Quelques éléments caractéristiques du trafic Internet

Philippe Olivier
France Télécom R&D
Issy-Les-Moulineaux
phil.olivier@francetelecom.com

Philippe Owezarski
LAAS-CNRS
Toulouse
owe@laas.fr

Kavé Salamatian
LIP6
Paris
kave.salamatian@lip6.fr

1 Introduction

L'Internet a connu et continue de connaitre une croissance sans précédent tant en termes de nombres d'utilisateurs que d'usages, l'Internet ayant de plus en plus la fonction de réseau universel.

D'un point de vue technique, l'Internet repose sur le protocole IP qui supporte de multiples applications, dont les diverses caractéristiques se mélangent au sein des ressources du réseau ; les paquets de gestion partagent le même réseau que les paquets de données utiles (il n'existe pas de réseau de signalisation séparé) ; enfin, les mécanismes de contrôle (tels TCP) interagissent fortement avec le trafic offert, produisant un trafic observable grandement modifié. Ces caractéristiques confèrent à la structure du trafic IP un caractère d'une grande complexité, dont une manifestation est par exemple le phénomène de dépendance à long terme ou d'auto-similarité.

Sa connaissance nécessite donc d'être recherchée (à défaut d'être maîtrisée) plus ou moins continuellement en fonction de son évolutivité. Techniquement, la nécessité d'effectuer des mesures et des analyses du trafic se justifie plus particulièrement par les besoins suivants :

- Evaluer la demande en trafic des utilisateurs, notamment dans le cadre de la fourniture à venir de classes de service différenciées (COS).
- Dimensionner les ressources du réseau : capacité de traitement des routeurs ; débit de transmission des liens ; taille des buffers aux interfaces. Adapter la gestion opérationnelle de ces ressources à l'évolutivité temporelle de la demande en trafic.
- Contrôler la QoS offerte par le réseau : taux de perte de paquets, délai et gigue de transfert des paquets de bout en bout pour les applications à contraintes temps-réel, débit utile de transport des flux de trafic de données.
- Tester l'adéquation des modèles de performance élaborés au moyen de calculs analytiques ou de simulations, tant au niveau de la validation des hypothèses considérées que de la pertinence des résultats.

Différents types de mesure du trafic peuvent être mises en œuvre : mesures passives ou mesures actives. Dans le présent état de l'art, nous ne parlerons pas des outils, matériels et logiciels, permettant de mettre en œuvre ces mesures passives et actives. Nous nous attacherons ici à synthétiser les différents modèles de description du trafic qui ont été élaborés au moyen de l'analyse de campagnes de mesures. Celles-ci ne seront que peu évoquées en elles-mêmes. Il s'agira généralement d'observations réalisées à l'aide de sondes passives, plus spécialement adaptées à la fourniture de paramètres descriptifs du trafic. Les sondes actives fournissent quant à elles des informations plutôt liées à la performance du trafic et à la QoS réseau, sujets débordant quelque peu du cadre assigné à cet article.

2 Diversité du trafic Internet

2.1 Caractéristiques générales du trafic IP

Un réseau de type Internet est dit multi-service : il a vocation à transporter un grand nombre de types de service possédant des caractéristiques de trafic différentes et éventuellement des contraintes de Qualité de Service (QoS) différenciées. Cependant, dans le souci d'une modélisation simplifiée autant que pour les besoins opérationnels de gestion du réseau, l'on recherche plutôt une classification grossière des différents types de trafic [31]. La plupart des auteurs s'accordent généralement pour distinguer deux grandes classes de trafic de télécommunications dans les réseaux à haut débit :

- Le trafic de type "**streaming**", dont la durée et le débit ont une réalité intrinsèque bien que variable éventuellement. Souvent associé à la notion de services "orientés connexion", son intégrité temporelle doit être préservée par le réseau. Le délai de transfert des données de même que sa variation, la gigue, doivent être contrôlables, tandis qu'un certain degré de perte de paquets peut être tolérable. Les flux de trafic streaming sont typiquement produits par les services téléphoniques et vidéo (vidéoconférence ou téléchargement "on-line" de séquences).

- Le trafic dit "**élastique**", ainsi nommé car son débit peut s'adapter à des contraintes extérieures (bande passante insuffisante par exemple) sans pour autant remettre en cause la viabilité du service. Cette classe de trafic est essentiellement engendrée par le transfert d'objets numériques par nature (par opposition au transfert en mode numérique d'informations analogiques à la source) tels que des pages Web (application HTTP), des messages électroniques (e-mail, application SMTP) ou des fichiers de données (application FTP). Le respect de leur intégrité sémantique est indispensable mais les contraintes de délai de transfert sont moins fortes. Cette intégrité sémantique est la plupart du temps assurée par le protocole de transport (TCP) et ne constitue donc pas un élément de performance sur lequel l'opérateur de réseau puisse agir ; en revanche, le maintien d'un certain débit effectif minimum de transfert des documents est un objectif de QoS.

Le trafic de type élastique est actuellement largement majoritaire sur les réseaux IP : on constate couramment [34] des proportions supérieures à 95% en volume (octets) et à 90% en nombre de paquets pour le trafic sous TCP, protocole sous lequel fonctionnent la plupart des applications mentionnées ci-dessus. Des proportions similaires ont été observées récemment sur le réseau de France Télécom (voir le paragraphe 2.2).

L'analyse des caractéristiques du trafic Internet s'effectue commodément en se plaçant à un niveau de représentation selon trois entités de trafic, correspondant à trois échelles de temps différentes et, quoique de manière assez grossière, à trois niveaux (couches) de la pile protocolaire des réseaux de données :

- Les "**paquets**" forment l'entité de trafic la plus fine que l'on considère dans les réseaux de données, le paquet étant l'unité élémentaire traitée par la couche réseau des protocoles. Les paquets sont *a priori* de longueur variable dans un réseau IP et leur processus d'apparition est très complexe, en raison notamment de la superposition de services de nature très diverse et de l'interaction des couches protocolaires (dispositifs de contrôle de flux et de retransmission sur perte de paquets, tels TCP [3]). Le trafic au niveau paquet possède la caractéristique unanimement reconnue d'auto-similarité, laquelle rend très ardue l'évaluation de ses performances à ce niveau. Les échelles de temps décrivant le processus des paquets sont la microseconde et la milliseconde, en fonction des ordres de grandeur du débit de transmission des liens.

- Les "**flots**" constituent une entité de trafic intermédiaire que l'on pense être la mieux adaptée pour effectuer les études d'ingénierie du trafic IP [31] (voir aussi le paragraphe 3.3.1). Ils correspondent à des transferts plus ou moins continus de séries de paquets associés à une même instance d'une application donnée. Les flots de type streaming sont associés à des communications audio/vidéo (téléphonie sur IP, vidéoconférence) ou encore à des téléchargements en temps réel de séquences vidéo. Les flots de trafic élastique sont créés par le transfert d'un fichier, d'un message, d'un objet (ou document) au sein d'une page HTML, etc. Un flot correspond donc plus ou moins à la couche transport de la pile protocolaire Internet ; mais pas complètement puisque cette notion n'est pas nécessairement équivalente à celle d'une connexion TCP, p. ex., comme on le verra par la suite. On peut estimer que les flots ont une durée s'étendant de quelques secondes à quelques minutes, voire quelques heures.

- Au plus haut niveau, on peut tenter de définir la notion de "**sessions**" dans le but de se rapprocher des périodes d'activité des utilisateurs (transposition de la notion d'appels considérée en téléphonie à commutation de circuits). Pour le trafic streaming, ce niveau ne se distingue guère de celui des flots, du moins temporellement, puisque ce dernier correspond déjà à des communications ou des appels. S'agissant du trafic élastique, les sessions peuvent être associées à des connexions Telnet, FTP, ou à des envois de messages électroniques. La notion de session est (encore) plus floue au sujet des connexions de type WWW ("World Wide Web") selon le protocole HTTP : on peut par exemple la définir comme étant la durée de transfert d'une page HTML dans son ensemble (comportant plusieurs objets à transférer) ou d'une suite de pages associées à une même consultation. Les sessions sont générées par la couche application des réseaux et l'ordre de grandeur de leur durée se situe entre quelques minutes et quelques heures.

2.2 Répartition par protocole

Sur l'Internet, au-dessus de la couche réseau IP, les protocoles de transport de loin les plus répandus sont UDP (User Defined Protocol) et TCP (Transport Control Protocol). Le trafic TCP est largement majoritaire, comme le montre le tableau 1 où l'on donne les fourchettes dans lesquelles s'insèrent la plupart des proportions de trafic UDP/TCP reportées dans la littérature. Il est intéressant de noter que ces valeurs sont relativement stables depuis quelques années (environ 5 ou 6 ans) [21]. Le protocole UDP ne transporte encore que très peu de trafic lié à des applications utilisateurs (les services de Voix sur IP ou de téléchargement audio/vidéo en temps-réel n'ont pas encore réussi leur percée). Comme on le verra plus loin, une grande partie des flux UDP est générée par l'application réseau DNS, ce qui explique leur poids en octets encore plus faible qu'en termes de paquets ou de flots.

D'autres protocoles de transport sont présents dans les observations, mais ne contribuent que pour une proportion négligeable au volume de trafic véhiculé, mesuré en nombre de paquets ou d'octets (en termes de flots, leur poids pourrait monter jusqu'à 1 ou 2% selon la définition utilisée pour identifier les flots) : ICMP (Internet Control Message Protocol), RSVP (Reservation Protocol), GRE (General Routing Encapsulation), SIPP-ESP (SIPP Encap Security Payload) et NHRP (NBMA Next Hop Resolution Protocol). On ne considère généralement pas ces protocoles lors des études de caractérisation de trafic, en particulier celles rapportées ici.

Table 1: Proportions de trafic par protocole de transport

	TCP	UDP	Autres
% paquets	85 - 90	10 - 15	négligeable
% octets	94 - 98	2 - 6	négligeable

2.3 Répartition par application

Une étude très détaillée des caractéristiques et des profils de trafic [9, 34], basée sur des campagnes de mesure réalisées sur le réseau dorsal de MCI, fait référence comme source d'informations depuis plusieurs années. Deux liens, respectivement dédiés au trafic domestique (interne aux USA) et au trafic international (liaison USA - GB) sont observés durant une semaine. Des résultats très complets sont présentés sur les poids respectifs, exprimés en unité de flots, de paquets ou d'octets, des différentes applications ou des différents protocoles entrant dans la composition du trafic et sur leurs variations au cours du temps (les profils de trafic obtenus ne sont pas forcément similaires à ceux obtenus en France par exemple, en raison des décalages horaires à l'intérieur même des USA).

Le tableau 2 fournit les répartitions de trafic par application (reconnues par leur numéro de port) parmi les paquets sous protocole TCP. Y figurent les résultats de la campagne MCI citée ci-dessus (chiffres assez approximatifs) de même que ceux issus d'observations effectuées sur le réseau IP de France Télécom en deux points de collecte (POP) du trafic Internet. Pour ces dernières mesures, les deux sens de transmission, montant et descendant, sont distingués, étant donnée la structure hiérarchique très marquée du réseau.

Table 2: Proportions de trafic par application sur TCP

		HTTP	SMTP	POP3	FTP	NNTP	Autres
MCI 1997	% paquets	75	6	-	3	< 1	15
Lien domestique	% octets	80	5	-	5	2	8
POP 1 FT 2000	% paquets	65	2	3	5	2	23
Sens montant	% octets	33	8	1	9	< 1	48
POP 1 FT 2000	% paquets	65	2	3	6	2	22
Sens descendant	% octets	64	0	2	9	3	22
POP 2 FT 2001	% paquets	79	3	3	-	-	15
Sens montant	% octets	65	17	1	-	-	17
POP 2 FT 2001	% paquets	72	2	4	-	-	22
Sens descendant	% octets	72	< 1	4	-	-	24

Par rapport à la répartition par protocole (paragraphe précédent), la ventilation par application est beaucoup moins stable selon le lieu ou la période de mesure. On note cependant quelques faits saillants que l'on retrouve dans ce tableau et dans de nombreux autres résultats non reportés ici. En premier lieu, l'application dominante, du moins sur un réseau dorsal, est HTTP (protocole de navigation sur le World Wide Web), et ce dans une large proportion. Mais ceci est un phénomène relativement récent : l'explosion du trafic Web s'est produite au milieu des années 90 pour les USA (un peu plus tard dans d'autres pays) en liaison avec la "démocratisation" de l'accès à Internet. Auparavant, le trafic Internet était essentiellement dominé par les applications FTP, SMTP, NNTP et

Telnet utilisées dans le monde professionnel [28]. Derrière HTTP, les applications les plus utilisées sont liées à la messagerie (SMTP pour le transport dans le réseau et POP3 pour la consultation des boîtes aux lettres sur les serveurs), au transfert de fichiers (FTP) ou aux services de News (NNTP, mais qui reste très concentré temporellement, en général la nuit). A noter toutefois qu'il y a trois ans (en 2000), l'application Napster, un précurseur pour l'échange de fichiers audio au format MP3 a éclaté, comme le montre la figure 1, au point de devenir, par la quantité de trafic générée, la seconde application dans l'Internet après le Web.

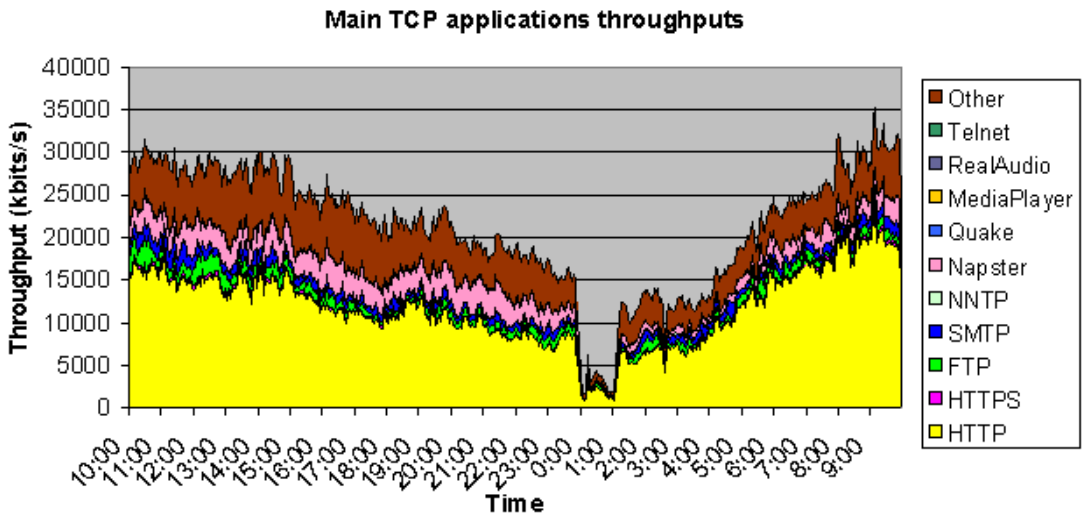

Figure 1: Exemple de répartition du trafic par application sur un lien Internet (2000)

Concernant le trafic UDP, la seule application généralement identifiée est DNS (traduction d'adresses IP), laquelle génère de nombreux flots de petite taille (1 paquet de faible taille, inférieure à 80 octets). Son poids est cependant faible, de l'ordre de 5 à 10% des paquets et de 2 à 8% des octets du trafic UDP pour les observations France Télécom. Cependant, les observations MCI reportent des contributions sensiblement plus fortes : environ 30 et 20% du trafic UDP en paquets et en octets, (soit respectivement 3 et 1% du trafic total).

Très récemment (depuis fin 1999 et 2000), les applications orientées "streaming", comme Mediaplayer de Microsoft, ont connu une croissance importante. Mediaplayer peut au choix de l'utilisateur fonctionner sur TCP, UDP et même RTP. Les mesures actuelles sur certains liens (Figure 2) montrent que dans sa version UDP, l'outil Mediaplayer a un certain succès.

Il faut signaler, car cela n'apparaît pas sur les résultats ici présentés, que les répartitions de trafic en termes d'applications sont globalement sensibles à la localisation géographique des points de mesure : ceci est en particulier vrai selon que l'on se place sur un réseau commercial d'opérateur ou sur un réseau local professionnel (de nombreuses publications portent sur des observations en entrée/sortie d'un LAN de campus universitaire ou de centre de R&D). Lorsque l'on se place sur un réseau d'accès, la répartition du trafic est aussi sensible au débit de connexion, comme le montre [36]. Mentionnons pour finir un phénomène très récent (2001), l'apparition d'une forte proportion (jusqu'à environ 30%) de trafic lié aux applications "Peer to Peer" (dont Napster était un précurseur), en particulier lorsque la mesure est effectuée sur un réseau d'accès haut débit (ADSL). La montée en puissance de ce type de trafic présente de plus la particularité de symétriser les flux de trafic par l'effet d'une augmentation sensible du trafic montant, de l'utilisateur vers le réseau.

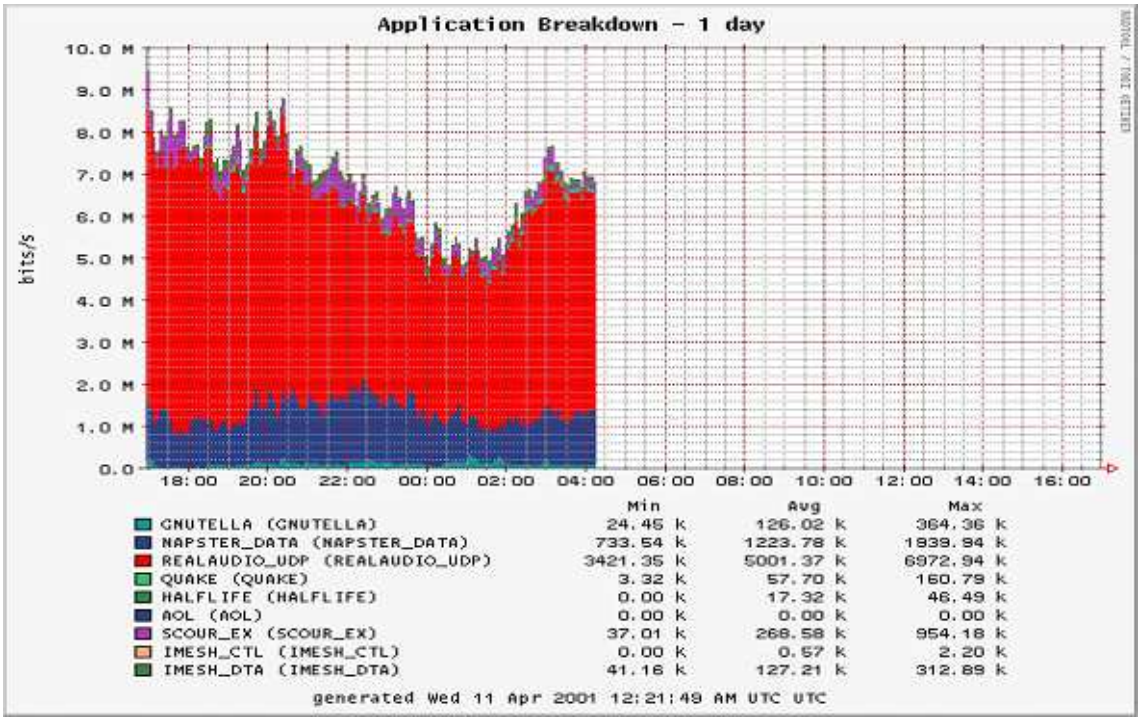

Figure 2: Applications émergentes en 2000

3 Modélisation des processus

3.1 Introduction sur l'auto-similarité

Un trait important concernant la nature du trafic Internet, ou du trafic de données en général, est son aspect auto-similaire (ou possédant des dépendances à long terme, ou encore de caractère fractal, sans trop entrer dans les subtilités mathématiques qui différencient ses trois notions voisines). L'auto-similarité du trafic de données a été mise en évidence dans [19] et souvent confirmée depuis : la structure des variations d'amplitude du signal analysé (par exemple le nombre d'octets transférés par unité de temps) se reproduit de manière similaire quelle que soit la finesse temporelle avec laquelle il est représenté. Le comportement d'un trafic auto-similaire est à l'opposé de celui d'un trafic poissonnien, dont les variations d'amplitude sont filtrées au fur et à mesure que l'on augmente la taille de la fenêtre d'intégration.

Une monographie entière [27] récemment publiée est consacrée à la modélisation du phénomène d'auto-similarité du trafic dans les réseaux de données et à son impact sur l'évaluation des performances. Y figurent aussi bien des chapitres sur la description et la simulation des caractéristiques auto-similaires du trafic (streaming video, connections TCP, ...) et sur leur analyse au moyen de techniques sophistiquées telles que la transformée en ondelettes, que sur leur impact sur les modèles de performance basés sur les files d'attente et sur l'ingénierie des réseaux multi-service offrant de la Qualité de Service (dimensionnement, contrôle de congestion, etc.). Ce livre constitue une excellente et très complète source d'informations et de références sur ce thème ; nous donnons explicitement certains de ses chapitres dans la bibliographie figurant en fin de document. On pourra consulter aussi [37] pour une bibliographie exhaustive (à la date de parution) sur le sujet.

Les chercheurs d'AT&T ont publié de nombreux travaux sur l'auto-similarité du trafic [19, 38] ; mais les articles [13] et [14] sont particulièrement intéressants en ce sens que, outre la présentation de

nombreux résultats mettant en avant ce phénomène, les auteurs insistent sur la nécessité de développer un modèle structurel d'analyse du trafic. Ce type d'approche permet de mieux cerner les aspects dynamiques (processus des connexions TCP au sein des sessions applicatives, processus paquets, ...) du trafic de données transporté par les réseaux longue distance (Wide Area Networks), et de fournir quelques interprétations "physiques" des phénomènes observés (relations entre auto-similarité et lois de probabilité à décroissance lente, par exemple). L'analyse des phénomènes liés aux échelles de temps est effectuée à l'aide d'une technique originale fondée sur la transformée en ondelettes [1] : les séries temporelles, telles que le nombre de paquets transmis par unité de temps p. ex., y sont analysées en termes d'un spectre d'énergie établi en fonction d'un facteur d'échelle temporelle.

A noter toutefois qu'un premier article [6], à l'origine de nombreux débats dans la communauté Internet et peut être à la base d'une nouvelle évolution dans l'approche choisie pour modéliser le trafic, défend une théorie opposée à celle de l'auto-similarité. En effet, l'étude présentée montre que plus la quantité de trafic augmente, plus le trafic devient régulier, avec des distributions d'arrivées exponentielles (et plus sous-exponentielles) et une dépendance qui diminue (évaluée à l'aide de méthodes entropiques). Le modèle de trafic ne serait ainsi plus auto-similaire à partir du moment où une certaine quantité importante de paquets et de flux s'entrelacent sur un lien haut débit.

3.2 Trafic au niveau paquets

Une caractéristique générale du trafic de paquets est de se présenter sous forme de rafales, ce qui est inhérent à ce mode de commutation (voir [32] et [35] et leurs nombreuses références). Il en résulte une extrême variabilité à toutes les échelles de temps des processus observés relatifs aux paquets : intervalle entre paquets successifs, nombre de paquets ou d'octets transférés par unité de temps, etc. Ceci se traduit mathématiquement par un comportement auto-similaire, voire multi-fractal selon les échelles de temps, des variables de trafic, un phénomène observé dans toutes les publications à ce sujet. Ce comportement se caractérise notamment par une décroissance lente, par exemple sous forme de loi puissance [16], de la fonction d'auto-corrélation du nombre de paquets, ou du nombre d'octets, transférés par unité de temps (typiquement 100 ms) : les processus auto-similaires sont des cas particuliers des processus à dépendance long terme (LRD).

Concernant le trafic de type streaming, les services liés à la vidéo sont appelés à un fort développement dans le futur : vidéoconférence, téléchargements en temps réel (Video on Demand). La caractéristique LRD a été identifiée dans de nombreuses publications concernant le transfert de séquences vidéo à débit variable (VBR selon la terminologie ATM) [2], probablement due à la variabilité des paramètres de transmission liés au codage des trames (MPEG, p. ex.), à la dynamique des images, etc. On pourra consulter [17] pour une revue complète sur les caractéristiques de ce trafic et sur leur impact sur les modèles de performance. Il y est en particulier noté que la LRD n'a pas forcément une influence déterminante, contrairement aux corrélations à court terme, sur le comportement des files d'attente des routeurs.

Dans le cas particulier de la téléphonie sur IP, on pourrait supposer que les paquets sont de longueur et d'intervalle inter-arrivées constantes au sein d'une même communication. Ces paramètres fixes sont le reflet, après encodage et compression à la source, du débit constant des communications téléphoniques. Cependant, ces hypothèses semblent quelque peu simplificatrices, d'une part à cause du phénomène de gigue de transfert si l'on se place sur un lien éloigné du routeur origine, d'autre part en raison de la diversité potentielle des paramètres de codage de la voix. Quoi qu'il en soit, et il en est de même pour le trafic vidéo, nous ne disposons pratiquement pas à l'heure actuelle d'observations concrètes de ce type de trafic sur réseau réel.

Concernant le trafic de type élastique, l'identification du processus des paquets tel qu'il est offert

au réseau est particulièrement délicate. En effet, les dispositifs de correction d'erreur et de perte génèrent la retransmission de paquets supplémentaires et les mécanismes de contrôle de flux (TCP notamment) régulent les débits de transmission [3]. Les analyses de trafic doivent donc se contenter des données de trafic effectivement mesurées sur des liens, compte tenu de ces retransmissions et régulations.

Le caractère auto-similaire du trafic TCP a été largement étudié. En complément de ce qui a été dit au paragraphe précédent, notons les tentatives d'explication avancées : aux échelles de temps supérieures à un délai de transmission typique (RTT, "Round Trip Time", de l'ordre de 100 ms), le comportement auto-similaire (ou mono-fractal) serait dû à l'extrême variabilité de la taille des documents transférés (la loi de distribution est de type "heavy-tailed", telle la loi de Pareto), voir le paragraphe 3.3.2 sur la caractérisation des flots ; tandis que les caractéristiques multi-fractales aux échelles de temps inférieures seraient provoquées par les mécanismes de contrôle de congestion du protocole TCP [13, 14]. Effectuant une analyse des phénomènes d'échelle segmentée par composante de trafic (protocole de transport ou application), [22] montre que HTTP et FTP sont les principales applications contribuant, de par leur extrême variabilité, aux propriétés de LRD détectées au niveau des paquets IP.

Tout ce qui précède concerne le processus d'arrivée des paquets. La loi de distribution des tailles de paquet, quant à elle, est difficilement modélisable statistiquement car elle possède de fortes composantes discrètes correspondant à certaines tailles caractéristiques (messages de gestion, accusés de réception, etc.) [34]. La distribution des tailles de paquet peut bien sûr varier selon le lieu et l'heure d'observation, mais elle est surtout sensible généralement au sens de transmission du trafic : la plupart des liens IP présentent une dissymétrie de répartition serveurs/usagers entre les deux nœ uds qu'il relie (c'est le cas p. ex. de liens internationaux Europe - Etats-Unis, de liens de collecte du trafic grand public vers le cur de réseau, etc.). Le sens serveur vers usager a alors tendance à comporter des paquets de plus grande taille, liés au transfert des données demandées, par rapport au sens usager vers serveur, où le trafic est essentiellement composé de requêtes et d'informations protocolaires relatives à l'établissement des communications (accusés de réception, début et fin de connexion TCP, ...).

On observe ainsi trois modes déterministes principaux, qui se superposent bien entendu à une certaine distribution continue de poids assez variable. Les paquets de faible taille (40 octets ou guère plus), essentiellement composés des en-têtes TCP (ou UDP) et IP, sont produits par les protocoles et par de courtes requêtes (telles les commandes de Telnet générant des paquets de 1 caractère) ; ils constituent globalement presque la moitié des paquets observés, et jusqu'à 70 ou 80% des paquets dans le sens usager vers serveur. Les paquets de taille moyenne (typiquement 552 ou 576 octets) sont produits par certaines implémentations de TCP. Les paquets de grande taille (1500 octets) correspondent à la taille maximum (MTU) autorisée par la couche Ethernet et généralement reconnue par les protocoles de transport. Ces deux derniers modes comptent chacun pour environ 10 à 20% de la totalité des paquets.

3.3 Trafic au niveau flots

3.3.1 Notion de flot

En particulier pour les études liées à l'ingénierie de trafic, on s'intéresse tout particulièrement au niveau des flots [31]. Défini pour l'instant de manière assez floue comme une succession de paquets engendrés par une même instance d'une application donnée, et présentant donc une caractéristique de "cohérence temporelle", un flot de paquets correspond au transfert d'un message SMTP, d'un fichier au sein d'une session FTP, d'un objet (texte, image, son, ...) au sein d'une page HTML,

éventuellement à une phase active d'une communication audio. Cette notion est donc très proche de la notion de documents dont la performance en termes de transfert forme le principal critère de QoS vue par les utilisateurs. Ceci constitue le principal argument conduisant à considérer le niveau flots pour proposer des modèles de dimensionnement, notamment s'agissant du trafic élastique.

Pour être plus précis, référons-nous en premier lieu à l'une des principales études menées de manière extensive sur cette notion [8] : on définit un **flot** comme un ensemble de paquets IP répondant à une même "**spécification de flots**" et se succédant les uns les autres à un intervalle de temps inférieur ou égal à un seuil donné que l'on nomme "**Time Out**" (**TO**). Cette notion de Time Out permet de garantir une certaine cohérence temporelle à la suite de paquets identifiée par une spécification de flots, c'est-à-dire que les flots de paquets ne présentent pas de trou trop important dans leur processus d'arrivées. La cohérence temporelle est essentielle à maintenir pour la modélisation des performances du trafic sous TCP. Par ailleurs, l'introduction d'un TO sert aussi pour décider qu'un flot est terminé ou non ; c'est un élément indispensable si l'on envisage l'implémentation de traitements par flots dans les routeurs du réseau : le dépassement de TO sans nouvelle arrivée de paquet lié à une spécification de flot active permet de déclarer le flot terminé et de le supprimer de la table d'états du routeur. Dans ces conditions, l'estimation d'un TO optimal revêt une importance primordiale afin d'économiser les ressources en mémoire et en temps CPU des machines.

La spécification d'un TO est loin d'être triviale, elle peut être : (i) différenciée selon le type de protocole ou d'application ; (ii) adaptative en fonction du débit des flux [33] ; (iii) motivée par des préoccupations diverses (pour ne pas dire divergentes) telles que l'élaboration de modèles de performance du trafic, la mise en œuvre de disciplines de service par flot ou de politique de routage dans les nœ uds du réseau ; (iv) etc. Sans trop entrer ici dans les détails, mentionnons que la spécification de flots peut comprendre quatre dimensions [8] : la directionalité des flots (mono- ou bi-directionalité) ; la prise en compte d'une ou deux des extrémités (origine ou destination des paquets) ; la granularité des extrémités (de la plus fine, les applications, à la plus grossière, les sous-réseaux) ; enfin, le protocole de la couche transport.

Dans la suite, on associera implicitement la notion de flot à celle de **micro-flot**, en considérant que la spécification de flots est déterminée par la donnée du **5-uple** $\{$***adresse IP source, adresse IP destination, port source, port destination, protocole de transport***$\}$. (A noter que les numéros de port identifiant les applications n'existent que dans le cas de transport sous les protocoles TCP et UDP.) Sur le lien considéré et pour un intervalle d'observation donné, on appellera "**flux**" tout ensemble de paquets conformes à un même 5-uple de spécification de flots. Un flux est donc éventuellement constitué d'un ou plusieurs (micro-) flots successifs séparés d'au moins un intervalle de temps égal à TO.

Insistons, pour terminer, sur le fait que les flots ainsi définis ne correspondent pas forcément à des connexions dans le cas de flux TCP. Certains auteurs préconisent en effet d'utiliser les informations SYN/FIN de début et de fin de connexion, présentes dans les en-têtes TCP, pour identifier les flots [12]. Non seulement ces informations TCP peuvent ne pas être toujours présentes en un point donné du réseau (pour cause de routes différentes suivies par les paquets, p. ex.), ce qui perturbe l'identification des connexions, mais de plus, de telles connexions TCP sont susceptibles de comporter plusieurs flots au sens que nous venons de définir : une session de connexion à distance sous Telnet, ou bien une session de navigation Web sous protocole HTTP 1.1 à connexions persistentes [18], peut éventuellement comporter le transfert de plusieurs fichiers successifs bien délimités dans le temps.

3.3.2 Caractérisation des flots

De nombreuses études ont été publiées récemment sur la modélisation du trafic au niveau des flots, motivées par les nombreuses perspectives d'application offertes par la considération de cette entité de trafic. En premier lieu, comme souligné plus haut, l'analyse des performances du trafic et l'inférence qui en découle de méthodes de dimensionnement des ressources s'effectuent plus aisément, et de manière plus adéquate, à ce niveau. Par ailleurs, les différents schémas d'architectures de routage, de "traffic engineering" (MPLS, routage orienté QoS, etc.), voire de fourniture de services différenciés (IntServ, DiffServ), qui ont été proposés ces dernières années de manière quelque peu foisonnante dans la mouvance de l'IETF, prennent en compte également la notion de flots, éventuellement selon des niveaux d'agrégation très variables.

Une comparaison détaillée est malaisée à effectuer entre les différents résultats produits, en raison des définitions diverses accordées à la notion de flots : micro-flots selon la définition ci-dessus, connexions TCP, documents Web, etc.). Cependant, quelques points communs importants peuvent être dégagés dans l'ensemble : la non conformité du processus des arrivées de flot à un processus de Poisson, et le comportement général de décroissance lente des distributions statistiques de longueur de flot. A noter que la plupart des publications sur ce sujet ne traitent que des caractéristiques de flots TCP, à l'exception de [25] où l'on montre que les modèles de représentation des processus de flots sont similaires pour UDP et TCP, notamment pour ce qui concerne le processus d'arrivée. Cependant, ce dernier résultat est à tempérer par le fait que très peu de véritables flux de trafic temps-réel circulent sur les réseaux IP, du moins jusqu'à très récemment.

Tous les résultats statistiques produits dans la littérature mettent en évidence des lois de distribution à décroissance lente ("heavy-tailed") dès que l'on s'intéresse à un paramètre lié à la taille, au volume, à la durée, ..., d'un objet à transférer sur un réseau de données (voir p. ex. [4, 7, 11, 20, 23, 25, 29] pour le trafic IP). Ce phénomène de décroissance lente signifie que la probabilité d'obtenir des très grandes valeurs de la variable aléatoire est asymptotiquement beaucoup moins faible que pour une loi de type exponentiel. Les lois de probabilité couramment utilisées pour modéliser un tel comportement sont la loi de Pareto et la loi log-normale. Si l'on entend littéralement par "décroissance lente" une décroissance équivalente (selon une définition mathématique que l'on ne précisera pas ici) à une fonction puissance, la loi log-normale n'est pas une loi à décroissance lente [30], elle est seulement à décroissance sous-exponentielle. De même, la loi de Weibull est souvent assimilée à une loi à décroissance lente alors qu'il s'agit d'une généralisation (de même que la loi Gamma) de la loi exponentielle ; elle peut bien sûr être à décroissance plus lente que l'exponentielle en fonction des valeurs prises par l'un de ses paramètres.

La loi de Pareto est l'archétype de la loi à décroissance lente puisque sa distribution (cumulative complémentaire) est proportionnelle à $x^{-\alpha}$ avec $\alpha > 0$. Pour $1 < \alpha \leq 2$, la valeur moyenne est finie, mais la variance ne l'est pas. Pour $0 < \alpha \leq 1$, la valeur moyenne elle-même devient infinie. Ce comportement est significatif d'une très grande variabilité de la variable aléatoire considérée : dans le cas de la taille des documents des sessions Web, de très nombreux documents de taille modeste coexistent avec des documents très volumineux, en nombre plus faible mais non négligeable. C'est cette extrême variabilité de la taille des documents qui semble être à l'origine des phénomènes de dépendance à long terme observés aux grandes échelles de temps (typiquement supérieures à 1 s), du moins à propos du trafic de type Web ou de transfert de fichiers [10, 26].

Dans la plupart des cas, seule la queue de distribution de la loi des longueurs de flot est identifiée comme étant à décroissance lente ; la loi de Pareto ne fournit en général pas un bon modèle de représentation de l'ensemble de la distribution, le corps de la distribution étant par exemple bien modélisé par une loi log-normale [23, 25]. Circonstance qui pourrait inciter à proposer de mod-

éliser l'ensemble de la distribution par des mélanges de loi (log-normal/Pareto [18] ou mélange de plusieurs lois log-normales [4]), quoi que l'on puisse douter de l'intérêt pratique de disposer de tels modèles de représentation, certainement peu utilisables analytiquement et peu économes en nombre de paramètres, pour mener des études ultérieures sur la performance du trafic. A l'opposé de ce caractère généralement multi-modal des distributions, on observe dans [25] un ajustement remarquablement bon (du moins visuellement, mais néanmoins selon deux modes de représentation, en échelle linéaire et en échelle logarithmique) de l'ensemble de la distribution par une loi de Pareto dès lors que l'on traite des longueurs de flots TCP mesurées en nombre de paquets, et ce à partir de diverses campagnes d'observation, aussi bien sur un réseau dorsal que sur un réseau d'accès haut débit ADSL. Dans tous les cas où il est estimé, le paramètre de puissance α de la loi de Pareto se situe entre 1 et 2, voire proche de 1, signe d'extrême variabilité comme souligné plus haut.

Les travaux publiés sont un peu moins nombreux concernant la caractérisation du processus d'arrivée des flots, malgré le fait que la plupart des modèles de performance au niveau flot supposent qu'il s'agit d'un processus de Poisson et demandent donc à être validés. Dans le cadre d'un modèle hiérarchique sessions/flots [5] où les flots correspondent à des demandes de transfert successives de documents (pages Web) ou de fractions de documents en parallèle ou en série (fichiers ou objets d'une page Web) au sein d'une même session d'un utilisateur, il est logique de s'attendre à des inter-dépendances dans le processus temporel d'apparition des flots, lequel devra alors s'écarter sensiblement du modèle Poissonnien. C'est ce que l'on vérifie expérimentalement, à l'exception de l'étude commentée au paragraphe suivant. La distribution statistique des intervalles inter-arrivée de flots est remarquablement bien représentée (y compris au vu de tests numériques d'ajustement) par une loi de Weibull [12, 25] ou par une loi Gamma (toutes deux des extensions à deux paramètres de la distribution exponentielle, mais la dernière étant moins usitée dans ce domaine). Dans la seconde de ces deux études, les flots sont des micro-flots TCP ou UDP, tandis que dans la première, ce sont des connexions TCP (identifiées par les informations de début et de fin fournies par ce protocole) ; on en déduit une certaine robustesse des résultats obtenus. Pour compléter l'étude au second ordre, des estimations de la fonction d'auto-corrélation de l'intervalle inter-arrivée mettent en évidence une corrélation persistante dans le temps (sur une ou quelques dizaines de seconde), quoi que de niveau assez faible (de l'ordre de 0,1). Poussant plus loin le caractère non Markovien du processus d'arrivée des flots, [12] met en évidence une composante de LRD concernant le nombre d'arrivées de connexions TCP par unité de temps, sur toutes les échelles de temps au delà de 1 s. Les auteurs notent par ailleurs le fait intéressant que ce phénomène est apparu graduellement au cours de ces dernières années, au fur et à mesure de l'importance croissante du trafic Web (protocole HTTP).

Se différenciant des résultats précédents, l'étude [23] montre que la loi log-normale fournit (de même que pour la statistique des longueurs) la meilleure représentation de la distribution des intervalles inter-arrivées de documents si l'on traite l'ensemble des données recueillies sur plusieurs jours consécutifs (typiquement une semaine). En se limitant à des période chargées de 2 heures où les composantes non stationnaires (profils journaliers déterministes) sont moins présentes, la meilleure représentation est alors fournie par la loi exponentielle. Ce résultat est surprenant, d'autant qu'il repose sur une analyse descriptive très complète des statistiques du trafic Web (jeux de données sur plusieurs semaines, en provenance de 4 sites différents). Il peut néanmoins s'expliquer par différents facteurs : en premier lieu, les flots sont en fait des requêtes adressées vers des sites Web ; ensuite, parmi les lois testées, seule la loi exponentielle n'est pas à caractère de décroissance sous-exponentielle.

En tout état de cause, il semble que les modèles de performance du trafic IP doivent tenir compte du caractère non Poissonnien sensiblement marqué du processus d'arrivée des flots, soit en intégrant explicitement, de manière exogène, les caractéristiques de représentation du premier ordre, voire du

second, soit en développant une approche de plus haut niveau prenant en compte la structuration hiérarchique des flots en sessions comme le propose [5].

3.4 Trafic au niveau sessions

Le processus des demandes de communication, qu'elles soient de type streaming ou de type élastique, a toutes les raisons de pouvoir être considéré comme Poissonnien (dans la mesure où l'on peut admettre que la population source est de taille quasi-infinie). C'est l'un des principaux invariants communément reconnus en modélisation du trafic Internet [15]. En effet, au niveau des sessions utilisateurs, le processus d'arrivée résulte de la superposition d'un nombre élevé de demandes élémentaires indépendantes entre elles (à opposer à la dépendance inter-flot au sein d'une même session).

Des campagnes d'observation remontant au début de la précédente décennie, époque où le trafic Internet était essentiellement dominé par les applications FTP, Telnet ou SMTP, ont montré que les arrivées de session obéissaient correctement à un processus de Poisson [30], bien que ces diverses applications aient des modes de fonctionnement très différents (au niveau des connexions TCP générées par exemple). Dans le but de caractériser les sessions Web, des observations indirectes ont été effectuées [13] par la collecte d'informations relatives aux appels par modem à destination d'un ISP : instants d'arrivée, taille et durée des appels. Bien que ces demandes de connexion ne contiennent pas uniquement des sessions Web, ces données ont été utilisées pour tenter de caractériser les processus liés à ces dernières. L'analyse, uniquement qualitative, montre que le processus d'arrivées est cohérent avec un processus poissonnien, du moins avec un processus de renouvellement (processus pour lequel les intervalles inter-arrivées sont indépendamment et identiquement distribués). En fait, peu de travaux ont eu pour objet de valider rigoureusement le caractère poissonnien du processus d'arrivée des sessions, probablement en raison du caractère naturel, presque évident, de l'hypothèse, mais aussi certainement à cause de la difficulté d'identifier des sessions générées par les utilisateurs à partir de traces réelles. Citons seulement l'article récent [24] qui obtient sur des données collectées aux Bell Labs (donc sur un réseau local) un excellent comportement, aux premier et second ordre, du modèle de représentation des arrivées de session par un processus de Poisson.

La loi des durées (ou des longueurs), quant à elle, possède des caractéristiques de distribution à décroissance lente, quoiqu'elle soit difficile à identifier comme indiqué plus haut. Que ce soit dans [30] ou dans [13], donc avec ou sans présence prépondérante des sessions Web, la loi des durées de session (ou de taille exprimée en koctets) possède une queue de distribution caractéristique d'une loi de Pareto de moyenne finie, mais de variance infinie, significative d'une grande variabilité. D'un point de vue qualitatif, les paramètres quantitatifs des modèles de représentation étant bien entendu différents, les caractéristiques statistiques des durées de session sont dans l'ensemble similaires à celles des longueurs de flot.

4 Conclusion

Sans prétendre accomplir un travail de caractérisation complet du trafic Internet, cet article en a présenté quelques premiers éléments caractéristiques n'allant pas forcément dans le sens des croyances collectives et qui ont provoqué de nombreuses réflexions et le démarrage de nombreuses études sur de nouvelles approches pour améliorer les transmissions et la gestion dans les réseaux de l'Internet. La métrologie du trafic Internet est ainsi devenue la pierre angulaire de la recherche et de l'ingénierie des réseaux informatiques en donnant à ces acteurs des informations réalistes sur la nature du trafic et ses besoins. Certes, comme cela a été montré dans cet article, les premiers résultats de carac-

térisation du trafic montrent des propriétés très complexes et très irrégulières pouvant expliquer certains phénomènes observés dans l'Internet. Ainsi, la métrologie et ses premiers résultats ont permis d'ouvrir de nouvelles voies pour l'amélioration et l'évolution technique et technologique de l'Internet.

A noter que cet article présente une petite partie d'un rapport plus général sur l'état de l'art de la métrologie du trafic Internet, et qui est le fruit du travail réalisé au cours de la première année du projet RNRT METROPOLIS.

References

[1] P. Abry and D. Veitch, *"Wavelet analysis of long-range dependent traffic"*, IEEE Trans. Information Theory, Vol. 44, pp. 2-15, 1998.

[2] J. Beran, R. Sherman, M. S. Taqqu and W. Willinger, *"Long-range dependence in Variable-Bit-Rate video traffic"*, IEEE Trans. Comm., Vol. 43, No 2/3/4, pp. 1566-1579, 1995.

[3] U. Black, *"TCP/IP and related protocols"*, McGraw-Hill, 1992.

[4] V. A. Bolotin, Y. Levy and D. Liu, *"Characterizing data connection and messages by mixtures of distributions on logarithmic scale"*, Proc. of ITC '16, pp. 887-894, P. Key and D. Smith (Editors), Elsevier, June 1999.

[5] T. Bonald, A. Proutière, G. Régnié and J. Roberts, *"Insensitivity results in statistical bandwidth sharing"*, Proc. of ITC '17, Moreira de Souza, Fonseca and de Souza e Silva (eds.), Elsevier, Dec. 2001.

[6] J. Cao, W. S. Cleveland, D. Lin and D.X. Sun, *"Internet traffic tends to Poisson and independent as the load increases"*, Bell Labs report, 2001, available at http://cm.bell-labs.com/cm/ms/departments/sia/InternetTraffic/webpapers.html.

[7] J. Charzinski, *"HTTP/TCP connection and flow characteristics"*, Performance Evaluation, Vol. 42, pp. 149-162, 2000.

[8] K. Claffy, H-W Braun and G. Polyzos, *"A parametrizable methodology for Internet traffic flow profiling"*, IEEE JSAC, Vol. 13, No 8, Oct. 1995.

[9] K. Claffy, G. Miller and K. Thompson, *"The nature of the beast : recent traffic measurements from an Internet backbone"*, Proc. of INET '98, 1998 (http://www.isoc.org/isoc/conferences/inet/98/proceedings/6g/6g_3.htm).

[10] M. Crovella and A. Bestavros, *"Self-similarity in World Wide Web traffic : Evidence and possible causes"*, IEEE/ACM Trans. on Networking, Vol. 5, No 6, pp. 835-846, Dec. 1997.

[11] A. B. Downey, *"Evidence for long-tailed distributions in the Internet"*, Proc. of ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop, Nov. 2001.

[12] A. Feldmann, *"Characteristics of TCP connection arrivals"*, In 'Self-similar network traffic and performance evaluation', edited by K. Park and W. Willinger, J. Wiley & Sons, 2000.

[13] A. Feldmann, A. C. Gilbert and W. Willinger, *"Data networks as cascades : Explaining the multifractal nature of Internet WAN traffic"*, Proc. of ACM SIGCOMM '98, Aug. 1998.

[14] A. Feldmann, A. C. Gilbert, W. Willinger and T. G. Kurtz, *"The changing nature of network traffic : Scaling phenomena"*, Computer Communication Review, Vol. 28, No 2, April 1998.

[15] S. Floyd and V. Paxson, *"Difficulties in simulating the Internet"*, IEEE/ACM Trans. on Networking, Vol. 9, No 4, pp. 392-403, Aug. 2001.

[16] D. Heyman, *"Some issues in performance modeling of data teletraffic"*, Performance Evaluation, Vol. 34, pp. 227-247, 1998.

[17] D. P. Heyman and T. V. Lakshman, *"Long Range Dependence and queueing effects for VBR video"*, In 'Self-similar network traffic and performance evaluation', edited by K. Park and W. Willinger, J. Wiley & Sons, 2000.

[18] A. K. Jena, A. Popescu and P. Pruthi, *"Modeling and analysis of HTTP traffic"*, Proc. of ITC Spec. Seminar on IP Traffic Modeling, Measurement and Management, Sept. 2000.

[19] W. Leland, M. Taqqu, W. Willinger and D. Wilson, *"On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version)"*, IEEE/ ACM Trans. on Networking, Vol. 2, No 1, pp. 1-15, 1994.

[20] B. Mah, *"An empirical model of HTTP network traffic"*, Proc. of INFOCOM '97, pp. 592-600, Apr. 1997.

[21] S. McCreary and K. C. Claffy, *"Trends in Wide Area IP traffic patterns : A view from Ames Internet Exchange"*, Proc. of ITC Spec. Seminar on IP Traffic Modeling, Measurement and Management, Sept. 2000 (see also CAIDA Technical Report http://www.caida.org/outreach/papers/2000/AIX0005/).

[22] S. Molnar and T. D. Dang, *"Scaling analysis of IP traffic components"*, Proc. of ITC Spec. Seminar on IP Traffic Modeling, Measurement and Management, Sept. 2000.

[23] M. Nabe, M. Murata and H. Miyahara, *"Analysis and modeling of World Wide Web traffic for capacity dimensioning of Internet access lines"*, Performance Evaluation, Vol. 34, pp. 249-271, 1998.

[24] C. J. Nuzman, I. Saniee, W. Sweldens and A. Weiss, *"A compound model for TCP connection arrivals"*, Proc. of ITC Spec. Seminar on IP Traffic Modeling, Measurement and Management, Sept. 2000.

[25] P. Olivier and N. Benameur, *"Flow level IP traffic characterization"*, Proc. of ITC '17, Moreira de Souza, Fonseca and de Souza e Silva (eds.), Elsevier, Dec. 2001.

[26] K. Park, G. Kim and M. Crovella, *"On the relationship between file sizes, transport protocols, and self-similar network traffic"*, Proc. of IEEE ICNP, 1996.

[27] K. Park and W. Willinger, *"Self-similar network traffic : an overview"*, In 'Self-similar network traffic and performance evaluation', edited by K. Park and W. Willinger, J. Wiley & Sons, 2000.

[28] V. Paxson, *"Growth trends in wide-area TCP connections"*, IEEE Network, Vol. 8, No 4, pp. 8-17, July/Aug. 1994.

[29] V. Paxson, *"Empirically derived analytical models of wide-area TCP connections"*, IEEE/ACM Trans. on Networking, Vol. 2, No 4, Aug. 1994.

[30] V. Paxson and S. Floyd, *"Wide area traffic : The failure of Poisson modeling"*, IEEE/ACM Trans. on Networking, Vol. 3, pp. 226-244, 1995.

[31] J. Roberts, *"Engineering for Quality of Service"*, In 'Self-similar network traffic and performance evaluation', edited by K. Park and W. Willinger, J. Wiley & Sons, 2000.

[32] J. Roberts, U. Mocci and J. Virtamo (editors), *"Broadband Network Teletraffic (Final report of COST 242)"*, LNCS 1155, Springer Verlag, 1996.

[33] B. Ryu, D. Cheney and H-W Braun, *"Internet flow characterization - Adaptive Timeout and statistical modeling"*, Proc. of Passive and Active Measurement Workshop, Apr. 2001.

[34] K. Thompson, G. Miller and M. Wilder, *"Wide-area internet traffic patterns and characteristics"*, IEEE Network, Vol. 11, No 6, Nov./Dec. 1997.

[35] Ph. Tran-Gia and N. Vicari (editors), *"Impacts of new services on the architecture and performance of broadband networks (Final report of COST 257)"*, Chapter on 'Traffic measurement and data analysis', 2000.

[36] N. Vicari and S. Köhler, *"Measuring Internet user traffic behavior dependent on access speed"*, Proc. of ITC Spec. Seminar on IP Traffic Modeling, Measurement and Management, Sept. 2000.

[37] W. Willinger, M. S. Taqqu and A. Erramilli, *"A bibliographical guide to self-similar traffic and performance modeling for modern high-speed networks"*, In F. P. Kelly, S. Zachary and I. Ziedins, eds., 'Stochastic networks : theory and applications', Clarendon Press, Oxford, UK, 1996.

[38] 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"*, IEEE/ACM Trans. on Networking, Vol. 5, pp. 71-86, 1997.