

# Métrologie de la qualité de service

Philippe Owezarski

LAAS-CNRS, 7 Avenue du Colonel Roche, 31077 Toulouse cedex 4  
e-mail : owe@laas.fr

---

*RESUME. Cet article a pour objectif de faire un tour d'horizon du domaine de la métrologie, en présentant les différentes techniques de mesure, illustrées par les projets passés et actuels les plus significatifs et leurs principales contributions. Ces techniques montrent comment la QoS peut être mesurée dans l'Internet, pour un flux, ou pour le trafic global et cela selon les deux points de vue possibles qui sont ceux de l'utilisateur et de l'opérateur. Ensuite, en exploitant les premiers résultats du projet METROPOLIS, cet article se propose de caractériser le trafic global de l'Internet et ses propriétés, de les analyser, et d'évaluer en conséquence les performances du réseau et son aptitude à offrir des services réguliers et, pourquoi pas, garantis. Il sera en particulier montré que le trafic actuel de l'Internet est très instable, présentant des phénomènes marqués portant sur de longues périodes, et que ces caractéristiques sont préjudiciables au niveau de performance du réseau et à la QoS qu'il offre. En conclusion, cet article montrera comment cette analyse du trafic Internet influence les recherches qui sont en cours afin de permettre d'optimiser les performances et la QoS du réseau.*

*MOTS-CLES : Métrologie, Qualité de Service, caractérisation, trafic Internet*

---

## 1. Introduction

Le réseau Internet subit depuis quelques années une explosion considérable en terme d'augmentation du nombre d'utilisateurs et de la quantité du trafic à transporter, en même temps qu'une mutation au niveau de ses usages. De réseau de transmission de données, l'Internet est de plus en plus utilisé comme un réseau universel devant offrir, en plus des services de transmission de données informatiques, des services de transmission audio et vidéo, de téléphonie, etc. qui étaient des services plutôt offerts par les réseaux hertzien de radiodiffusion ou par le réseau téléphonique. De fait, il faut aussi opérer une mutation technologique du réseau de façon à le rendre capable de transporter avec des Qualités de Services (QoS) adéquates les différents types d'informations proposées par toutes les applications utilisant l'Internet. Cette mutation technologique est encore aujourd'hui problématique, et il est très difficile de trouver de nouvelles architectures et protocoles capables d'offrir des mécanismes universels pour la gestion de la QoS dans l'Internet. Les premières tentatives se sont soldées par des échecs, notamment par un manque de connaissance globale de tous les protocoles et mécanismes de l'architecture TCP/IP, ainsi qu'un manque de connaissance des comportements des utilisateurs et des trafics qu'ils génèrent.

Par conséquence, la métrologie, ou science des mesures, est une activité en plein essors dans le domaine des réseaux IP. Les opérateurs réseaux utilisent des techniques de métrologie depuis la mise en place des premiers réseaux de communication, mais cette discipline n'a jusqu'à présent jamais été utilisée comme elle aurait dû l'être. Pour l'instant, les opérateurs utilisaient la métrologie, souvent passive et en ligne (à partir de SNMP et de ses MIB), pour faire de la supervision du réseau et du trafic qui circulait dessus. Avec l'essor du réseau Internet, la métrologie devient la pierre angulaire de nombreuses activités autant au niveau de la recherche en réseau que de la conception, la mise en place, la gestion et l'opération des réseaux. Ainsi, la métrologie recouvre maintenant des domaines d'étude comme :

- La classification des flux et du trafic, soit pour pouvoir trier les flux en fonction de la qualité de service (QoS) qu'ils requièrent, soit, par rapport à des problèmes de routage, pour pouvoir les encapsuler dans des « trunks » de trafic qui empruntent tous la même route.
- Le dimensionnement des réseaux qui permet de mettre en place des capacités suffisantes pour assurer en permanence un service adéquat à tous les utilisateurs.
- L'analyse des mécanismes du réseau, et ce autant au niveaux des mécanismes des routeurs, les algorithmes de routages et les mécanismes du transport assurant le contrôle de flux, d'erreur, de congestion, etc. Cette analyse permet de comprendre comment tous ces mécanismes interagissent entre eux, et de régler de façon fine les différents paramètres mis en jeu. Au niveau de la recherche, les résultats d'analyse permettent la conception de nouveaux mécanismes et protocoles.
- La modélisation de trafic qui permet de représenter et comprendre le trafic actuel, et ensuite d'adapter les paramètres du réseau aux caractéristiques du trafic.

- La tarification et les SLA qui permettent de définir des coûts de service en relation avec les ressources consommées, par exemple. A noter que les mesures sur le trafic sont essentielles à double titre : d'abord pour permettre à l'opérateur de facturer les services offerts aux utilisateurs, mais aussi pour permettre aux utilisateurs que le SLA est bien rempli.
- Etc.

En fait, s'il est un problème qui ne se dément pas, c'est bien celui de la qualité de service dans l'Internet, qui doit servir de support pour toutes les applications classiques de l'Internet (mail, web, FTP, P2P, etc.) mais aussi et de plus en plus pour des applications plus exigeantes par rapport à des contraintes de temps (et appelées temps-réel souples) comme la téléphonie, la visioconférence, etc. et même parfois des applications comme du contrôle /commande... Toutefois, le terme QoS peut avoir différentes connotations selon la personne qui l'emploie. Pour simplifier un peu la problématique, on peut considérer qu'il existe deux points de vue principaux :

- **Le point de vue des applications** (ou des utilisateurs) : chaque application a des besoins en termes de débit, délai, gigue, fiabilité, etc. Ces besoins sont naturellement différents d'une application à l'autre, et chaque application souhaiterait pouvoir bénéficier d'un service de communication spécifiquement adapté à ses besoins.
- **Le point de vue des opérateurs** dont les objectifs sont d'optimiser l'utilisation des ressources de l'infrastructure de communication (et ainsi de maximiser leurs gains), de limiter les pertes et les délais, et de pouvoir facturer de façon juste et cohérente les services rendus aux utilisateurs.

Cet article se propose donc de faire une introduction à la métrologie, aux différentes techniques existantes en détaillant les aptitudes de chacune d'elles dans les différents domaines énoncés ci-dessus. Il se propose également de dresser une liste des principales expériences en métrologie qui ont été conduites de par le monde. Enfin, en utilisant les premiers résultats du projet de métrologie français METROPOLIS<sup>1</sup> labellisé en octobre 2001 par le RNRT – cet article se propose de donner quelques premiers résultats des mesures effectuées dans l'Internet, qui se focalisent sur la QoS offerte et les performances de l'Internet.

## 2. Les techniques de mesures

Deux classes de mesures existent : les mesures actives et les mesures passives, décomposées elles-mêmes en mesures passives en ligne et hors ligne. Chacune de ces deux classes permet de mieux comprendre le comportement à la fois du réseau (observation passive des taux de perte, des délais, etc.) et des applications (réaction en temps réel des applications aux pertes dans le réseau, du taux de transmission utile, etc.) et de mettre en lumière les interactions entre les applications et le réseau.

### 2.1. Les mesures actives

Le principe des mesures actives consiste à générer du trafic dans le réseau à étudier et à observer les effets des composants et protocoles – réseaux et transport – sur le trafic : taux de perte, délai, RTT, topologie, etc. Cette première approche possède l'avantage de prendre un positionnement orienté utilisateur. Les mesures actives restent le seul moyen pour un utilisateur de mesurer les paramètres du service dont il pourra bénéficier. Cette approche est exclusivement dédiée à des mesures de performance du réseau. En revanche, l'inconvénient majeur de cette approche est la perturbation introduite par le trafic de mesure qui peut faire évoluer l'état du réseau et ainsi fausser la mesure. De nombreux travaux menés actuellement abordent ce problème en essayant de trouver les profils de trafics de mesures qui minimisent les effets du trafic supplémentaire sur l'état du réseau. C'est par exemple le travail en cours au sein du groupe IPPM<sup>2</sup> de l'IETF<sup>3</sup> [1] [2] [3] [4].

Les mesures actives simples restent tout de même monnaie courante dans l'Internet pour lequel de nombreux outils de test, validation et / ou mesure sont disponibles. Parmi eux, on peut citer les très célèbres *ping* et *traceroute*. *Ping* permet de vérifier qu'un chemin est valide entre deux stations et de mesurer certains paramètres comme le RTT<sup>4</sup> ou le taux de perte. *Traceroute* permet de voir apparaître l'ensemble des routeurs traversés par les paquets émis jusqu'à leur destination et donne une indication sur les temps de passage en chacun de ces nœuds.

---

<sup>1</sup> METROPOLIS : Metrologie pour l'Internet et ses Services

<sup>2</sup> IPPM : IP Performance Metrics

<sup>3</sup> IETF : Internet Engineering Task Force

<sup>4</sup> RTT : Round Trip Time

L'un des projets les plus simples en théorie était le projet *Surveyor* [5] de la NSF<sup>5</sup> aux Etats-Unis qui reposait sur l'utilisation de *ping*, amélioré par la présence d'horloges GPS<sup>6</sup> sur les machines de mesure. L'objectif de ce projet était donc d'étudier les délais de bout en bout et les pertes dans l'Internet.

Plusieurs projets ont actuellement pour sujet les mesures actives.

- Le projet NIMI<sup>7</sup> (initié par Vern Paxson aux Etats-Unis) [37] a pour objectif le déploiement d'une infrastructure nationale (au niveau des Etats-Unis) de mesures actives. Cette infrastructure est flexible et permet le recueil de diverses mesures actives. Cette infrastructure a été utilisée durant les deux ou trois années passées pour plusieurs campagnes de mesures, dont la détermination d'une matrice de distance dans Internet. L'infrastructure NIMI s'est aussi étendue en Europe, notamment en Suisse.
- En Europe, le projet RIPE (Réseaux IP Européens) [38], tente de déployer une infrastructure semblable à l'infrastructure de NIMI en Europe. Par rapport à NIMI, RIPE fournit des services à des clients, en plus des services classiques d'accès à des statistiques globales d'utilisation des liens du réseau Européen de la recherche surveillés. A noter que des boîtes de mesure du projet RIPE ont été déployées en France par les partenaires du projet METROPOLIS pour mesurer les performances des réseaux VTHD<sup>8</sup> et RENATER, avec de plus un projet d'extension du nombre de sondes de métrologie passive à installer sur RENATER pour permettre de définir les SLAs de ce réseau et les proposer aux utilisateurs.
- Le projet MINC<sup>9</sup> [6] [7] est un client du projet NIMI. Il utilise la diffusion de sondes actives par le biais du multicast pour inférer sur la structure interne du réseau et les propriétés sur tous les liens d'interconnexion ainsi traversés. En allant plus loin, c'est le sujet de la tomographie qui est au centre de ce projet qui se focalise sur certains aspects dynamiques du trafic, comme les propriétés du routage, les pertes et les délais. Toutefois, comme le multicast n'est pas un service disponible partout, et comme le trafic dans l'Internet n'est pas symétrique (cf. section 4), l'intérêt du multicast dans cette tâche n'est concrètement pas évident. Aussi, le projet UINC (Unicast INC) a vu le jour et tente de reproduire le travail de MINC en unicast.
- Le projet *Netsizer* [8] de Telcordia (ex Bellcore) a pour objectifs de mesurer la croissance de l'Internet, les points durs de congestion, les délais, *etc.* Pour cela, depuis une ensemble de stations situées chez Telcordia, un programme teste la présence sur le réseau de toutes les adresses IP existantes et met à jour suivant les résultats une carte de l'Internet. Un des gros problèmes de ce projet reste ainsi un problème de représentation.
- Le projet américain AMP<sup>10</sup> de NLANR<sup>11</sup> [9] [10] est l'un des plus récent à avoir démarré. De ce fait, peu de résultats sont aujourd'hui disponibles, mais l'objectif de ce projet est de faire de « l'active probing ».

## 2.2. Les mesures passives

Les mesures passives sont apparues beaucoup plus récemment que les mesures actives car elles nécessitent des systèmes de capture ou d'analyse du trafic en transit relativement avancés, et développés très récemment. Le principe des mesures passives est de regarder le trafic et d'étudier ses propriétés en un ou plusieurs points du réseau. L'avantage des mesures passives est qu'elles ne sont absolument pas intrusives et ne changent rien à l'état du réseau. De plus, elles permettent des analyses très avancées. En revanche, il est très difficile de déterminer le service qui pourra être offert à un client en fonction des informations obtenues en métrologie passive. Les systèmes de métrologie, actifs comme passifs, peuvent aussi se différencier en fonction du mode d'analyse des traces. Ainsi, le système peut faire une analyse en-ligne ou hors-ligne. Dans le cadre d'une analyse en-ligne, toute l'analyse doit être effectuée dans le laps de temps correspondant au passage du paquet dans la sonde de mesure. Une telle approche, temps-réel, permet de faire des analyses sur de très longues périodes et donc d'avoir des statistiques significatives. Par contre, la complexité maximale pour ces analyses reste très limitée à cause du faible temps de calcul autorisé. Une analyse hors-ligne par contre oblige la sonde à sauvegarder une trace du trafic pour analyse ultérieure. Une telle approche demande ainsi d'énormes ressources ce qui représente une limitation pour des traces de très longues durées. Par contre, une analyse hors-ligne permet des analyses extrêmement complètes et difficiles, permettant d'étudier des propriétés non triviales du trafic. De plus, comme les traces sont sauvegardées, il est possible de faire plusieurs analyses différentes sur les traces, et de corrélérer les résultats obtenus pour une meilleure compréhension des mécanismes complexes du réseau.

<sup>5</sup> NSF : National Science Foundation

<sup>6</sup> GPS : General Positioning System

<sup>7</sup> NIMI : National Internet Measurement Infrastructure

<sup>8</sup> VTHD: Vraiment Très Haut Débit

<sup>9</sup> MINC : Multicast-based Inference of Network-internal Characteristics

<sup>10</sup> AMP : Active Measurement Project

<sup>11</sup> NLANR : National Laboratory for Applied Network Research

L'endroit idéal pour positionner des sondes de mesures passives est indéniablement dans les routeurs. CISCO a ainsi développé le module *Netflow* [11] dans ces routeurs, qui scrute le trafic en transit, et génère régulièrement des informations statistiques sur ce trafic. *Netflow* a ainsi été utilisé dans de nombreux projets. L'expérience montre toutefois que les performances de netflow restent limitées (code écrit en Java et interprété), et que l'influence sur les performances du routeurs sont non négligeables.

Toutefois, le premier projet connu – le projet AT&T *Netscope* [12] – a débuté il y a environ 7 ans et repose sur ce système *Netflow* de CISCO. Ce projet de mesure passive en ligne a pour but d'étudier les relations entre le trafic transitant en chaque nœud du réseau et les tables de routage des routeurs. L'objectif final est d'utiliser ces résultats pour améliorer les politiques et décisions de routage, afin d'équilibrer au mieux la charge dans les différents liens du réseau, et ainsi améliorer la qualité de service perçue par chaque utilisateur. C'est de la tomographie afin de trouver ensuite des politiques d'ingénierie des trafics adéquates.

Vern Paxson et al. d'ACIRI ont également conduit un projet de mesure passive en ligne dont l'objectif était de proposer un modèle pour les arrivées de flux et de paquets sur les liens de l'Internet. Ce travail [13] achevé depuis 1995 a été et reste une référence dans le milieu de la recherche Internet. Cependant, aujourd'hui, avec l'apparition de nouvelles applications qui n'existaient pas à l'époque et avec les changements dans la façon d'utiliser l'Internet, ce travail doit être reconduit. Les résultats ne sont certainement plus valables aujourd'hui, et il n'existe aucune technique sûre d'extrapolation de ces résultats pour essayer de modéliser le trafic d'aujourd'hui.

De façon plus générale, le laboratoire CAIDA<sup>12</sup> [14] à San Diego, Californie, est spécialisé dans l'étude du trafic Internet et mène un projet dont l'objectif est d'étudier sur le long terme l'évolution du trafic, avec l'apparition des nouvelles applications comme les jeux, le commerce électronique, etc. D'autre part, ce projet étudie aussi les variations en fonction du moment de la journée, du jour de la semaine, de la période de l'année, etc [15] [16]. Pour ce faire, le système de métrologie repose sur les modules OC3MON [17] et OC12MON qui permettent de traiter le trafic de liens IP/ATM dont les capacités respectent respectivement les normes OC3 (155 Mbps) et OC12 (622 Mbps). D'autre part, pour l'analyse statistique, CAIDA a développé la suite logicielle *CoralReef* [18] [19] qui est complémentaire des systèmes OCxMON. D'autres études sont en cours, notamment sur les problèmes de représentation de l'Internet [20], ou d'étude des délais. Pour plus d'information, le lecteur pourra consulter [14].

A noter que les systèmes OCxMON sont aussi utilisés par Worldcom pour faire de la métrologie sur le réseau vBNS [21].

SPRINT a démarré il y a presque 4 ans un des projets les plus ambitieux du moment basé sur des mesures actives hors ligne [22]. Ainsi, Sprint enregistre des traces complètes de tous les entêtes de tous les paquets qui transitent en certains point de son réseau IP. Cette granularité microscopique permet d'approfondir les analyses que l'on peut faire dans la compréhension des interactions qui existent entre tous les flux, les mécanismes des routeurs, etc. A noter que le système IPMON de Sprint, décrit plus en détail dans la suite, repose sur la carte DAG [23] conçue par l'université de Waikato en Nouvelle Zélande et qui se charge d'extraire les entêtes des paquets, de les estampiller suivant une horloge GPS [24] et de les stocker sur un disque dur [25].

### ***Le projet METROPOLIS***

Même si la métrologie bénéficie d'un engouement important en France avec de nombreuses équipes travaillant sur ses thèmes, peu d'efforts fédérés existaient, en France ou en Europe.

Pour combler cette lacune, un projet de métrologie fédérant les efforts de quelques équipes de la communauté réseau en France a été avalisé par le RNRT et a débuté en Octobre 2001. Les partenaires de ce projet sont : le LAAS, le LIP6, France Télécom R&D, l'INRIA, le GET, Eurécom et RENATER.

Les thèmes d'études qui sont abordés concernent :

- la classification du trafic et le dimensionnement du réseau
- l'analyse du réseau (protocoles, routeurs)
- la modélisation du trafic et de ses propriétés
- la définition de procédure de tarification et de mise en place de SLA

---

<sup>12</sup> CAIDA : Cooperative Association for Internet Data Analysis

Le premier point fort de ce projet par rapport aux projets étrangers concerne l'utilisation des deux approches actives et passives de métrologie, ce qui permettra de corrélérer ces deux types de mesures. En particulier, il sera possible d'évaluer les perturbations induites par un réseau réel sur un trafic dont le profil est connu. Cette corrélation devrait apporter un plus indéniable par rapport aux projets en cours actuellement qui ne peuvent pas aller aussi loin sans cette combinaison.

Plusieurs types de sondes ont été déployées dans le cadre de METROPOLIS. Les sondes passives sont de 3 types :

- des sondes DAG ;
- des sondes QoS MOS qui se placent en rupture sur un lien et capture des informations pré-programmées par un chercheur ou l'administrateur du réseau ;
- des sondes IPANEMA dont le fonctionnement est assez similaire à celui des sondes QoS MOS
- Les sondes actives déployées sont aussi de 3 types :
  - des sondes RIPE ;
  - des sondes NIMI ;
  - des sondes SATURNE qui ont été conçue par l'ENST Bretagne pour l'évaluation des performances du réseau VTHD. Ces sondes sont donc conçues spécifiquement pour des réseaux à très hauts débits.

Ces sondes sont aujourd'hui installées, mais de nouveaux types de sondes pourront faire leur apparition en fonction des nouveaux besoins qui ne manqueront pas d'apparaître au cours du projet.

Enfin, la seconde grande force de ce projet se situe dans la diversité des réseaux sur lesquels sont effectuées les mesures. En effet, 3 réseaux différents sont étudiés :

- un réseau expérimental avec le réseau VTHD ;
- un réseau public opérationnel avec le réseau Renater ;
- un réseau commercial : les plaques ADSL de France télécom.

### 3. QoS et performance de l'Internet

#### 3.1. Classification des flux

Caractériser le trafic Internet est une activité extrêmement difficile de nos jours. Le modéliser l'est encore plus. En effet, l'Internet est aujourd'hui un réseau multi-services dont l'objectif est de transporter un grand nombre de types de trafic possédant des caractéristiques différentes. De façon grossière, on dénombre deux grandes classes de trafic :

- Le trafic de type « **stream** », dont la caractéristique principale – le débit – doit être maintenu assez régulier. Ceci implique donc de préserver une certaine intégrité sur les profils temporels de ces trafics « orientés connexion », et donc de maintenir à un niveau régulier les délais (et ses variations : la gigue), les taux de pertes (qui doivent rester en général relativement bas), etc. Ces trafics sont caractéristiques d'applications comme la téléphonie IP, la visioconférence ou le téléchargement de séquences audio ou vidéo en ligne.
- Le trafic « **élastique** » dont le débit peut s'adapter à des contraintes extérieures (bande passante disponible 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 tels que des pages Web, des messages électroniques ou des transferts de fichiers, etc.

La caractérisation du trafic « stream » est assez aisée car directement inspirée des travaux effectués dans le cadre de la téléphonie. Par contre, caractériser le trafic élastique, et donc le trafic Internet, qui est composé en large majorité de trafic élastique (aux alentours de 90 à 95% actuellement et même parfois plus [26]), n'est pas aussi aisée. En effet, même si les modèles issus du monde des télécommunications pour caractériser le trafic Internet sont encore utilisés, il est clair aujourd'hui que les débits, délais ou taux de pertes constants ne suffisent pas à caractériser et/ou modéliser le trafic élastique – et donc le trafic Internet – et tous ses aspects dynamiques.

D'autre part, il existe plusieurs niveaux de modélisation du trafic qui correspondent à des entités réelles et différentes du trafic : les *paquets* qui correspondent aux unités élémentaires de traitement par les couches réseau, les *flux* qui sont des séries consécutives de paquets ayant des caractéristiques communes, et souvent dépendantes des applications ou des protocoles de transport (comme TCP) et les *sessions* définies plus ou moins aléatoirement de façon à se rapprocher au plus près des comportements des utilisateurs ou de leurs applications (par exemple).

La modélisation du trafic est également complexe de par les mécanismes de superposition des services de natures très différentes, de dispositifs de contrôle (notamment ceux de TCP) aux comportements chaotiques [27],

engendrant des processus d'apparition très complexes, complexité encore accrue par le nombre d'utilisateurs de tous les services disponibles.

Etant donnée la difficulté de travailler simultanément sur les 3 niveaux (paquets, flux, sessions), la suite de ce travail ne considère que le niveau paquet, et se concentrera principalement sur le trafic TCP, dominant dans l'Internet.

D'autre part, il existe plusieurs approches d'analyse du trafic :

- une approche microscopique qui consiste à caractériser et analyser les flux individuellement ;
- une approche macroscopique qui consiste à caractériser et analyser des agrégats de flux, voire même tout le trafic qui passe sur un lien dans son ensemble.

La suite de cette section se focalisera donc sur les aspect microscopiques des flux (voir 3.2) alors que la partie 3.3 s'attardera sur les propriétés macroscopiques du trafic.

### 3.2. Paramètres de QoS microscopiques

L'analyse microscopique d'un trafic consiste dans le cadre de l'Internet à regarder individuellement et analyser de petits flux de l'Internet, souvent des demi-connexions TCP qui sont l'entité de base protocolaire du trafic sur un lien (avec une analyse mono-directionnelle). Ce point de vue représente plus particulièrement le point de vue utilisateur de par la situation aux extrémités du réseau de la source et de la destination.

Dans une telle configuration, les paramètres « traditionnels » de QoS utilisateur évaluables sont les suivants :

- **délai** : c'est la quantité maximale d'informations que peut transmettre le lien par unité de temps.
- **gigue** : il s'agit de la variation du délai de bout en bout.
- **RTT**<sup>13</sup> : temps nécessaire à un paquet pour faire un aller-retour entre l'hôte d'émission et l'hôte de réception.
- **taux de perte** : c'est le nombre de paquets d'informations perdus par unité de temps lors d'une transmission.

Il existe d'autres paramètres plus « spécifiques » de QoS lorsqu'on s'intéresse à la notion de flux utilisateurs (qu'ils soient de niveau transport ou applicatif) :

- **débit moyen** : il s'agit du débit moyen qu'expérimente le flux de données sur la totalité du temps nécessaire à son émission. Ce paramètre donne une information globale sur l'état du service qu'aura expérimenté le flux au cours de sa transmission.
- **variabilité** : il s'agit des écarts de débit mesurable pendant la durée nécessaire à la transmission d'un flux de données. Ce paramètre donne une information plus précise sur l'état du service. En effet, une variabilité forte traduira un service peu stable dans le temps et inversement.

Ces paramètres sont relativement classiques et connus dans le cadre des mesures de performances et / ou de QoS des applications multimédias qui sont des applications temps-réel souples, mais pose souvent problème lors de leur mesure, notamment au niveau temporel car il est très difficile de se référer à une base de temps commune dans un système aussi distribué et aussi vaste que l'Internet. La contribution dans ce domaine des nouveaux systèmes de mesure consiste à établir cette base de temps commune par l'utilisation du service GPS qui permet à chaque machine d'être synchronisée avec le temps de référence universel.

### 3.3. Caractérisation macroscopique du trafic Internet et de ses paramètres de QoS et de performance

D'un point de vue macroscopique maintenant, c'est-à-dire en regardant de gros flux de l'Internet, voire, tout le trafic qui passe sur un lien globalement, les travaux de ces dernières années sur la modélisation du trafic des paquets dans l'Internet ont montré qu'un trait important concernant la nature du trafic Internet 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 ces trois notions voisines). L'auto-similarité du trafic de données a été mise en évidence dans [28] et souvent confirmée depuis : la structure des variations d'amplitude du signal analysé (par exemple le nombre d'octets ou de paquets transférés par unité de temps ou la série des durées inter-paquets) 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, pour lequel les variations d'amplitude sont filtrées au fur et à mesure que l'on augmente la taille de la fenêtre d'intégration. Cette auto-similarité, voire cette multi-fractalité, et son extrême variabilité à toutes les échelles de temps est caractéristique du principe même de la commutation de paquets qui induit des transmissions en rafales [29] [30]. Ce

---

<sup>13</sup> RTT : Round Trip Time

comportement se caractérise notamment par une décroissance lente<sup>14</sup>, par exemple sous forme de loi de puissance, sous exponentielle ou à queue lourde [31], de la fonction d'autocorrélation du nombre de paquets transférés par unité de temps (typiquement 100 ms) : les processus auto-similaires sont des cas particuliers des processus à dépendance à long terme (LRD).

Même pour les applications « stream », la caractéristique de LRD se retrouve dans les transferts de séquences vidéo à débit variable (VBR selon la terminologie ATM) [32], probablement due à la variabilité des paramètres de transmission liés au codage des trames (MPEG, par exemple), à la dynamique des images, etc.

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 [33]. 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, 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) ; tandis que les caractéristiques multi-fractales aux échelles de temps inférieures seraient provoquées par les mécanismes de contrôle de congestion du protocole TCP [34] [35]. C'est aussi la conclusion à laquelle [36] est arrivé lorsqu'il a analysé le trafic HTTP (dominant dans le trafic Internet). De la même manière, [28] a montré que le trafic Internet peut être représenté par un processus ON/OFF dont la distribution des durées des périodes ON est à queue lourde.

Plus généralement, toutes ces caractéristiques ont effectivement un impact sur la caractéristique très oscillante globale du trafic, mais il faut les considérer toutes conjointement pour expliquer comment elles s'entretiennent mutuellement et pourquoi les oscillations étaient le résultat de la présence de LRD dans le trafic [43]. Pour expliquer ces phénomènes, le point de départ est constitué des mécanismes de contrôle de congestion de TCP qui est le protocole dominant dans l'Internet [42]. Parmi tous les mécanismes de TCP, il est clair que son système de contrôle en boucle fermée introduit de la dépendance à court terme dans le trafic étant donné que les acquittements dépendent de la réception d'un paquet, et que tous les autres paquets de ce flux dépendent de cet acquittement. De la même façon, les deux mécanismes de TCP (slow-start et congestion avoidance), introduisent de la dépendance entre les paquets de différentes fenêtres de contrôle de congestion. Et naturellement, la notion d'émission en rafale des sources TCP ajoutée à la LRD permettent d'expliquer la présence d'oscillations qui se répètent à toutes les échelles de temps dans le trafic global. En généralisant ces observations, nous pouvons affirmer que tous les paquets d'un flux sont dépendants les uns des autres. De plus, avec l'augmentation des capacités de l'Internet permettant aux utilisateurs d'échanger des fichiers de plus en plus volumineux, comme des données musicales ou vidéo par exemple, il est clair que l'échelle du phénomène de LRD augmente, ce qui explique pourquoi l'amplitude des oscillations mesurées dans l'Internet, même avec une granularité d'observation élevée, est si importante.

En effet, les phénomènes de dépendance de TCP se propageant dans le trafic par l'intermédiaire des flux, l'allongement des flux observable avec l'arrivée des applications P2P, augmente aussi la portée des dépendances qui se retrouvent à très long terme. Une oscillation à la date  $t$  provoque ainsi d'autres oscillations à des dates pouvant être éloignées de  $t$ . Une congestion (sporadique) induite par une forte oscillation sur un flux peut ainsi ne pas être complètement résorbée plusieurs heures après (dans le cas du téléchargement d'un film par exemple), c'est à dire que ce flux qui continuera à proposer au réseau des pics de trafic dépendants de cette première oscillation, engendrera de nouvelles congestions sporadiques<sup>15</sup>. De plus, il est clair que les longs flux, à cause de leur longue existence dans le réseau, et par l'importance des capacités des réseaux la plupart du temps très surdimensionnés, ont le temps d'atteindre des valeurs élevées de la fenêtre de contrôle de congestion (CWND). Aussi, une perte va entraîner une forte baisse, suivie d'une forte hausse du débit du flux. Les nouveaux usages de l'Internet (P2P notamment) qui entraînent la transmission de fichiers de plus en plus gros favorisent l'émergence d'oscillations de très fortes amplitudes et dépendantes sur de très longues périodes<sup>16</sup>.

<sup>14</sup> 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.

<sup>15</sup> Naturellement, avec les nouvelles capacités hauts débits des réseaux et le choix des opérateurs de sur-dimensionner les capacités du réseau pour améliorer la qualité de service, les congestions sur de longues durées n'existent plus. Par contre, des congestions sporadiques continuent à exister dans le réseau, notamment dans le réseau d'accès, à cause des fortes oscillations du trafic.

<sup>16</sup> En effet, les résultats métrologiques sur la caractérisation du trafic depuis l'an 2000 ont montré que l'Internet qui était alors presque exclusivement utilisé pour de la navigation web, est aujourd'hui de plus en plus utilisé par des applications P2P pour des échanges de fichiers, souvent de tailles importantes (fichier audio, films, etc.). Aussi, le trafic Internet en 2000 se caractérisait par la transmission de flux courts, avec seulement un très faible pourcentage de flux de tailles plus importantes (environ 2 % des flux faisaient plus 100 Ko). Avec l'arrivée des applications P2P, la proportion de gros flux a considérablement augmenté, de même que la taille moyenne des flux transmis. De fait, le trafic Internet présente aujourd'hui

Bien sûr, les oscillations sont très dangereuses pour l'utilisation globale des ressources du réseau étant donné que la capacité consommée par un flux après une perte, par exemple, ne peut pas être immédiatement utilisée par les autres flux : ceci correspond à un gaspillage de ressources, et évidemment entraîne une diminution de la QoS globale du trafic et du réseau. En effet, plus l'amplitude des oscillations est importante, plus les performances globales dans le réseau sont faibles [41]. De plus, l'aspect dépendance à long terme du trafic impacte surtout les oscillations dont la portée est longue, comme c'est le cas sur la figure 1 pour les oscillations basses fréquences (BF). La figure 1 représente une courbe journalière de trafic sur laquelle sont mis en avant les phénomènes oscillatoires sur des périodes courtes et sur des périodes longues (la journée). Si des échelles différentes étaient choisies, il apparaîtrait le même phénomène oscillatoire.

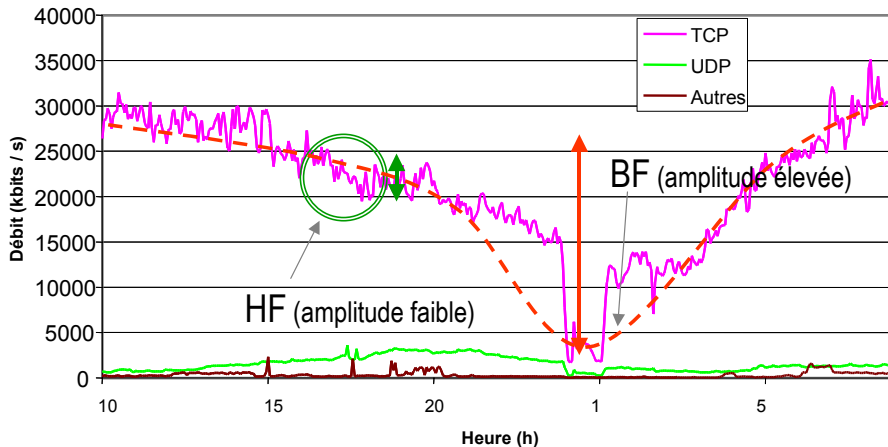


Figure 1. Evolution du trafic Internet au cours du temps (24 heures)

#### 4. Conclusion

Cet article a présenté les différentes techniques de métrologie permettant d'évaluer les performances et / ou la QoS du trafic, et ce à tous les niveaux de granularité, allant de la mesure de la QoS microscopique d'un flux individuel, jusqu'à un niveau macroscopique pour la mesure de la performance globale d'un réseau en fonction des caractéristiques du trafic global qui transite dessus. De plus, ces techniques de mesure ont été découpées en deux classes, actives et passives, qui offrent plus spécifiquement des visions orientées respectivement utilisateur et opérateur. La métrologie est déjà un outil essentiel pour la recherche autour de l'Internet, mais plus généralement elle présente de très nombreux intérêts pour mesurer les performances et la QoS de tous types de réseaux dans tous types de domaines, et notamment pour les réseaux et applications temps-réel (même si ici, dans le cadre de l'Internet, cet article s'est focalisé sur les aspects applications multimédias, qualifiées aussi de temps-réel souple, et sur les performances globale du réseau face au trafic actuel de l'Internet).

En particulier, les premiers résultats de caractérisation et d'analyse du trafic Internet ont été présentés. Ces résultats montrent que le trafic présente des propriétés d'auto-similarité et de dépendance à long terme qui donnent, à cause des mécanismes de contrôle de congestion de TCP, une nature très oscillante. Cette caractéristique est naturellement extrêmement préjudiciable pour obtenir de bons niveaux de performance et de QoS, et il est à noter qu'avec l'augmentation des capacités disponibles et l'augmentation du nombre de gros flux dans l'Internet (appelés aussi « éléphants » et qui sont dus à la multiplication des transferts de fichiers musicaux et de films, par l'intermédiaire des nouvelles applications P2P notamment) le phénomène oscillatoire ne cesse de s'aggraver.

De nombreux travaux actuels portent d'ailleurs sur la réduction de ces oscillations, c'est-à-dire de la dépendance à long terme. Pour cela, de nombreux travaux sont menés sur des améliorations du protocole TCP, afin que ce dernier introduise moins de dépendance entre les pertes, et un comportement moins agressif en régulant et lissant au maximum son trafic en émission. C'est en particulier le cas pour le protocole TFRC qui est en cours de définition à l'IETF et dont l'objectif est d'offrir un service « TCP friendly » et qui surtout réduit les variations brutales en émission des sources de trafic TCP [39].



## 5. Références

- [1] Paxson V., Almes G., Mahdavi J., Mathis M., "Framework for IP Performance Metrics", RFC 2330, May 1998
- [2] Almes G., Kalidindi S., Zekauskas M., "A One-way Delay Metric for IPPM", RFC 2679, September 1999
- [3] Almes G., Kalidindi S., Zekauskas M., "A One-way Packet Loss Metric for IPPM", RFC 2680, September 1999
- [4] Almes G., Kalidindi S., Zekauskas M., "A Round-trip Delay Metric for IPPM", RFC 2681, September 1999
- [5] Kalidindi S., Zekauskas M.J., "Surveyor: An infrastructure for Internet performance measurements", Proceedings of INET'99, June 1999
- [6] Adams A., Bu T., Caceres R., Duffield N., Friedman T., Horowitz J., Lo Presti F., Moon S. B., Paxson V., Towsley D., "The Use of End-to-end Multicast Measurements for Characterizing Internal Network Behavior", IEEE Communications, 38(5), May 2000
- [7] Caceres R., Duffield N., Towsley D., Horowitz J., "Multicast-based Inference of Network-internal loss characteristics", IEEE Transactions on Information Theory, vol. 45, no. 7, November 1999
- [8] "Netsizer web site", <http://www.netsizer.com>
- [9] "AMP web site", <http://watt.nlanr.net>
- [10] McGregor T., Braun H.-W., Brown J., "The NLANR network analysis infrastructure", IEEE Communications, vol. 38, no. 5, May 2000
- [11] "NetFlow Services Solutions Guide", <http://www.cisco.com/univercd/cc/td/doc/cisintwk/intsolns/netflsol/>
- [12] Feldmann A., Greenberg A., Lund C., Reingold N., Rexford J., True F., "Deriving traffic demands for operational IP networks: Methodology and Experience", ACM SIGCOMM Conference, Stockholm, 2000
- [13] Paxson V., Floyd S., "Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 3 No. 3, June 1995
- [14] "CAIDA web site", <http://www.caida.org>
- [15] Claffy K.C., Miller G., Thompson K., "The nature of the beast: Recent traffic measurements from an Internet backbone", Proceedings of INET'98, Geneva, Switzerland, July 1998
- [16] McCreary S., Claffy K. C., "Trends in wide area IP traffic patterns", in ITC Specialist Seminar, Monterey, California, May 2000
- [17] Apsidorf J., "OC3MON: Flexible, affordable, high performance statistics collection", Proceedings of INET, June 1997
- [18] "CoralReef website", <http://www.caida.org/tools/measurement/coralreef>
- [19] Keys K., Moore D., Koga R., Lagache E., Tesch M., Claffy K., "The Architecture of the CoralReef: An Internet Traffic Monitoring Software Suite", PAM'2001 (Passive and Active Measurements) workshop, Amsterdam, The Netherlands, April 2001
- [20] Huffaker B., Fomenkov M., Moore D., Claffy K., "Macroscopic Analyses of the Infrastructure: Measurement and Visualization of Internet Connectivity and Performance", PAM'2001 (Passive and Active Measurements) workshop, Amsterdam, The Netherlands, April 2001
- [21] "vBNS web site", <http://www.vbns.net>
- [22] Fraleigh C., Diot C., Moon S., Owezarski P., Papagiannaki D., Tobagi F., "Experiences Monitoring Backbone IP Networks", PAM (Passive and Active Measurements) Workshop, Amsterdam, The Netherlands, April 23-24, 2001
- [23] "Dag 4 SONET network interface", <http://dag.cs.waikato.ac.nz/dag/dag4-arch.html>
- [24] "Dag synchronization and timestamping", [http://dag.cs.waikato.ac.nz/-dag/docs/dagduck\\_v2.1.pdf](http://dag.cs.waikato.ac.nz/-dag/docs/dagduck_v2.1.pdf)
- [25] Cleary J., Donnelly S., Graham I., McGregor A., Pearson M., "Design principles for accurate passive measurement", PAM 2000, Hamilton, New Zealand, April 2000
- [26] Thompson K., Miller G., Wilder M., "Wide-area internet traffic patterns and characteristics", IEEE Network, Vol. 11, n° 6, Nov./Dec. 1997.
- [27] Veres, A., « The Chaotic Nature of TCP Congestion Control », *In proceedings of the INFOCOM conference*, March 2000
- [28] Leland W. E., Taqqu M. S., Willinger W., Wilson D. V., "On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version)," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 2, pp. 1--15, Feb 1994.

- [29] Roberts J., "Engineering for Quality of Service", In "Self-similar network traffic and performance evaluation", edited by K. Park and W. Willinger, J. Wiley & Sons, 2000
- [30] Tran-Gia Ph., Vicari N. (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
- [31] Heyman D., "Some issues in performance modeling of data teletraffic", *Performance Evaluation*, Vol. 34, pp. 227-247, 1998.
- [32] Beran J., Sherman R., Taqqu M. S., Willinger W., 'Long-range dependence in Variable-Bit-Rate video traffic', *IEEE Trans. Comm.*, Vol. 43, n° 2/3/4, pp. 1566-1579, 1995.
- [33] Black U., "TCP/IP and related protocols", McGraw-Hill, 1992.
- [34] Feldmann A., Gilbert A. C., Willinger W., "Data networks as cascades : Explaining the multifractal nature of Internet WAN traffic", *Proc. of ACM SIGCOMM '98*, Aug. 1998.
- [35] Feldmann A., Gilbert A. C., Willinger W., Kurtz T. G., 'The changing nature of network traffic : Scaling phenomena', *Computer Communication Review*, Vol. 28, n° 2, April 1998.
- [36] Crovella M., Bestavros A., "Self-similarity in World Wide Web traffic : Evidence and possible causes", *IEEE/ACM Trans. on Networking*, Vol. 5, n° 6, pp. 835-846, Dec. 1997
- [37] Paxson V., Adams A., Mathis M., "Experiences with NIMI", PAM (Passive and Active Measurements) Workshop, 2000
- [38] "RIPE NCC web site", <http://www.ripe.net>
- [39] Floyd S., Handley M., Padhye J. and Widmer J., "Equation-based congestion control for unicast applications", In *Proc. ACM SIGCOMM*, 14 pages, 2000
- [40] Owezarski P., Andreu D., Fricker C., Salamatian K., Chekroum C., Benameur N., Olivier P., Roberts J., Robert P., Guillemin F., « Projet Metropolis. Sous-projet 1 : Rapport d'état de l'art », rapport du contrat RNRT METROPOLIS, Janvier 2003
- [41] Park K., Kim G., Crovella M., « On the Effect of Traffic Self-similarity on Network Performance », *SPIE International Conference on Performance and Control of Network Systems*, November 1997
- [42] Park K., Kim G., Crovella M., « On the relationship between file sizes, transport protocols, and self-similar network traffic », *IEEE ICNP*, 1996.
- [43] Park K., Willinger W., *Self-similar network traffic : an overview*, In *Self-similar network traffic and performance evaluation*, J. Wiley & Sons, 2000.