

Outils de mesure de la bande passante disponible: Evaluation et analyse de performances

Ahmed Aitali

Fabien Michaut

Francis Lepage

CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy) CNRS-UMR 7039
Université Henri Poincaré Nancy I
Faculté des Sciences et Techniques BP-239
54506 Vandoeuvre Cedex
{Ahmed.Aitali, Fabien.Michaut, Francis.Lepage}@cran.uhp-nancy.fr

RESUME

L'étude de la bande passante disponible suscite un intérêt considérable ces dernières années. En effet, plusieurs outils de mesure de cette métrique ont été développés (Pathload, Spruce, Pathchirp et IGI). Ces outils ont été testés séparément et leurs performances ont été validées par leurs auteurs. Cependant, nous avons constaté l'absence d'étude comparative significative des performances de ces derniers. Ce papier présente donc une étude expérimentale comparative de ces outils et se propose d'expliquer et d'analyser les erreurs et les incertitudes dont ces outils font l'objet.

MOTS CLES : Bande Passante Disponible, Métrologie Réseau, Qualité de Service.

ABSTRACT

There is an increasing interest during these last years for the study of available bandwidth. Indeed, several measurement tools were developed (Pathload, Spruce, Pathchirp and IGI). These tools were tested separately and their performances were validated by their designers. However, there is a lack of significant comparative studies. The purpose of this paper is to perform a comparative study of performances and also to explain measurement errors and uncertainties of these tools.

KEYWORDS : Available Bandwidth, Network Metrology, Quality of Service.

INTRODUCTION

L'ingénierie du trafic recouvre l'ensemble des activités de gestion en temps réel conduisant à un fonctionnement correct et efficace d'un réseau. Il inclut les différents mécanismes de contrôle de trafic qui nécessitent une analyse quantitative des performances, ces mécanismes offrent les moyens de négocier et de respecter la garantie de la qualité de service exprimée habituellement par des métriques telles que la bande passante, le délai, les pertes de paquets, etc. Outre le fait qu'elle soit un facteur déterminant dans l'élaboration des algorithmes de contrôle de trafic, la bande passante disponible revêt une importance primordiale pour le fonctionnement de

nombreuses applications et technologies réseau telles que les grilles de calculs, les réseaux de recouvrement (Overlay Networks) et les applications peer-to-peer. Elle joue aussi un rôle prépondérant dans la négociation et l'élaboration des contrats de garantie de services entre les opérateurs et leurs clients (SLA: Service Level Agreement).

De nombreux outils de mesure de bande passante disponible ont été développés ces dernières années, des expérimentations et des tests ont été réalisés pour chaque outil. Cependant, on déplore l'absence d'étude comparative significative qui permettrait d'analyser et de classer ces outils selon leurs performances. Le but de cet article est ainsi de présenter une étude comparative des performances des outils Pathload [2], Spruce [4], IGI [1] et Pathchirp [3] en terme de précision, d'intrusivité et de rapidité en prenant en compte aussi l'aspect compatibilité et répétabilité des mesures. Une analyse des résultats permettra de mettre en lumière les incertitudes de mesure dont ces outils font l'objet et qui sont liées principalement à la mesure des temps.

Le terme "bande passante" regroupe quatre paramètres différents, à savoir la bande passante totale d'un lien, la bande passante minimale d'un chemin ou capacité d'un chemin, la bande passante disponible d'un lien et la bande passante disponible d'un chemin.

Soit P un chemin entre deux systèmes terminaux, P est constitué de N liens LI_1, LI_2, \dots, LI_N . La bande passante totale du lien i , ou capacité du lien, notée C_i , définit la capacité totale de transmission du lien i . La capacité C du chemin P est définie par $C = \min C_i$.

La bande passante disponible du lien i est donnée par: $A_i = C_i(1 - u_i)$, où u_i est le taux d'utilisation du lien i avec $0 \leq u_i \leq 1$. La bande passante disponible A du chemin P durant un intervalle de temps T est le minimum des bandes passantes disponibles de tous les liens LI_i du chemin P :

$$A = \min_{i=1 \dots N} \{C_i(1 - u_i)\} = \min_{i=1 \dots N} A_i \quad (1)$$

Les outils étudiés mesurent les délais unidirectionnels des paquets sondes entre un émetteur et un récepteur et en utilisant des algorithmes spécifiques, ils déduisent la valeur de la bande passante disponible du chemin de bout en bout.

Pathload implante le modèle PRM (Probe Rate model) [4] en se basant sur la technique SLoPS (Self-Loading Periodic Stream) [2] qui consiste à envoyer une rafale de paquets sondes d'une source vers une destination. Le destinataire mesure le délai de chaque paquet et analyse sa variation. Si le délai est jugé constant, on en déduit que le débit de la rafale est inférieur à la bande passante disponible. Si le délai est croissant, le débit de la rafale est supérieur à la bande passante disponible. On envoie alors une seconde rafale à un débit supérieur dans le premier cas ou inférieur dans le second cas. Ce mécanisme est répété et on approche par dichotomie la valeur de la bande passante disponible.

Pathchirp utilise aussi ce modèle, mais dans le but de minimiser le volume du trafic de mesure il envoie un train de paquets selon un processus exponentiel. Ce qui permet de sonder le réseau avec des débits différents.

Spruce est constitué d'un émetteur et d'un récepteur, il implante le modèle PGM (Probe Gap model) [4]. L'émetteur envoie au récepteur 100 paires de paquets de 1500 octets, de dispersion initiale D_{in} selon un processus poissonien. Le récepteur mesure la dispersion finale D_{out} entre les paquets de chaque paire, puis calcule la bande passante disponible pour chacune d'elles en utilisant la formule :

$$A = C - C_T = \left(2 - \frac{D_{out}}{D_{in}}\right) \cdot C \quad (2)$$

La valeur finale renvoyée à l'utilisateur est la moyenne des 100 estimations. (C_T est la valeur du trafic concurrent).

IGI est constitué d'un émetteur et d'un récepteur. Il repose sur le même principe que Spruce, mais au lieu d'envoyer des trains de paires de paquets selon un processus poissonien l'émetteur envoie au récepteur une séquence périodique de 60 paquets de 500 octets, de dispersion initiale D_{in} . IGI débute son exécution par la mesure de la capacité du chemin C^l pour ensuite déduire la valeur de la bande passante disponible en utilisant la formule:

$$A = C - C_T = \frac{C(D_{in} - D_{out}) + L}{D_{in}} \quad (3)$$

Avec L la taille des paquets sondes envoyés au récepteur.

ANALYSE DE PERFORMANCES

Nous avons mis en place une plateforme d'expérimentation qui permet de tester ces outils dans des conditions identiques. Elle consiste en un ensemble d'ordinateurs interconnectés via deux *Switchs* :

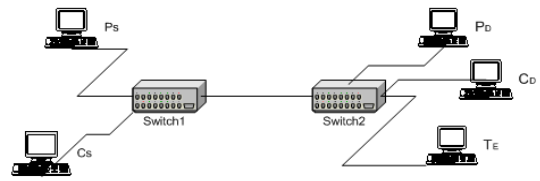


Figure 1. Plateforme d'expérimentation

Les émetteurs et récepteurs des outils de mesure sont installés respectivement sur P_S et P_D . Les flux de mesures circulent ainsi de P_S à P_D . Installé sur C_S , le générateur de trafic MGEN permet d'envoyer un trafic concurrent vers C_D . Installé sur T_E , l'outil de capture Ethereal permet de vérifier le débit du trafic généré par MGEN et de mesurer le temps d'exécution et la charge induite par chaque outil. Le débit du trafic concurrent est réglé de manière à faire varier la bande passante disponible de 0 et 100 Mb/s. Pour chaque valeur de cet intervalle, on effectue 30 mesures avec chaque outil. Les résultats des expérimentations sont représentés sur la figure 2. La valeur estimée de la bande passante disponible reportée est la moyenne des 30 valeurs obtenues.

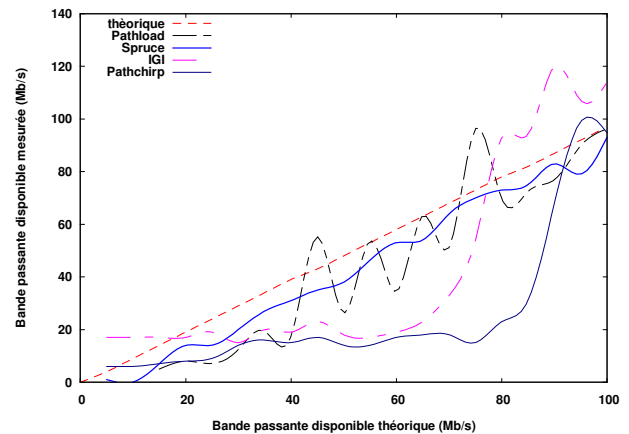


Figure 2. Bande passante disponible mesurée

Les courbes de la bande passante disponible théorique sont calculées en fonction de la taille des paquets sondes utilisés par chaque outil afin de tenir compte de l'encapsulation [2].

Globalement, Pathload sous-estime la bande passante disponible théorique à l'exception de quelques points. Cependant, l'allure de la courbe suit les variations des valeurs théoriques.

Pathload arrête prématurément son exécution lorsque la bande passante disponible est inférieure à 15 Mb/s (soit 15% de la capacité du chemin). En effet, Pathload intègre un mécanisme de détection des pertes de paquets-sonde qui écarte les mesures effectuées sur un flux qui perd plus de 10% de ses paquets. Si ce phénomène se répète pour plusieurs flux consécutifs, Pathload arrête la mesure.

¹ Cette mesure est effectuée en utilisant l'outil bprobe [1].

L'allure de la courbe obtenue avec Pathchirp ne suit pas les variations des valeurs théoriques. Pathchirp sous-estime largement la bande passante disponible pour les valeurs inférieures à 95 Mb/s et réagit très peu (voire pas du tout) pour les valeurs inférieures à 75 Mb/s.

La courbe obtenue avec Spruce suit les variations des valeurs théoriques. L'écart entre les courbes est d'ailleurs assez faible. Cependant, Spruce sous-estime légèrement les valeurs théoriques dans tous les cas. IGI ne réagit aux variations de la bande passante disponible que pour les valeurs théoriques supérieures à 60 Mb/s. La bande passante disponible est sous estimée pour les valeurs comprises entre 20 et 80 Mb/s, surestimée pour les autres.

De cette première observation des mesures, nous pouvons constater que Spruce semble être l'outil qui réagit le mieux aux variations de la bande passante disponible.

Justesse

La justesse (ou la précision) des outils est exprimée en terme d'erreur relative. Les erreurs relatives de chaque outil sont représentées sur la figure 3.

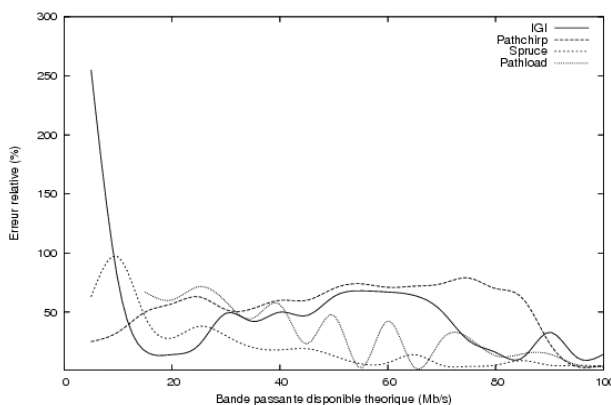


Figure 3. Erreurs relatives

L'erreur relative de Pathload est très importante (supérieure à 50%) lorsque la bande passante disponible est inférieure à 40 Mb/s. Elle ne dépasse pas 20% pour les valeurs de bande passante disponible supérieures à 75 Mb/s. Les résultats obtenus avec Pathchirp montrent que cet outil est très imprécis. Dans la majorité des cas, l'erreur relative est supérieure à 50%. Elle n'est inférieure à 20% que lorsque la bande passante disponible est supérieure à 90 Mb/s. Spruce est l'outil qui a globalement l'erreur relative la plus faible. Celle-ci est inférieure à 20% pour les valeurs de bande passante disponible supérieures à 35 Mb/s. L'erreur relative est cependant très importante lorsque la bande passante disponible est inférieure à 15 Mb/s. L'erreur relative de IGI est particulièrement importante lorsque la bande passante est inférieure à 15 Mb/s, certaines valeurs dépassant les 200%! L'erreur relative est inférieure à 20% lorsque la bande passante disponible est comprise entre 15 et 25

Mb/s et supérieure à 75 Mb/s. La comparaison des niveaux de précision offerts par les différents outils de mesure nous révèle que Spruce prend l'avantage encore une fois sur les autres outils, en offrant une meilleure justesse.

Intrusivité

L'intrusivité représente la quantité de trafic généré par un outil de mesure. C'est un critère d'évaluation très important car le trafic de mesure est susceptible de perturber le réseau et biaiser les mesures s'il est trop important.

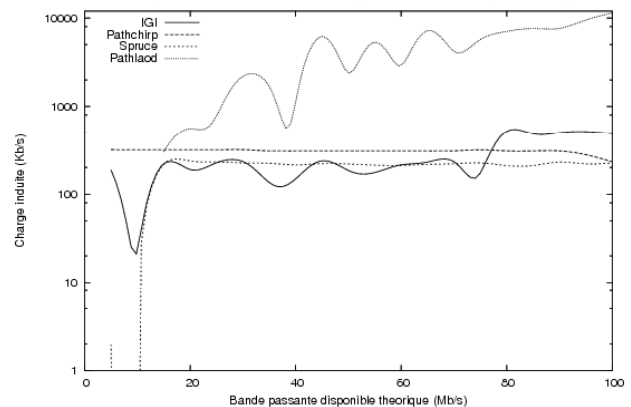


Figure 4. Courbes des charges réseau induites

Les courbes de la figure 4 montrent clairement que Pathload génère beaucoup plus de trafic que les autres outils. Le débit moyen des flux de mesure peut atteindre des valeurs supérieures à 10% de la capacité du chemin. Ceci s'explique par la technique d'auto-congestion [2] utilisée. Pour les autres outils, les débits moyens sont plus modestes. Les débits moyens des flux générés par Pathchirp et Spruce sont constants quelle que soit la bande passante disponible. Les débits sont respectivement de 300 et 220 kb/s. IGI génère des flux à des débits variant entre 200 et 500 Kb/s.

Rapidité

La bande passante disponible est un paramètre qui varie dans le temps, il est donc essentiel de pouvoir effectuer sa mesure rapidement. Les mesures doivent être effectuées d'autant plus rapidement lorsqu'elles sont utilisées pour configurer des applications "temps réel". Cependant, cette contrainte est moins forte lorsqu'un outil est utilisé dans le cadre de l'ingénierie de trafic.

La figure 5 présente les durées moyennes de mesure de chaque outil pour les différentes valeurs de bande passante. Nous constatons que Pathload se distingue par son temps d'exécution variable qui est dû au temps de convergence de l'algorithme dichotomique qu'il utilise. De plus, les temps de mesure sont supérieurs aux autres outils lorsque la bande passante disponible est inférieure à 40 Mb/s. En revanche pour les bandes passantes supérieures à 60 Mb/s Pathload est le plus rapide.

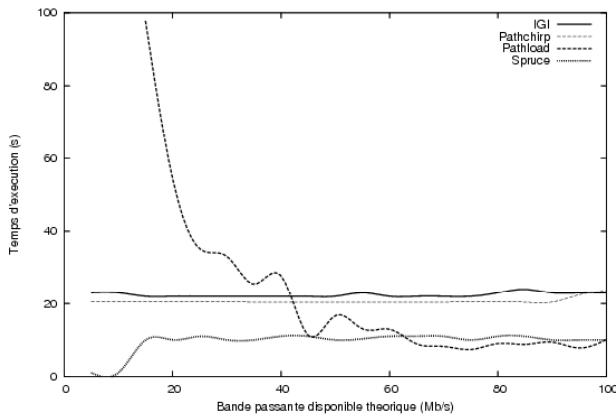


Figure 5. Temps d'exécution des outils de mesure

Pour tous les autres outils, les temps de mesure sont constants quelle que soit la bande passante disponible, c'est-à-dire 20s pour Pathchirp et IGI d'une part, et 10s pour Spruce d'autre part.

Compatibilité des mesures

La compatibilité des outils de mesure permet de savoir dans quel intervalle de valeurs ces derniers sont susceptibles de donner les mêmes résultats. Il s'agit de vérifier la concordance des résultats obtenus avec les différents outils pour chaque valeur théorique donnée. Cette plage de valeurs est définie comme l'intersection des intervalles de confiance calculés pour chaque outil.

Appliqué à nos résultats avec un risque de 5%, le test de normalité de Shapiro & Wilk permet de vérifier que les distributions des variables aléatoires X_i représentant les différentes valeurs de la bande passante disponible suivent une loi normale $N(M_i, \sigma_i)$ où M_i est la moyenne des valeurs mesurées et σ_i représente l'écart-type expérimental. Nous avons ensuite calculé les intervalles de confiance à 95% pour chaque outil. Ce qui signifie qu'il existe un risque de 5% pour que la valeur moyenne mesurée de la bande passante disponible ne soit pas dans l'intervalle calculé.

L'intervalle de confiance IC autour de la moyenne d'une distribution gaussienne est calculé comme suit:

$$IC = \left[M_i - \frac{\sigma_i t_{0.025}}{\sqrt{n}}, M_i + \frac{\sigma_i t_{0.025}}{\sqrt{n}} \right] \quad (4)$$

avec $t_{0.025}$ la valeur critique de la distribution du t de Student correspondant au niveau de confiance 95%. Cette formule est appliquée pour calculer les intervalles de confiance de Spruce, IGI et Pathchirp. Pour Pathload nous avons considéré les intervalles de valeurs obtenus lors des mesures car ces derniers sont déjà sous forme d'intervalles de confiance calculés directement par l'outil Pathload. Les intervalles de confiance des mesures de chaque outil sont représentés sur la figure 6.

Nous avons constaté que globalement, les outils de mesure ne sont pas compatibles. Leurs intervalles de confiance ne se superposent que sur quelques points. Ceci dit nous avons remarqué une forte compatibilité entre le couple d'outil Pathchirp-IGI alors que le couple Spruce-Pathload ne présente qu'une compatibilité moyenne. Les autres combinaisons d'outils offrent une très faible compatibilité. Donc IGI et Pathchirp peuvent donner des résultats plus au moins concordants mais qui sont susceptibles d'être tout à fait éloignés de ceux obtenus par Spruce et Pathload.

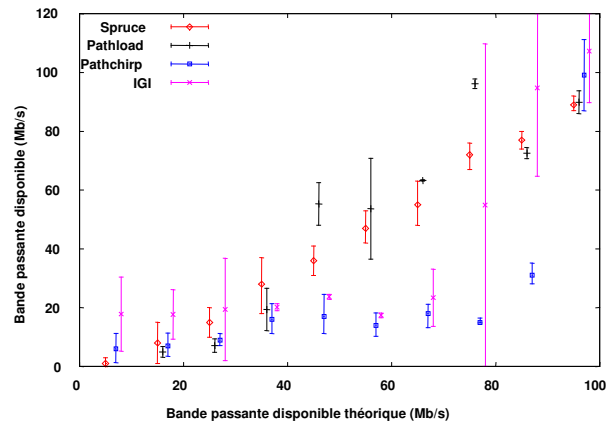


Figure 6. Intervalles de confiance des mesures

Répétabilité des mesures

La répétabilité (fidélité) mesure l'aptitude d'un outil à reproduire des résultats identiques pour chaque série de mesures effectuées dans des conditions très proches (et donc généralement dans un temps court).

L'écart type déterminant la distance moyenne des observations à la moyenne arithmétique, il permet de mesurer la répétabilité des observations effectuées. un l'écart-type grand indique une dispersion importante des données et donc une faible répétabilité. La fidélité d'un outil est ainsi inversement proportionnelle à l'écart-type des mesures observées.

On constate que Pathchirp présente des écarts-type élevés, donc il offre une faible répétabilité des mesures. IGI est reproductible au niveau des valeurs faibles de la bande passante disponible et les mesures de Pathload présentent un niveau de répétabilité élevé pour les valeurs supérieures à 60 Mb/s. En revanche Spruce offre un niveau de répétabilité constant et raisonnable pour toutes les valeurs de la bande passante disponible mesurées. Donc, globalement, Spruce présente une meilleure fidélité par rapport aux autres outils de mesure. Les résultats présentés dans cette partie montrent que: Pathload est l'outil le plus intrusif et est dans certains cas l'outil le moins rapide. Pathchirp est imprécis. Spruce offre globalement les meilleures performances en termes de justesse, d'intrusivité, de rapidité et de répétabilité.

De plus, ses performances sont relativement stables et indépendantes de la valeur de la bande passante disponible.

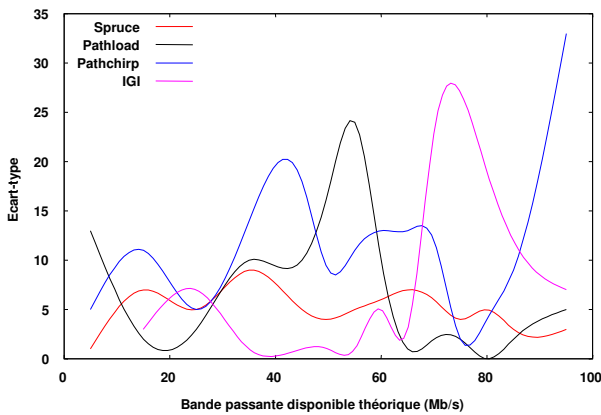


Figure 7. Ecarts-type des mesures

IGI calcule d'abord la capacité du chemin pour en déduire la valeur de la bande passante disponible. A priori, il ne semble pas être précis. Toutefois, la qualité des résultats obtenus dépend de la mesure préliminaire de la capacité. Il est ainsi difficile de conclure quant à la précision de cet outil.

ANALYSE DES INCERTITUDES DE MESURE

Incertitude à l'envoi des paquets

Les outils de mesure étudiés dans cet article nécessitent d'envoyer des paquets en respectant un temps inter-paquets précis ou à un débit donné. Le non-respect de ces contraintes temporelles est susceptible de générer une incertitude dans les mesures. Cette incertitude dépend de la latence pour estampiller un paquet, le déplacer de l'espace utilisateur vers l'espace noyau, c'est-à-dire de l'application au pilote de l'interface réseau, et le transmettre sur l'interface réseau. De plus, l'ordonnanceur du système d'exploitation peut assigner les ressources à d'autres processus entre les opérations d'estampillage et d'envoi².

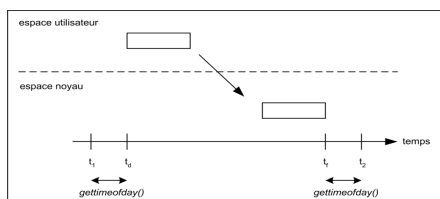


Figure 8. Passage du paquet de l'application au pilote de l'interface

Nous avons estimé la latence correspondant au passage d'un paquet de l'espace utilisateur à l'espace noyau. Cette latence est représentée sur la figure 8. La latence à mesurer est $\Delta t = t_r - t_d$.

² Ce phénomène peut être atténué de façon significative s'il est pris en compte lors de la conception du logiciel (affectation d'une priorité élevée à la tâche d'envoi, programmation temps-réel, etc.).

Les différentes opérations d'estampillage sont effectuées par l'appel système `gettimeofday()`. Cet appel ajoute une latence supplémentaire dans la mesure de Δt . En effet, la date t_d sera estimée par t_1 , t_r par t_2 . En notant $t_{gettimeofday()}$ le temps d'exécution de l'appel `gettimeofday()`, on a alors

$$\Delta t = t_2 - t_1 - 2 \times t_{gettimeofday()} \quad (5)$$

Le temps d'exécution de `gettimeofday()` varie de 1 à 6 μs (calculé sur un Pentium IV 2.5 GHz tournant sous Linux Debian). Pour des paquets de tailles différentes, les valeurs du temps de passage de l'application au pilote de l'interface réseau sont représentées dans le tableau 1.

Taille des paquets IP (en octets)	Nombre d'expériences	$t_2 - t_1$ (en μs)	Δt (en μs)
500	1000	0 - 41	0 - 39
1500	1000	0 - 50	0 - 48

Tableau 1. Mesure de la latence espace système - buffers interface réseau

Impacts sur les outils étudiés Spruce et IGI sont a priori les outils les plus susceptibles d'être affectés par l'incertitude liée à l'envoi des paquets. En effet, pour ceux-ci, il est impératif d'envoyer des paquets avec un temps inter-paquets D_{in} donné de l'ordre d'une centaine à plusieurs centaines de μs . Une variation de Δt de l'ordre de 10 μs entraîne ainsi une erreur relative importante sur D_{in} . La valeur de D_{in} étant utilisée pour calculer l'estimation de la bande passante disponible A , toute erreur sur D_{in} entraîne des erreurs sur l'estimation de A . Cette erreur peut être quantifiée en appliquant la méthode différentielle logarithmique. Nous détaillons ici le calcul de cette erreur pour l'outil Spruce:

Spruce estime la bande passante disponible en utilisant la formule (2). Nous définissons ΔD_{in} l'erreur sur D_{in} . En supposant qu'il n'y ait pas d'erreur sur la mesure de C et D_{out} (dispersion à l'arrivée des paquets), on a :

$$\Delta A = \left| -\frac{C \cdot D_{out}}{D_{in}^2} \right| \Delta D_{in}$$

Ainsi, pour une capacité C de 97,5 Mb/s (niveau IP), une erreur $\Delta D_{in} = 10 \mu s$ (erreur la plus fréquente), une bande passante disponible A de 50 Mb/s, nous obtenons une incertitude $\Delta A = 11,78$ Mb/s, soit 23%.

Les contraintes sur les temps inter-paquets à respecter par Pathchirp sont déterminées par la plage des débits instantanés balayée par ces flux et la taille de ces paquets sondes.

Par défaut, Pathchirp envoie des paquets de 1000 octets à des débits instantanés variant de 10 à 200 Mb/s, ce qui correspond à des temps inter-paquets variant de 40 à 830 μs environ. Une erreur sur les temps inter-paquets à l'envoi peut conduire Pathchirp à générer les paquets à des débits inférieurs aux débits désirés et ainsi à associer les excursions des délais mesurés à l'arrivée [3] à des

débits théoriques supérieurs aux valeurs réelles. Cette erreur sera plus importante pour les grandes valeurs de bande passante disponible (c'est-à-dire les temps inter-paquets les plus petits) et causera, pour ces valeurs, une surestimation de la bande passante disponible.

Pour effectuer ses mesures, Pathload envoie des flux de 100 paquets. La contrainte essentielle étant de générer des flux ayant chacun un débit moyen donné, l'incertitude étudiée ici est donc négligeable.

Incertaince à la réception des paquets

En adoptant une démarche similaire à celle du paragraphe précédent, nous avons estimé Δt , le temps de passage d'un paquet depuis son arrivée dans le système d'exploitation jusqu'à l'espace utilisateur³. Les valeurs obtenues varient entre 5 et 65 μ s. Δt est inférieur ou égal à 25 μ s pour, respectivement, 80 % et 91 % des mesures effectuées avec des paquets de 500 et 1500 octets.

Impacts sur les outils étudiés Spruce, IGI et Pathchirp s'affranchissent de cette incertitude en estampillant les paquets au niveau du pilote de l'interface réseau dans le noyau du système d'exploitation. Pour cela, Spruce et Pathchirp utilisent l'option `SO_TIMESTAMP` dans la socket de réception et IGI réalise les opérations d'estampillage avec la librairie `libpcap`. Pour effectuer ses mesures, Pathload mesure les délais des paquets à leur arrivée et en détecte la variation. Les délais et leurs variations observés de nos jours sur les réseaux WAN sont de l'ordre de plusieurs dizaines voire centaines de ms. Aussi, nous pouvons supposer que l'incertitude étudiée ici est négligeable.

Incertaince résultant de l'estimation de la bande passante minimale

Les outils basés sur le Probe Gap model [4] (Spruce et IGI) font l'hypothèse que la capacité du chemin est connue (c'est-à-dire mesurée préalablement), et utilisent cette valeur pour estimer la bande passante disponible. L'incertitude sur la mesure de la capacité s'ajoutera ainsi à l'estimation de la bande passante disponible. Nous quantifions ici cette erreur pour IGI en appliquant la méthode différentielle logarithmique. IGI estime la bande passante disponible en utilisant la formule (3). Ainsi, l'erreur sur A est⁴:

$$\Delta A = \left| 1 - \frac{D_{out}}{D_{in}} \right| \Delta C$$

Ainsi, pour une capacité C de 97,5 Mb/s (niveau IP), une erreur $\Delta C=20$ Mb/s (environ 20% de C), une bande passante disponible A de 40 Mb/s et en fixant D_{in} nous obtenons une incertitude $\Delta A = 11,60$ Mb/s, soit 29%. Cette valeur est donc très importante et explique une bonne part de l'erreur relative de IGI.

Incertainces dues à la corrélation des paquets

Ce phénomène est spécifique à IGI. En effet, ce dernier utilise des flux périodiques de paquets sondes. Les paires de paquets qui forment ces flux ne sont pas indépendantes : si une paire est constituée des paquets k et $k+1$ alors la paire suivante est formée des paquets $k+1$ et $k+2$. Les dispersions D_{out} mesurées par le récepteur sont ainsi corrélées. Pour atténuer cet effet, IGI ne prend pas en compte les D_{out} inférieurs ou égaux à D_{in} . Ceci a pour effet de surestimer le débit du trafic concurrent et donc de sous-estimer la bande passante disponible.

CONCLUSION

Nous avons présenté dans cet article une analyse et une étude comparative des techniques et des outils de mesure de la bande passante disponible. Nous avons mis en œuvre les différents outils sur une plateforme d'expérimentation dans des conditions similaires. Cette étude nous a permis de comparer les performances de ces outils en termes de précision, d'intrusivité et de rapidité ainsi qu'en terme de compatibilité et répétabilité des mesures. Nous avons, de plus, tenté d'analyser et d'expliquer les sources d'erreurs et d'incertitudes dont les outils étudiés font l'objet.

Les résultats obtenus montrent que Pathload est l'outil le plus intrusif et peut s'avérer très lent. Pathchirp et IGI sont généralement imprécis. Finalement, Spruce semble offrir les meilleures performances au regard des critères étudiés, il est l'outil le plus précis, le plus rapide et fait partie des outils les moins intrusifs.

L'étude présentée dans cet article s'est concentrée sur les critères qui nous semblaient essentiels. Cependant, cette étude devra être complétée par la prise en compte d'autres paramètres en mettant en œuvre les outils de mesure sur des réseaux réels.

BIBLIOGRAPHIE

1. N.Hu, P.Steenkiste, *Evaluation and Characterization of Available Bandwidth Probing Techniques*. In the IEEE JSAC Special Issue in Internet and WWW Measurement, Mapping, and Modeling, Vol. 21(6), Août 2003.
2. R.S.Prasad, M.Murray, C.Dovrolis, K.C.Claffy, *Bandwidth Estimation: Metrics, Measurement Techniques, and Tools*, IEEE Network, Novembre-Décembre 2003.
3. V.Ribeiro, R.Riedi, R.Baraniuk, J.Navratil, and L. Cottrell, *pathChirp: Efficient Available Bandwidth Estimation for Network Paths*, Passive and Active Measurement Workshop 2003.
4. J.Strauss, D.Katabi, and F.Kaashoek, *A Measurement Study of Available Bandwidth Estimation Tools*, The Internet Measurements Conference, Floride, 2003.

³ L'estimation de Δt n'est pas détaillée ici pour des raisons de place.

⁴ En supposant, qu'il n'y a pas d'erreur sur D_{in} et D_{out} .