



INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences

---

*Séance solennelle de l'Académie des sciences / 19 juin 2007  
Discours sous la Coupole de Membres élus en 2005*

**Réseaux stochastiques et réseaux de communication**  
**François Baccelli**

Il peut paraître surprenant d'avoir à modéliser des systèmes conçus par l'homme. La nécessité de modèles mathématiques pour les réseaux de communication se comprend cependant mieux quand on observe que ces derniers sont des systèmes intrinsèquement stochastiques, notamment à cause de la nature aléatoire de la demande, et que leur taille peut être considérable. La taille des réseaux téléphoniques justifiait déjà l'utilisation de méthodes issues de la physique statistique et actuellement, l'Internet est probablement le plus grand des systèmes construits par l'homme.

L'analyse mathématique des réseaux de communication est en fait une discipline déjà ancienne. Les premiers travaux sur ce sujet sont ceux du Danois A.K. Erlang en 1917. Les modèles d'Erlang et ceux des nombreuses écoles qui ont suivi son approche, sont fondés sur la théorie des processus de Markov. Ils ont fourni les principaux outils mathématiques de dimensionnement utilisés par les opérateurs et les constructeurs des réseaux à commutation de circuits (comme les réseaux téléphoniques) et des premiers réseaux à commutation de paquets. L'approche markovienne suppose que le trafic offert est constitué de processus ponctuels de Poisson et elle se concentre sur la question du multiplexage et du routage de ce trafic. Elle conduit à des résultats applicables à des réseaux de grande dimension, notamment la théorie des réseaux dits "à forme produit" (réseaux de Jackson et réseaux de Kelly).

Si c'est dans ce cadre markovien que s'inscrivent mes travaux avec W. Massey (Princeton) sur les transitoires de réseaux de Jackson à la fin des années 80, l'axe de recherche qui fut pour moi le plus important dans ce domaine porte sur la dynamique de réseaux stochastiques non-markoviens par des méthodes de processus ponctuels stationnaires, développé avec P. Brémaud (Paris) depuis les années 80. Parmi les résultats obtenus dans ce domaine, je citerais tout particulièrement les travaux en collaboration avec S. Foss (Edimbourg), initialisés au milieu des années 90, qui ont permis une construction des états stationnaires de réseaux de Jackson généralisés par des méthodes de théorie ergodique et plus récemment une caractérisation de leurs événements rares. Un autre axe important fut celui de l'étude de réseaux fondés sur d'autres mécanismes que le routage et le multiplexage, notamment les mécanismes de synchronisation, sur lesquels nous

avons commencé à travailler au milieu des années 80 avec A. Makowski (College Park) ; ces mécanismes permettent par exemple de représenter la sérialisation ou encore le contrôle de congestion. À partir des années 90, les méthodes algébriques initialement développées par G. Cohen et J.P. Quadrat (Paris) pour la représentation des graphes d'événements par des systèmes linéaires dans le semi-anneau (max,plus) ont été la base d'une série de résultats sur la version probabiliste de cette classe de réseaux de mécanismes de synchronisation : stabilité de ces réseaux avec Z. Liu (Yorktown Heights), analyse des perturbations avec V. Schmidt (Ulm), limites hydrodynamiques pour les réseaux infinis avec A. Borovkov (Novosibirsk) et J. Mairesse (Paris), caractérisation des événements rares avec S. Foss et M. Lelarge (Paris).

L'importance de la modélisation mathématique des réseaux s'est renforcée avec le développement de l'Internet. Une des conséquences inattendues des choix d'architecture et de protocoles qui ont permis le développement très rapide de l'Internet est l'impossibilité pour quiconque, même pour un grand opérateur, d'observer et a fortiori de contrôler le réseau dans son ensemble. Tout cela vient du découpage de l'Internet en systèmes autonomes et de l'extrême distribution des mécanismes de routage et de contrôle utilisés, notamment TCP, le protocole de contrôle de transmission de l'Internet qui permet d'éviter les phénomènes de congestion. Au niveau macroscopique, ceci se traduit par le fait que la topologie du graphe d'interconnexion des routeurs ou des systèmes autonomes varie constamment ; au niveau microscopique, par le fait que le nombre et le type des applications présentes sont extrêmement variables dans le temps et que le partage dynamique de la bande passante opéré par TCP entre ces applications est très difficile à prévoir ou à maîtriser.

C'est à Sophia-Antipolis, au milieu des années 90 et au contact de J. Bolot (actuellement à San Francisco), que j'ai commencé à m'intéresser à ce vaste champ d'investigation qu'est l'Internet. C'était l'occasion d'analyser des protocoles concrets, comme ceux que j'avais étudiés au tout début de ma carrière à l'INRIA dans le groupe de recherche d'E. Gelenbe (actuellement à Londres), et aussi d'obtenir des résultats qui pouvaient servir dans le cadre de la standardisation. Les méthodes de modélisation et de simulation de TCP sur lesquelles nous avons travaillé avec D. Hong (Paris) et D. McDonald (Ottawa) au début des années 2000, puis avec A. Chaintreau (Paris), avaient pour but de prédire et de contrôler les variations aléatoires de la qualité de service offerte par le réseau dans divers contextes rencontrés en pratique: compétition entre flots TCP dans un réseau d'accès ADSL, diffusion multipoint dans un réseau pair à pair.

À première vue, les outils permettant cette modélisation sont proches de ceux utilisés en physique statistique puisqu'il s'agit de l'interaction d'un très grand nombre de systèmes stochastiques simples, comme par exemple des applications de transfert de données ou de parcours de la toile, interagissant via TCP. Il y a cependant de grandes différences entre les mécanismes d'interaction propres aux réseaux et ceux de la physique. La nature du contrôle est elle aussi très différente : si on ne peut pas changer la manière qu'ont les particules d'interagir, on peut changer les protocoles de routage ou TCP et donc le mode d'interaction des applications qui se partagent la bande passante du réseau. D'où l'émergence de nouveaux axes de recherche sur le contrôle adaptatif de grands systèmes d'interaction.

En ce qui concerne l'observation et la métrologie de l'Internet, nos travaux avec D. Veitch (Melbourne) et S. Machiraju (Berkeley) en collaboration avec l'opérateur Sprint (San Francisco) ont porté sur des méthodes de tomographie par sondes actives qui consistent en l'envoi de trains

de paquets en un ou plusieurs points d'entrée du réseau et la collecte de ces paquets-sondes en un ou plusieurs points de sortie. Le but est d'inférer les propriétés de l'état du coeur de réseau à partir des informations partielles de topologie et de délais obtenues par les sondes lors de leur traversée du réseau.

La révolution de l'Internet en cache une autre, celle de l'accès radio. Les divers modes d'accès radio (cellulaire, Wi-Fi, WiMAX) en cours de déploiement ou en projet peuvent être considérés comme des réalisations de grande ampleur fondées sur la théorie de l'information et du codage, développée il y a plus d'un demi-siècle par C. Shannon aux laboratoires Bell. En plus des réseaux d'opérateurs (cellulaire, WiMAX), qui sont actuellement un enjeu industriel majeur, on assiste à l'émergence de réseaux de communautés, nécessitant peu d'infrastructure: réseaux de campus, de quartier, réseaux de secours ou d'opérations militaires etc. Ces réseaux de communautés doivent être adaptés à la mobilité et fondés sur une coopération auto-organisée des éléments qui les forment. Ces nouvelles architectures posent plusieurs problèmes difficiles comme celui du contrôle du partage de bande passante entre les utilisateurs de l'accès radio ou encore celui du routage en plusieurs sauts, dont le principe consiste à se servir des autres utilisateurs comme relais pour transmettre l'information vers la destination.

Le but des travaux sur la géométrie aléatoire que nous avons initialisés avec B. Blaszczyzyn (Paris) au début des années 2000 est de déterminer les limitations fondamentales de ces divers types d'architectures de communications radio-mobiles. La géométrie du réseau y joue un rôle clef dans la mesure où la capacité des canaux radio est fonction des interférences qui sont elles-mêmes des fonctions de la localisation des émetteurs. La géométrie aléatoire permet alors de calculer des moyennes spatiales sur les configurations d'émetteurs ou de récepteurs mobiles. Les principaux résultats obtenus par cette approche concernent le calcul de la couverture, le contrôle d'admission et le contrôle de puissance dans les réseaux cellulaires, en collaboration avec France Télécom ; l'optimisation de la connectivité et du routage dans les réseaux de communautés, en collaboration avec P. Muhlethaler (Paris) et C. Bordenave (Berkeley). Dans ce cadre, nous avons aussi proposé de nouveaux algorithmes d'auto-organisation pour les réseaux Wi-Fi avec C. Diot (Paris) et V. Mhatre (Bangalore). Dans les années 90, ces méthodes de géométrie aléatoire nous avaient déjà permis de proposer, avec S. Zuyev (Glasgow), de nouveaux outils pour l'analyse économique des réseaux filaires.

Chères consœurs et chers confrères, comme vous avez pu le constater, les contributions que je viens de décrire sont toutes le fruit de rencontres et de collaborations avec des chercheurs exceptionnels et c'est donc à la fois un devoir et une joie que d'associer mes maîtres et mes co-auteurs à l'honneur d'être aujourd'hui parmi vous.

Au delà de l'évocation de ces contributions, il me semble important de souligner d'une part à quel point les réseaux de communication ont transformé et vont continuer à transformer bien des aspects de notre environnement quotidien, d'autre part que ces transformations s'appuient sur un effort de recherche fondamentale en sciences de l'information, qui constitue au plan international un des grands enjeux de la recherche de demain.