

INVARIANCE D'ÉCHELLE DANS L'INTERNET*

P. ABRY⁽¹⁾, P. FLANDRIN⁽¹⁾, N. HOHN⁽²⁾ ET D. VEITCH⁽²⁾

⁽¹⁾ CNRS UMR 5672, Laboratoire de Physique. ENS Lyon, France,

{pabry, flandrin}@ens-lyon.fr, www.ens-lyon.fr/~pabry ,

⁽²⁾ ARC Special Research Center

for Ultra-Broadband Information Networks,

Department of Electrical and Electronic Engineering,

The University of Melbourne, Australia

{n.hohn, d.veitch}@ee.mu.oz.au, www.emulab.ee.mu.oz.au/~darryl

Résumé : Nous nous intéressons à la mise en évidence, l'analyse, la description et la modélisation statistique des phénomènes d'invariance d'échelle (lois d'échelle, lois de puissance) observés dans les données de télétrafic informatique, type Internet. Nous présentons certains modèles mathématiques ainsi que les outils d'analyse correspondants et décrivons leurs mises en œuvre et implications pour l'étude de l'Internet.

Mot-clés : Télétrafic Informatique, Internet, invariance d'échelle, loi de puissance, autosimilarité, analyses en ondelettes.

Abstract: Our aim here is to discuss evidences, analysis, description and statistical modeling of scale invariance phenomena observed in computer teletraffic data (such as those of the Internet). We introduce various mathematical modeling and the corresponding analysis tools and describe their uses and implications on the Internet.

Key-Words: Computer network teletraffic, Internet, scale invariance, power law, self-similarity, wavelet analysis.

*Ce texte rapporte des travaux partiellement financés par l'ACI *jeune Chercheur* 2329, du MENRT (1999), le programme *Télécommunications* du CNRS, TL99035 (1999) et l'université de Melbourne.

1 Internet ?

Du système complexe... L'inter-Net consiste en un super réseau reliant, interconnectant, un grand nombre de réseaux d'ordinateurs, échangeant entre eux de l'information. Ces flux d'informations ont, au cours de la dernière décennie, explosé par leurs volumes, la diversité de leurs natures et contenus et le nombre croissant *d'hôtes* et *clients* impliqués. Les structure et nature de ces flux reflètent celles de l'internet, grand système complexe, dont une caractéristique majeure est l'hétérogénéité. Le réseau présente d'abord une grande diversité géographique (avec une densité de machines et matériel très inégalement répartis sur la planète) et topologique (avec une connectivité forte en son cœur et moindre à sa périphérie). Il transporte ensuite des flux de natures très différentes (voix, téléphone, video, images, texte archivé, fax,...) correspondants à des applications également diverses (consultation de bases de données, échange de mels, jeux distribués interactifs, ...) et impliquant des contraintes variées (temps réel ou différé, en ligne, sécurité de transmission, fiabilité de transmission, niveaux de pertes acceptés...). Sur un même lien circulent d'ailleurs simultanément des paquets associés à des *communications* indépendantes et correspondant à des activités différentes, c'est le multiplexage temporel, mécanisme fondamental contribuant à structurer les flux. S'ajoutent les hétérogénéités matérielles (tous les réseaux ne fonctionnent pas avec la même technologie et sur les mêmes supports matériels) et celles dues aux fonctionnements des différents protocoles. Par exemple, une seule requête WEB produit l'émission d'un grand nombre de *paquets IP*, structure élémentaire de transport d'information, qui tous circulent de l'hôte vers le client, mais de manière totalement indépendante, par des chemins et en des temps éventuellement très différents. C'est ensuite le protocole de transfert (TCP par exemple) qui assure une concaténation pertinente des paquets et donc une reconstitution censée de l'information, induisant, à son tour, un trafic via l'envoi de paquets servant d'accusés de réception et empruntant eux-mêmes des chemins encore différents. Enfin, l'internet est un être vivant en développement rapide et permanent (de nouvelles applications, de nouvelles possibilités, de nouveaux usages apparaissent sans cesse tandis que d'autres meurent, rendus inopérants ou inintéressants). D'ailleurs, la perspective du raccordement de tous les réseaux de communication, y compris ceux mobiles accroît encore cette diversité. De ces différentes sources de complexité naît un trafic caractérisé par une irrégularité, forte et frappante, dont il s'agit de fournir une description statistique.

... à sa description statistique. Outre la compréhension scientifique et intellectuelle des relations entre irrégularité observée et complexité des mécanismes définissant et structurant l'Internet, les enjeux d'une description statistique des flux d'information circulant sur ce réseau résident dans la maîtrise et le contrôle de son fonctionnement ainsi que dans l'aptitude à le concevoir. Il s'agit de savoir dimensionner les éléments qui le constituent (taille des files d'attentes, capacité des liens et des serveurs,...), il s'agit également de pouvoir assurer des qualités de services (délais, pertes, débit,...) et définir des règles d'admission de nouveaux clients sur un réseau, de sécurité ou de tarification. Il s'agit enfin de savoir éviter l'occurrence d'événements *catastrophiques*, congestions, écroulement

du réseau...

La description statistique des flux Internet a d'abord été conduite à partir des concepts et outils appris sur le précédent grand réseau de communication : le réseau téléphonique. Les maître-mots de cette description statistique sont : processus de Poisson, loi de Gauss et processus de Markov. Les deux premiers sont relatifs aux distributions marginales, et donc aux propriétés statiques, des arrivées d'appels téléphoniques (ou de connexions Internet) et des processus agrégés correspondants (la superposition d'un grand nombre d'appels poissonniens, regroupés sur un même lien donne un trafic moyen, agrégé dans des fenêtres d'observation de durées fixées, tendant vers une loi normale ou gaussienne). Le troisième décrit la structure de dépendance statistique en temps (ou en espace) du trafic, et donc ses propriétés dynamiques.

Les observations fondamentales effectuées sur l'Internet, à la fin des années 80 [15], ont montré que l'ajustement des paramètres associés à ces modèles était sujet à des difficultés d'estimation inhabituelles, que les prévisions (de performances, de qualités de service, ...) faites à partir de ces modèles ajustés se révélaient souvent de piètre qualité (sous évaluant les temps d'attente, la taille des files d'attente nécessaire pour assurer une qualité de service, ...), que ces désaccords entre prévisions et réalité n'étaient pas résolus en surdimensionnant, même d'un ordre de grandeur, les éléments du réseau, mais seulement *partiellement* réduits. La prise en compte, la description et la modélisation de ce corpus d'observations fondamentales a été formulée à travers les paradigmes de *phénomènes d'invariance d'échelle* ou de *comportements en loi d'échelle*, souvent rassemblés, en langue anglaise, sous le simple terme de *scaling*.

2 Invariance d'échelle ?

Aucune échelle caractéristique ou toutes les échelles sont également caractéristiques.

L'un des points communs aux trois modèles statistiques précédemment cités (Poisson, Gauss, Markov) réside dans le fait qu'ils définissent, ou sont définis à partir d', une échelle de temps caractéristique clairement identifiable. Par exemple, le processus ponctuel poissonnien est entièrement caractérisé par le temps moyen entre arrivées successives. Il en est de même pour l'écart-type d'un processus gaussien (de moyenne fixée). La (ou les) constante(s) de temps qui définisse(nt) l'argument de la (ou des) fonction(s) exponentielle(s) impliquée(s) dans la description de la structure de dépendance d'un processus markovien joue(nt) également un rôle central dans la spécification du processus. Ces constantes de temps mesurent notamment la portée de la corrélation du processus et on utilise souvent, comme un argument essentiel dans la construction des algorithmes d'analyse de données, le fait que des échantillons séparés par, disons, dix fois cette longueur de corrélation, peuvent être considérés comme sans relation statistique sans commettre d'erreur forte (ou en faisant une erreur dont l'ampleur est parfaitement quantifiable).

Les phénomènes d'invariance d'échelle, les comportements en loi d'échelle, se définissent, à l'inverse, de façon négative et comme une non-propriété, par l'absence, la non-existence, l'impossibilité d'identifier une échelle jouant un rôle particulier, présentant une caractéristique

spécifique. De manière inversée, mais équivalente, on peut dire que toutes les échelles jouent des rôles équivalents et contribuent également à l'état observé du système. Les manifestations essentielles des comportements en lois d'échelle dans des systèmes ou des objets (géométriques, mathématiques, statistiques) résident dans le fait que *le tout et sa partie sont indiscernables l'un de l'autre*, que la partie réplique, à un facteur d'échelle près, le tout. Dans l'analyse du télétrafic informatique, cette indiscernabilité sera statistique et non déterministe, elle concernera les lois statistiques des processus et non l'apparence exacte de chacune des observations.

Modèles mathématiques. On conçoit intuitivement que des modèles statistiques fondés sur l'existence d'une échelle de temps caractéristique (Poisson, Gauss, Markov) s'appliquent de façon insatisfaisante pour la description de données caractérisées par des phénomènes d'invariance d'échelle [15]. Il faut, au contraire, mettre en œuvre de nouveaux modèles privilégiant un mécanisme de mise en relation de toutes les échelles les unes avec les autres ou d'une large gamme de celles-ci. On peut tenter d'organiser ces modèles en deux classes, à structure additive ou multiplicative. La première regroupe les marches aléatoires et leur déclinaison, les processus autosimilaires [18]. Dans une marche aléatoire additive, un *grand* pas de la marche aléatoire (c'est-à-dire, l'accroissement du processus entre les instants t et $t + \tau$) peut être subdivisé en un grand nombre de *petits* pas (accroissements de t à $t + \tau_1$ puis de $t + \tau_1$ à $t + \tau_2, \dots$) et l'invariance d'échelle se traduit alors par le fait que les lois statistiques des grands pas ou des petits pas sont identiques à un changement d'échelle près. La seconde classe est celle des processus multiplicatifs et multifractals [17]. Comme pour les célèbres poussières de Cantor ou flocon de Von Koch, l'invariance d'échelle résulte alors de l'itération d'une procédure de construction qui fragmente un ensemble en sous-ensembles et effectue une opération multiplicative sur chacun.

L'une des caractéristiques fondamentales associées à l'invariance d'échelle pour ces deux classes de modèles réside dans l'apparition de *lois de puissance* : en dimension 1, la loi de puissance est la fonction de référence permettant de traduire l'absence d'échelle caractéristique, si, on impose à une fonction d'une variable de satisfaire une relation de covariance par changement d'échelle ($f(at) = a^\lambda f(t)$), on obtient la solution en loi de puissance $f(t) = C|t|^\lambda$ dont la définition n'implique pas d'échelle de temps caractéristique (contrairement à celle de l'exponentielle $\exp(t/\tau_c)$ par exemple). En effet, si, pour mesurer l'irrégularité des données, on utilise des *boîtes* de taille caractéristique a , on observe que les puissances q -ème du contenu de ces boîtes se comportent comme des lois de puissance en fonction de l'échelle d'analyse a . Cette signature permet de reconnaître les lois d'échelle, de les classer et d'en estimer les paramètres. Les structures de corrélation des processus issus de ces deux classes présentent des décroissances algébriques (en loi de puissance, donc sans échelle caractéristique) et donc significativement plus lentes que les décroissances exponentielles (donc avec échelle caractéristique) associées aux modèles markoviens. La décroissance peut être si lente que la somme des corrélations diverge, on parle alors de *mémoire longue* ou de *mémoire à longue portée*, une propriété statistique qui vient considérablement compliquer l'analyse pratique des données expérimentales.

Outils d'analyse. Les phénomènes d'invariance d'échelle imposent, après le renouvellement des modèles, celui des outils d'analyse. Les analyses en ondelettes ou analyses multirésolution [12] constituent de *bons outils* pour l'analyse des lois d'échelle dans la mesure où se produit une adéquation entre le problème étudié (l'invariance d'échelle implique simultanément toutes les échelles) et l'outil utilisé (l'analyse multirésolution scrute, par définition, toutes les échelles du processus simultanément). Qualitativement, dans la mesure de l'irrégularité par la méthode des boîtes, évoquée ci-dessus, les ondelettes peuvent être envisagées comme des *boîtes oscillantes*, ce qui confère à l'analyse des lois d'échelle par les ondelettes de *bonnes* caractéristiques statistiques. On peut, par exemple, montrer que, dans l'analyse pratique des données, l'analyse en ondelettes permet de contourner, la difficulté posée par la présence de mémoire longue et apporte de la robustesse vis-à-vis de tendances saisonnières susceptibles d'être superposées aux lois d'échelle [6, 1].

3 Lois d'échelle dans l'Internet ?

Observations. Les premières observations de comportements en lois d'échelle ont été effectuées à la fin des années 80 (et décrites dans des articles célèbres datant de 93 et 94 [11, 22]) sur des données Ethernet, de haute qualité collectées dans un laboratoire de Bellcore et ont été associées au phénomènes de mémoire à longue portée. Dans les années suivantes, des analyses complémentaires, réalisées sur des données, sur des réseaux différents, ont confirmé l'existence de phénomènes d'invariance d'échelle. Sur les données Internet (sur des liens type *backbone*, présentant des débits effectifs de l'ordre la centaine de Moctets par seconde), on observe, à ce jour, des phénomènes d'invariance dans des échelle de temps impliquant des gammes d'échelles qui vont de la dizaine de microseconde (temps caractéristique du transfert de l'internet à un réseau local haut débit de quelques paquets) à quelques heures (temps caractéristique du rythme de l'activité humaine), soit sur près de 7 décades (une situation tout à fait exceptionnelle et remarquable dans les sciences expérimentales) [16, 1, 3]. Au delà des phénomènes de longue mémoire, désormais bien établis, les description et modélisation statistiques fines des différents phénomènes d'invariance d'échelle existant dans les différentes gammes d'échelles restent des questions ouvertes et font actuellement l'objet de nombreux efforts et travaux.

Impacts. Les études de performances de fonctionnement du réseau et de qualités de service ont été longtemps réalisés à partir de calculs analytiques supposant des hypothèses markoviennes. Certains calculs ont pu être étendus au cas spécifique de la mémoire longue. Cependant, face à la diversité et à la richesses des phénomènes d'invariance d'échelle observés, la prévision de leur impact sur les performances et les qualités de service restent au delà des possibilités analytiques. Des simulations numériques dans lesquelles ont nourri des émulateurs de réseaux avec des signaux synthétiques reproduisant le plus fidèlement possible les caractéristiques statistiques (et notamment les lois d'échelle) du trafic observé permettent néanmoins de conclure globalement que les invariances d'échelle conduisent à des dégradations substantielles et des performances et des qualités de service [5].

Mécanismes. Des efforts importants ont été déployés pour tenter d'identifier les mécanismes à l'origine des lois d'échelle dans le trafic. Un seul cependant fait pour l'instant l'unanimité des analyses et explique partiellement certains aspects des lois d'échelle, celui associant les distributions à *queues lourdes* d'une caractéristique des objets transmis (la taille des fichiers à transmettre) à l'apparition d'effets de longue mémoire. Une distribution à queue lourde est une loi dont la variance est infinie (contrairement à la loi normale), donc sans échelle caractéristique et dont les ailes décroissent en loi de puissance (donc plus lentement que celles de la loi normale), la probabilité de transmission de fichier de très grande taille est donc significativement supérieure à celle qu'impliquerait une loi normale. La superposition linéaire, par multiplexage du trafic, par exemple, d'un grand nombre de trafic à *queue lourde* constitue un mécanisme réel produisant pour le trafic agrégé des effets de mémoire à longue portée. Dans cette approche, la complexité est mise individuellement sur les caractéristiques statistiques des données à transmettre et correspond à une réalité observée (les tailles des fichiers WEB par exemple sont sans échelle caractéristique et à queue lourde [4]). Cependant, on peut également envisager d'associer les lois d'échelle à la complexité des protocoles qui assure le fonctionnement du réseau plutôt qu'aux caractéristiques des sources elles-mêmes. Le protocole TCP notamment impliquant un *feedback* entre l'état du réseau et la gestion du trafic est étudié, comme susceptible de produire des cascades multiplicatives [7] et donc des lois d'échelle. Dans l'état actuel des recherches, les travaux réalisés en sont encore à analyser, paquets par paquets, les flux transmis pour tenter d'identifier la nature fine des lois d'échelle, leurs causes et les éléments qui les déterminent et contrôlent [9, 10, 24].

4 Lois d'échelle et grand systèmes complexes ?

Pour conclure, il nous paraît intéressant de noter que des phénomènes d'invariance ont également été observés dans un grand nombre d'autres applications parmi lesquelles on peut mentionner, de manière non exhaustive, la physique, avec la turbulence hydrodynamique [13], la biologie avec la variabilité des rythmes du corps humains [23, 20], la géophysique, avec la répartition des failles géologiques [19], la géographie avec la répartition des populations [8], les célèbres marchés financiers, avec la fluctuation des taux de changes ou des cours d'action [14] ... Ces champs d'applications sont de natures très diverses et sans relation apparente, tout au plus peut-on les ranger en deux catégories, celle des phénomènes naturels (première partie de la liste) et celle de ceux résultants de l'activité humaine (seconde partie). C'est une question stimulante de déterminer les ingrédients communs à ces grands systèmes complexes et susceptibles de produire des lois d'échelle ou au contraire d'établir que la ressemblance des phénomènes d'invariance d'échelle observés est fortuite et dépourvue de signification fondamentale.

Une présentation plus complète et détaillée relative aux lois d'échelle dans le télétrafic informatique, peut être consultée, en français, dans [21]. Une présentation tutorielle plus

technique et précise de l'analyse des lois d'échelle par les ondelettes est disponible [1]. Des procédures MATLAB d'analyses des lois d'échelle dans des données expérimentales sont disponibles sur nos pages WEB : www.emulab.ee.mu.oz.au/~darryl.

References

- [1] P. Abry, P. Flandrin, M.S. Taqqu and D. Veitch. Wavelets for the analysis, estimation and synthesis of scaling data. Un chapitre de [16].
- [2] P. Abry, P. Gonçalvès and J. Lévy Véhel, Eds., *Lois d'échelle et Fractales*, Traité Information, Commandes, Contrôle, Hermès Editions, Paris, France, Avril, 2002.
- [3] P. Abry, R. Baraniuk, P. Flandrin, R. Riedi, and D. Veitch, "The multiscale nature of network traffic: Discovery, Analysis, and Modelling," *IEEE Signal Processing Magazine, Special issue on "Analysis and Modeling of High-Speed Data Network Traffic"*, vol. 19, no. 3, pp. 28–46, May 2002.
- [4] M. Crovella, A. Bestavros, "Self-Similarity in World Wide Web traffic: evidence and possible causes," *IEEE /ACM trans. on Networking*, 6(5):835–846, 1997.
- [5] A. Erramilli, O. Narayan, A. Neidhardt, and I. Saniee, "Performance impacts of multi-scaling in wide area TCP/IP traffic," in *Proceedings of IEEE Infocom'2000*, Tel Aviv, Israel, March 2000.
- [6] P. Flandrin, Wavelet analysis and synthesis of fractional Brownian motion, *IEEE Trans. on Info. Theory*, 38:910-917, 1992.
- [7] A. Feldmann, A. Gilbert, and W. Willinger, "Data networks as cascades: Explaining the multifractal nature of Internet WAN traffic," in *ACM/Sigcomm'98, Vancouver, Canada*, 1998.
- [8] P. Frankhauser, L'approche fractale : un nouvel outil dans l'analyse spatiale des agglomérations urbaines, *Population*, 4:1005–1040, 1997.
- [9] N. Hohn, D. Veitch, and P. Abry, "Does fractal scaling at the IP level depend on TCP flow arrival processes?," in *ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop (IMW-2002)*:63–68, Marseille, France, Nov 6–8 2002.
- [10] N. Hohn, D. Veitch, and P. Abry, "Cluster processes, a natural language for network traffic," *IEEE Trans. on Sig. Proc.*, Special Issue on " *Signal Processing in Networking*", to appear 2003.
- [11] W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, and D.V. Wilson, "On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version)," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 2, no. 1, pp. 1–15, Feb 1994.

- [12] S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, 1998.
- [13] B. Mandelbrot, Intermittent turbulence in self-similar cascades: divergence of high moments and dimension of the carrier, *J. of Fluid Mech.*, 62(2):331–358, 1974.
- [14] B. Mandelbrot. A multifractal walk down Wall Street. *Scientific American*, 280:70–73, 1999.
- [15] V. Paxson, S. Floyd, Wide Area Traffic: the failure of of Poisson modelling, Proc. of the Sigcomm, 1994.
- [16] K. Park, W. Willinger, eds, *Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation*, Wiley (Interscience Division), 2000.
- [17] R. Riedi, Lois d'échelles multifractales : fondements et approche ondelettes, in [2].
- [18] G. Samorodnitsky, M. S. Taqqu, *Stable Non-Gaussian Processes: Stochastic Models with Infinite Variance*. Chapman and Hall, New York, London, 1994.
- [19] D. Sornette, *Critical Phenomena in Natural Sciences*. Springer, 2000.
- [20] M. Teich, S. Lowen, B. Jost and K. Vibe-Rheymer, Heart rate Variability: Measures end Models, preprint, 2000.
- [21] D. Veitch, Lois d'échelle en télétrafic informatique, in [2].
- [22] W. Willinger, M.S. Taqqu, R. Sherman, and D.V. Wilson, “Self-similarity through high-variability: Statistical analysis of Ethernet LAN traffic at the source level,” in *Proceedings of the ACM/SIGCOMM'95*, 1995.
- [23] B. West, A. Goldberger, Physiology in fractal dimensions, *American Scientist.*, 75:354–365, 1987.
- [24] Z.-L. Zhang, V. Ribeiro, S. Moon, and C. Diot, “Small-Time Scaling behaviors of internet backbone traffic: An Empirical Study,” *to appear, IEEE Infocom*, San Francisco, April 2003.