

Avant-projet TREC

Théorie des Réseaux et Communications

Rocquencourt, ENS

THÈME 1B



*R*apport
d'Activité

2000

Table des matières

1	Composition de l'équipe	3
2	Présentation et objectifs généraux	4
3	Fondements scientifiques	4
4	Domaines d'applications	4
4.1	Panorama	4
5	Logiciels	5
5.1	Simulateur de l'interaction d'un grand nombre de sources TCP	5
5.2	ERS	5
6	Résultats nouveaux	6
6.1	Analyse de protocoles de contrôle de flux dans les réseaux	6
6.1.1	Point à point	6
6.1.2	Multipoint	6
6.2	Calcul d'exposants de Lyapunov	7
6.2.1	Calcul des exposants de Lyapunov dans l'algèbre (max ,plus)	7
6.2.2	Propriété de contraction	7
6.2.3	Région d'analyticité	7
6.2.4	Thèse de D. Hong	8
6.3	Réseaux de dimension infinie	8
6.4	Systèmes à événements–propriétés logiques	9
6.4.1	Interblocage de réseaux de Petri	9
6.4.2	Systèmes temporisés	9
6.4.3	Sémantique du parallélisme	9
6.4.4	Parallélisme et probabilité	10
6.5	Analyse de processus de couverture	10
6.5.1	Modélisation de processus de couverture CDMA	10
6.5.2	Simulation de processus de couverture CDMA	11
6.5.3	Couverture booléenne	12
7	Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)	12
7.1	CTI avec France Télécom R&D	12
7.2	RNRT Georges	12
8	Actions régionales, nationales et internationales	13
8.1	Actions financées par la Commission Européenne	13
8.1.1	Projet TMR Alapedes	13
8.1.2	Projet INTAS Asymptotics of Stochastic Networks	13
8.2	Réseaux et groupes de travail internationaux	14
8.3	Relations bilatérales internationales	14

8.3.1	Russie	14
8.3.2	USA	14
8.4	Visites et invitations de chercheurs	14
9	Diffusion de résultats	15
9.1	Animation de la communauté scientifique	15
9.2	Enseignement universitaire	15
9.3	Participation à des colloques, séminaires, invitations	16
10	Bibliographie	17

1 Composition de l'équipe

Responsable scientifique

François Baccelli [DR]

Responsable permanent

Dohy Hong [CR depuis le 01/10/00]

Assistante de projet

Lydie Vincensini [TR]

Collaborateurs extérieurs

Jean Mairesse [Liafa]

Chercheurs invités

Bartek Błaszczyszyn [Université de Wrocław, Pologne]

Chercheurs post-doctorants

Stefan Haar [Post-Doctorant TMR Alapedes]

James Martin [Post-Doctorant TMR Alapedes, jusqu'au 01/11/00]

Doctorants

Dohy Hong [Doctorant AMX jusqu'au 01/10/00]

Alexandre Proutieres [Doctorant, FT]

Florent Tournois [Doctorant, ENS & Corps des Télécoms]

Stagiaires

Julien Guyon [Ecole Polytechnique, du 01/04/00 au 01/07/00]

Augustin Chaintreau [ENS & SPRINT, du 01/02/00 au 01/07/00]

2 Présentation et objectifs généraux

Ce projet se concentre sur la modélisation et le contrôle des réseaux de communication. Sa localisation à l'ENS permet le développement d'activités de nature méthodologique, en complément des travaux fondés sur les relations industrielles en cours avec Alcatel et France Télécom. Deux axes principaux sont étudiés: les méthodes algébriques d'une part, qui ont des applications naturelles dans le domaine de la régulation des flux et du contrôle de congestion. La modélisation par la géométrie aléatoire d'autre part, qui s'applique à tout domaine des communications où la composante planaire ou spatiale des protocoles est importante.

3 Fondements scientifiques

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

- Le *network calculus* qui concerne l'analyse et le contrôle des réseaux de communication par des méthodes algébriques.

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.

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).

- 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.dmi.ens.fr/~mistral/sg/>;

4 Domaines d'applications

4.1 Panorama

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'amélioration du fonctionnement du multipoint dans l'Internet et les réseaux ATM. Les travaux en cours portent sur l'analyse de protocoles du type HCBT.
- L'optimisation des réseaux cellulaires. Les travaux en cours portent notamment sur la couverture 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 des routeurs avec des caractéristiques variées: WFQ, FIFO, priorités etc. (voir le paragraphe "Logiciel").
- 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 de l'interaction d'un grand nombre de sources TCP

Participants : François Baccelli, Dohy Hong, Zhen Liu.

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

En collaboration avec Zhen Liu (maintenant à IBM Yorktown), nous avons développé une nouvelle méthode de simulation de l'interaction entre un grand nombre de connexions TCP se partageant le même routeur d'accès. Un prototype a été développé en C. Il permet 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, qui est décrite dans [BHL00], 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. Un brevet a été déposé sur ce type de simulateur.

5.2 ERS

Durant son stage de magistère au Loria [21], Anne Bouillard (ENS) a intégré dans le logiciel ERS, sous la direction de B. Gaujal, les méthodes d'analyse de systèmes temps réel proposées dans [BGS].

[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.

[BGS] F. BACCELLI, B. GAUJAL, D. SIMON, « Analysis of Preemptive Periodic Real Time Systems using the (max,plus) Algebra », Rapport INRIA 3778, 1999, soumis à **IEEE CST**, 2000.

6 Résultats nouveaux

6.1 Analyse de protocoles de contrôle de flux dans les réseaux

Participants : François Baccelli, Augustin Chaintreau, Julien Guyon, Dohy Hong.

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

6.1.1 Point à point

Une représentation de la dynamique des variantes Reno et Tahoe de TCP au niveau paquet a été proposée dans [13] dans le cas d'une seule connexion. Cette représentation permet de considérer le cas de connexions établies sur un réseau constitué d'une série de plusieurs routeurs déterministes ou aléatoires. Nous montrons que les principales caractéristiques du protocole et du réseau contrôlé peuvent s'exprimer sous la forme d'une récurrence linéaire dans l'algèbre (max, plus). Ceci conduit à des résultats analytiques nouveaux ainsi qu'à de nouvelles méthodes de simulation rapide de ce protocole, tous fondés sur la réduction à des produits de matrices aléatoires dans cette algèbre. En particulier, on obtient des expressions explicites des débits sous divers types d'hypothèses naturelles concernant le comportement des routeurs et la détection des pertes et des *timeouts*, et nous montrons dans quelle mesure ces expressions prolongent celles connues dans le cas d'un seul routeur ou dans le cas de modèles fluides.

Un modèle simplifié de l'interaction entre plusieurs connexions, fondé sur une représentation sous forme d'un système dynamique de type (min, plus) est étudié dans le stage d'option de J. Guyon [22].

6.1.2 Multipoint

L'impact de perturbations aléatoires (files d'attente) sur les performances d'une session multipoint a été étudié dans [17]. 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 Calcul d'exposants de Lyapunov

Participants : François Baccelli, Stéphane Gaubert, Dohy Hong.

Mots clés : algèbre (max , plus), exposant de Lyapounov, contraction, non-expansivité, analyticité, relation de récurrence vectorielle, régénération, analyticité.

Les exposants de Lyapounov sont les taux de croissance linéaire asymptotiques des vecteurs d'états d'un système à événements discrets stochastique dont la dynamique est décrite par une relation de récurrence vectorielle. Dans le cas déterministe, ils coïncident avec la notion de vecteur de temps de cycle. De manière générale, le calcul des exposants de Lyapunov est une question difficile dans l'algèbre conventionnelle.

6.2.1 Calcul des exposants de Lyapunov dans l'algèbre (max ,plus)

L'article ^[BH] donne un développement explicite de l'exposant de Lyapounov $\gamma(p)$ d'une suite de matrices aléatoires i.i.d. dans le semi-anneau (max ,plus), tirées selon un mécanisme de Bernoulli et dépendant d'un petit paramètre p . Une hypothèse clef est que l'une des matrices possède un unique vecteur propre. Cette hypothèse permet d'utiliser une représentation de $\gamma(p)$ comme la moyenne d'une variable aléatoire, puis un analogue discret des méthodes de perturbations pour obtenir ce développement. Plusieurs extensions sont proposées, notamment au cas multinomial et au cas d'itérées d'opérateurs aléatoires non-expansifs. La connaissance des coefficients du développement permet aussi d'évaluer une borne inférieure du rayon de convergence du développement analytique.

6.2.2 Propriété de contraction

L'article [6] porte sur l'analyticité du comportement asymptotique d'une classe de systèmes dynamiques définis par itération d'opérateurs aléatoires non-expansifs, incluant le cas des exposants de Lyapounov. Il s'agit d'étudier la dépendance analytique par rapport aux paramètres qui gouvernent la loi des opérateurs aléatoires. Les propriétés de contraction par rapport à certaines semi-normes projectives sont utilisées pour aborder ce problème. Pour les exposants de Lyapounov dans (max ,plus), cette approche donne une meilleure approximation du domaine d'analyticité. Mais, elle permet aussi d'étudier les exposants de Lyapounov dans l'algèbre conventionnelle ou encore ceux associés aux systèmes dynamiques non-linéaires qui apparaissent dans les problèmes de contrôles stochastiques. Pour la classe des opérateurs réductibles (définie dans [6]), nous obtenons des résultats sur l'analyticité de l'espérance des fonctionnelles du comportement limite, en fonction des paramètres de la loi : dans ce cas, la contraction est établie par rapport à la norme infinie.

6.2.3 Région d'analyticité

L'article [18] étudie les itérées de fonctions monotones homogènes, lorsque les images de certaines itérées sont des droites avec probabilité positive. En utilisant cette propriété de perte

[BH] F. BACCELLI, D. HONG, «Analytic Expansions of (max,+) Lyapunov Exponents», à paraître dans Annals of Appl. Prob.

de mémoire qui est vérifiée pour les produits aléatoires de matrices dans le semi-anneau (max, plus), et en particulier, pour les modèles de tas de pièces du type Tetris, on obtient une formule de développement en série pour l'exposant de Lyapunov en fonction de la loi de probabilité. Dans le cas d'une loi de probabilité rationnelle, l'exposant de Lyapunov est une fonction analytique des paramètres de la loi, dans un domaine qui contient le domaine de convergence absolue d'une fonction de type partition, associée à un monoïde particulier dit "oublieux", défini par générateurs et relations. En outre, on montre que cette estimation de la région d'analyticité est, dans un certain sens, optimale.

6.2.4 Thèse de D. Hong

La thèse de D. Hong [4], qui porte sur l'existence et les développements asymptotiques d'exposants de Lyapunov, a été soutenue en Mai 2000.

6.3 Réseaux de dimension infinie

Participants : Alexander Borovkov, François Baccelli, Jean Mairesse, James Martin.

Mots clés : réseau en série, file d'attente, limite hydrodynamique, percolation, lattice animal, réseau de Jackson.

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

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

Dans [19], J. Martin étudie le cas d'un réseau infini de files à capacité limitée avec blocage. Ce problème a des liens directs avec le modèle de K -exclusion totalement asymétrique considéré par exemple par Seppalainen. Les problèmes qui se posent sont de diverses natures : limites hydrodynamiques, propagation d'une onde de choc, existence et calcul des débits asymptotiques, lois d'occupation, processus ponctuels limites, etc.

Dans [20], J. Martin a aussi obtenu des résultats sur d'autres types de graphes aléatoires infinis, les *greedy lattice animals* introduits par Cox et al. et Gandolfi & Kesten. Soit $d \geq 2$, et soit $\{X_v, v \in \mathbb{Z}^d\}$ une famille i.i.d de variables aléatoires de distribution commune F . Soit $N(n)$ la valeur maximale de $\sum_{v \in \xi} X_v$ sur tous les sous-ensembles connexes ξ de \mathbb{Z}^d de taille n qui comprennent l'origine. Cox et al. (1993) et Gandolfi et Kesten (1994) ont montré que si $EX_0^d (\log^+ X_0)^{d+\epsilon} < \infty$ pour $\epsilon > 0$, alors $N(n)/n \rightarrow N$ p.s. et dans \mathcal{L}_1 . Avec des méthodes similaires quoiqu'un peu plus simples, on obtient la même conclusion sous l'hypothèse légèrement plus faible que $\int_0^\infty (1 - F(x))^{1/d} dx < \infty$. On montre aussi que $N \leq c \int_0^\infty (1 - F(x))^{1/d} dx$ pour une constante c .

[BBM] F. BACCELLI, A. BOROVKOV, J. MAIRESSE, « Asymptotic Results on Infinite Tandem Queueing Networks », à paraître dans PTRF.

Une autre direction de recherche concerne les réseaux de Jackson en dimension infinie. Dans [12], J. Martin considère un réseau de type Jackson, dont chacun des noeuds comprend N canaux identiques avec un seul serveur. A son arrivée dans un noeud, une tâche sélectionne m canaux aléatoirement, et entre dans la file la plus courte parmi les m files observées. Il considère une collection fixe de canaux dans le réseau, et il analyse le comportement des files d'attente pour ces canaux quand $N \rightarrow \infty$. Si les conditions initiales convergent d'une manière appropriée, la distribution de ces processus converge en variation locale vers une limite pour laquelle chaque canal se comporte indépendamment. Ceci permet de caractériser les processus limites, et en particulier les versions stationnaires des processus ponctuels des arrivées et des départs.

6.4 Systèmes à événements—propriétés logiques

Participants : Bruno Gaujal, Stefan Haar, Jean Mairesse.

Mots clés : réseau de Petri, réseau d'actions, système temporisé, sémantique du parallélisme, produit synchronisé d'automates.

6.4.1 Interblocage de réseaux de Petri

Avec Bruno Gaujal (Loria) et Jean Mairesse, S. Haar étudie les processus markoviens générés par des réseaux de Pétri à temporisation et routage stochastique. Le but de cette étude est l'analyse asymptotique du cas borné et vivant. Pour démontrer l'ergodicité, on démontre la possibilité de blocage complet d'un réseau à choix libre par le blocage d'une transition. On en déduit d'autres propriétés pour des topologies plus générales.

6.4.2 Systèmes temporisés

Dans [15], S. Haar et ses co-auteurs ont démontré par une traduction explicite l'équivalence d'une sous-classe d'automates temporisés à une classe de Réseaux de Pétri *temporels* (c'est-à-dire soumis à des contraintes temporelles). Dans un autre cadre, celui des Réseaux de Pétri *temporisés* (c'est-à-dire avec des durées de transition), B. Gaujal et S. Haar ont étudié [14] la sémantique obtenue par le passage à la limite $\varepsilon \rightarrow 0$ quand le réseau contient des transitions à durée ε .

6.4.3 Sémantique du parallélisme

Dans [11], S. Haar étudie les *réseaux d'actions* (*occurrence Petri nets*) tant du point de vue de leurs propriétés structurelles que de leur utilisation en tant que sémantique de dépliage. La décomposition en sous-structures définies par les relations d'ordre causal, de conflit et de concurrence, conduit à des logiques temporelles d'ordre partiel très utiles.

6.4.4 Parallélisme et probabilité

S. Haar étudie aussi le comportement de systèmes parallèles, modélisés par des produits synchronisés d'automates ou des réseaux de Petri, d'un point de vue probabiliste (à ne pas confondre avec les réseaux de Petri stochastique). Bien que partant de deux points de vue assez différents, les travaux avec H. Voelzer (Berlin) et ceux avec A. Benveniste et E. Fabre de l'IRISA convergent néanmoins vers l'étude de mesures de probabilités cohérentes sur les dépliages.

6.5 Analyse de processus de couverture

Participants : François Baccelli, Bartek Błaszczyszyn, Florent Tournois.

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, protocole CDMA.

6.5.1 Modélisation de processus de couverture CDMA

L'article [16] 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.

Le continuum de processus de couverture est alors obtenu en faisant varier les paramètres des marques. En plus de l'analyse et de la visualisation de ce continuum (voir Figure 6.5.1), 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. Les analyses mathématiques permettent de calculer certaines caractéristiques d'intérêt pratique dans ce cadre, comme la probabilité de non connexion; la loi du nombre de cellules couvrant un point donné permet, quant à elle, de caractériser certaines propriétés du *handover*.

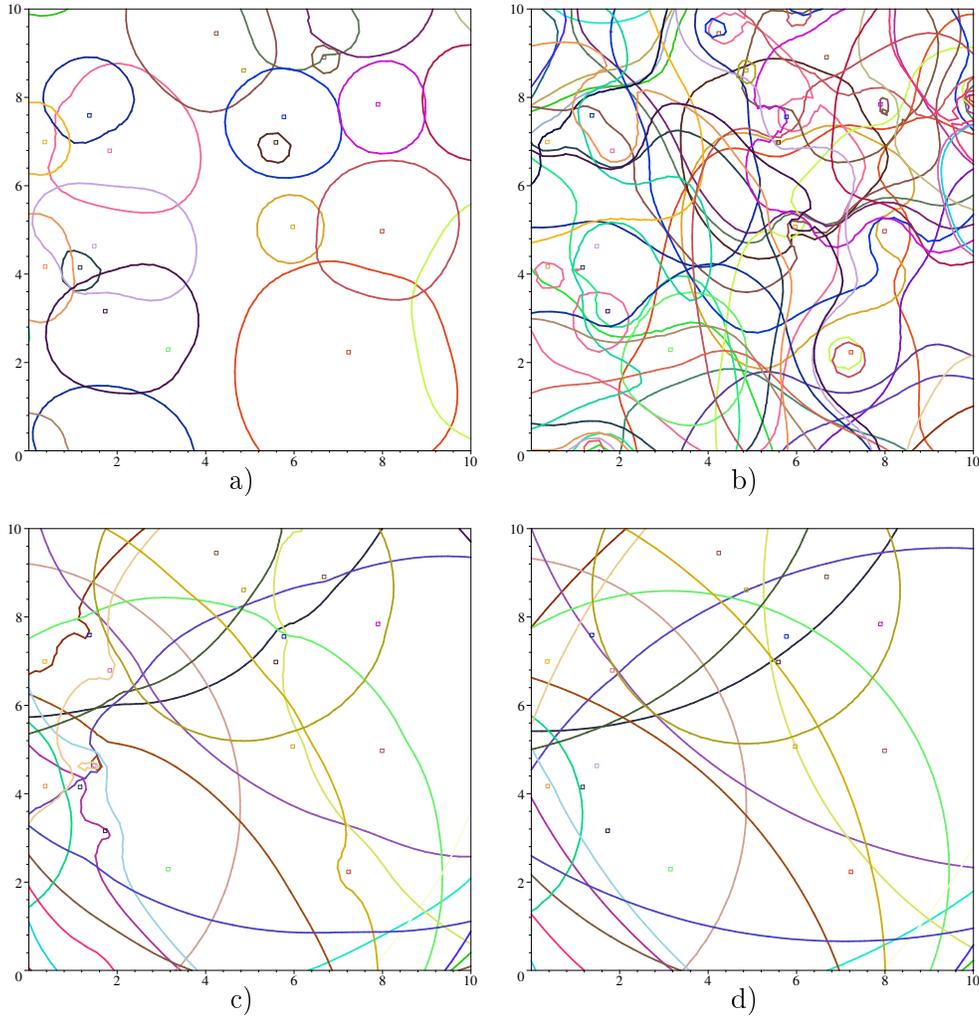


FIG. 1 – Exemple de convergence de couverture CDMA vers un modèle booléen.

6.5.2 Simulation de processus de couverture CDMA

Inspiré par l'algorithme de W. Kendall sur les simulations conditionnelles du schéma booléen, 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.

6.5.3 Couverture booléenne

Un agrégat dans un modèle booléen est un ensemble maximum de grains se rencontrant. On cherche un arbre dont les sommets sont les germes d'un agrégat et tel que la somme des longueurs des arêtes soit minimale. B. Błaszczyszyn et K. Tchoumatchenko (France Télécom R&D), ont proposé une construction naturelle pour un tel arbre et obtenu une borne sur la distribution de la longueur totale des arêtes de l'arbre. L'analyse utilise un processus de branchement multi-types, similaire à ceux considérés dans l'article [10]. La longueur de l'arbre est bornée par une fonction aléatoire du nombre total d'individus du processus de branchement, dont la fonction génératrice est solution d'un système d'équations fonctionnelles. Ceci permet d'obtenir la transformée de Laplace de la variable aléatoire majorant la longueur totale des arêtes de l'arbre.

7 Contrats industriels (nationaux, européens et internationaux)

7.1 CTI avec France Télécom R&D

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

K. Tchoumatchenko a soutenu sa thèse le 15 Décembre 1999 [5]. Il a depuis rejoint France Télécom R&D.

Cette année, la CTI s'est orientée sur de nouveaux axes de recherche concernant l'optimisation de protocoles ayant des composantes spatiales, notamment le multipoint et le CDMA.

Voici les principaux événements de cette année:

- Organisation du workshop Eurandom sur la géométrie stochastique pour les réseaux en collaboration avec V. Schmidt et O. Boxma en Avril 2000 (<http://www.eurandom.tue.nl/teletraffic.htm>).
- Exposé de Bartek Błaszczyszyn sur le modèle de couverture CDMA au CNET en Mai 2000 (organisé par A. Ortega-Molina, DMR/ISS).
- Exposé de F. Baccelli sur le modèle de couverture CDMA au workshop Stochastic Networks de Madison en Juin 2000 (<http://www.cms.wisc.edu/~stochnet/>)
- Parution de l'article avec K. Tchoumatchenko (FT) et S. Zuyev (Université de Strathclyde) [9] sur le routage dans Advances in Applied Probability (section sur la géométrie stochastique).

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 première revue de ce projet a eu lieu en Octobre 2000.

Durant cette première année, nous avons constitué un groupe de travail “Géométrie Stochastique et Réseaux” qui s’est concentré sur les processus de couverture, la lecture du livre de Kendall-Mecke-Stoyan, la statistique des processus ponctuels, la topologie sur les fermés et le théorème de Choquet.

Un cours sur ce sujet a aussi été organisé au Summer Research Institute de l’ICA à l’EPFL en Juillet 2000.

Les principaux résultats nouveaux portent sur les aspects de calcul et de simulation des processus de couverture CDMA:

- Simulation ϵ -parfaite de processus de couverture CDMA fondée sur les grandes déviations
- Simulation conditionnelle parfaite, fondée sur les méthodes de couplage arrière. Exemple: simulation de l’environnement d’un point sachant qu’il est couvert par k cellules.
- Développements asymptotiques pour les processus de couverture CDMA.

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, James Martin.

Les partenaires du TMR Alapedes sont HP Bristol, les universités de Delft, Louvain et Paris, Metalau et l’Ecole des Ponts et Chaussées.

Les travaux actuels se concentrent sur

- l’analyse des systèmes (max ,plus) linéaires en dimension infinie (travaux de J. Martin);
- l’étude de propriétés logiques sur les réseaux de Petri (travaux de S. Haar);
- le calcul des exposants de Lyapunov dans (max ,plus);
- l’analyse de la stabilité de certaines classes de réseaux de type Jackson (voir [7]).

Actuellement, deux post-doctorants travaillent à l’ENS dans le cadre de ce projet : J. Martin et S. Haar. Les collaborations en cours sont principalement avec le Liafa (J. Mairesse), le Loria (B. Gaujal) et Metalau (S. Gaubert).

8.1.2 Projet INTAS Asymptotics of Stochastic Networks

Un workshop a été organisé en Août 2000 à Novosibirsk dans le cadre du projet INTAS et de l’Institut Lyapounov (avec S. Foss, A. Borovkov et S. Rybko). S. Foss a séjourné à l’ENS en Avril 2000. Les travaux sur les processus semi-markoviens généralisés (GSMP), en collaboration avec J. Mairesse, ont été prolongés à cette occasion. L’autre axe de recherche exploré cette année concerne les réseaux de Jackson généralisés avec des lois de service sous-exponentielles.

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 Relations bilatérales internationales

8.3.1 Russie

Le projet de l'Institut Lyapounov (avec S. Foss, A. Borovkov et S. Rybko) est prolongé pour un an. Plusieurs bourses de cet institut ont permis à des scientifiques français de participer au workshop de Novosibirsk (voir INTAS).

8.3.2 USA

La proposition INRIA/NSF avec Georgia Tech en est à sa première année. Plusieurs échanges ont eu lieu dans ce cadre: R. Serfozo et H. Ayhan ont séjourné une semaine à l'ENS, et J. Martin deux semaines à Georgia Tech.

8.4 Visites et invitations de chercheurs

Europe

- B. Heidergott (Eurandom, Pays Bas), Octobre 2000;
- J. Gunawardena (HP Bristol, UK), Professeur invité à l'ENS en Février-Mars-Avril 2000;
- S. Foss (Université de Novosibirsk, Russie), Avril 2000;
- D. Korshunov (Université de Novosibirsk, Russie), Avril 2000;
- K. Majewski (Siemens, RFA), Avril 2000;
- Y. Suhov (Université de Cambridge, UK), Janvier 2000.

Amérique

- J. Walrand (UC Berkeley, USA), Octobre 2000, orateur de la conférence de rentrée 2000 en informatique de l'ENS;
- R. Serfozo (Georgia Tech, USA), Décembre 1999;
- H. Ayhan (Georgia Tech), USA, Décembre 1999.

9 Diffusion de résultats

9.1 Animation de la communauté scientifique

- Organisation du workshop Eurandom sur la géométrie stochastique pour les réseaux en collaboration avec V. Schmidt et O. Boxma (<http://www.eurandom.tue.nl/teletraffic.htm>).
- Organisation par B. Błaszczyszyn et K. Tchoumatchenko (FT) du Groupe de Travail “Géométrie Stochastique et Réseaux”.
- Cours au Summer Research Institute (ICA, EPFL) sur la géométrie aléatoire et les réseaux sans fils en Juillet 2000.
- Cours sur l’utilisation des algèbres (max ,plus) pour le contrôle de flux dans les réseaux au workshop “Stochastic Networks”, Juin 2000 (<http://www.cms.wisc.edu/~stochnet/>).
- Organisation du *Workshop on the modeling of flow and congestion control mechanisms* à l’ENS, 4-6 Septembre 2000, avec l’INRIA Sophia, Sprint et FT R&D (<http://www.ens.fr/~mistral/tcp2>).
- Conférence de rentrée de F. Baccelli à l’ENS Cachan.
- Animation du séminaire du projet par D. Hong (<http://www.dmi.ens.fr/~mistral/seminaire.html>).
- F. Baccelli est membre des comités de programme de INFOCOM 2000 et INFOCOM 2001 et 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*.

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 quatre cours sur les aspects algébriques et les aspects probabilistes.

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

Ecole Normale Supérieure Cours sur l'analyse des performances en deuxième année du magistère MMFAI (F. Baccelli et S. Haar 30H).

9.3 Participation à des colloques, séminaires, invitations

F. Baccelli Présentations aux conférences et workshops suivants:

- SSC, Ottawa, Juin 2000 (conférence invitée);
- Madison, Conference on Stochastic Networks, Juin 2000 (<http://www.cms.wisc.edu/~stochnet/>);
- Réunion ALAPEDES 7/8 Juillet, Hamburg, RFA;
- 3-ième ECM, Barcelone, Juillet 2000 (conférence invitée);
- Workshop INTAS, Novosibirsk, Août 2000;
- Workshop on Random Matrices, Queues, and Percolation 11-15 Septembre, Bristol (G.B.) (<http://research.microsoft.com/users/ajg/workshop.html>);
- Second workshop on the modelling of flow and congestion control mechanisms, Paris, Septembre 2000 (<http://www.ens.fr/~mistral/tcp2.html>);
- Séminaire final COST 257 Würzburg, RFA, Octobre 2000 (conférence invitée) (<http://nero.informatik.uni-wuerzburg.de/cost/Final/programm/programm.htm>).

Présentations à des séminaires: INRIA Rocquencourt, Alcatel, FT R&D, Université de Lyon, Université du Minnesota.

B. Błaszczyszyn Présentations aux conférences et workshops suivants:

- Workshop Eurandom “Stochastic Geometry and Teletraffic” et “Stochastic Geometry and Spatial Statistics”, Eindhoven, Avril 2000;
- Revue du projet RNRT Georges, Mars 2000.

S. Haar Présentations aux conférences et workshops suivants:

- Réunion ALAPEDES 7/8 Juillet, Hamburg, RFA
- WODES 21-23 Août, Gand, Belgique
- CS & P 9-11 Octobre, Berlin, RFA

D. Hong Présentations aux conférences et workshops suivants:

- Conférence ACM-Sigcomm 2000, Stockholm, Suède, Sept. 2000;
- Workshop on the modeling of flow and congestion control mechanisms, ENS, Sept. 2000.

J. Martin Présentations aux conférences et workshops suivants:

- South Eastern Probability Days, Atlanta, Mars 2000;
- Stochastic Networks Workshop, Madison, Juin 2000;
- Convention ALAPEDES, Hamburg, Juillet 2000;
- Statistical Mechanics 2000, Cambridge, Août 2000;
- Modern Problems in Applied Probability, Novosibirsk, Août 2000;
- Microsoft / Hewlett-Packard Workshop, Bristol, Septembre 2000.

Présentations à des séminaires: Ecole Polytechnique, Paris; Georgia Tech, Atlanta; Bell Labs, New Jersey; Motorola, Chicago; ENS.

F. Tournois Présentations aux conférences et workshops suivants:

- Conférence à l'École de Mines, Fontainebleau, Mai 2000;
- Revue du projet Georges, Issy, Octobre 2000.

10 Bibliographie

Ouvrages et articles de référence de l'équipe

- [1] F. BACCELLI, P. BRÉMAUD, *Elements of Queuing Theory*, Série: *Applications of Mathematics*, Springer Verlag, 1994.
- [2] F. BACCELLI, P. BRÉMAUD, *Modélisation et Simulation des Réseaux de Communication*, Ecole Polytechnique, 2000.
- [3] F. BACCELLI, G. COHEN, G. OSLDER, J. QUADRAT, *Synchronization and Linearity an Algebra for Discrete Event Systems*, Wiley, 1992.

Thèses et habilitations à diriger des recherches

- [4] D. HONG, *Exposants de Lyapunov de Réseaux Stochastiques Max-Plus Linéaires*, thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, Mai 2000.
- [5] K. TCHOUMATCHENKO, *Modélisation de réseaux de communication par la géométrie stochastique*, thèse de doctorat, université de Nice Sophia Antipolis, Décembre 1999.

Articles et chapitres de livre

- [6] F. BACCELLI, D. HONG, « Analyticity of Iterates of Random Non-Expansive Maps », *Adv. in Appl.Prob.* 32(1), 2000, p. 193–220.
- [7] F. BACCELLI, D. HONG, « Slotted Jackson Networks », *QUESTA*, 2000, Soumis pour publication.
- [8] F. BACCELLI, D. MAC DONALD, « Rare Events for Stationary Processes », *Stoch. Proc. and Appl.*, 89, 2000, p. 141–173.
- [9] F. BACCELLI, K. TCHOUMATCHENKO, S. ZUYEV, « Markov Paths on the Poisson Delaunay Graph », *Adv. in Appl.Prob.* 32(1), 2000, p. 1–18.
- [10] B. BŁASZCZYSZYN, C. RAU, V. SCHMIDT, « Bounds for clump size characteristics in the Boolean model », *Adv. in Appl.Prob.* 31, 1999, p. 910–938.
- [11] S. HAAR, « Occurrence Net Logics », *Fundamenta Informaticae* 43, Août 2000, p. 105–127.
- [12] J. MARTIN, « Point Processes in Fast Jackson Networks », *Ann. Appl. Probab.*, 2000, à paraître.

Communications à des congrès, colloques, etc.

- [13] F. BACCELLI, D. HONG, « TCP is Max-Plus Linear », in : *Proceedings of ACM-Sigcomm*, Stockholm, Suède, Septembre 2000. Rapport INRIA 3986, Août 2000.
- [14] B. GAUJAL, S. HAAR, « A Limit Semantics for Timed Petri Nets », in : *Proceedings WODES*, Kluwer, p. 219–226, Gent, Belgique, Août 2000.
- [15] S. HAAR, L. KAISER, F. SIMONOT-LION, J. TOUSSAINT, « Using and translating equivalent Models: Timed State Machines and Time Petri Nets », in : *TACAS 2001*, Soumis.

Rapports de recherche et publications internes

- [16] F. BACCELLI, B. BŁASZCZYSZYN, « On a coverage process ranging from the Boolean model to the Poisson Voronoi tessellation, with applications to wireless communications », *RR n° 4019*, INRIA, Rocquencourt, Octobre 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4019.html>.
- [17] A. CHAINTREAU, F. BACCELLI, C. DIOT, « Impact of Network Delay Variation on Multicast Session Performance With TCP-like Congestion Control », *RR n° 3987*, INRIA, Rocquencourt, Septembre 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-3987.html>.
- [18] 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>.
- [19] J. MARTIN, « Large Tandem Queueing Networks with Blocking », *RR n° 4034*, INRIA, Rocquencourt, Octobre 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4034.html>.
- [20] J. MARTIN, « Linear Growth for Greedy Lattice Animals », *RR n° 4035*, INRIA, Rocquencourt, Octobre 2000, <http://www.inria.fr/rrrt/rr-4035.html>.

Divers

- [21] A. BOUILLARD, *Calcul du temps de réponse de systèmes temps réel dans le semi-anneau (max,plus)*, Rapport de stage, Ecole Normale Supérieure, Septembre 2000.
- [22] J. GUYON, *Analyse du protocole de contrôle de flux de l'Internet: cas d'une double connexion*, Rapport de stage d'option, Ecole Polytechnique, Juin 2000.