

Internet: modéliser le trafic — pour mieux le gérer

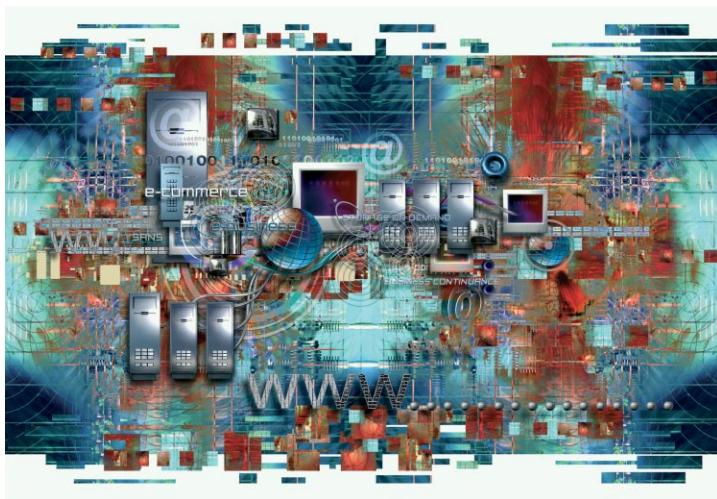
François Baccelli



Les spécialistes des réseaux de communication s'efforcent de bien comprendre les propriétés statistiques du trafic de données qu'ils doivent acheminer. La gestion de ces réseaux et leur développement en dépendent.

Les réseaux de communication (téléphone, Internet, réseaux locaux, etc.) ont connu, au cours des dernières décennies, une expansion phénoménale. Pour leurs opérateurs, une question centrale est de savoir contrôler les flux d'information de façon optimale,

afin d'éviter tout engorgement et d'offrir aux utilisateurs un service de bonne qualité, fiable et rapide. Or pour concevoir des procédures efficaces de contrôle de la circulation des informations, pour dimensionner correctement les logiciels et les équipements matériels nécessaires, une connaissance approfondie des propriétés du trafic des communications dans de tels réseaux s'impose.



*Le réseau Internet n'est pas centralisé comme l'étaient autrefois les réseaux de communication. De tels changements structurels ont des répercussions profondes sur les propriétés mathématiques du trafic de données.
(Photo: Getty Images)*

L'analyse mathématique du trafic dans les réseaux de communication est une discipline déjà ancienne. Elle remonte à 1917, avec les travaux engagés par l'ingénieur danois Agner K. Erlang. Sa démarche, poursuivie par beaucoup d'autres chercheurs, a fourni les principaux outils mathématiques de dimensionnement utilisés par les opérateurs et les constructeurs de réseaux, jusqu'aux années 1990 environ.



Jusqu'aux années 1990, la modélisation du trafic par des lois statistiques classiques suffisait

Dans ses principes, la démarche mathématique explorée par Erlang et par d'autres chercheurs et ingénieurs après lui est *markovienne*. Cela signifie qu'elle décrit le trafic en s'appuyant sur un modèle simple de processus aléatoires, les *chaînes de Markov*, pour lesquelles la théorie mathématique est bien avancée et puissante (Andreï Markov (1856-1922) était un mathématicien russe qui a apporté des contributions importantes à la théorie des probabilités). En simplifiant, une chaîne de Markov est une suite d'événements aléatoires, dans laquelle la probabilité d'un événement donné ne dépend que de l'événement qui précède immédiatement. Dans le cadre des réseaux de communication, la démarche markovienne d'Erlang suppose que les lois statistiques caractérisant le trafic sont des lois de Poisson ; la loi de Poisson est une des lois de probabilité ou de statistique les plus répandues et les plus simples, elle tire son nom du mathématicien français Denis Poisson (1781-1840). L'hypothèse poissonnienne s'avérait justifiée pour le trafic téléphonique (où les événements aléatoires sont les appels des abonnés, qui surviennent à des instants aléatoires et dont la durée est également aléatoire).

Ce type de modélisation du trafic a permis de mettre en place des procédures de contrôle adaptées. Jusqu'à une date récente, le contrôle des réseaux de communication était un contrôle d'admission, c'est-à-dire que l'opérateur refuse à l'utilisateur l'accès au réseau lorsque ce dernier ne peut garantir une qualité de service prédéfinie. Ce type de contrôle exige une connaissance assez précise de l'état

du réseau dans son ensemble, et il n'est donc possible que pour des réseaux gérés de manière centralisée.

Mais les réseaux de communication d'aujourd'hui ne sont plus ceux d'hier. Internet a connu un développement extraordinaire ces cinq dernières années (on estime que le trafic de communications vocales représentait 90 % du trafic global en 1997, 50 % en 2000, et n'en représentera que 10 % d'ici un an ou deux). Cet essor a radicalement changé une situation qui était stable depuis plus d'un demi-siècle. Les raisons profondes de ce développement rapide résident dans l'utilisation, pour l'acheminement de l'information et le contrôle du trafic, de nouveaux protocoles de routage (routage IP, pour *Internet Protocol*) et de contrôle (TCP, pour *Transmission Control Protocol*) décentralisés, qui rendent le réseau Internet indéfiniment extensible.

Les propriétés statistiques du trafic ont changé. Il fallait comprendre comment et pourquoi

Ces modifications structurelles ont eu des conséquences sur le trafic et ses propriétés statistiques, et il a fallu développer une théorie mathématique adaptée à la nouvelle donne. En effet, des analyses statistiques effectuées au milieu des années 1990 par des chercheurs de Bellcore, aux États-Unis, et de l'INRIA (Institut national de recherche en informatique et en automatique), en France, ont montré, d'abord sur des réseaux locaux puis sur le Web, que le trafic ne pouvait plus être décrit à l'aide de lois de probabilité de Poisson. Notamment, on observe des processus aléatoires à *mémoire longue* (où la probabilité d'un événement dépend aussi d'événements qui se sont pro-



duits relativement loin dans le passé), ce qui exclut toute modélisation usuelle fondée sur les processus markoviens classiques. Souvent, ces processus présentent également des propriétés statistiques connues sous le nom de multi-fractalité, qui traduisent une très grande irrégularité. Or toutes ces propriétés statistiques ont des conséquences importantes, par exemple pour le dimensionnement des mémoires des routeurs; ne pas en tenir compte pourrait conduire à sous-estimer les pertes de paquets d'informations par le réseau et entraîner des dysfonctionnements.



Des internautes dans un cybercafé. Une bonne connaissance des propriétés statistiques des flux de données sur le réseau Internet est indispensable pour assurer le bon fonctionnement de la Toile. (Cliché Frank Moehle)

Depuis les premiers articles mettant en évidence les nouvelles propriétés statistiques du trafic de données, de très nombreux travaux ont été publiés en vue de les expliquer.

Aujourd'hui, on comprend assez bien l'origine du phénomène de mémoire longue constaté dans la statistique du trafic. On a pu établir qu'il découle directement de la répartition statistique des tailles de fichiers contenus dans les serveurs Web et FTP (protocole de transfert de fichiers) ainsi que des tailles des fichiers demandés par les utilisateurs lors des requêtes HTTP (protocole de transfert hypertexte, utilisé lorsqu'on surfe sur le Web) et FTP. Leurs courbes statistiques, c'est-à-dire les courbes représentant le nombre de fichiers échangés ou consultés en fonction de la taille, décroissent, pour les grandes valeurs, moins rapidement qu'une exponentielle, de part et d'autre de leur maximum: on dit que leur loi de probabilité est sous-exponentielle. Ce que l'on a montré, c'est que les lois statistiques sous-exponentielles auxquelles obéit le comportement individuel des internautes, superposées en grand nombre étant donnée la multitude de ces internautes, ont pour conséquence directe le phénomène de mémoire longue caractérisant le trafic global.

Analyser le protocole TCP et ses effets afin d'améliorer la gestion du réseau Internet

Tout n'est pas éclairci pour autant. Les travaux actuels se concentrent sur l'explication des propriétés statistiques du trafic aux petites échelles de temps, la multi-fractalité en particulier. L'hypothèse la plus répandue est que cette propriété résulte des protocoles de contrôle utilisés, et notamment de TCP. Mais en quoi consiste le protocole TCP, qui contrôle actuellement près de 90 % du trafic sur Internet? Il s'agit d'un contrôle de flux adaptatif, où le débit d'information émise par une source est commandé par un algorithme qui



augmente linéairement le débit d'émission au cours du temps, tant qu'il ne se produit pas d'engorgement; mais dès que des pertes sont détectées, l'algorithme réduit de moitié le débit d'émission.

C'est ce contrôle adaptatif qui règle toute réponse à la congestion dans le réseau. Son analyse mathématique présente de nombreuses difficultés, en raison du caractère décentralisé, stochastique (l'encombrement et les pertes évoluent aléatoirement), non linéaire (les effets ne sont pas simplement proportionnels aux causes), complexe (réseau très étendu, impliquant des interactions entre nombreux routeurs intermédiaires) de la situation. Or l'élaboration de modèles intégrant tous ces éléments est un enjeu majeur, qu'il s'agisse de définir des règles de dimensionnement du réseau, d'optimiser les débits ou de prédire et contrôler les variations aléatoires de la qualité de service offert par le réseau à ses utilisateurs.

Des défis scientifiques et des enjeux économiques, qui mobilisent les universitaires et les industriels

Une telle tâche exige des efforts de recherche dans des domaines très divers (statistiques, théorie des probabilités et des files d'attente, contrôle adaptatif de systèmes non linéaires, théorie des grands réseaux stochastiques, systèmes dynamiques) et qui dépassent ceux de l'approche traditionnelle. Ces dernières années, un grand nombre de modèles plus ou moins simplifiés ont ainsi été proposés. Certains d'entre eux permettent de rendre compte de la multi-fractalité du trafic global, propriété évoquée plus haut, d'autres permettent d'évaluer si le partage

d'un même canal de communication entre plusieurs flux de données contrôlés par TCP est équitable, etc.

Les recherches actuelles se concentrent aussi beaucoup sur l'analyse de DiffServ, une méthode de différenciation des services offerts, fondée sur la création de classes de priorité pour les échanges de données. Cela paraît être la seule démarche extensible capable d'améliorer la qualité de service dans le réseau Internet. Un autre axe important concerne l'adaptation d'UDP (User Datagram Protocol), un protocole utilisé pour les flux de données vidéo et vocales, flux qui ne sont pas régulés par TCP, notamment dans le but de définir des modes de transmission de ces flux qui soient compatibles avec TCP.

Face à ces questions qui présentent des défis scientifiques et des enjeux économiques de première importance, le monde académique et le monde industriel s'organisent. Comment? La plupart des grands groupes industriels des technologies de l'information et des opérateurs ont constitué des équipes de recherche du plus haut niveau, centrées sur la modélisation du trafic et du contrôle dans les réseaux de données, et tout particulièrement dans le réseau Internet. L'effort du monde académique n'est pas moindre, notamment aux États-Unis, en Europe et dans certains pays asiatiques, où se mettent en place des collaborations interdisciplinaires entre des mathématiciens et des chercheurs en informatique ou en génie électrique.

L'instance qui a la plus grande influence dans l'évolution du réseau Internet est sans doute l'IETF (Internet Engineering Task Force, consultable à l'adresse <http://www.ietf.org>). Elle est ouverte à chacun, qu'il soit concepteur



de réseau, chercheur ou opérateur. Les activités se déroulent sous forme de groupes de travail portant sur plusieurs domaines tels que le routage, la sécurité, le transport, le contrôle de congestion, les applications, etc. Ces groupes de travail sont chargés de faire des recommandations dont certaines deviendront des normes. La validation de ces recommandations par des études mathématiques, du type de celles évoquées dans cet article, constitue une composante importante et parfois décisive du travail de normalisation.

*François Baccelli
INRIA (Institut national de recherche en
informatique et automatique) et
École Normale Supérieure
(Département d'informatique), Paris*

Quelques références:

- K. Park et W. Willinger (eds.), *Self similar traffic analysis and performance evaluation* (Wiley, 2000).
- P. Abry, P. Flandrin, M. S. Taqqu et D. Veitch, « Wavelet for the analysis, estimation and synthesis on scaling data », dans la référence ci-dessus.
- F. P. Kelly, A. K. Maulloo et D.K.H. Tan, « Rate control in communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability », *Journal of the Operational Research Society*, 49, pp. 237-252 (1998).
- R. Riedi et J. Levy-Vehel, « Fractional brownian motion and data traffic modeling: the other end of the spectrum », *Fractals in Engineering* (Springer-Verlag, 1997).
- M. Taqqu, W. Willinger et R. Sherman, « Proof of a fundamental result in self similar traffic modeling », *Computer Communication Review*, 27, pp. 5-23 (1997).
- F. Baccelli et D. Hong, *Interaction of TCP flows as billiards*, rapport INRIA, avril 2002.