

Une approche simple inspirée des réseaux sociaux pour la hiérarchisation des systèmes autonomes de l'Internet

Fabrice Clérot*, Quang Nguyen**

* France Télécom Division R&D, 2 avenue Pierre Marzin, 22307 Lannion Cedex, France
fabrice.clerot@francetelecom.com

** France Télécom Division R&D, 38 rue du Général Leclerc, 92794 Issy-les-Moulineaux Cedex, France
quang.nguyen@francetelecom.com

Résumé. Le transit des flux d'information dans le réseau Internet à l'échelle mondiale est régi par des accords commerciaux entre systèmes autonomes, accords qui sont mis en œuvre via le protocole de routage BGP. La négociation de ces accords commerciaux repose implicitement sur une hiérarchie des systèmes autonomes et la position relative de deux systèmes débouche sur un accord de type client/fournisseur (un des systèmes, le client, est nettement mieux classé que l'autre, le fournisseur, et le client paye le fournisseur pour le transit des flux d'information) ou sur un accord de type "peering" (transit gratuit du trafic entre les deux systèmes). En dépit de son importance, il n'existe pas de hiérarchie officielle de l'Internet (les clauses commerciales des accords entre systèmes autonomes ne sont pas nécessairement publiques) ni de consensus sur la façon d'établir une telle hiérarchie. Nous proposons une heuristique simple inspirée de la notion de "centralité spectrale" issue de l'analyse des réseaux sociaux pour analyser la position relative des systèmes autonomes de l'Internet à partir des informations des seules informations de connectivité entre systèmes autonomes.

1 Introduction

Le transit des flux d'information dans le réseau Internet à l'échelle mondiale est régi par des accords commerciaux entre systèmes autonomes. La négociation de ces accords commerciaux repose implicitement sur une hiérarchie des systèmes autonomes et la position relative de deux systèmes débouche sur un accord de type client/fournisseur (un des systèmes, le client, est nettement mieux classé que l'autre, le fournisseur, et le client paye le fournisseur pour le transit des flux d'information) ou sur un accord de type "peering" (transit gratuit du trafic entre les deux systèmes).

Les politiques de routage déduites de ces accords commerciaux sont ensuite mises en œuvre via le protocole de routage BGP (Border Gateway Protocol). Ainsi, l'établissement des routes à l'échelle mondiale obéit à des règles d'efficacité économique déduites d'une hiérarchisation entre systèmes autonomes (une route ne peut pas, par exemple, "descendre" d'un fournisseur à son client pour "remonter" vers un autre fournisseur : quel client accepterait de

Une hiérarchisation des systèmes autonomes de l'Internet

payer pour porter le trafic de ses fournisseurs ?), règles bien différentes des règles d'ingénierie qui régissent le routage à l'intérieur des systèmes autonomes (Griffin et al (2002), Gao et Wang (2002)).

En dépit de l'importance de cette hiérarchisation des systèmes autonomes, que ce soit pour la compréhension des phénomènes de routage à grande échelle dans l'Internet ou pour les systèmes autonomes eux-mêmes à fins de négociation, il n'existe pas de hiérarchie publiquement disponible (les clauses commerciales des accords entre systèmes autonomes ne sont pas nécessairement publiques) ni même de consensus sur le moyen d'en établir une (les différents fournisseurs de services ont chacun leur propre façon d'établir ce classement).

Nous proposons ci-dessous une méthode permettant d'établir un tel classement qui satisfasse aux contraintes suivantes :

1. reposer sur des données publiquement disponibles;
2. permettre de simuler les conséquences de l'ajout ou du retrait d'une relation de connectivité entre systèmes autonomes;
3. permettre de pondérer l'importance accordée aux différents systèmes autonomes;
4. permettre d'étudier les contributions de son voisinage au classement d'un système particulier.

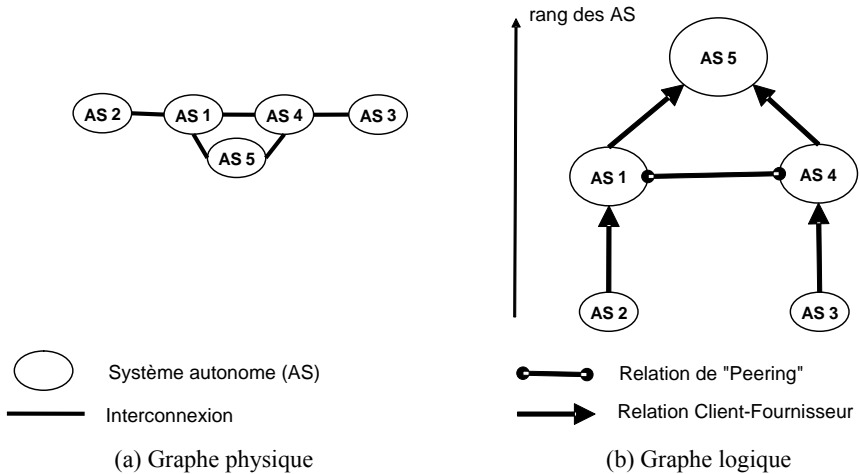


FIG. 1 – Graphe d'interconnexion au niveau des systèmes autonomes

2 Importance d'un système autonome et centralité

2.1 Importance d'un système autonome et centralité dans les réseaux sociaux

La notion d'importance d'un système autonome (AS1) dans le cadre du routage dans l'Internet mondial repose sur sa capacité à permettre à d'autres systèmes d'établir une connexion alors qu'ils n'ont pas de connectivité directe (AS2 et AS3); cette capacité ne repose pas forcément sur une médiation "directe" AS2 – AS1 – AS3 entre les systèmes autonomes mais

peut aussi reposer sur une médiation "indirecte" par le biais des connectivités nouvelles offertes à AS2 et AS3 par AS1 : AS2 – AS1 – AS4 – AS3 où il est entendu que AS2 n'a pas de connectivité avec AS4, ni AS3 avec AS1 (voir la Figure 1). Ainsi, dans l'exemple ci-dessus, l'importance de AS1 dépend de l'importance de AS4 : en se connectant à AS4, AS1 "hérite" d'une partie de l'importance de AS4 en ce qu'il peut maintenant proposer à AS2 une connectivité plus étendue (les systèmes comme AS3 que AS1 n'atteint pas directement mais auxquels AS4 a accès); la réciproque est vraie pour AS4 qui hérite d'une partie de l'importance de AS1.

Cette notion d' "héritage" à partir des voisins dans la constitution de la notion d'importance est au cœur de l'analyse de l'importance des positions dans les réseaux sociaux et trouve une de ses formalisations dans la notion de "centralité spectrale" détaillée ci-dessous. C'est à partir de cette notion d'importance que nous proposons d'établir un classement des systèmes autonomes de l'Internet à partir de leur seul graphe d'interconnexion.

Ce graphe d'interconnexion est facile à établir à partir des tables de routage BGP (Chen et al (2002)). Remarquons que, par construction, ce graphe ne comprend que les liens qui apparaissent dans au moins un chemin BGP.

2.2 Centralité spectrale dans les réseaux sociaux

Nous reprenons ici la généralisation de la notion de centralité spectrale pour les graphes asymétriques introduite par Bonacich et Lloyd (2001). Le vecteur X des importances des nœuds dans un graphe (donné par sa matrice d'adjacence asymétrique pondérée A) possède deux origines de nature différente, un terme intrinsèque E qui ne dépend que du nœud considéré isolément et un terme provenant de l'effet de réseau (héritage linéaire de l'importance des voisins), ce qui se traduit par une équation du type $X = \alpha AX + E$ où α doit approcher (par valeurs inférieures) l'inverse de la valeur propre principale de A pour que le résultat obtenu par cette méthode soit cohérent avec celui obtenu par la méthode spectrale usuelle dans le cas de graphes non orientés (Bonacich et Lloyd (2001)).

Techniquement, la solution de l'équation ci-dessus est obtenue par itération jusqu'à convergence de $X_{i+1} = \alpha AX_i + E$, l'inversion directe $X = (I - \alpha A)^{-1} E$ faisant apparaître une matrice non creuse en général bien trop volumineuse.

Cette formulation de la centralité permet de répondre directement à deux de nos objectifs :

1. la notion d'importance intrinsèque permet de pondérer l'importance accordée aux différents systèmes autonomes; dans la littérature, on rencontre surtout le choix $E_i = 1, \forall i$ mais rien n'impose ce choix dans l'absolu; la seule condition imposée à E est que les valeurs soient indépendantes des effets de réseau (par exemple, il ne serait pas cohérent de pondérer chaque nœud par son degré). Il est donc possible, par exemple, d'introduire une pondération tenant compte de facteurs géographiques, de l'importance stratégique de certains acteurs ou en fonction de critères plus objectifs comme le nombre d'adresses qu'ils atteignent directement;
2. la dépendance simplement linéaire de l'importance d'un système autonome en fonction de celle de ses voisins et aux poids de la matrice d'adjacence permet d'étudier facilement les contributions de son voisinage au classement d'un système particulier via $X_s = \alpha \sum_i A_{s,i} X_i + E_s$.

3 Calcul de la centralité spectrale à partir du graphe de connectivité

3.1 Sources de données et résultats d'inférence

La topologie réelle de l'Internet est inconnue; toutefois, comme BGP, le protocole de routage entre systèmes autonomes dans l'Internet, est un protocole de vecteurs de chemins qui diffuse des listes de systèmes autonomes vers le réseau de destination, le graphe d'interconnexion des systèmes autonomes peut être inféré à partir des tables de routage BGP. Dans cette étude, nous nous sommes fondés sur les données du serveur Oregon Route Views ¹ et d'une vingtaine sites Looking Glass ² pour reconstruire les tables de routage BGP et partant le graphe d'interconnexion au niveau des systèmes autonomes (Decima et al. (2004)). Le graphe des systèmes autonomes ainsi relevé le 1^{er} Septembre 2004 comprend 17886 nœuds et 42123 arêtes. Le tableau 1 résume quelques propriétés de connectivité de ce graphe.

Number of nodes (ASs)	17886
Number of edges (undirected AS links)	42123
Average degree	4.9
Maximum degree	2413
Percentage of nodes with degree ≤ 2 .	72.7 %
Percentage of nodes with degree ≥ 50 .	0.9 %

TAB. 1 – Propriétés topologiques du graphe d'interconnexion des systèmes autonomes

La notion de degré dans le graphe d'interconnexion est une description de la connectivité physique d'un nœud; cette notion de "connectivité physique" ne capture pas la notion d' "atteignabilité" ("reachability") qui recouvre la capacité d'un système autonome à atteindre d'autres systèmes autonomes en exploitant les chemins à travers l'Internet. Cette dernière notion dépend des relations logiques entre les systèmes autonomes.

	No. of AS pairs	Percentage
Customer-Provider	36472	86,5 %
Peer	4996	11,8 %
Sibling	655	1,5 %

TAB. 2 – Relations logiques inférées sur le graphe d'interconnexion à partir des chemins BGP.

¹ Le serveur Oregon Route Views est connecté à plusieurs routeurs opérationnels de l'Internet dans le but de collecter les tables de routage BGP : <http://www.routeviews.org/>

² Les sites Looking Glass sont maintenus par les fournisseurs de service pour permettre de résoudre les problèmes de routage à grande échelle dans l'Internet : <http://www.traceroute.org/>

On distingue trois relations logiques principales : client-fournisseur, peering et sibling (Gao (2000)). La première correspond à un service de transit payant offert par un système autonome (le fournisseur) à un autre système autonome (le client); le deuxième type correspond à un accord de transit gratuit entre deux systèmes autonomes; le troisième type correspond à un cas particulier de transit mutuel entre deux systèmes autonomes et sera ignoré dans la suite. Ces types de relations logiques structurent la hiérarchie des systèmes autonomes de l'Internet car les politiques de routage entre systèmes autonomes répondent à des critères d'efficacité économique. Typiquement, un client doit se trouver en dessous de ses fournisseurs dans la hiérarchie. De même, plus un système autonome est important, plus il sera à même de négocier à son avantage les accords avec les autres systèmes autonomes.

Il est possible d'inférer ces relations logiques à partir des chemins déduits des tables de routage BGP. Le tableau 2 résume le résultat de cette inférence à partir de la méthode proposée par Gao (2000).

La connaissance des relations logiques permet de construire une hiérarchie des systèmes autonomes mais cette façon de procéder ne répond pas à un des objectifs que nous nous sommes fixés dans cette étude, à savoir pouvoir évaluer l'impact de l'ajout ou du retrait d'une connexion dans le graphe; en effet, l'inférence repose sur les chemins BGP qui sont la résultante de décisions politiques distribuées de l'ensemble des acteurs et il est impossible, par exemple, de prédire comment les chemins BGP se ré-arrangeraient si on supprimait une connexion. Nous travaillerons donc seulement à partir du graphe d'interconnexion.

3.2 La centralité fondée sur le degré

Cette notion de centralité est la plus simple qui inclue un effet de réseau; les experts estiment que ce classement est assez satisfaisant pour les systèmes les plus importants (en particulier, les 5 systèmes autonomes les plus importants de l'Internet ("Tier 1") qui sont tous reliés entre eux par des accords de peering et ne sont clients de personne sont correctement placés en tête de classement, voir le tableau 3) mais surestime l'importance des systèmes autonomes ayant de nombreux voisins "terminaux" (des nœuds qui n'ont qu'un seul voisin).

Pour mémoire, les cinq systèmes autonomes qui forment une clique de pairs au sommet de l'Internet sont UUNET (701), Sprint (1239), ATT (7018), Level 3 (3356), Qwest (209). Une définition moins restrictive du Tier 1 y ajoute les autres systèmes autonomes ayant au moins un lien de peering avec les précédents; s'ajoutent, entre autres, à la liste Cogent (174), NTT Verio (2914), Global Crossing (3549) ou Savvis (ex Cable Wireless) (3561). Ces systèmes ne font pas partie de la clique de pairs mais, ayant au moins une relation de peering avec cette clique, ils ont un accès gratuit à la totalité de l'Internet.

Bien que très simple et obtenant des résultats assez satisfaisants, cette centralité fondée sur le degré ne permet pas de simuler les conséquences de l'ajout ou du retrait d'une connexion au-delà de la seule variation triviale de connectivité des deux systèmes concernés. C'est une conséquence de la différence entre les notions de "connectivité" (mesurée par le degré) et d' "atteignabilité" qui nous intéresse ici.

3.3 La centralité spectrale à partir du graphe d'interconnexion symétrique

Le graphe d'interconnexion entre systèmes autonomes tel qu'on peut le déduire des informations de routage publiquement disponibles est évidemment un graphe symétrique.

On peut lui appliquer le calcul classique de centralité spectrale pour les graphes symétriques (cette approche a également été proposée par Gkantsidis et al (2003)). Le classement obtenu (voir le tableau 3) est clairement insatisfaisant pour les experts du domaine; en particulier, les cinq systèmes autonomes formant le "Tier 1" ne sont pas en tête du classement, l'un d'entre eux ne figurant même pas parmi les 20 premiers.

Centralité fondée sur le degré		Centralité spectrale et heuristique d'orientation $p=1,0$		Centralité spectrale appliquée au graphe d'interconnexion symétrique	
AS	Centralité	AS	Centralité	AS	Centralité
701	1,00	701	1,00	4513	1,00
1239	0,75	1239	0,79	6461	0,93
7018	0,73	7018	0,74	3303	0,92
3356	0,47	3356	0,59	3356	0,92
209	0,46	209	0,48	701	0,83
174	0,29	174	0,41	4589	0,79
8220	0,27	6461	0,38	1239	0,78
3549	0,26	4513	0,36	174	0,75
2914	0,26	8220	0,36	13237	0,75
6461	0,24	2914	0,35	8220	0,69
702	0,23	3549	0,35	8210	0,67
4513	0,22	3303	0,34	12956	0,62
7132	0,21	702	0,28	13129	0,62
3303	0,21	4589	0,28	6939	0,61
4323	0,19	13237	0,26	7018	0,61
4589	0,18	7132	0,24	13030	0,61
3561	0,17	4323	0,23	6320	0,57
13237	0,16	3561	0,23	3491	0,56
2828	0,13	6939	0,21	286	0,56
3786	0,13	2516	0,20	12859	0,54

TAB. 3 –Classement des 20 systèmes autonomes les plus importants selon le critère de centralité. Les valeurs des critères de centralité sont normalisées à leur maximum pour faciliter leur comparaison. Les systèmes autonomes sont repérés par leur numéro d'AS. Les cinq systèmes autonomes les plus importants de l'Internet (Tier 1) sont notés en gras.

3.4 Une heuristique pour orienter le graphe d'interconnexion en fonction de la hiérarchie des systèmes autonomes

Le défaut de l'approche précédente est de laisser symétrique la relation entre deux nœuds au lieu de tenir compte de leur différence de centralité pour orienter le graphe au sens d'une relation client/fournisseur.

Nous proposons ci-dessous une heuristique itérative simple permettant d'introduire progressivement cette asymétrie dans le graphe à partir des différences de classement entre systèmes autonomes. Le résultat de cette heuristique est de permettre de transformer progressivement le graphe d'interconnexion "physique" (symétrique) en un graphe d'adjacence "logique" (asymétrique) en cohérence avec le classement des systèmes autonomes associé.

L'heuristique proposée est la suivante :

Initialisation :

1. tous les nœuds reçoivent une importance intrinsèque;
2. le graphe d'interconnexion est considéré comme un (di-)graphe orienté pondéré, chaque arête non orientée donnant naissance à deux arêtes orientées dans des sens opposés et de poids $\frac{1}{2}$;

Calcul de la centralité et du graphe d'adjacence "logique" :

1. on calcule le score de centralité associé au graphe pondéré obtenu à l'étape précédente et aux importances intrinsèques;
2. on modifie la pondération des arêtes en renforçant l'asymétrie de la relation entre deux nœuds en fonction de leur différence de centralité et on obtient une nouvelle matrice d'adjacence asymétrique.

Ces deux dernières étapes sont déroulées jusqu'à convergence du score de centralité.

Plusieurs modifications de la pondération de l'arête w_{ab}^n entre des nœuds a et b sont envisageables; ci-dessous, nous avons opté pour une modification en fonction des scores c_a^n et c_b^n de centralité à l'étape n normalisés sur $[0,1]$ sous la forme :

$$w_{ab}^{n+1} = (1 - \beta)w_{ab}^n + \beta \Delta_{ab}^n \quad \text{avec} \quad \Delta_{ab}^n = \frac{1}{2} \left[1 + \text{signe}(c_b^n - c_a^n) \left| \frac{c_b^n - c_a^n}{c_b^n + c_a^n} \right|^p \right]$$

En choisissant une valeur faible du paramètre β , on a une adaptation très progressive de l'orientation des arcs à la structure de centralité, ce qui permet de ne pas "figer" brutalement la structure obtenue à l'initialisation.

Le paramètre p permet de faire varier l'importance accordée à un faible écart de centralité entre nœuds : choisir une valeur $p > 1$ accorde une importance faible à de faibles écarts de centralité, ce qui permet d'explorer plus finement la notion de "peering" entre nœuds.

3.5 Résultats expérimentaux pour l'heuristique proposée

3.5.1 Classement de systèmes autonomes

Le tableau 3 montre le classement obtenu à convergence pour $p=1$. Ce classement paraît satisfaisant aux experts du domaine; nous notons en particulier le classement correct des systèmes autonomes du Tier 1. Pour mémoire, le classement des dix premiers systèmes est le

Une hiérarchisation des systèmes autonomes de l'Internet

suivant : UUNET, Sprint, ATT WorldNet, Level 3, Qwest, Cogent, Abovenet, Globix, Colt, NTT Verio.

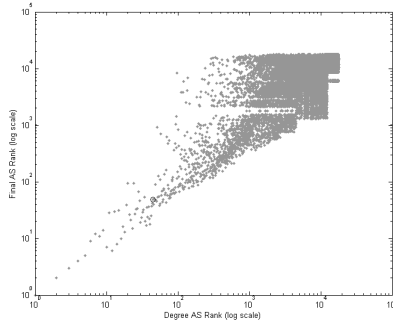


FIG. 2 – Rang obtenu par l'heuristique proposée en fonction du rang déduit du degré

La figure 2 montre la variation du classement obtenu en fonction du classement déduit du degré; on peut observer que pour les systèmes autonomes les mieux classés, la corrélation est forte mais que quelques différences significatives sont néanmoins observables. Noter que les grands écarts de rangs observés pour les systèmes mal classés ne sont guère significatifs, tous ces systèmes étant partiquement ex-aequo avec des scores de centralité très proches de 1.

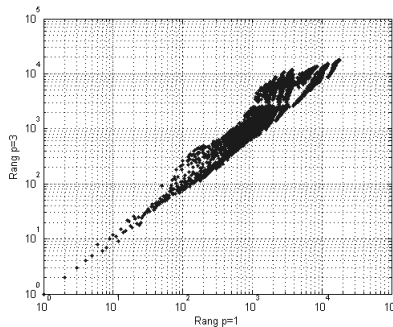


FIG. 3 – Rang obtenu par l'heuristique avec $p=3$ vs rang obtenu par l'heuristique avec $p=1$

3.5.2 Découverte des "peerings" potentiels

La figure 3 montre que modifier le paramètre p de 1 à 3 ne modifie pas significativement le classement du moins pour les systèmes les mieux classés.

Les figures 4 et 5 montrent les poids des arêtes sortantes à partir du système OPENTRANSIT en fonction du rang des systèmes; une valeur supérieure à $\frac{1}{2}$ indique qu'OPENTRANSIT est en position de client; une valeur inférieure à $\frac{1}{2}$ indique qu'OPEN-

TRANSIT est en position de fournisseur , ce caractère étant d'autant plus marqué que l'écart à $\frac{1}{2}$ est grand. Noter qu'une valeur nulle indique qu'il n'y a pas de connectivité entre OPENTRANSIT et le système considéré.

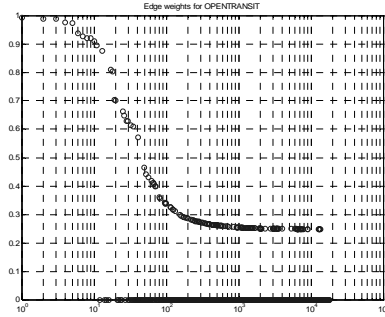


FIG. 4 – Poids des arêtes sortantes de OPENTRANSIT pour $p=1$

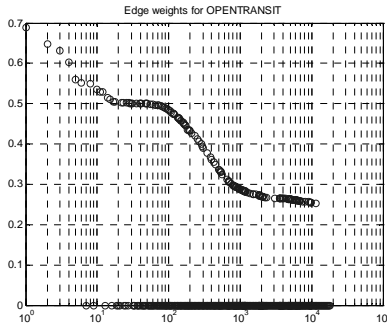


FIG. 5 – Poids des arêtes sortantes de OPENTRANSIT pour $p=3$

Comme on peut le constater, l'utilisation de $p=3$ permet de faire émerger une plage de systèmes autonomes qui sont dans une relation quasi-symétrique vis-à-vis de OPENTRANSIT (poids de l'arête proche de $\frac{1}{2}$) et pourraient donc être considérés comme des "peers" potentiels de OPENTRANSIT au sens du classement obtenu. Ce classement dépendant de la valeur du paramètre p choisi, nous proposons ci-dessous une façon de chercher la valeur du paramètre la plus adaptée. Nous soulignons ici que notre objectif n'est pas d'identifier précisément les peerings existants³ mais plutôt d'identifier les peerings potentiels, c'est-à-dire les connexions concernant des systèmes autonomes d'importances comparables.

³ Ce problème, intéressant en soi pour les fournisseurs de service, est abordé plus efficacement via l'heuristique de Gao (2000)

Une hiérarchisation des systèmes autonomes de l'Internet

Pour cela nous nous restreignons à l'étude des connexions mettant en jeu au moins un système autonome dont la valeur du critère de centralité spectrale dépasse 2. Comme nous avons choisi uniformément une valeur d'importance intrinsèque de 1, tous les systèmes autonomes ont une valeur de centralité spectrale au moins égale à 1. Ce seuil à 2 permet de ne considérer que des connexions mettant en jeu au moins un système autonome pour lequel l'effet de réseau a une importance supérieure à cette importance intrinsèque uniforme; en effet, la notion de "peering" n'a de sens que pour des systèmes autonomes jouant le rôle de fournisseur pour une partie du réseau.

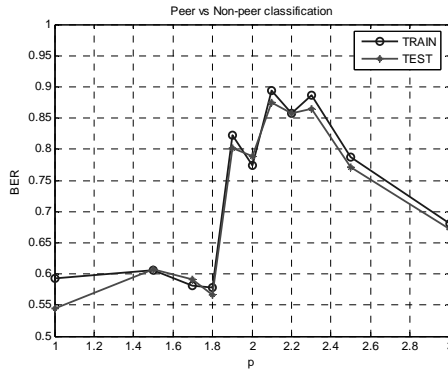


FIG. 6 – Performance de classification "peering"/"non-peering" en fonction de la valeur de p

Nous nous fondons sur le caractère "peering" vs "non-peering" des connexions tel qu'obtenu par application de l'heuristique de Gao (2000) à partir des routes BGP⁴. Les arêtes sont ensuite séparées aléatoirement en un ensemble d'apprentissage et un ensemble de test en proportions égales et pour chaque valeur du paramètre p , on recherche le seuil $t(p)$ optimal pour la règle de classification :

- si $|w_{ij}-1/2| < t(p)$, l'arête (i,j) est de type "peering"
- si $|w_{ij}-1/2| > t(p)$, l'arête (i,j) est de type "non-peering"

Pour chaque valeur de p , le seuil optimal $t^*(p)$ est déterminé à partir du seul ensemble d'apprentissage. Le critère de performance est défini comme la demi-somme du taux de bonne classification dans les classes "peering" et "non-peering". Nous avons choisi ce critère pour donner la même importance à la petite classe des "peerings" face à la classe largement majoritaire des "non-peerings" (voir le tableau 2). La variation du critère de performance (pour le seuil optimal) est donnée sur la figure 6, pour l'ensemble d'apprentissage et pour l'ensemble de test.

Les performances sont proches sur l'ensemble d'apprentissage et sur l'ensemble de test, ce qui montre que le classifieur défini par la règle simple au-dessus possède de bonnes capacités de généralisation; la valeur optimale de p se situe autour de $p^*=2.2$ (associée à une valeur optimale de seuil $t^*(p^*)=0.34$). Le taux de bonne classification est de 0.96 dans la classe peering et 0.77 dans la classe non-peering. Le fait que beaucoup de connexions "client-

⁴ Dans cette partie, on confondra "peering" proprement dit et "sibling".

fournisseur" (23%) soient classées "peering" par le modèle reflète simplement le fait que du point de vue du classement, de nombreuses connexions se font entre systèmes autonomes d'importance équivalentes qui pourraient se traduire par des accords de peerings en fonction des volontés politiques des acteurs concernés.

4 Conclusion

L'approche décrite dans cette communication emprunte la notion de centralité spectrale généralisée au domaine de l'analyse des réseaux sociaux et identifie l'importance d'un système autonome de l'Internet à cette centralité.

S'appuyant sur la différence de centralité entre systèmes autonomes pour orienter et pondérer progressivement la matrice d'adjacence du (di-)graphe d'interconnexion, l'heuristique proposée réalise le passage de la description du graphe en termes de connectivité "physique" à une description du graphe en termes de connectivité "logique". Le classement obtenu est en accord avec les attentes des experts du domaine.

La méthode ne repose que sur des données publiquement disponibles, est reproductible et permet :

1. de simuler les conséquences de l'ajout ou du retrait d'une relation de connectivité
2. de pondérer l'importance E accordée aux différents systèmes autonomes, que ce soit en fonction de leur importance stratégique ou en fonction de critères plus objectifs comme le nombre d'adresses qu'ils atteignent directement
3. d'étudier d'où provient le classement d'un système particulier et donc de comprendre qui sont les voisins qui contribuent le plus à la centralité d'un système autonome particulier.

C'est à notre connaissance la seule méthode à répondre à ces contraintes. Elle est applicable de façon plus générale à tout problème de hiérarchisation pour lequel l'hypothèse d'héritage de l'importance des voisins dominés est valide et pour lequel on possède seulement une information de connexion symétrique entre acteurs

Références

- Bonacich P. et P. Lloyd (2001), Eigenvector-like Measures of Centrality for Asymmetric Relations, *Social Networks*, 23
- Decima M., M. Meulle et Q. Nguyen (2004), SpyBGP: Mapping the Internet from BGP routing table, Note Technique France Télécom
- Chen Q., H. Chang, R. Govidan., S. Jamin, S. Shenker et W. Willinger (2002), The Origin of Power Laws in Internet Topologies Revisited, in Proc. IEEE Infocom
- Gao L. (2000), On inferring autonomous system relationships in the Internet, in Proc. IEEE Global Internet Symposium
- Gao L. et F. Wang (2002), The extent of AS path inflation by routing policies, in Proc. IEEE Global Internet Symposium

Gkantsidis C., M. Mihail et E. Zegura (2003), Spectral Analysis of Internet Topologies, in Proc. IEEE Infocom

Griffin T. G., F. B. Shepherd et G. Wilfong (2002), The stable paths problem and interdomain routing, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 10:232-243

Summary

The worldwide scale transit of information flows in the Internet is governed by trade agreements between autonomous systems; these agreements are translated into routing policies by the Border Gateway Protocol (BGP). The negotiation of these trade agreements implicitly relies on a hierarchy of the autonomous systems and the relative position of two systems leads to an agreement of the customer-provider type (one of the systems, the provider, is ranked higher than the other, the client, and the client pays the provider for the transit of information flows) or to a no cost agreement of the "peering" type (two service providers that agree to exchange traffic between their respective customers) when both systems consider their rankings to be equivalent. In spite of its importance, there is no official hierarchy of the Internet (the commercial clauses of the agreements between autonomous systems are not necessarily public, it is usually a bilateral arrangement) nor a consensus on the way of establishing such a hierarchy. We propose a simple heuristic inspired of the concept of "spectral centrality" borrowed from the social networks analysis to analyze the relative positions of the autonomous systems of the Internet starting from their connectivity information only.