animation de la communauté scientifique	16
9.2	Enseignement universitaire	16
9.3	Participation à des colloques, séminaires, invitations	16
10	Bibliographie	17

TREC est un projet commun INRIA-ENS

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

François Baccelli [DR]

Responsable permanent

Dohy Hong [CR2]

Assistante de projet

Lydie Vincensini [TR, jusqu'au 09/2001]

Danielle Croisy [TR, à partir du 10/2001]

Personnel Inria

Bartłomiej (Bartek) Błaszczyszyn [CR1, à partir du 10/2001]

Conseiller Scientifique

Pierre Brémaud [à partir du 09/2001]

Collaborateur extérieur

Jean Mairesse [Liafa]

Chercheur post-doctorant

Stefan Haar [Post-Doctorant TMR Alapedes, jusqu'au 02/2001]

Ingénieurs experts

Bartłomiej (Bartek) Błaszczyszyn [Université de Wrocław, Pologne, jusqu'au 09/2001]

Augustin Chaintreau [à partir du 09/2001]

Julien Reynier [à partir du 09/2001]

Ingénieurs experts

Bartłomiej (Bartek) Błaszczyszyn [Université de Wrocław, Pologne, jusqu'au 09/2001]

Augustin Chaintreau [à partir du 09/2001]

Julien Reynier [à partir du 09/2001]

Doctorants

Florent Tournois [ENS & Corps des Télécoms]

Marc Lelarge [École polytechnique à partir du 10/2001]

Stagiaires

Florent Benaych-Georges [stagiaire de DEA, du 09/2001 au 10/2001]

Augustin Chaintreau [stagiaire de DEA du 04/2001 au 07/2001]

Dimitri Lebedev [stagiaire de DEA, du 03/2001 au 09/2001]

Marc Lelarge [stagiaire de DEA, du 03/2001 au 07/2001]

2 Présentation et objectifs généraux

TREC est un projet commun INRIA-ENS. Ce projet se concentre sur la modélisation et le contrôle des réseaux de communication. Les activités de nature méthodologique se conjuguent avec des travaux fondés sur les relations industrielles, notamment avec Alcatel et France Télécom. Trois axes principaux sont étudiés :

- L'évaluation des performances des réseaux à commutation de paquets, notamment dans le domaine de la régulation des flux et du contrôle de congestion et dans celui de l'analyse du trafic.
- La modélisation par la géométrie aléatoire, qui s'applique à tout domaine des communications où la composante planaire ou spatiale des protocoles est importante.
- L'étude de la dynamique des réseaux stochastiques, tout particulièrement par des méthodes algébriques.

3 Fondements scientifiques

Du point de vue scientifique, trois axes principaux sont étudiés.

- Le contrôle des réseaux de communication. Par contrôle, nous entendons ici les notions de régulation de flux ATM et surtout de contrôle en boucle fermée du type de TCP, dont l'analyse et l'amélioration sont des défis majeurs pour la communauté des réseaux dans les années à venir.
- La modélisation des réseaux par la *géométrie aléatoire*. La géométrie aléatoire est un outil ancien dans les sciences des matériaux et la biologie. Les activités dans le domaine des télécommunications, sur lesquelles nous nous concentrons, sont nouvelles et foisonnantes. Ces techniques apportent beaucoup à tout domaine des communications où la composante planaire ou spatiale est présente : réseau d'accès, boucle locale, multipoint, jeux distribués, architecture hiérarchique, sans fil, etc. On pourra consulter la page web suivante sur ce sujet : <http://www.di.ens.fr/~trec/sg/>.
- La théorie des réseaux, et notamment le *network calculus*, qui concerne l'analyse des réseaux par des méthodes algébriques. Les outils mathématiques sont ceux propres aux systèmes dynamiques à événements : semi-anneaux (max, plus) et inf-convolutions, ainsi que leurs extensions non linéaires ; les principaux outils mathématiques dans ce cadre sont la théorie ergodique, les méthodes de contraction, le calcul des exposants de Lyapunov, la caractérisation des lois limites, les grandes déviations etc. Ce domaine est aussi fortement lié à l'informatique fondamentale (semi-groupes, monoïdes de traces, automates).

4 Domaines d'applications

Nous interagissons avec plusieurs industriels et opérateurs : France Télécom, Alcatel et Sprint.

- Les travaux avec FT se concentrent sur deux types d'applications : l'économie des réseaux qui est importante dans le contexte de la compétition entre les opérateurs, et l'analyse des protocoles ayant une composante spatiale. Parmi les défis majeurs actuels, on peut citer :
 - L'optimisation des réseaux cellulaires. Les travaux en cours portent notamment sur les couverture et capacité CDMA.
- Les travaux avec Alcatel portent sur l'analyse de l'interaction d'un grand nombre de connexions TCP dans le contexte de réseaux comportant plusieurs routeurs avec des caractéristiques variées : WFQ, FIFO, priorités, RED etc. (voir la section sur les relations

industrielles).

- Les travaux avec Sprint portent sur l'analyse de mécanismes de contrôle de flux dans le contexte multipoint, et notamment sur l'influence de la taille du groupe multipoint et de la forme de l'arbre multipoint sur le débit.

5 Logiciels

5.1 Simulateur N2N

Participants : François Baccelli, Dohy Hong.

Mots clés : simulation, TCP, routeur d'accès, trafic HTTP, qualité de service.

Plusieurs nouvelles méthodes de simulation de l'interaction entre un grand nombre de connexions TCP se partageant un ou plusieurs routeurs ont été développées par TREC. Plusieurs prototypes ont été développés en C. Ils permettent d'étudier le débit obtenu par chaque connexion (moyenne en temps long du débit, fluctuations du débit instantané) sous des hypothèses réalistes de trafic (HTTP, voix, mail etc.) et avec une description détaillée des routeurs Internet. L'idée principale du premier simulateur est décrite dans ^[BHL00]; elle consiste en une méthode de point fixe fondée sur la simulation détaillée d'une connexion et une représentation simplifiée de l'interaction avec les autres connexions. L'idée de base de la deuxième famille de simulateurs est décrite dans les articles [14], [11], [16] et ^[BH01]; cette deuxième famille permet notamment de simuler le partage des ressources d'un très grand nombre de routeurs par des connexions ayant des caractéristiques et des routes différentes. Des brevets ont été déposés sur ces simulateurs.

5.2 Logiciel K2

Participant : Florent Tournois.

Mots clés : simulation, CDMA, qualité de service, capacité, couverture.

Dans le cadre de sa thèse Florent Tournois travaille sur une intégration, dans le logiciel K2, des méthodes d'analyse de systèmes CDMA par la géométrie aléatoire proposées dans [5], [13] et [19]. Ce logiciel comporte déjà une partie centrale à laquelle nous pouvons rajouter des éléments. Il s'agit d'un logiciel très modulaire qui peut s'apparenter à un langage visuel tel que Open Music. Chaque élément visuel représente un objet qui contient des données et une fonction. Les éléments visuels peuvent être assemblés afin d'obtenir un programme. Chacun de ces éléments représente un morceau de programme élémentaire.

[BHL00] F. BACCELLI, D. HONG, Z. LIU, « Fixed Point Methods for the Simulation of a Large Number of Interacting TCP Connections », Communication présentée au Workshop on the modeling of flow and congestion control mechanisms, 4-6 Septembre 2000.

[BH01] F. BACCELLI, D. HONG, « Performance for TCP Sessions over a Network: The Multi-AIMD Model », en cours de rédaction, 2001.

6 Résultats nouveaux

6.1 Analyse de protocoles de contrôle de flux dans les réseaux

Mots clés : TCP/IP, prévention/contrôle de la congestion, multipoint, Reno, Tahoe, algèbre (max, plus), système dynamique, simulation, produit de matrices aléatoires, modèle aimd, taux de synchronisation.

Participants : François Baccelli, Augustin Chaintreau, Dohy Hong, Dmitri Lebedev, Zhen Liu, Julien Reynier.

La nature des protocoles de contrôle et des applications (multimédias) utilisés dans l'Internet a changé radicalement ces dernières années, au point que les règles classiques de dimensionnement de réseau et les outils d'évaluation de performances employés jusqu'ici ne conviennent plus. Il est communément admis qu'une méthodologie d'analyse du trafic et des mécanismes de contrôle de congestion utilisés est indispensable pour garantir une qualité de service (QoS) de bout en bout dans les couches application et transport, et pour aboutir à des règles d'ingénierie des performances qui permettront :

- de concevoir des architectures de réseau et des contrôles d'accès garantissant certaines bornes prédéfinies de QoS de bout en bout, dans différentes conditions de fonctionnement et différentes configurations ;
- d'aider les opérateurs à planifier des réseaux ayant des ressources (capacité des mémoires tampons et bande passante) suffisantes pour prendre en charge n'importe quel panachage de trafic (voix, vidéo et données) avec des exigences variables en matière de QoS.

6.1.1 Modélisation de TCP au niveau paquets

La simulation du transfert des paquets d'un grand nombre de connexions parallèles est abordée dans [BH00] et [10]. Dans ces modèles, on suppose connus les paramètres du trafic potentiel (trafic demande) et la configuration du réseau (RTT_{\min} , la description du protocole, etc). La méthode est basée sur la recherche d'un point fixe pour N flux homogènes : en simulant de manière précise un flux de référence et en propageant les statistiques de ce flux (par exemple, les deux premiers moments de la durée inter-arrivées des paquets) sur tous les flux transversaux, on peut simuler l'interaction d'un grand nombre de connexions parallèles (de l'ordre de dizaines de milliers) et en obtenir des statistiques fines du trafic (fluctuation du débit ou QoS, taux de pertes, de time-outs). Typiquement, cette approche permet de trouver le nombre de connexions parallèles que peut supporter une boucle locale une fois la qualité de service fixée.

6.1.2 Modélisation fluide de TCP

Le modèle AIMD Le protocole TCP/IP est basé sur une adaptation dynamique de fenêtre. Dans les modèles fluides, on suppose que la phase d'évitement de congestion, qui suit le principe

[BH00] F. BACCELLI, D. HONG, « TCP is Max-Plus Linear », *in: Proceedings of ACM-Sigcomm*, Stockholm, Suède, Septembre 2000.

dit AIMD (Additive Increase, Multiplicative Decrease), est dominante et on cherche à étudier l'évolution jointe des flux TCP en compétition. Lorsque le temps aller-retour RTT de chaque flux est supposé constant dans le temps, cette évolution est décrite par un produit de matrices aléatoires dont un paramètre fondamental est le taux de synchronisation. Ce modèle et les résultats obtenus ont été présentés à la conférence d'Allerton [11].

Trafic agrégé Même sous des hypothèses très simplificatrices (trafic homogène, RTT constant, perte indépendante du débit), l'analyse statistique basée sur les outils d'ondelettes montre un comportement non-trivial du trafic agrégé du type multi-fractal; voir [14]. Ces résultats suggèrent une explication physique concrète de l'apparition du caractère multi-fractal des flux TCP aux petites échelles de temps.

Asymptotique du modèle AIMD L'article [16] montre que lorsque le nombre de connexions TCP tend vers l'infini, le modèle fluide AIMD dépendant du taux de synchronisation tend vers un modèle unidimensionnel, dont on peut caractériser complètement et simplement le régime stationnaire.

Performances de connexions TCP partageant un routeur TREC cherche à développer un ensemble de formules qui donnent les performances atteintes par une connexion TCP dans différents cas de réseaux à commutation de paquets. Le formalisme de calcul basé sur un calcul de transformée de Laplace est déjà développé dans le cas fondamental d'un lien goulot d'étranglement partagé par des connexions persistantes. Nous envisageons d'améliorer nos résultats et de les étendre à l'étude de connexions non persistantes, comme par exemple dans le trafic HTTP, responsable d'une partie importante du trafic général.

La prévision des performances du protocole TCP sur un lien d'un réseau à commutation de paquets a été abordée dans le cas de connexions partageant un lien goulot d'étranglement et dans le cadre d'une asymptotique de grand nombre de connexions introduite dans [16]. Cette extension du modèle mathématique dit AIMD permet de prendre en compte ces différents effets et conduit à une formule explicite caractérisant les variations des performances des connexions.

Modèles de réseaux à commutation de *bursts* optiques Une étude a été initialisée en collaboration avec Alcatel sur la commutation de *bursts* optiques [21]. Il s'agit notamment de déterminer une taille optimale pour les *bursts*.

6.1.3 Contrôle de flux multipoint

L'impact de perturbations aléatoires (files d'attente) sur les performances d'une session multipoint a été étudié dans [12]. Un modèle analytique simple a permis d'analyser la dégradation du débit de la session dans le cas d'une source unique et lorsque le contrôle de congestion et de flux est de type TCP. L'algèbre (max,plus) ainsi que des méthodes de comparaison stochastique (association et ordonnancement convexe) et des résultats de la théorie des extrêmes (caractéristique maximale de Lai et Robbins) ont permis d'analyser les propriétés asymptotiques du débit d'une telle session lorsque le nombre de récepteurs est grand. Le débit obtenu par le modèle déterministe de Golestani est systématiquement optimiste. En présence

d'un bruit dont la distribution est à queue exponentielle, le débit de la session décroît en fait comme l'inverse du logarithme du nombre des récepteurs. Ce comportement est établi au moyen de bornes inférieures et supérieures explicites du débit. L'évolution du débit entre ces deux bornes dépend de la topologie de l'arbre multipoint. Une classe d'arbres fréquemment rencontrés dans les sessions IP multipoint est particulièrement sensible au bruit.

6.2 Analyse de processus de couverture

Mots clés : modélisation spatiale, processus ponctuel, géométrie stochastique, calcul de Palm, processus de couverture, modèle booléen, mosaïque de Voronoi, processus de Poisson, fermé aléatoire, analyse des perturbations, communication sans fil, rapport signal sur bruit, capacité de Shannon, protocole CDMA, protocole 802.11.

Participants : François Baccelli, Bartek Błaszczyszyn, Florent Tournois, Florent Benaych-Georges, Konstantin Tchoumatchenko.

Cet axe concerne l'analyse de modèles stochastiques issus de problèmes de communications, en particulier de protocoles de communication cellulaire tels que le CDMA et l'UMTS. Nous nous intéressons principalement à des modèles macroscopiques, qui sont particulièrement importants dans le cadre des questions de planification économique. L'outil commun est la géométrie stochastique, combinée avec d'autres domaines des processus stochastiques comme par exemple les processus ponctuels ou les processus de branchement.

6.2.1 Modélisation et optimisation de processus de couverture CDMA

L'article [5] porte sur la définition et l'analyse d'un processus de couverture aléatoire sur l'espace euclidien de dimension d , qui permet de décrire un continuum allant du modèle booléen à la mosaïque de Voronoi en passant par le modèle de Johnson-Mehl. Comme pour le modèle booléen, les données minimales pour définir un tel processus sont un processus ponctuel de Poisson sur cet espace euclidien et une suite de variables aléatoires à valeurs réelles. La cellule attachée à un point est définie comme la région du plan, où l'effet de la marque de ce point dépasse une fonction affine de l'effet cumulé de toutes les marques du processus ponctuel. Cet effet cumulé est par définition le processus de *shot noise* associé au processus ponctuel.

Plusieurs propriétés fondamentales de ce processus de couverture sont étudiées, comme la probabilité de couverture d'un point ou d'une paire de points par une cellule typique, ou encore comme la distribution du nombre de cellules qui couvrent un point donné. Sont aussi étudiées certaines propriétés de convergence de ce processus au moyen du formalisme des fermés aléatoires, et certaines questions de différentiabilité par l'analyse des perturbations.

Ce modèle est issu des communications sans fil où plusieurs antennes utilisent les mêmes canaux de fréquences, ou encore des canaux sujets à des interférences, comme dans le CDMA. Dans ce cadre, le domaine où une antenne donnée peut être reçue est celui où le rapport signal sur bruit (ou signal sur interférence) est plus grand qu'un certain seuil. L'idée générale consiste en une représentation de la localisation des antennes et des mobiles comme réalisations de processus ponctuels aléatoires dans le plan appartenant à des classes paramétriques simples ; ceci permet notamment de prendre en compte les irrégularités et les aléas présents dans les locali-

sations des antennes et des stations mobiles. Dans [13], nous avons montré, que cette approche conduit à de nouvelles formules et à de nouveaux schémas de simulation permettant de calculer ou d'estimer les moyennes spatiales de ces caractéristiques en fonction des paramètres du modèle (densité des antennes et des mobiles, loi de la puissance d'émission et de l'évanouissement etc.) et de mettre en oeuvre diverses optimisations paramétriques, notamment de la probabilité de connexion ou encore de la loi du nombre de cellules couvrant un point donné.

6.2.2 Simulation de processus de couverture CDMA

Inspiré par l'algorithme de W. Kendall sur les simulations conditionnelles du schéma booléen, dans [19] F. Tournois a développé un outil similaire pour le modèle de couverture CDMA. Un procédé de remontée dans le temps et des méthodes d'encadrement sont utilisés pour obtenir la simulation conditionnelle. Une nouvelle fonction de transition est proposée, qui permet de prendre en compte des conditions du type suivant : les points x_i sont couverts au plus n_i fois et les points y_i sont couverts au moins m_i fois. Une implémentation de cet algorithme a été effectuée, et on sait donc construire par simulation des réalisations de configurations vérifiant ces conditions, à partir desquelles on peut par exemple obtenir des statistiques sur certaines caractéristiques géométriques du processus de couverture qui ne peuvent pas être calculées de manière analytique.

6.2.3 Un modèle stochastique de la capacité globale de la voie descendante dans le CDMA

La construction détaillée des capacités de la voie montante ou de la voie descendante sont particulièrement importantes pour les réseaux CDMA. Traditionnellement cette capacité est définie en termes de nombre maximal d'utilisateurs qui peuvent être servis de manière fiable et elle est calculée en utilisant des modèles très réguliers. Dans l'article ^[BB01] la localisation des antennes et des mobiles est représentée par des processus ponctuels aléatoires dans le plan. Des conditions nécessaires et suffisantes sont données pour la faisabilité de la voie descendante, globalement dans le réseau. Elles font intervenir toutes les interférences intra et intercellulaires, les affaiblissements, ainsi que le contrôle de puissance. Dans certains cas, par exemple pour des processus de Poisson d'antennes et de mobiles, cette approche permet d'exprimer la capacité globale du réseau de manière explicite. Notamment, étant donnée une intensité d'antennes, on trouve l'intensité de mobiles maximale gérable par ces antennes.

6.2.4 Analyse du protocole IEEE 802.11

Dans son stage de DEA [20], Florent Benaych-Georges a commencé une étude sur l'analyse mathématique du débit du protocole IEEE 802.11. Les principaux résultats portent sur la construction des états stationnaires des files d'attente de messages bloqués. Les travaux se poursuivent sur la caractérisation du débit maximal.

[BB01] F. BACCELLI, BLASZCZYSZYN, « Stochastic Model for Global Downlink Capacity of CDMA System », en cours de rédaction, 2001.

6.2.5 Communication multipoint

Le multipoint permet une réduction de charge et donc de coût pour la diffusion de messages ayant un grand nombre de destinataires. Un routeur multipoint peut transmettre plusieurs copies d'un unique paquet en réception, en opposition avec ce qui se passe dans le cas d'un routeur classique qui ne peut transmettre qu'autant de paquets qu'il en a reçus. Le calcul de la réduction de charge (et donc de coût) de diffusion dans des réseaux où certains des routeurs ont une capacité multipoint reste un défi.

Dans ^[BT01] nous définissons la notion de longueur d'un *arbre multipoint*, où les noeuds de l'arbre (représentant les routeurs) ont une capacité multipoint ou pas. Les arcs de l'arbre représentent les connexions entre routeurs. La longueur d'un tel arbre est définie comme le nombre minimal de sauts (transmissions d'un paquet sur une connexion) nécessaires pour transmettre un paquet de la racine de l'arbre vers tous les noeuds demandant le paquet. Deux exemples d'arbres multipoints sont étudiés :

- Les arbres associés à un *processus de branchement*. La fonction génératrice de la longueur d'un tel arbre peut être obtenue comme solution d'une équation fonctionnelle.
- Les arbres associés aux agrégats généralisés d'un modèle booléen. Ces arbres peuvent servir à la modélisation des réseaux ad hoc. Grâce à une approche similaire à celle de ^[BRS99], ces arbres peuvent être approximés par des processus de branchement.

6.3 Théorie des réseaux

Mots clés : algèbre (max , plus), exposant de Lyapounov, cadre monotone-séparable, fonction topicale, distribution sous-exponentielle, sous-additivité, queue épaisse, distribution d'excès, théorème de Veraverbeke, réseau de Jackson.

Participants : François Baccelli, Serguei Foss, Stefan Haar, Dohy Hong, Marc Lelarge.

Cet axe concerne l'étude des systèmes à événements discrets temporisés, notamment dans le cas stochastique. Il est à la fois lié à l'informatique théorique, tout particulièrement pour ce qui concerne les méthodes algébriques, et à la théorie des probabilités. C'est notamment le cas pour les questions de stabilité et pour le calcul des propriétés asymptotiques, qui utilisent un certain nombre de techniques probabilistes (processus markoviens, processus ponctuels et théorie ergodique).

6.3.1 Propriétés des exposants de Lyapunov

Les exposants de Lyapunov sont les taux de croissance linéaire asymptotiques des vecteurs d'états d'un système à événements discrets stochastiques dont le dynamisme est décrit par une relation de récurrence vectorielle. Dans le cas déterministe, ils coïncident avec la notion de vecteur de temps de cycle. Dans la suite des travaux [17] et [15], D. Hong et S. Gaubert

[BT01] B. BLASZCZYSZYN, K. TCHOUMATCHENKO, « Modeling of Shortest-Path Multicast Trees with Branching Processes and Boolean Clumps », 11-th Inform Applied Probability Society Conference, New York, Juillet 2001, article en cours de rédaction, 2001.

[BRS99] B. BLASZCZYSZYN, C. RAU, V. SCHMIDT, « Bounds for clump size characteristics in the Boolean model », *Adv. in Appl. Prob.* 31, 1999, p. 910–938.

s'intéressent à la question de l'égalité de l'exposant de Lyapunov top et bottom : la perte de mémoire en est une condition suffisante triviale. Une condition suffisante beaucoup plus générale est que le support des fonctions itérées soit irréductible. Le résultat recouvre le cas classique des produits aléatoires de matrices positives.

6.3.2 Calcul d'asymptotiques sous-exponentielles

Réseaux monotones-séparables Un réseau ouvert appartient à la classe monotone-séparable si ses variables d'état sont des fonctions homogènes et monotones des dates d'arrivées dans le réseau. Ce cadre, qui a initialement été introduit pour analyser la région de stabilité de réseaux stochastiques sous des hypothèses stationnaires ergodiques, contient plusieurs modèles classiques comme les réseaux de Jackson généralisés, les réseaux (max,plus) linéaires, les files multiserveurs et diverses classes de réseaux de Petri stochastiques. Le but de cet article est l'analyse des queues de distributions stationnaires des variables d'état de ces réseaux dans le cas i.i.d. Pour ce faire, nous établissons deux relations de comparaison entre les réseaux de cette classe et la file d'attente GI/GI/1/∞. Dans [8], ces relations sont utilisées pour généraliser aux réseaux de la classe monotone-séparable, deux résultats asymptotiques bien connus sur l'état stationnaire de la file d'attente GI/GI/1/∞. Le premier d'entre eux concerne les moments des variables d'état stationnaires. Pour tout $\alpha \geq 1$, l'hypothèse de moment d'ordre $\alpha + 1$ pour les temps de service est nécessaire et suffisante pour l'existence du moment d'ordre α du dateur maximal stationnaire (temps pour vider le réseau quand on arrête les arrivées) de tout réseau de cette classe. Le second résultat est une extension directe du théorème de Veraverbeke sur le comportement asymptotique de la queue de la distribution du temps d'attente stationnaire dans la file GI/GI/1/∞. Sous des hypothèses sous-exponentielles sur les temps de service, le dateur maximal stationnaire de tout réseau de cette classe a une distribution dont la queue peut être asymptotiquement majorée et minorée par des multiples de la queue de la distribution d'excès des services. En général, ces deux bornes ne coïncident pas. Néanmoins, des asymptotiques exactes peuvent être obtenues dans la lignée des résultats précédents pour divers cas particulier de réseaux. En particulier le théorème de Veraverbeke est étendu à des files d'attente en série (dateur maximal et délais dans les stations) ainsi qu'à des files multiserveurs. Cette méthode pour obtenir les asymptotiques se généralise à d'autres classes de réseaux monotones-séparables comme les réseaux (max,plus) linéaires généraux (irréductibles ou non) ou encore les réseaux de Jackson généralisés.

Graphes d'événements Dans son stage de DEA, M. Lelarge [22] a étudié l'asymptotique des queues de distribution des délais de bout en bout d'un réseau modélisé par un graphe d'événements de topologie générale, sous des hypothèses sous-exponentielles. Les seules asymptotiques exactes connues étaient celles d'un graphe irréductible et celles d'un graphe réductible correspondant à deux files en tandem.

Files d'attentes GPS Dans [18], Marc Lelarge a aussi étudié le comportement de files d'attente suivant une discipline de type Generalized Processor Sharing (GPS). Les arrivées de clients pour les différentes files d'attente sont des processus de renouvellement indépendants

et les temps de service sont sous-exponentiels. Nous calculons alors l'asymptotique exacte de la charge de chacune des files.

6.3.3 Equations d'évolution de réseaux de Petri temporisés avec compétition

L'article [9] établit les équations d'évolution pour les compteurs de réseaux de Petri temporisés dans le cas de la règle de tir connue sous le nom de *compétition*, où les transitions en conflit consomment les jetons disponibles selon une règle du type « première transition franchissable, première à tirer ». Cette classe permet notamment de représenter des réseaux de files d'attente multiclassées. Les équations obtenues ont pour espace d'états un espace de fonctions. Les opérations sur ces fonctions sont le max, le min, l'addition et la soustraction, et l'opérateur $\inf_{[0,t]}$. Une première version de ces résultats, qui porte sur une classe de réseaux de Petri de structure particulière, a été présentée au *IFAC Workshop on Max/Plus Algebras*, Prague, Août 2001 ; une version étendue avec la généralisation à des topologies arbitraires est en préparation.

6.3.4 Analyse des réseaux (max,plus)-linéaires

L'article [4] donne un développement de Taylor explicite des distributions transitoire et stationnaire des temps de réponse joints de réseaux stochastique (max,plus)-linéaires avec des entrées poissonniennes. Plusieurs exemples sont considérés, en particulier dans le domaine des réseaux de files d'attente. Les formules obtenues sont notamment utilisables pour évaluer les coefficients de perturbation des covariances des temps de réponse dans le réseau.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 CTI avec France Télécom R&D

Participants : François Baccelli, Bartek Błaszczyszyn, Konstantin Tchoumatchenko, Florent Tournois.

La CTI s'est terminée en octobre 2001. Voici une liste des principaux résultats de recherche obtenus au cours de cette CTI :

- L'analyse du routage avec connaissance partielle de la structure du réseau : dans le cadre des modèles de la géométrie aléatoire, l'infrastructure d'un réseau cellulaire peut être représentée par la triangulation de Delaunay. Les connexions entre des éléments du réseau correspondent à des chemins sur ce graphe.
- L'étude d'ensembles aléatoires fractals issus du modèle de Poisson-Voronoi hiérarchique introduit dans la première CTI.
- L'analyse de la superposition de pavages de Voronoi–Poisson qui permet notamment de poser certains problèmes de compétition entre opérateurs.
- L'amélioration du fonctionnement du multipoint dans l'Internet, qui a été abordée dans le contexte de l'analyse de protocoles de construction d'arbres multipoint de type HCBT, et dans celui de la gestion du multipoint pour environnements virtuels à grande échelle.
- L'analyse d'arbres multipoints par comparaison aux agrégats dans un modèle booléen.

- L'analyse et la simulation parfaite de la couverture CDMA par un nouveau modèle de géométrie aléatoire.

7.2 RNRT Georges

Participants : François Baccelli, Bartek Błaszczyszyn, Florent Tournois.

Une convention de recherche et coopération entre l'INRIA, l'ENST et France Télécom a démarré en 1999 dans le cadre du RNRT intitulé «Georges». Il s'agit de fédérer l'étude des réseaux de télécommunications par la géométrie stochastique. La troisième réunion de bilan de ce projet a eu lieu en Décembre 2001.

Cette année, le groupe de travail sur la géométrie stochastique et ses applications à la modélisation des réseaux de télécommunication a notamment abordé les champs de Gibbs, le modèle booléen, le calcul de Palm et la topologie des fermés aléatoires. Les leçons sont préparées par les participants de FT R&D, de l'ENS et de l'ENST.

(<http://www.di.ens.fr/~trec/georges>). En particulier, P. Brémaud a donné un cours sur les processus de Gibbs.

Dans un but de diffusion des méthodes développées au sein du projet GEORGES, TREC travaille au développement d'un logiciel nommé K2 qui intègre diverses méthodes d'analyse de systèmes CDMA par la géométrie aléatoire (voir section 5.2).

7.3 Opération Stratégique Conjointe avec Alcatel Bell

Participants : François Baccelli, Augustin Chaintreau, Dohy Hong, Dimitri Lebedev, Julien Reynier.

L'avènement de réseaux transportant la voix, la vidéo, les données et la signalisation sur une même infrastructure de transport pose aux concepteurs de réseaux des problèmes difficiles de dimensionnement.

L'équipe de recherche Trafic, Qualité de Service & Routage, du Groupe Stratégies de Réseau (NSG) d'Alcatel Bell à Anvers, et le projet TREC, se sont associés dans une Opération Stratégique Conjointe portant sur l'analyse des performances de bout en bout dans les réseaux à commutation de paquets [7].

L'objectif est à la fois de contribuer conjointement à l'effort de recherche international sur ces sujets et de fournir aux équipes R & D d'Alcatel les outils, les connaissances et les compétences leur permettant de concevoir des solutions de bout en bout dont la qualité de service satisfasse les exigences des applications.

Les travaux de recherche se concentrent tant sur l'analyse du trafic de type *streaming* (voix et vidéo) que sur celle du trafic contrôlé par le protocole TCP ; l'une des principales difficultés est d'unifier l'analyse de tous ces types de trafic dans des modèles globaux permettant de discerner leurs relations et de prédire leurs performances conjointes, notamment en terme de qualité de service (QoS).

S'il est largement admis que la QoS est nécessaire pour les communications téléphoniques et vidéo, de nombreuses applications élastiques ou adaptatives en débit, contrôlées par TCP, exigent également un niveau minimum de garantie de QoS pour fonctionner efficacement.

Dans les réseaux IP actuels, plus de 90% de toutes les applications sont contrôlées par TCP. Il importe donc de comprendre les propriétés statistiques d'applications contrôlées par TCP et de prévoir comment elles fonctionnent avec d'autres applications tant TCP qu'UDP, dans de grands réseaux IP utilisant des fonctions de gestion de trafic évoluées. Il faut notamment des règles de dimensionnement permettant d'évaluer la QoS obtenue par des sources individuelles en fonction de leur nombre, du trafic offert, de la topologie du réseau et des caractéristiques des routeurs d'accès et des routeurs du coeur du réseau. Ceci permettra notamment de contrôler le nombre des utilisateurs accédant à une boucle locale pour préserver à chacun d'entre eux une QoS prédéfinie.

Comme indicateur naturel de la QoS, on retient usuellement une mesure des fluctuations du débit utile instantané obtenu par un usager lors du téléchargement d'un fichier utilisant le protocole de transfert d'hypertexte (HTTP), sous l'hypothèse que N usagers partagent le même routeur considéré comme un goulet d'étranglement. Ce débit utile instantané est une moyenne locale du débit utile instantané obtenu par une source.

Cette collaboration a pour but principal d'évaluer les performances individuelles obtenues par des applications UDP et TCP interagissant avec un grand nombre de sources TCP et UDP (voix, vidéo) sur différents types de réseaux d'accès filaires et sans fil (xDSL, LMDS, GPRS, UMTS, satellite, etc.) et de réseaux d'infrastructure IP à haut débit ayant leurs propres fonctions de gestion de trafic et leurs propres profils de trafic.

Il s'agit donc d'un projet de recherche ambitieux qui comprend trois volets :

- La recherche fondamentale pour améliorer les modèles mathématiques et la méthodologie employées pour décrire avec plus de précision la dynamique des réseaux contrôlés par TCP/UDP dans des environnements d'accès et d'infrastructure hétérogènes.
- La recherche appliquée pour d'une part, effectuer une analyse statistique du comportement des usagers de certaines applications importantes et une identification des exigences de QoS de ces applications et, d'autre part, élaborer une méthodologie d'ingénierie des performances de réseaux réclamant des méthodes heuristiques utilisables pour les activités de planification et de dimensionnement.
- Le rôle de conseil vis-à-vis des équipes de R&D qui sont confrontées à des problèmes spécifiques de performances et d'exploitation des réseaux durant les expérimentations. L'interaction directe avec ces équipes peut être cruciale pour tester et valider l'applicabilité des méthodologies d'ingénierie des performances de réseau proposées.

Le groupe de recherche Trafic, QoS et routage de NSG d'Alcatel se concentre sur la modélisation et l'ingénierie des performances des réseaux d'accès et d'infrastructure à large bande, notamment sur l'analyse :

- des paramètres de performances des réseaux influant sur la qualité subjective des communications téléphoniques et vidéo en mode paquets dans divers types de réseaux comme les réseaux d'accès, les réseaux mobiles, les réseaux d'entreprise et satellitaires etc ;
- des fonctions de gestion de trafic IP pour les réseaux compatibles avec les protocoles IntServ et Diffserv ;
- des architectures d'administration de bande passante IP et des spécifications de niveau de service ;
- de l'ingénierie du trafic IP et des algorithmes de protection et de rétablissement.

8 Actions régionales, nationales et internationales

8.1 Actions financées par la Commission Européenne

8.1.1 Projet TMR Alapedes

Participants : François Baccelli, Stefan Haar, Dohy Hong.

Le projet TMR *Alapedes*, dans lequel participaient HP Bristol, les universités de Delft, Louvain et Paris, Metalau et l'Ecole des Ponts et Chaussées est maintenant terminé. Les principaux résultats de la fin du projet qui concernent les équations d'évolution de réseaux de Petri temporisés avec compétition ont été présentés au *IFAC Workshop on Max-Plus Algebras*, Prague, Août 2001 [9].

8.1.2 Projet INTAS *Asymptotics of Stochastic Networks*

Le projet INTAS *Asymptotics of Stochastic Networks*, dont l'INRIA était le coordinateur, est maintenant terminé. Le rapport final a été approuvé par Bruxelles. Les principaux résultats de la fin du projet concernent l'analyse de réseaux soumis à des aléas sous-exponentiels, notamment [8] et les réseaux en dimension infinie [6]. Un nouveau projet, *Mathematics of Stochastic Networks* démarre. Le coordinateur en est O. Boxma (Eurandom). TREC est un des partenaires de ce nouveau projet, avec les universités de Cambridge, Ulm, Lund, Novosibirsk et Patras.

8.2 Réseaux et groupes de travail internationaux

F. Baccelli est membre du groupe de travail IFIP W.G. 7.3. et membre du comité scientifique du département « Stochastic Networks » du centre Eurandom à Eindhoven.

8.3 Visites et invitations de chercheurs

Europe

- T. Bousch (Laboratoire de Mathématiques, Orsay), Février 2001 ;
- J-Y. Le Boudec (EPFL), Mai 2001 ;
- S. Foss (Université de Novosibirsk & Heriot-Watt, Edimbourg) Juin 2001 ;

Amérique

- D. Mac Donald (Département de Mathématiques, Université d'Ottawa, Canada), Mars 2001 ;
- R.R. Mazumdar (School of Electrical and Computer Engineering, Purdue University), Juin 2001 ;
- W. Szpankowski (Department of Computer Science, Purdue University), Juin 2001.

Australie

- D. Veitch (Université de Melbourne), Juin 2001.

9 Diffusion de résultats

9.1 Animation de la communauté scientifique

- Animation par B. Błaszczyszyn et K. Tchoumatchenko (FT) du Groupe de Travail « Géométrie Stochastique et Réseaux ».
- F. Baccelli maintient une page web sur la géométrie aléatoire pour les communications : (<http://www.di.ens.fr/~trec/sg>).
- Organisation par F. Tournois d'un groupe de travail sur l'utilisation de C++ (dans le cadre du développement du logiciel K2);
- Animation du séminaire du projet par D. Hong (<http://www.di.ens.fr/~trec/seminaire.html>);
- F. Baccelli est membre des comités de lecture des journaux suivants : *QUESTA*, *Annals of Applied Probability*, *Markov Chains*, *Mathematics of Operations Research* et *Journal of Discrete Event Dynamical Systems*;
- Organisation par D. Hong d'une journée sur TCP, à laquelle participaient notamment P. Jacquet (Hipercom, INRIA), G. Regnier (France Télécom, R&D),; P. Robert (Algo, INRIA) et T. Bonald (France Télécom, R&D), Mai 2001.

9.2 Enseignement universitaire

Le développement des activités d'enseignement dans le domaine des réseaux de communication nous semble une tâche particulièrement importante dans le contexte actuel. Nous nous investissons conjointement avec S. Gaubert, B. Gaujal, A. Jean-Marie et J. Mairesse, dans l'élaboration d'une nouvelle filière sur les réseaux dans le cadre du DEA Algorithmique; ces cours sont aussi proposés aux étudiants du DEA Réseaux. Deux nouveaux cours ont aussi été mis en place en amont : l'un au magistère de l'ENS, l'autre à l'X.

DEA Probabilités, Paris 6 Cours sur les processus ponctuels, la stabilité et les grandes déviations des réseaux (F. Baccelli, J. Mairesse et L. Massoulié, 32H).

DEA Algorithmique Filière sur les réseaux comportant trois cours sur les aspects algébriques et les aspects probabilistes (total de 60 heures).

Ecole Polytechnique Cours sur la simulation et la modélisation des réseaux de communication, commun aux deux majeures de deuxième année : Mathématiques Appliquées et Informatique, Algèbre et Applications (F. Baccelli 36H).

Ecole Normale Supérieure Cours sur l'analyse des performances en deuxième année du magistère MMFAI (F. Baccelli, S. Haar et M. Lelarge 40H).

9.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations

F. Baccelli – Membre du comité de programme d'*Infocom 2001* et de celui du *Symposium on Internet Performance* de Globecom 2001 (<http://www.globecom2001.com/src/TWorkshops.shtml>).

- Présentation au *Max-plus Workshop*, Prague, 27-29 Août 2001, satellite du *IFAC Symposium on System Structure and Control*.
- Conférences invitées :
 - au Forum Diderot, *Mathematics and Communications*, organisé par l'EMS, EPFL, Nov. 22-23, 2001.
 - au workshop Eurandom *Mathematics of Stochastic Networks*, Eindhoven, Nov. 2001, (<http://www.eurandom.tue.nl/workshops/>).
 - à la conférence d'Allerton 2001 : (<http://www.comm.csl.uiuc.edu/allerton/>).
 - à la journée commune des troisièmes cycles romands de Fribourg, Décembre 2000.

B. Błaszczyszyn Présentations aux conférences et workshops suivants :

- Conférence INFORMS 2001, New York, Juillet 2001 ; (<http://www.cap.columbia.edu/informs-aps/ap-2001.html>) ;
- Revue du projet RNRT Georges, Mai 2001 ;
- Revue du projet RNRT Georges, Décembre 2001.

A. Chaintreau Présentations aux conférences et workshops suivants :

- Conférence IEEE INFOCOM 2001, Anchorage USA, Avril 2001 ; (<http://www.ieee-infocom.org/2001/>) ;

D. Hong Présentations aux conférences et workshops suivants :

- Réunion RNRT, Toulouse, Mars 2001 ;
- Journée Automatique et Télécommunications, ENSEIRB, Bordeaux, Mars 2001 ;
- Conférence ITC Specialists Seminar on Access Networks and Systems, Girone, Espagne, Avril 2001 ;
- Journée STS du GDR-ARP, CNAM, Paris, Mai 2001 ;
- Atelier d'Evaluation de Performances, ENS Paris, Mai 2001.

Participations aux conférences et workshops suivants :

- Conférence INFORMS 2001, New York, Juillet 2001 ;
- Conférence SIGCOMM 2001, San Diego, Août 2001.

M. Lelarge Présentations aux conférences et workshops suivants :

- Workshop EURANDOM « The mathematics of stochastic networks », Octobre 2001 ; (http://www.eurandom.tue.nl/workshops/mathematics_stochastic_networks.htm) ;
- Séminaire du département de mathématiques actuariales de l'université Heriot-Watt d'Edimbourg, Décembre 2001, (<http://www.ma.hw.ac.uk/ams.html>).

F. Tournois Présentation aux séminaires suivants :

- L'École de Mines, Fontainebleau, Février 2001 ;
- L'École de Mines, Fontainebleau, Décembre 2001.

10 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] F. BACCELLI, P. BRÉMAUD, *Elements of Queueing Theory*, Série : *Applications of Mathematics*, Springer Verlag, 1994.

- [2] F. BACCELLI, P. BRÉMAUD, *Modélisation et Simulation des Réseaux de Communication*, Ecole Polytechnique, 2001.
- [3] F. BACCELLI, G. COHEN, G. OSLDER, J. QUADRAT, *Synchronization and Linearity an Algebra for Discrete Event Systems*, Wiley, 1992, <http://www-rocq.inria.fr/scilab/cohen/SED/book-online.html>.

Articles et chapitres de livre

- [4] H. AYHAN, F. BACCELLI, « Expansions for Joint Laplace Transform of Stationary Waiting Times in (max,plus)-Linear Systems with Poisson Input », *Queueing Systems Questa*, 37, 2001, p. 291–328.
- [5] F. BACCELLI, B. BLASZCZYSZYN, « On a coverage process ranging from the Boolean model to the Poisson Voronoi tessellation, with applications to wireless communications », *Adv. in Appl.Prob. (SGSA)*, 33, 2001, p. 293–323.
- [6] F. BACCELLI, A. BOROVKOV, J. MAIRESSE, « Asymptotic Results on Infinite Tandem Queueing Networks », *PTRF*, 118(3), 2000, p. 365–405.
- [7] F. BACCELLI, D. DE VLEESSCHAUWER, D. HONG, G. PETIT, « End to End Network Performance Modelling », *Alcatel Telecommunications Review, ATR*, 3, 2001, p. 223–227.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [8] F. BACCELLI, S. FOSS, « Moments and Tails in Monotone–Separable Stochastic Networks », in : *Workshop on Max-Plus Algebras and Their Applications to Discrete-event Systems, Theoretical Computer Science, and Optimization*, IFAC, Prague, 2001. Rapport INRIA 4197.
- [9] F. BACCELLI, S. HAAR, « Counter Equations for Timed Competition Nets », in : *Workshop on Max-plus Algebras and Their Applications to Discrete-event Systems, Theoretical Computer Science, and Optimization, at 1st IFAC Symposium on System Structure and Control*, IFAC, Prague, August 2001.
- [10] F. BACCELLI, D. HONG, Z. LIU, « Fixed Point Methods for the Simulation of a Large Number of Interacting TCP Connections », in : *Proceedings of Proc. of ITC Specialists Seminar on Access Networks and Systems*, Girone, Espagne, Avril 2001.
- [11] F. BACCELLI, D. HONG, « The AIMD Model for TCP Sessions Sharing a Common Router », in : *Proceedings of 39th Annual Allerton Conf. on Communication, Control and Computing*, Allerton Park, US, Octobre 2001.
- [12] A. CHAINTREAU, F. BACCELLI, C. DIOT, « Impact of Network Delay Variation on Multicast Session Performance With TCP-like Congestion Control », in : *Proceedings of IEEE INFOCOM'01*, Anchorage, Avril 2001. à paraître dans IEEE TON.

Rapports de recherche et publications internes

- [13] F. BACCELLI, B. BLASZCZYSZYN, F. TOURNOIS, « Spatial Averages of Downlink Coverage Characteristics in CDMA Networks », *RR n°4196*, INRIA, Rocquencourt, Juin 2001, à paraître dans les actes d'INFOCOM'02, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4196.html>.
- [14] F. BACCELLI, D. HONG, « AIMD, Fairness and Fractal Scaling of TCP Traffic », *RR n°4155*, INRIA, Rocquencourt, Avril 2001, à paraître dans les actes d'INFOCOM'02, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4155.html>.

-
- [15] S. GAUBERT, D. HONG, « Series Expansions of Lyapunov Exponents and Forgetful Monoids », *RR n° 3971*, INRIA, Rocquencourt, Juillet 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3971.html>.
 - [16] D. HONG, D. LEBEDEV, « Many TCP User Asymptotic Analysis of the AIMD Model », *RR n° 4229*, INRIA, Rocquencourt, Juin 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4229.html>.
 - [17] D. HONG, « Lyapunov Exponents : When the Top joins the Bottom », *RR n° 4198*, INRIA, Rocquencourt, Juin 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4198.html>.
 - [18] M. LELARGE, « Asymptotic behavior of Generalized Processor Sharing queues under subexponential hypothesis », *RR n° 4339*, INRIA, Rocquencourt, Décembre 2001, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4339.html>.
 - [19] F. TOURNOIS, « Perfect Simulation of a Stochastic Model for CDMA Coverage », *RR n° 4348*, INRIA, Rocquencourt, Janvier 2002.

Divers

- [20] F. BENAYCH-GEORGES, *Modèles probabilistes de deux protocoles de communication*, Rapport de stage de diplôme d'études approfondies, Ecole Normale Supérieure, Lyon, Octobre 2001.
- [21] D. LEBEDEV, *Fluid Approximation of Optical Burst Switching Networks*, Rapport de stage de diplôme d'études approfondies, Lix, Octobre 2001.
- [22] M. LELARGE, *Distributions sous-exponentielles et graphes d'événements*, Rapport de stage de diplôme d'études approfondies, Laboratoire de Probabilités, Université Paris 6, Octobre 2001.