

Que nous apprend la topologie du réseau Internet sur la structure de marché et les stratégies d'acteurs de l'Internet ?

Jean-Sebastien Bedo ^a, Nathalie Colombier ^b, Zouhaïer M'Chirgui ^{b, c*} et
Thierry Pénard ^b

^a Orange R&D

^b CREM, Université de Rennes 1, Marsouin

^c Groupe ESC Troyes

Résumé

Dans cet article, nous proposons une analyse de la topologie du réseau Internet (i.e. une analyse de la structure des relations entre les principaux acteurs d'Internet) afin de mieux comprendre l'organisation industrielle d'Internet et les stratégies d'acteurs. Nous montrons en particulier que le réseau des acteurs centraux d'Internet présente une structure petit monde dont l'intérêt est de faciliter la coopération entre ces acteurs (une structure petite monde présentant des propriétés d'efficacité en termes de coordination et de communication). La topologie d'Internet se caractérise toutefois par une certaine instabilité qui reflète la concurrence entre certains acteurs et peut dégrader la confiance dans le réseau. Enfin, nous montrons que le choix de s'interconnecter entre deux opérateurs dépend du degré de symétrie et de leur proximité géographique.

Mots-clés: *Internet, Peering, Transit, externalités de réseaux; accords d'interconnexion.*

* Groupe ESC Troyes, Champagne School of Management,
217, avenue Pierre Brossolette –BP 710- 10002 Troyes Cedex, France
Tel + 33 3 25 71 22 73; Fax: + 33 2 25 71 22 38;

Que nous apprend la topologie du réseau Internet sur la structure de marché et les stratégies d'acteurs de l'Internet ?

Résumé

Dans cet article, nous proposons une analyse de la topologie du réseau Internet (i.e. une analyse de la structure des relations entre les principaux acteurs d'Internet) afin de mieux comprendre l'organisation industrielle d'Internet et les stratégies d'acteurs. Nous montrons en particulier que le réseau des acteurs centraux d'Internet présente une structure petit monde dont l'intérêt est de faciliter la coopération entre ces acteurs (une structure petite monde présentant des propriétés d'efficacité en termes de coordination et de communication). La topologie d'Internet se caractérise toutefois par une certaine instabilité qui reflète la concurrence entre certains acteurs et peut dégrader la confiance dans le réseau. Enfin, nous montrons que le choix de s'interconnecter entre deux opérateurs dépend du degré de symétrie et de leur proximité géographique.

Mots-clés: Internet, Peering, Transit, externalités de réseaux; accords d'interconnexion.

1. INTRODUCTION

Internet est le réseau informatique mondial qui rend accessibles au public des services comme le courrier électronique et le World Wide Web. Techniquement, Internet est un ensemble de réseaux IP (Internet Protocol) interconnectés qui transportent des données sous forme de paquet à la demande des utilisateurs. Il existe une hiérarchie dans les opérateurs, avec au niveau supérieur des IBP (Internet Backbone Providers) qui fournissent de la connectivité universelle aux opérateurs régionaux ou locaux qui sont appelées des ISP (Internet Service Provider). Le nombre d'IBP est assez faible, de l'ordre d'une vingtaine. Les IBP disposent d'une large couverture mondiale et sont interconnectés entre eux sous forme d'accords de peering qui ne prévoit pas de compensation financière. En revanche, les relations des IBP avec les ISP sont en règle générale des relations de type client-fournisseur et se matérialisent par des accords de transit qui prévoient une rémunération de l'IBP pour le service de connectivité fournie.

Les ISP sont des opérateurs régionaux qui fournissent des services d'accès et de connectivité à des utilisateurs finals au niveau régional. Là encore, deux types d'accords d'interconnexion peuvent prévaloir entre les ISP. La règle pour les échanges de trafic entre clients de deux ISP est l'accord de peering sans compensation financière. Mais, lorsque les ISP présentent des trafics déséquilibrés, le peering peut être remplacé par un accord payant (paid peering), le plus petit devant payer une somme le plus souvent forfaitaire pour être interconnecté avec le plus gros.

Chaque ISP se caractérise à la fois par la nature intrinsèque de son réseau (couverture géographique, débits, profils et nombre de clients, contenu des services) et par ses accords d'interconnexion avec ses homologues. Un ISP ne peut vendre de l'accès à Internet sans conclure un minimum d'accords d'interconnexion, notamment avec un ou plusieurs IBP, car c'est le seul moyen de garantir à ses clients un lien avec l'ensemble des utilisateurs et des sites mondiaux.

L'interconnexion entre ces différents acteurs se fait sur la base du mode « best effort ». Il s'agit d'un mode de routage décentralisé et guidé par le choix de la meilleure route pour transporter les paquets de données de l'origine à sa destination, mais sans garantie de qualité de service ou de priorité. Avec l'explosion en 2000 de la bulle Internet qui a profondément

modifié la topologie du réseau Internet et le développement récent de nouveaux services, particulièrement les applications à temps réel comme la voix sur IP (VoIP) et la vidéo conférence, le problème s'accroît. Ces services exigent un certain niveau de qualité que le mode best effort semble difficilement procurer à l'heure actuelle. Comment faire évoluer le réseau Internet vers un nouveau régime d'interconnexion et de routage qui permette de garantir un certain niveau de qualité de service (QoS) ?

Une deuxième question est de savoir comment les opérateurs peuvent rentabiliser leurs investissements dans un système de best effort qui privilégie le peering. Sachant que des investissements considérables seront nécessaires pour déployer de la qualité de service et des réseaux d'accès ultra-haut débit, les questions du pouvoir de marché respectif et du partage de la valeur entre fournisseurs de services d'accès et de transit (services réseaux) et fournisseurs d'applications et de contenus sont centrales.

Par ailleurs, la qualité du service de transport IP offert par un ISP est une fonction croissante de la capacité de son réseau propre, mais aussi de la capacité des réseaux avec lequel il est interconnecté. L'interconnexion des réseaux IP crée des *externalités de réseau et des risques de passager clandestin*. Chaque opérateur a deux variables stratégiques à sa disposition : le niveau de ses investissements en capacité de transport, qui sont pour l'essentiel des coûts irrécupérables, et le nombre et la nature des accords d'interconnexion qu'il signe avec les autres opérateurs. Cette situation peut s'analyser comme un dilemme du prisonnier. Les opérateurs ont clairement un intérêt commun à s'interconnecter et à coopérer pour échanger leur trafic, et les gains attendus de cette coopération seront une fonction croissante des investissements en capacités consentis par l'ensemble des opérateurs. Mais individuellement, chaque opérateur a une incitation à sous-investir dans son réseau et à adopter un comportement de *passager clandestin*, puisqu'il peut utiliser gratuitement les réseaux de ses partenaires pour améliorer la qualité de ses services. S'il est interconnecté en plusieurs points avec un autre opérateurs, il peut être tenté de lui transmettre le plus tôt possible les paquets à destination des clients de ce dernier et lui laisser ainsi assumer l'essentiel des coûts de transport (principe de *hot potato*). De cette manière, il réalise des économies substantielles sur son propre réseau. Le *peering* serait donc à première vue une forme d'accord instable, exposé à l'opportunisme des opérateurs et qui ne favoriserait pas la qualité de service.

La mise en place de services à qualité garantie nécessite donc l'établissement de relations contractuelles qui encouragent les acteurs à partager leurs ressources (leurs informations, leurs routes, ...) et à investir suffisamment. L'architecture actuelle d'Internet est-elle favorable au développement d'une telle coopération ? Les relations existantes permettent-elles de supporter des services en inter-domaine (faisant appel à plusieurs opérateurs) avec qualité de service garantie ? Dans cet article, notre objectif est d'analyser la dynamique des relations contractuelles existantes entre les fournisseurs de services ou de contenus, de transit et d'accès local sur Internet. En s'appuyant sur la théorie des réseaux, nous examinons les propriétés du réseau Internet et plus particulièrement les propriétés des relations inter-domaines (i.e. les relations d'interconnexion entre les opérateurs), à partir des données collectées par France Télécom. De nombreux travaux se sont attachés à modéliser la structure topologique du réseau d'internet à la fois au niveau des systèmes autonomes et des *routeurs*. Deux types de structure topologique ont été mises en évidence. D'une part, plusieurs études ont montré que ce réseau présente une structure sans échelle (Barabási et Albert, 1999; Faloutsos *et al.*, 1999; Vasquez *et al.*, 2002). D'autres ont mis en évidence l'existence d'une structure petit monde (Barceló *et al.*, 2004; Jin and Bestavros, 2006). Notre travail cherche à relier ces analyses de réseaux à des analyse d'économie industrielle (analyse de la structure du marché et des stratégies d'acteurs). Dans un second temps, nous proposons de modéliser les décisions d'interconnexion entre opérateurs (qu'il soit ISP ou IBP, en se concentrant sur les 100 premiers) en se concentrant sur quelques variables caractérisant les opérateurs eux-mêmes et non les routes empruntés et de rechercher les principaux déterminants des accords (et du choix entre peering et transit). Nous mettons en évidence l'importance de la symétrie, de la proximité et de la rivalité dans le choix de s'interconnecter ou non et dans les modalités d'interconnexion.

Le reste de l'article est organisé de la manière suivante. La section suivante décrit la structure des relations inter-domaines dans Internet. La section 3 présente les données utilisées et procède à une analyse topologique des relations inter-domaines. La section 4 concerne les déterminants des accords d'interconnexion entre opérateurs. Enfin, la section 5 conclut.

2. LA STRUCTURE DES RELATIONS INTERNET

Les relations Internet sont caractérisées par une structure hiérarchique. La nature des accords d'interconnexion a largement contribué à l'existence d'une telle structure hiérarchique.

Plusieurs niveaux sont souvent distingués pour caractériser la structure des relations entre les acteurs de l'Internet. Tout d'abord, en amont, les systèmes autonomes (AS) de premier rang (appelés aussi Tier1) qui forment le réseau de cœur d'Internet et assurent la connectivité universelle. Ces acteurs, appelés aussi Internet Backbone Providers, n'ont pas de fournisseur (donc pas de coût d'interconnexion). Par exemple Level 3, MCI WorldCom- UUNET, PSINet Inc, etc. Ensuite, les acteurs de second rang qui ont une couverture plus régionale ou nationale. Parmi ces acteurs de second rang, on trouve aussi des fournisseurs de services et de contenus sur Internet, mais qui ne fournissent pas de service de transport (par exemple Skype, Google, *msn*, etc). Ces Internet Services Providers sont plusieurs milliers dans le monde. Enfin, en aval, on trouve les fournisseurs d'accès local (IAP) sur Internet comme AOL, *Free*, etc. Ils représentent le réseau de collecte sur Internet, en contact avec l'utilisateur final. De nombreux acteurs de l'Internet sont intégrés et sont donc présents sur plusieurs niveaux comme France Télécom qui est à la fois un IAP et un ISP et fournit aussi des services de connectivité à certains ISPs.

Il existe deux grands modèles de rémunération entre les acteurs Internet qui s'interconnectent

Bill & keep (BK) ou Sender-Keep-All ou Peering

Dans ce modèle, les deux acteurs qui s'interconnectent acceptent réciproquement d'échanger du trafic gratuitement. Il n'y a donc aucun échange monétaire entre les deux acteurs et chacun se rémunère en facturant ses clients avec son propre schéma tarifaire. Dans le cas où l'usage et les coûts fixes d'interconnexion sont symétriques entre les deux acteurs, les deux parties retirent le même gain de l'interconnexion. Le problème se pose lorsque les trafics sont déséquilibrés entre les deux parties entraînant une asymétrie des coûts supportés et les gains obtenus par chacun des opérateurs.

Smaller Party Pays ou transit

Dans ce modèle, les deux acteurs ont généralement une "taille" différente (par exemple en terme de base clientèle) et le plus petit (le client) paie pour le trafic montant ou descendant, principalement sous la forme d'un forfait qui dépend de la capacité de la bande passante au point d'interconnexion.

L'absence de politique de régulation des accords d'interconnexion a largement contribué à leur évolution et à renforcer la structure hiérarchique d'Internet. Plusieurs travaux théoriques et empiriques ont alors examiné les stratégies optimales d'interconnexion, notamment avec l'accentuation des problèmes d'asymétrie au niveau du trafic, des bénéfices et des coûts générés par les accords. L'introduction de la qualité de service (QoS)¹ a accentué ces problèmes, notamment des problèmes de *free-riding* qui contraignent les opérateurs à trouver des moyens de contrôle des comportements des opérateurs. Ce contrôle est traduit dans les politiques de peering qui visent essentiellement à s'assurer que les opérateurs qui s'interconnectent ont un niveau d'investissement en qualité équivalent. Sans aucune standardisation des services proposés par chaque opérateur, le problème est encore accru. Toutefois, il est toujours avantageux de passer au peering sur la base de « *bill and keep* » si les structures de coût entre les opérateurs sont symétriques et si les utilisateurs finaux sont homogènes.

Les relations inter-domaines se caractérisent ainsi à la fois par une logique de complémentarité et/ou de coopération notamment dans l'achèvement de la connectivité universelle à travers les accords de peering et par une logique de concurrence sur le marché aval (augmenter la taille de la base clientèle). En ce sens, plusieurs travaux ont examiné la décision d'interconnexion entre les inter-domaines en mettant l'accent sur le rôle d'asymétrie de taille. Les principaux travaux théoriques sur les stratégies d'interconnexion remontent aux travaux de Crémer *et al.* (2000). Certains ont étudié cette décision dans le cas où les inter-domaines se concurrencent par les prix (concurrence à la Bertrand) [Crémer *et al.*, 2000 ; Foros et Hansen, 2001 ; Badasyan et Chakrabarti, 2003 ; Laffont *et al.*, 2003 ; Carter *et* Wright (2003 ; Jahn et Prüfer, 2004] et d'autres dans le cas où les inter-domaines se concurrencent par la quantité (concurrence à la Cournot) [Baake et Wichmann, 1999 ; Weiss et Shin, 2004 ; Economides, 2006]. L'ensemble de ces travaux ont trouvé que les épines dorsales gardent des accords de peering avec des épines dorsales de même taille dans la base installée des clients et appliquent des accords de transit avec les autres inter-domaines. Par exemple, Carter et Wright (2003) ont développé un modèle théorique dans lequel ils ont montré qu'en raison de l'asymétrie de taille les grands réseaux préfèrent toujours établir un accord d'interconnexion réciproque en termes de coûts, en occurrence de peering. Pour un niveau d'asymétrie suffisamment important les petits réseaux affichent également la même préférence. Weiss et

¹ La QoS est une indexe utilisée pour désigner un ensemble de termes qui exprime une garantie d'un certain débit.

Shin (2004) ont trouvé que l'asymétrie de taille (part de marché en termes du volume du trafic) affecte négativement la décision de peering. Les inter-domaines préfèrent ainsi établir des accords de peering avec des inter-domaines de même taille et pratiquer des accords de transit pour des inter-domaines de niveau inférieur

Toutefois si les contributions théoriques sont plus ou moins importantes, les travaux empiriques restent très limités (D'ignazio et Giovannetti, 2006 ; Giovannetti *et al.*, 2007. Lippert et Spagnolo, 2007). Les quelques travaux qui existent, tentent d'apporter une réponse aux propositions avancées. Le présent article s'inscrit dans cette ligne et vient s'ajouter à la littérature empirique en proposant d'analyser la topologie du réseau Internet afin de mieux comprendre l'organisation et les stratégies d'acteurs d'une part, et d'autre part, d'examiner les déterminants de choix d'interconnexion sous-tendant ces stratégies d'acteurs. Deux types d'analyse sont mobilisés : une analyse réseau et une analyse économétrique

3. ANALYSES ET RESULTATS

Nous décrivons tout d'abord les données. Ensuite, nous étudions les propriétés structurelles des différents réseaux des relations inter-domaines afin de caractériser leur topologie (analyse au niveau 'macro'). Enfin nous analysons la position et la centralité des différents inter-domaines au sein de ces réseaux (analyse au niveau 'micro').

3.1. Description des données

Notre travail empirique se fonde sur les données des relations inter-domaines élaborées à partir des tables de routages BGP (*Border Gateway Protocol*) disponibles sur les routeurs ouverts de l'Internet et grâce à un algorithme d'inférence.

Le protocole de routage inter domaine BGP permet à chaque système autonome de définir des politiques de routage vers les autres domaines. Les politiques permettent par exemple de filtrer les routes à importer ou à annoncer suivant les accords d'interconnexion commerciaux conclus entre les domaines, de privilégier le choix d'un chemin, ou encore de prévoir les voies de secours.

Ainsi, la propagation des routes dans l'Internet est toujours sans vallée, c'est-à-dire qu'un système autonome (AS) ne transmet pas les routes qui transitent par ses fournisseurs à ses pairs (afin d'éviter de payer du trafic pour lequel l'AS ne reçoit aucune rémunération). En observant les transmissions de routes entre les AS on peut donc inférer la nature de leurs relations :

- aucune si aucune route n'est transmise entre les AS
- peering si les routes sont transmises de manière sélective
- client si toutes les routes sont transmises

Le problème est que seule la meilleure route est conservée dans les tables de routage BGP et il n'est donc pas aisé de repérer les transmissions de route à partir des tables BGP uniquement.

Les données mensuelles couvrent une période de 18 mois entre l'année 2005 et 2006.

Pour chaque mois, nous avons ensuite échantillonné les données qui regroupaient l'ensemble des AS de l'Internet. L'échantillon regroupe l'ensemble des accords d'interconnexion établis par les 100 premiers domaines (le rang est calculé à partir du cône de clients²). L'unité d'analyse est une dyade qui représente deux ISP (nous les désignons par ISP1 et ISP2, l'ISP1 étant par construction l'ISP ayant le rang le plus élevé). Dans le cas d'une relation *provider-to-customer*, le *provider* est l'ISP1 et le *customer* l'ISP2. Cela nous conduit à un échantillon de 4 950 accords potentiels, parmi lesquels nous pouvons observer environ 65 % des accords réalisés sont de type *peer-to-peer* (P2P), et 35 % de type *provider-to-customer* (P2C).

Ce choix d'échantillonnage peut facilement se justifier. L'Internet se caractérise par une hiérarchie de réseau ; au sommet de la hiérarchie, les épines dorsales (les *backbones*) dessinent le cœur de l'Internet. Ils garantissent la connectivité universelle du réseau. Ces épines dorsales par leur politique d'interconnexion, jouent un rôle central dans la qualité de la connectivité. Elles sont aussi un maillon essentiel dans la chaîne de valeur de l'Internet, à travers les accords *provider-to-customer* qu'elles signent avec les ISP de niveau inférieur (ces accords générant un flux de revenu du client final vers ces épines dorsales). La mise en place de nouveaux modèles économiques et de nouveaux services ne peut donc pas se faire sans ces acteurs centraux dans le cas des fermes de serveurs centralisées. C'est pourquoi il est important d'étudier la topologie du réseau à son niveau le plus élevé. De plus, la diversité des

² Voir J. Xia and L. Gao, On the Evaluation of AS Relationship Inferences, IEEE Globecom, 2004.

AS est telle que conserver l'ensemble des relations induit un biais par rapport à l'observation des comportements des opérateurs de réseaux principaux. Ainsi, certains AS sont détenus par de petites entreprises qui utilisent un numéro d'AS pour faciliter la gestion de leur adressage mais ne sont pas en proie aux problématiques de rentabilité des interconnexions des opérateurs de réseaux. De même, les fournisseurs de contenus et de services détiennent de nombreux numéros d'AS pour leur adressage parfois au sein des réseaux de collecte.

Nous distinguons les Tier 1 et les Tier 2 afin de mieux saisir les différences de comportements entre les niveaux hiérarchiques de l'Internet. Les Tier 1 n'ont pas de fournisseur et les Tier 2 n'ont que des fournisseurs parmi les Tier 1. Le tableau 1 présente la répartition des domaines selon leur niveau hiérarchique (Tier 1, 2, 3 ou 4) pour les trois périodes étudiées.

	2005_07	2006_01	2006_7
Tier1	13	12	19
Tier2	71	73	69
Tier3	15	13	9
Tier4	1	2	3
Total	100	100	100

Tableau 1 : La répartition hiérarchique des domaines

3.2. Topologie des relations inter-domaines

Les propriétés topologiques macro d'un réseau comme l'accessibilité (*path length*) ou la cohésion (*clustering coefficient*) sont généralement étudiées pour définir la structure d'un réseau. Plusieurs travaux ont montré que le réseau Internet présentait une structure petit monde ou small world (forte accessibilité et forte cohésion).

Le concept de petit monde ou '*small world*' trouve son origine dans des travaux américains de psychosociologie durant les années soixante (Milgram, 1967). Ces travaux faisaient référence à une première expérience qui avait été conduite à l'époque et qui consistait à étudier à travers combien d'intermédiaires successifs il était possible de relier deux personnes, choisies de manière aussi arbitraire que possible, sur le territoire des Etats-Unis. Le résultat de cette expérience connu sous le vocable « *six degrees of separation* » exprimait qu'il était possible

de relier deux personnes quelconques à travers une chaîne de connaissance d'une longueur moyenne de six relations interindividuelles. Ces travaux ont été par la suite remis en intérêt par un jeune doctorant de mécanique théorique et appliquée (Watts [1999], Watts et Strogatz, [1998]) en suscitant l'attention d'autres disciplines, notamment l'économie (Cowan et Jonard, 2004).

Les caractéristiques du réseau "petit monde" semblent particulièrement adaptées à la mise en place de services différenciés avec QoS : une **cohésion forte** permet de réduire les risques d'opportunisme dans les relations interdomaine (plus grande solidarité et confiance entre les acteurs, meilleur contrôle des comportements de chaque acteur) et une **accessibilité forte** permet de mieux maîtriser la qualité de service (coordination plus facile, car moins d'acteurs impliqués dans la fourniture du service de bout en bout). Il reste donc à déterminer si la politique d'interconnexion actuelle dans Internet est suffisante pour faire émerger cette topologie *small world* ou si une révision des politiques de peering apparaît nécessaire pour renforcer les cliques (**cohésion forte**) et raccourcir les chemins (**accessibilité forte**).

Empiriquement, la nature « petit monde » d'un réseau est déterminée en comparant les valeurs de l'accessibilité (*path length*) et du coefficient de cohésion (*clustering*) du réseau en question (L, C) avec celles d'un réseau aléatoire (L_R, C_R) ayant le même nombre de nœuds, n et de liens, k (Watts 2003). Pour un réseau aléatoire, le niveau d'accessibilité est mesuré par $L_R(n, k) \sim \ln(n)/\ln(k)$ et le coefficient de cohésion par $C_R \sim k/n$ pour $n \gg k \gg \ln(n) \gg 1$, avec n le nombre de nœuds (acteurs) et k la valeur moyenne du nombre de liens (*average degree*)³.

Un réseau est caractérisé par un effet petit monde si $L \approx L_R$ (accessibilité identique) et $C \gg C_R$ (cohésion plus forte que dans un réseau régulier) ou encore $(C/C_R)/(L/L_R) > 1$.

Nous analysons les propriétés petit monde sur trois dates séparées d'un intervalle de 6 mois (juillet 2005, janvier 2006 et juillet 2006). Le tableau 2 présente l'évolution des propriétés « petit monde » du réseau des 100 premiers acteurs ou domaines (sont aussi présentés les propriétés des seuls Tier1 et des seuls Tier2), à ces trois dates différentes. Le tableau 2 indique clairement que le réseau Internet aux niveaux les plus élevés affiche des propriétés

³ La condition $n \gg k$ suppose une faible densité du réseau ; c'est-à-dire qu'il n'existe aucun acteur dominant auquel la plupart des acteurs lui sont directement connectés. Tandis que la condition $k \gg \ln(n)$ garantit que le réseau aléatoire est connecté.

« petit monde », surtout lorsque l'on se concentre sur les seuls Tier 1 (accessibilité proche de celle d'un réseau aléatoire, mais cohésion plus forte que dans un réseau aléatoire).

Ce résultat peut s'expliquer par la politique d'interconnexion des domaines de rang élevé. Avec l'augmentation du nombre de domaine et de services demandés, les politiques d'interconnexion des épines dorsales ont évolué vers une discrimination des accords selon la taille de l'autre domaine : *peering* avec les domaines équivalents et *accords de transit* avec des acteurs de rang inférieur. Ceci a renforcé la nature *small world* ou clique des Tier 1.

Tableau 2. Les caractéristiques « petit monde » des trois réseaux (Top 100, Tier1, Tier2)

Période	Inter-domaines	Nombre de relations	Moyenne des degrés	Moyenne path length	Moyenne path length (aléatoire)	L/L _R	Coefficient de cohésion	Coefficient de cohésion (aléatoire)	C/C _R	Coefficient Petit monde
Top 100										
2005_7	100	1964	19,52	1,97	1,54	1,27	0,58	0,19	2,97	2,33
2006_1	100	1836	18,24	2,05	1,58	1,29	0,52	0,18	2,83	2,19
2006_7	100	1944	19,54	2,05	1,54	1,32	0,55	0,19	2,82	2,13
Tier 1										
2005_7	91	968	10,637	2,03	1,90	1,06	0,84	0,11	7,11	6,66
2006_1	88	798	9,068	2,05	2,03	1,01	0,86	0,10	8,33	8,23
2006_7	87	970	11,149	2,02	1,85	1,09	0,62	0,12	4,81	4,40
Tier 2										
2005_7	99	1742	17,596	2,02	1,60	1,26	0,49	0,17	2,75	2,17
2006_1	101	1680	16,634	2,11	1,64	1,28	0,44	0,16	2,65	2,06
2006_7	96	1694	17,646	2,04	1,59	1,28	0,47	0,18	2,55	1,98

3.3. Distribution des degrés

Nous examinons maintenant la distribution des degrés en loi de puissance. Une distribution en loi de puissance est une distribution statistique dans laquelle une variable est proportionnelle à une puissance de l'autre. Une fois tracés sur une échelle de log/log, les différents points sont distribués selon une ligne droite. Une distribution en loi de puissance souligne la présence d'un comportement d'attachement préférentiel (Barabási et Albert, 2002). Cela signifie que la probabilité qu'un nouveau nœud soit connecté au nœud i dépend linéairement du nombre k_i de degrés. Les nouveaux nœuds ont une probabilité plus élevée de se lier aux nœuds ayant le plus grands nombre de degrés qu'aux nœuds ayant un nombre de degrés faibles. Par conséquent, les nœuds fortement connectés deviennent davantage connectés dans le temps. Ces nœuds fortement connectés dominent la topologie du réseau en formant des 'nœuds centraux'. Ainsi,

la centralité de ces nœuds fonctionne comme élément attractant pour que des nouveaux nœuds rejoignent le réseau.

Les figures 2a, 2b et 2c montrent clairement que la distribution des degrés ne suit pas une loi de puissance (pour la date 2006_1). Elles indiquent une distribution en loi de puissance *incomplète* dans la mesure où les degrés ne sont pas distribués comme une ligne droite lorsqu'ils sont tracés sur une échelle de log/log. Par conséquent, ces réseaux n'exhibent pas une structure sans échelle. Ce résultat est très important puisqu'il diverge de l'explication « physique » sur la dynamique de la formation de réseau à la Barabási (2002). Il indique que la structure actuelle d'Internet n'est pas complètement cannibalisée par quelques acteurs, même s'ils y jouent un rôle crucial. Autrement dit, il n'existe pas d'acteurs très dominants parmi les 100 premiers domaines qui contrôlent l'ensemble de la structure sous-tendant le trafic des flux. Certes, il existe des acteurs qui ont un pouvoir de marché important et peuvent influencer l'échange du flux mais ce pouvoir semble être réparti entre ces derniers d'une manière relativement équilibrée. Une telle situation ne peut que conduire à une multiplication de solution QoS hétérogènes et un renforcement de la concurrence entre les domaines. Ces derniers tendent à se concurrencer pour établir et imposer leurs propres mécanismes QoS. La question de supports QoS, sous-tendant une logique de standards, et de l'interopérabilité, étroitement liée à la dominance technologique, devient ainsi un facteur de concurrence et joue un rôle crucial dans le développement des services différenciés et pour ériger des barrières à l'entrée.

Toutefois, les figures montrent une différence dans la distribution des degrés. La figure 2b montre une distribution plus proche d'une distribution en loi de puissance que les deux autres figures (elle tend vers une structure sans échelle). Ce résultat indique qu'il existe quelques domaines qui contrôlent le réseau des relations d'interconnexion parmi l'ensemble des domaines tier1, sans toutefois former des positions fortes de 'nœuds centraux'. La structure du réseau à ce niveau semble alors plus stable et par conséquent plus favorable au développement des relations de coopération dans une perspective de mise en place de mécanismes QoS en commun.

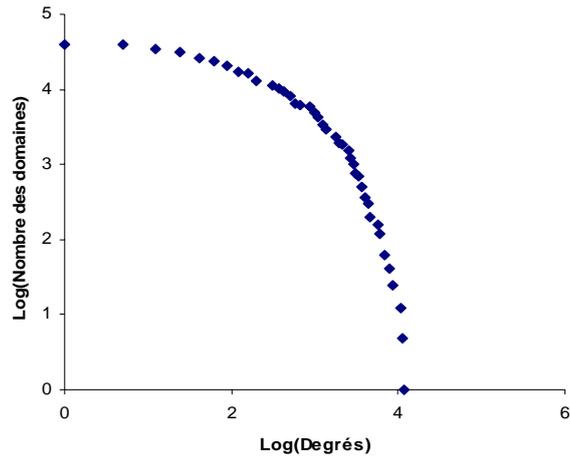


Figure 2a. Répartition selon la loi de la puissance (TOP 100)

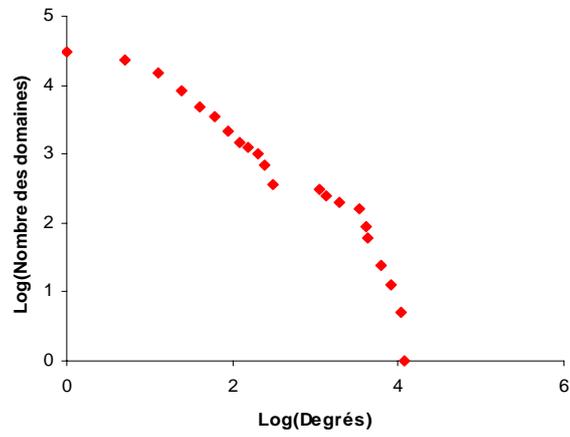


Figure 2b. Répartition selon la loi de la puissance (Tier 1)

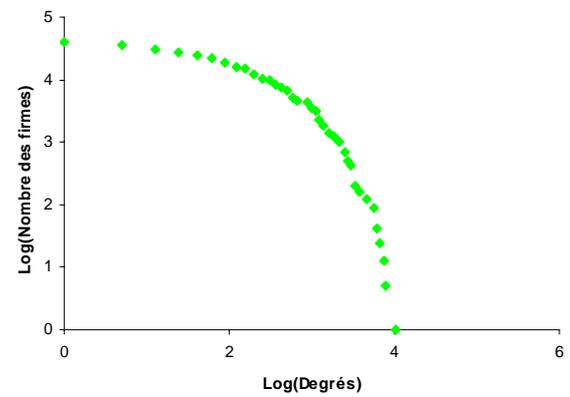


Figure 2c. Répartition selon la loi de la puissance (Tier 2)

La présence de propriétés *petit monde* notamment dans le réseau des Tier 1 d'une part, et l'absence d'une structure caractérisée par des acteurs fortement connectés formant des '*hubs*' d'autre part, a deux implications. D'une part, le réseau d'interconnexion des Tier 1 présente une structure qui favorise la réduction des coûts de coordination et de communication. D'autre part, la topologie actuelle d'Internet ne semble pas suffisamment stable dans la mesure où les principaux acteurs centraux détiennent un nombre de degrés relativement similaire (*pas de propriété scale-free*). En revanche, c'est un indice d'une bonne concurrence entre les acteurs de même niveau. Nous étudions dans la section suivante la position et la centralité des acteurs au sein du réseau ainsi que son évolution à travers les trois périodes en question.

3.4. Centralité des acteurs

Dans cette sous-section on s'intéresse en particulier à la stabilité de ces relations d'interconnexion. Deux mesures de centralités sont calculées⁴. La centralité de degrés d'un acteur ou domaine mesure le nombre de liens ou de degrés formé par cet acteur et la centralité d'intermédierité mesure la proportion en nombre de chemins entre n'importe quelle paire qui passe par cet acteur. L'acteur du réseau qui détient une valeur élevée de centralité d'intermédierité peut bien être faiblement connecté aux autres et même relativement éloigné, mais sert d'intermédiaire dans bon nombre des échanges entre les autres membres du groupe. Plus il sert ou peut servir d'intermédiaire pour tous les membres, plus il est en position de contrôler la communication ou d'être indépendant des autres pour communiquer. Un tel individu peut influencer le groupe plus facilement en filtrant ou distordant les informations qui y circulent. Sa position lui permet également d'assurer la coordination du groupe.

Les tableaux 3, 4 et 5 présentent les 10 premiers domaines en termes de centralité de degré parmi les 100 premiers domaines, les tier1 parmi les 100 premiers domaines et les tier2 parmi les 100 premiers domaines.

Le tableau 3 (top 100 domaines) montre que seulement LEVEL3 (tier1) ABOVENET (tier1) PSINET (tier1) HURRICANE (tier2) sont présents à travers les trois sous périodes d'analyses. Le tableau 4 (uniquement les 10 premier tier1 parmi le top 100 domaines) montre

⁴ l'annexe A présente les formules de calcul des différentes mesures de centralité

que seulement LEVEL3 (tier1) VERIO (tier1) TELIANET (tier1) COLT (tier1) TELEGLOBE-AS (tier1) sont présents à travers les trois sous périodes d'analyses. Le tableau 5 (les 10 premiers tier2 parmi les 100 domaines) montre que seulement HURRICANE (tier2) et INTERROUTE (tier2) sont présents à travers les trois sous périodes d'analyses. On remarque que seulement LEVEL3 (tier1) est présent parmi les 10 premiers des deux premiers réseaux et par conséquent il joue un rôle central dans les relations d'interconnexion.

Tableau 3. Centralité de degrés pour le réseau Top 100

Nom ISP (2005_07)	Degrés	Nom ISP (2006_01)	Degrés	Nom ISP (2006_07)	Degrés
SWISSCOM (tier2)	61	PSINET (tier1)	59	PSINET (tier1)	64
ABOVENET (tier1)	57	COLT (tier1)	57	CAIS-ASN (tier2)	54
LEVEL3 (tier1)	56	ABOVENET (tier1)	56	ABOVENET (tier1)	54
PSINET (tier1)	56	LEVEL3 (tier1)	50	TDC (tier2)	52
VERIO (tier1)	53	HURRICANE (tier2)	49	LEVEL3 (tier1)	49
SPRINTLINK (tier1)	51	INTERROUTE (tier2)	46	HURRICANE (tier2)	46
HURRICANE (tier2)	49	KPN (tier2)	44	VERIO (tier1)	45
REACH (tier2)	44	TELIANET (tier1)	43	TELIANET (tier1)	45
LAMB DANET-AS (tier2)	44	TELENOR (tier2)	43	KPN (tier2)	43
CAIS-ASN (tier2)	43	TELECOMPLETE (tier2)	39	GBLX (tier2)	43

Tableau 4. Centralité de degrés pour le réseau Tier 1

Nom ISP (2005_07)	Degrés	Nom ISP (2006_01)	Degrés	Nom ISP (2006_07)	Degrés
ABOVENET (tier1)	57	PSINET (tier1)	59	LEVEL3 (tier1)	49
PSINET (tier1)	56	COLT (tier1)	57	VERIO (tier1)	45
LEVEL3 (tier1)	56	LEVEL3 (tier1)	50	TELIANET (tier1)	44
VERIO (tier1)	53	TELIANET (tier1)	44	TELEGLOBE-AS (tier1)	41
SPRINTLINK (tier1)	51	Deutsche Telekom (tier1)	38	SPRINTLINK (tier1)	36
TELIANET (tier1)	41	SPRINTLINK (tier1)	38	COLT (tier1)	30
COLT (tier1)	40	VERIO (tier1)	37	PORT80 (tier1)	30
TELEGLOBE-AS (tier1)	38	TELEGLOBE-AS (tier1)	34	SEABONE-NET (tier1)	29
ALTERNET-AS (tier1)	37	CWUSA (tier1)	34	SINGTEL-AS-AP (tier1)	29
AS702 (tier1)	35	ATT-INTERNET4 (tier1)	32	CWUSA (tier1)	27

Tableau 5. Centralité de degrés pour le réseau Tier 2

Nom ISP (2005_07)	Degrés	Nom ISP (2006_01)	Degrés	Nom ISP (2006_07)	Degrés
SWISSCOM (tier2)	61	HURRICANE (tier2)	49	TDC (tier2)	52
HURRICANE (tier2)	49	INTERROUTE (tier2)	46	HURRICANE (tier2)	46
LAMBDANET-AS (tier2)	44	KPN (tier2)	44	KPN (tier2)	43
REACH (tier2)	44	TELENOR (tier2)	43	CAIS-ASN (tier2)	41
CAIS-ASN (tier2)	43	TELECOMPLETE (tier2)	39	KDDI (tier2)	39
GBLX (tier2)	42	TISCALI-BACKBONE (tier2)	36	TELENOR (tier2)	38
INTERROUTE (tier2)	40	ECRC (tier2)	34	INTERROUTE (tier2)	35
TDC (tier2)	39	SEABONE-NET (tier2)	32	NL-BIT (tier2)	33
CWUSA (tier2)	39	CLARANET-AS (tier2)	32	WEBUSUNET-1 (tier2)	33
VERIO (tier2)	38	REACH (tier2)	31	TISCALI-BACKBONE (tier2)	31

Les tableaux 6, 7 et 8 présentent les mesures de la centralité d'intermédiation pour les domaines suivants (Top 100, Tier 1 et Tier 2). Les tableaux montrent que les domaines les plus centraux en termes de degrés ont également des valeurs élevées en termes d'intermédiation. 80 % d'inter-domaines présents dans le tableau 3 sont présents dans le tableau 6. 93 % d'inter-domaines présents dans le tableau 4 se trouvent également dans le tableau 7. Enfin, 73 % d'inter-domaines présents dans le tableau 5 sont présents dans le tableau 8. Ces résultats montrent clairement que ces principaux inter-domaines dominent la topologie du réseau des relations d'inter-domaines. Cependant, la centralité de ces acteurs ne leur confère pas une position de 'hubs' comme cela était montré précédemment.

Tableau 6. Centralité d'intermédiation pour le réseau Top 100

Nom ISP (2005_07)	Degrés	Nom ISP (2006_01)	Degrés	Nom ISP (2006_07)	Degrés
SWISSCOM (tier2)	382.22	TELIANET (tier1)	439.06	PSINET (tier1)	311.50
LEVEL3 (tier1)	375.48	LEVEL3 (tier1)	349.67	LEVEL3 (tier1)	296.52
VERIO (tier1)	352.57	COLT (tier1)	341.77	KDDI (tier2)	292.49
SPRINTLINK (tier1)	344.25	INTERROUTE (tier2)	282.56	TDC (tier2)	272.15
HURRICANE (tier2)	253.61	PSINET (tier1)	268.47	ASCC-AS-AP (tier2)	243.13
LAMBDANET-AS (tier2)	248.29	HURRICANE (tier2)	244.58	SEABONE-NET (tier1)	220.87
PSINET (tier1)	227.48	ABOVENET (tier1)	237.97	VERIO (tier1)	220.28
ABOVENET (tier1)	219.30	SPRINTLINK (tier1)	199.61	CAIS-ASN (tier2)	211.85
TISCALI-BACKBONE (tier2)	187.95	Deutsche Telekom (tier1)	177.00	GBLX (tier2)	186.40
REACH (tier2)	171.75	TELENOR (tier2)	154.57	HURRICANE (tier2)	177.34

Tableau 7. Centralité d'intermédiation pour le réseau Tier1

Nom ISP (2005_07)	Degrés	Nom ISP (2006_01)	Degrés	Nom ISP (2006_07)	Degrés
LEVEL3 (tier1)	609.29	COLT (tier1)	813.28	LEVEL3 (tier1)	459.37
SPRINTLINK (tier1)	562.75	PSINET (tier1)	739.55	VERIO (tier1)	410.98
ABOVENET (tier1)	552.26	LEVEL3 (tier1)	609.02	TELIANET (tier1)	366.15
VERIO (tier1)	550.79	TELIANET (tier1)	596.32	TELEGLOBE-AS (tier1)	266.53
PSINET (tier1)	471.30	SPRINTLINK (tier1)	310.66	PORT80 (tier1)	216.91
ALTERNET-AS (tier1)	302.75	Deutsche Telekom (tier1)	251.34	SPRINTLINK (tier1)	176.14
COLT (tier1)	255.14	VERIO (tier1)	176.96	ALTERNET-AS (tier1)	161.68
TELIANET (tier1)	171.67	TELEGLOBE-AS (tier1)	150.18	SEABONE-NET (tier1)	139.62
TELEGLOBE-AS (tier1)	123.81	ALTERNET-AS (tier1)	75.20	COLT (tier1)	102.11
AS702 (tier1)	83.089	CWUSA (tier1)	66.974	SINGTEL-AS-AP (tier1)	82.927

Tableau 8. Centralité d'intermédiation pour le réseau Tier2

Nom ISP (2005_07)	Degrés	Nom ISP (2006_01)	Degrés	Nom ISP (2006_07)	Degrés
SWISSCOM (tier2)	503.17	INTERROUTE (tier2)	336.64	TDC (tier2)	307.22
HURRICANE (tier2)	296.94	HURRICANE (tier2)	271.55	KDDI (tier2)	304.57
LAMBDANET-AS (tier2)	280.53	KPN (tier2)	188.88	CERN (tier2)	240.11
REACH (tier2)	191.72	TELENOR (tier2)	168.06	KPN (tier2)	206.13
INTERROUTE (tier2)	190.98	TISCALI-BACKBONE	165.75	HURRICANE (tier2)	202.29
GBLX (tier2)	186.87	SEABONE-NET (tier2)	154.87	CCINET-2 (tier2)	136.95
CAIS-ASN (tier2)	154.53	ASN-QWEST (tier2)	143.81	WIDE-BB (tier2)	112.02
TISCALI-BACKBONE	121.91	OPENTRANSIT (tier2)	123.17	INTERROUTE (tier2)	90.70
NZIX-2 (tier2)	115.12	CIPCORE (tier2)	119.27	AS6830 (tier2)	88.38
SEABONE-NET (tier2)	111.73	KDDI (tier2)	114.57	AS702 (tier2)	83.69

Par ailleurs, on peut aussi examiner l'assortativité de ces réseaux. C'est-à-dire, voir si ces acteurs ayant le plus grand nombre de liens sont connectés entre eux ou pas. Pour cela, nous avons calculé le coefficient de corrélation de Pearson souvent utilisé comme une mesure de l'assortativité. Les résultats montrent que le réseau est assortatif parce que la valeur du coefficient de corrélation de Pearson est positive. C'est-à-dire que les inter-domaines de fort degré sont préférentiellement liés à d'autres inter-domaines de fort degré. Ce résultat indique aussi que les inter-domaines de fort degré ne forment pas des 'hubs' dans le réseau.

Cette analyse au niveau 'micro' confirme bien que la structure actuelle d'Internet n'est pas suffisamment stable à cause de nombreux changements dans la hiérarchie des acteurs au cours des trois sous périodes d'analyses. Ce changement semble moins important au niveau des

tier1 (50% des dix premiers domaines sont présents à travers les trois sous-périodes). Ce résultat vient appuyer l'interprétation avancée dans l'analyse précédente.

4. ANALYSE DES ACCORDS D'INTERCONNEXION

Plusieurs facteurs influencent les décisions d'interconnexion. Nous présenterons les considérations économiques, puis les considérations stratégiques⁵. Les considérations économiques renvoient aux gains de s'interconnecter (revenus supplémentaires, économie sur les coûts d'exploitation du réseau liée à une meilleure connectivité, ...) et aux coûts de s'interconnecter (coût d'accès à un point d'échange ainsi que son coût de maintenance). Du côté des gains, un opérateur va regarder si l'interconnexion améliore la performance de son réseau et la qualité de son service. Cela dépendra de la qualité du réseau avec lequel il souhaite s'interconnecter (couverture géographique du réseau, connectivité, ...) et de la qualité de la passerelle d'interconnexion. Par exemple, les gains attendus ne seront pas les mêmes si les deux réseaux sont « *overlapping* » ou « *non-overlapping* ». D'autres considérations vont également affecter les gains et les coûts attendus comme les standards techniques, le support opérationnel, les politiques spécifiques de routage et les volumes de trafic anticipés. A partir de ces considérations, nous allons formuler plusieurs hypothèses sur les facteurs qui peuvent accroître ou réduire les incitations à s'interconnecter.

4.1. Les considérations économiques

Comme toute industrie de réseau, l'industrie d'Internet est caractérisée par la présence de fortes externalités de réseau et une différenciation de plus en plus accrue dans les services. Un service comporte des externalités de réseau lorsque l'utilité de ce service augmente avec le nombre d'utilisateurs de ce service. L'utilité d'être client d'un réseau est donc croissante avec le nombre de clients de ce réseau. A travers l'interconnexion, on augmente la taille d'un réseau en permettant à ses clients d'accéder aux clients de l'autre réseau. Dans le cas d'Internet, les accords permettent d'améliorer la qualité de l'accès aux clients de l'autre réseau et donc de générer de l'utilité pour ses propres clients, ce qui peut permettre d'attirer plus de clients et/ou de leur faire payer plus cher ses services

⁵ D'autres considérations peuvent aussi intervenir comme la régulation et autres instruments de politique publique relatifs à la juridiction des accords d'interconnexion, mais nous ne les aborderons pas ici.

Les externalités de réseau deviennent encore plus importantes avec les possibilités accrues de différenciation. Ces dernières années l'industrie a vu le développement d'un large éventail d'applications de multimédia (par exemple, la vidéo et l'audio numérique) et à temps réel (par exemple la téléphonie sur Internet et la vidéo conférence) qui nécessitent un certain type de trafic réseau, ou des besoins en qualité de service (QoS). Ainsi, une connectivité universelle est requise et la qualité augmente avec une meilleure interconnexion parmi les inter-domaines (Crémer *et al.*, 2000). L'interconnexion⁶ est donc un moyen d'accroître les effets de réseau et donc la valeur que chaque domaine peut retirer du réseau. Les incitations à s'interconnecter devraient être d'autant plus fortes que les réseaux sont de grande taille (plus d'effets de réseau attendus).

***Hypothèse 1:** la probabilité d'établir un accord d'interconnexion, notamment un accord de peering, devrait augmenter avec la taille globale des deux réseaux, et en particulier avec la taille du plus petit réseau*

La proximité géographique constitue également un autre élément permettant d'accroître les effets de réseaux et joue un rôle important dans la décision d'interconnexion (D'Ignazio et Giovannetti, 2006). Une décision d'interconnexion inter-domaine, en particulier un accord de peering, nécessite un niveau de confiance et de coopération informelle entre eux (Schumacher, 2006). La proximité géographique, notamment l'appartenance à un même pays ou continent, renforce cette logique (Beamish et Banks, 1987 ; Hennart et Reddy, 1997). Selon la théorie des coûts de transaction, cette préférence peut être expliquée en termes de coût de surveillance et de contrôle tout au long de la durée de l'accord. La distance psychique entre les partenaires agit également sur les incertitudes associées aux accords d'interconnexion. Lorsque les domaines nouent des accords avec des partenaires situés dans leur pays d'origine, le degré d'incertitude est inférieur dans la mesure où les entreprises fonctionnent dans un environnement économique, légal et politique familier. La proximité géographique implique aussi des échanges de trafic plus intense et par conséquent accroît les effets de réseaux en cas d'interconnexion.

***Hypothèse 2:** la probabilité de passer un accord d'interconnexion devrait augmenter en cas de proximité géographique*

⁶ Rappelons que le peering et le transit sont les deux principaux accords d'interconnexion.

4.2. Les considérations stratégiques

Le peering a permis d'achever la connectivité universelle ou la terminaison du trafic à travers le mode « *Best effort* ». Cependant avec l'explosion de la demande et l'évolution rapide du nombre des acteurs, ce modèle qui favorise de fortes externalités de réseaux, génère des comportements de *free-riding* et un potentiel énorme de congestion de réseau. Des problèmes d'asymétrie au niveau du trafic, des bénéfices et des coûts générés par ces accords sont également apparus. L'introduction de la qualité de service (QoS) a accentué ces problèmes, notamment des problèmes de *free-riding* qui contraignent les opérateurs à trouver des moyens de contrôle des comportements des opérateurs. Ce contrôle s'est traduit dans les politiques de peering qui visent essentiellement à s'assurer que les opérateurs qui s'interconnectent ont un niveau d'investissement en qualité équivalent. Sans aucune standardisation des services proposés par chaque opérateur, le problème est encore accru. En effet, le peering n'est plus considéré comme un moyen efficace pour l'échange du trafic notamment avec l'explosion des applications de multimédia et à temps réel qui offrent un potentiel élevé de différenciation. Ces applications requièrent un besoin en QoS important et une technologie de routage plus avancée que le « *best effort routing* » qui ne peut pas supporter un service en QoS bout-en-bout à cause notamment de l'hétérogénéité des supports de la QoS. C'est pourquoi nous assistons depuis quelques années à la coupure de plusieurs accords de peering par les domaines. Le transit, où le client paye le fournisseur pour le transport du trafic, remplace parfois ces accords. Toutefois, il est toujours avantageux de passer au peering, sur la base de « *bill and keep* », si les structures de coût entre les opérateurs sont symétriques et si les utilisateurs finaux sont homogènes.

Les domaines préfèrent ainsi établir des accords de peering avec des domaines de même taille et pratiquer des accords de transit pour des domaines de niveau inférieur (Kende, 2000 ; Filstrup, 2001 ; Norton, 2002 ; Badasyan et Chakrabarti, 2003 ; Weiss et Shin 2004 ; Jahn et Prüfer 2005 ; Buccirossi *et al.*, 2005 ; D'ignazio et Giovannetti, 2006). Par conséquent, nous avançons l'hypothèse que l'effet d'asymétrie de taille entre les domaines affecte leur décision de peering. Cet effet d'asymétrie de taille peut être mesuré par rapport à plusieurs variables, telles que le nombre d'accords d'interconnexion, la classe hiérarchique (tier 1, tier2, tier3, etc.), le trafic de flux, les revenus d'accès Internet, le nombre d'adresses accessibles, le nombre de points de présence, la largeur de la bande réelle utilisée pour l'échange du trafic, etc.

Hypothèse 3: la probabilité de passer un accord de peering, devrait diminuer avec l'asymétrie entre réseaux.

Hypothèse 3bis: la probabilité de passer un accord de transit, devrait augmenter avec l'asymétrie entre réseaux.

Les relations inter-domaines se caractérisent à la fois par une logique de complémentarité et/ou de coopération notamment dans l'achèvement de la connectivité universelle à travers les accords de peering et de transit et par une logique de concurrence sur le marché aval (augmenter la taille de la base de clients). Avec l'évolution de l'industrie, les domaines doivent constamment trouver le bon équilibre entre ces deux logiques dans leur décision d'interconnexion. En effet, si la symétrie dans la taille des domaines peut être une condition suffisante pour que le peering s'impose, il est possible que des domaines asymétriques dans leur taille choisissent de s'interconnecter en peering dès lors que le bénéfice que chacun en retire est assez proche (réciprocité). C'est notamment le cas pour les domaines d'opérateurs de boucle locale (tirants leurs revenus du client final) et les domaines de fournisseurs de contenus et de services. Cela dépend donc de la nature des externalités de réseau dont bénéficient les clients de chaque domaine du fait de l'interconnexion. Il est également possible que deux domaines proches dans la taille refusent d'établir une relation de peering, dès lors qu'ils sont directement en concurrence sur des services d'accès à internet et de connectivité. Dans ce cas, refuser de s'interconnecter est un moyen de renforcer son pouvoir de marché et de se différencier de l'autre. Un domaine qui détient un avantage dans une base installée de clients préfère diminuer la qualité de la connectivité avec son plus proche concurrent. Ainsi, en l'absence de connexion directe on peut dégrader la qualité d'accès à son réseau pour les clients de l'autre réseau.

Par conséquent, l'argument de symétrie dans la taille et dans les externalités de réseau que nous avons évoqué précédemment peut être renversé dans certaines situations associées à des logiques de concurrence. Par exemple, deux réseaux très asymétriques mais qui ne sont pas sur le même marché peuvent décider de s'interconnecter en peering (pour accéder à une région géographique dans laquelle ils n'ont pas de base installée de clients), alors qu'à l'inverse ils peuvent refuser d'établir des relations de peering avec un réseau de taille proche

lorsque ces domaines couvrent une même région géographique dans laquelle ils sont en concurrence directe.

Hypothèse 4 : la probabilité de passer un accord d'interconnexion devrait diminuer lorsque les réseaux sont en concurrence directe

Nous allons dans la section suivante présenter la méthodologie de tests des quatre hypothèses précédentes.

4.3. Méthodologie et résultats

Un modèle Probit est utilisé pour modéliser d'une part la décision d'accord, en prenant en compte tous les types d'accord possibles et, d'autre part la décision d'un type d'accord défini entre les ISP. Nous cherchons ainsi à expliquer les déterminants de la décision d'accord entre deux ISP. Nous avons ainsi défini une variable dépendante qui prend la valeur 0 si la paire d'ISP a établi un accord et la valeur 1 sinon. Le modèle vise également à déterminer quelles sont les variables qui influencent la nature de l'accord (*peer-to-peer* ou *provider-to-customer*). En effet, il est légitime de supposer que, selon les caractéristiques des deux ISP considérés, le type d'accord privilégié ne sera pas le même. Nous avons ainsi spécifié une variable prenant la valeur 1 si l'accord entre les deux ISP est un accord *peer-to-peer* et la valeur 0 dans le cas où la nature de l'accord est autre, c'est-à-dire de type *provider-to-customer*.

Comme nous l'avons indiqué, selon la taille et le degré d'asymétrie des deux ISP considérés, il est vraisemblable que la probabilité d'accord diffère ainsi que la nature de l'accord éventuel. Nous avons donc cherché à mesurer les effets de réseaux, d'asymétrie et de concurrence et leur impact sur les choix d'interconnexion.

La variable *diffaccord* mesure la différence entre le nombre total d'accords passés par l'ISP1 (quelque soit le type d'accord) et le nombre total d'accords passés par l'ISP2. L'introduction de cette variable permet de mesurer l'effet d'asymétrie de taille entre les deux ISP (Hypothèses 3 et 4).

La variable *somaccord* est la somme du nombre total d'accords d'ISP1 et d'ISP2. Cette variable permet de mesurer l'effet agrégé de réseaux sur la probabilité d'accord (hypothèse 1).

De manière identique, les variables *diffpeer* et *sompeer*, (respectivement *diffprovider* et *somprovider*) représentent la différence du nombre d'accords de type *peer-to-peer* (respectivement *provider-to-customer*) entre ISP1 et ISP2 et la somme du nombre d'accords de type *peer-to-peer* (respectivement *provider-to-customer*) entre ISP1 et ISP2. Elles sont prises en compte pour expliquer la probabilité d'accord de type *peer-to-peer* (respectivement *provider-to-customer*).

Outre ces variables, nous avons également contrôlé un certain nombre de caractéristiques des ISP. Ainsi, la variable *asrang*, représente le degré d'asymétrie de rang des deux ISP et prend la valeur du quotient $ISP1./ISP2$.

La variable *astier*, traduit la classe hiérarchique à laquelle appartient l'inter-domaine (tier1, tier2 et tier3) et prend la valeur 1 si ISP1 et ISP2 appartiennent à la même classe hiérarchique, 0 sinon.

De manière similaire, la variable *aspays* (*ascontinent*) indique si les deux inter-domaines appartiennent au même pays (continent).

Tableau 1 : Résultats économétriques sur les choix d'accords (quelle que soit la forme) sur le choix d'un accord de peering et d'un accord P2C

	Accord		peer		p2c	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Sumaccord	0.048		0.052		0.015	
	(0.001)***		(0.002)***		(0.001)***	
Diffaccordabs	-0.017		-0.019		0.000	
	(0.002)***		(0.002)***		(0.002)	
Asrank	-0.064	-0.054	-0.174	-0.159	0.107	0.080
	(0.033)*	(0.035)	(0.040)***	(0.044)***	(0.037)***	(0.040)**
Aspays	0.255	0.213	0.077	0.141	0.197	0.108
	(0.075)***	(0.075)***	(0.089)	(0.091)	(0.087)**	(0.087)
Ascontinent	0.254	0.222	0.327	0.256	0.082	0.152
	(0.058)***	(0.058)***	(0.068)***	(0.070)***	(0.069)	(0.070)**
Astier	0.107	0.172	0.403	0.277	-0.210	-0.006
	(0.051)**	(0.056)***	(0.062)***	(0.069)***	(0.060)***	(0.066)
Sumpeer		0.052		0.066		0.007
		(0.002)***		(0.002)***		(0.002)***
Diffpeerabs		-0.022		-0.028		0.006
		(0.002)***		(0.003)***		(0.003)**
Sumprovider		0.052		0.027		0.038
		(0.008)***		(0.008)***		(0.008)***
Diffproviderabs		-0.019		-0.030		0.009
		(0.010)*		(0.011)***		(0.010)
Constant	-2.842	-2.556	-3.462	-3.082	-2.299	-2.335
	(0.096)***	(0.094)***	(0.126)***	(0.126)***	(0.101)***	(0.102)***
Observations	4851	4851	4851	4851	4851	4851

Les résultats mettent en évidence un impact positif et significatif de **l'effet de réseau** sur la probabilité de passer un accord et sur les probabilités de passer des accords de type *peer-to-peer* ou *provider-to-customer*. En effet, le coefficient positif et significatif de la variable *sumaccord* indique que plus les deux ISP ont un réseau de meilleure qualité (meilleure connectivité), plus ils ont une probabilité élevée de passer un accord quelle que soit sa nature.

La variable *diffaccord* indique un impact négatif et significatif de l'asymétrie de réseaux sur le choix d'établir un accord de peering, et un impact positif sur le choix d'un accord de transit, conformément à l'hypothèse 3 et 3bis. Ainsi, plus la différence de nombre d'accord entre ISP1 et ISP2 est importante, plus la probabilité de passer un accord de peering est faible

De même, le fait d'être de même niveau *astier* augmente la probabilité de peering et réduit celle de transit. Enfin la probabilité d'accord est plus grande en cas de proximité géographique.

La variable *asrank* qui mesure l'asymétrie en termes de rang, souligne que plus l'asymétrie entre deux ISP est importante, plus la probabilité de réaliser un accord de type *provider-to-*

customer est élevée ; à l'inverse, plus les deux ISP considérés ont des caractéristiques similaires, plus la probabilité de réaliser un accord de type *peer-to-peer* est importante.

Les spécifications (2) décomposent *l'effet de réseau agrégé* et *l'effet d'asymétrie de réseau* en tenant compte des types d'accord au sein de ce réseau. Cette différenciation confirme l'importance de l'asymétrie dans la nature de l'accord réalisé. Ainsi, plus le nombre d'accords en tant que provider de l'ISP1 (respectivement *peer-to-peer*) est proche de celui de l'ISP2, plus la probabilité qu'ils réalisent un accord de type *peer-to-peer* est élevée. Par ailleurs, les résultats soulignent, au contraire, un impact positif et significatif de la variable *diffpeer* sur *provider-to-customer* ce qui implique que la probabilité de réaliser un accord de type *provider-to-customer* augmente avec l'asymétrie entre les deux ISP.

Le tableau précédent indique quels sont les déterminants d'un accord de nature bilatérale, en considérant les accords agrégés des deux ISP. Mais, il est légitime de penser que l'ISP1 a un pouvoir de négociation et de décision plus grand que le plus petit ISP. Nous souhaitons donc maintenant regarder quels sont les déterminants de s'interconnecter du point de vue de l'ISP1.

Afin de répondre à cette question, nous introduisons la variable *nbaccordISP2* qui indique le nombre d'accords que l'ISP2 a passé (une mesure des gains que peut espérer l'ISP1 en s'interconnectant avec l'ISP2). De manière identique, les variables *nbpeerISP2* (respectivement *nbproviderISP2*) représentent le nombre d'accords de type *peer-to-peer* (respectivement *provider-to-customer*) passés par les ISP2.

Nous avons vu dans le tableau précédent que la variable *diffaccord* avait un impact négatif et significatif sur la probabilité d'accord. Toutefois, il n'est pas évident qu'à l'inverse, une différence minime entre les deux ISP conduise à une probabilité d'accord élevée. En effet, il peut à ce niveau survenir un effet de concurrence qui tendrait à diminuer la probabilité d'accord entre deux ISP relativement semblables par exemple dans un but de différenciation. Ainsi, il n'est pas certain que la relation entre l'asymétrie et la probabilité d'accord soit linéaire et décroissante et on peut suspecter un point de retournement pour une valeur de *diffaccord*. Afin de tester l'existence de ce double effet : *effet d'asymétrie* et *effet de concurrence*, une variable *diffaccord2* ($diffaccord * diffaccord$) est introduite dans les estimations présentées dans le tableau 2. De manière identique, les variables *diffpeer2* et *diffprovider2* (respectivement *nbproviderISP2*) sont prises en compte.

Les résultats supportent l'existence d'un double effet lié aux différences dans le nombre d'accords (*effet d'asymétrie* et *effet de concurrence*). Si la variable *diffaccord* a un impact positif et significatif, cette même variable élevée au carré (*diffaccord2*) a un impact négatif et significatif, ce qui indique une relation en forme de U renversé entre l'asymétrie de réseaux et la probabilité de réaliser un accord et ce, quelle que soit la nature de l'accord. Ainsi, la probabilité de réaliser un accord augmente avec la différence en terme de nombre d'accords entre les deux ISP, ce qui supporte l'hypothèse d'un *effet de concurrence* jusqu'à un certain niveau de différence mais diminue ensuite ce qui tend à confirmer *l'effet d'asymétrie*. Cet effet, n'est toutefois pas identique pour chaque type d'accord. Il est ainsi possible d'estimer à la différence de nombre d'accords qui constitue le point de retournement à 20 pour la probabilité de réaliser un accord, à 10 pour la probabilité de réaliser un accord de type *peer-to-peer* et à 33 pour la probabilité de réaliser un accord de type *provider-to-customer*.

Tableau 2 : Résultats économétriques sur les choix d'accords sur le choix d'un accord de peering et d'un accord P2C avec effet de concurrence

	accord		Peer-to-peer		provider-to-customer	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
nbaccordISP2	0.043		0.044		0.019	
	(0.002)***		(0.002)***		(0.002)***	
Diffaccordabs	0.012		0.010		0.009	
	(0.006)**		(0.006)*		(0.007)	
diffaccord2	-0.000		-0.000		-0.000	
	(0.000)		(0.000)		(0.000)	
Asrank	0.100	-0.015	-0.002	0.032	0.170	-0.048
	(0.030)***	(0.035)	(0.035)	(0.041)	(0.037)***	(0.045)
Aspays	0.305	0.207	0.211	0.145	0.234	0.163
	(0.070)***	(0.070)***	(0.078)***	(0.080)*	(0.087)***	(0.088)*
Ascontinent	0.183	0.229	0.213	0.234	0.057	0.121
	(0.052)***	(0.053)***	(0.059)***	(0.060)***	(0.069)	(0.071)*
Astier	0.120	0.359	0.340	0.455	-0.211	0.051
	(0.046)***	(0.053)***	(0.053)***	(0.060)***	(0.060)***	(0.068)
nbpeerISP2		0.047		0.049		0.018
		(0.002)***		(0.002)***		(0.002)***
Diffpeerabs		-0.000		0.000		0.002
		(0.007)		(0.007)		(0.008)
diffpeer2		0.000		-0.000		0.000
		(0.000)		(0.000)		(0.000)
nbproviderISP2		0.004		0.048		-0.040
		(0.007)		(0.008)***		(0.009)***
diffproviderabs		0.108		0.084		0.095
		(0.013)***		(0.016)***		(0.015)***
diffprovider2		-0.003		-0.004		-0.001
		(0.001)***		(0.001)***		(0.001)**
Constant	-2.183	-2.117	-2.456	-2.526	-2.220	-2.097
	(0.087)***	(0.092)***	(0.101)***	(0.109)***	(0.107)***	(0.115)***
Observations	4851	4851	4851	4851	4851	4851

5. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons montré que la structure actuelle de l'Internet possède des propriétés intéressantes pour assurer la qualité de service de bout en bout (réduction des coûts de coordination et de transaction par la structure petit monde) mais qu'elle est trop instable et que le pouvoir de marché est suffisamment dilué pour qu'une forte coordination globale des domaines (par exemple autour d'une norme pour assurer la qualité de service) soit établie.

En effet, les structures en hub sont quasi inexistantes donc l'impulsion pour le changement ne peut être lancée unilatéralement. Les acteurs intermédiaires sont aussi ceux qui ont beaucoup d'interconnexions ce qui signifie que la structure industrielle est plutôt horizontale au niveau le plus haut d'Internet. Cela reflète une situation concurrentielle forte au niveau du transit mondial et régional. De plus, l'instabilité des positions des acteurs ne correspond pas au timing des alliances business⁷. Seul l'ensemble des Tier 1 semble potentiellement assez homogène et stable pour envisager ou instaurer un début d'alliance malgré la forte concurrence.

Dans cet article, nous n'avons pas étudié la différence entre les accords de peering et de transit qui caractérisent les interconnexions bilatérales. Pour autant, la présence d'accords de peering entre deux acteurs indique une collaboration possible pour les standards de qualité de service car elle marque la confiance et la complémentarité.

Nous n'avons pas non plus évoqué la nature des activités complémentaires des opérateurs de systèmes autonomes. Ainsi, certains fournisseurs de transit sont intégrés à des fournisseurs d'accès et d'autres systèmes autonomes sont des fournisseurs de contenus. Les business models de ces acteurs sont très différents et pas forcément basés sur les revenus liés à leurs interconnexions ce qui change la structure topologique associée. L'intérêt d'être très intermédiaire ou avec un fort degré est faible pour les fournisseurs de contenus (on ne les retrouve pas dans les tableaux du chapitre 4) mais leur degré de proximité les intéresse beaucoup plus contrairement aux fournisseurs de transit. On remarque aussi que les acteurs intermédiaires mais avec un degré plus faible sont plutôt les fournisseurs de transit intégrés à des fournisseurs d'accès (exemple de Tiscali) car ils sont les passages obligés pour atteindre les clients finaux mais n'ont pour autant pas une position de peering avec de nombreux autres fournisseurs de transit. Ceci résulte d'une situation oligopolistique relativement stable du

⁷ Cette instabilité est peut-être due à un modèle économique qui se cherche avec de grands changements dans les politiques de peering à mesure de la croissance du trafic Internet et de la diversité des modèles économiques des services associés.

marché correspondant aux Tier 1 qui n'acceptent pas de nouveaux concurrents⁸. De leur côté, les fournisseurs d'accès purs ont un business model basé sur la vente de détail au consommateur final qui ne les incite pas à valoriser leurs interconnexions ou à être intermédiaire. Ils cherchent plutôt à accéder à tout l'Internet avec une meilleure qualité et au meilleur coût d'où des stratégies de multi-homing parmi les fournisseurs de transit voire d'interconnexion directe en peering avec les fournisseurs de contenus et une valorisation potentiellement supérieure des acteurs du transit qui proposent de la qualité de service de bout en bout.

⁸ Le marché de l'accès étant régulé dans de nombreux pays, la concurrence est par contre effective chez les fournisseurs d'accès/ Tier 3 qui hésitent du coup à s'interconnecter en peering.

BIBLIOGRAPHIE

- Albert, R. and Barabási, A-L. 2002, 'Statistical mechanics of complex networks' *Review of Modern Physics*, vol° 74, pp 47-97.
- Baake P. and Wichmann T., 1999, On the economics of Internet peering, *Netnomics* 1, 89–105.
- Badasyan N. and Chakrabarti S. 2003, Intra-backbone and Inter-backbone Peering Among Internet Service Providers. Mimeo
- Barabási A.-L. and Albert R., 1999, 'Emergence of scaling in random network' *Science*, vol° 286, 509-512.
- Barabási A.-L., 2002, 'Linked: The New Science of Networks' Cambridge, MA: Perseus Publishing.
- Barceló J M., Nieto-Hipólito J. I., and Garcia-Vidal J., 2004," Study of Internet autonomous system interconnectivity from BGP routing tables, *Computer Networks*, 45, pp 333-344.
- Beamish, P. W. and Banks, J.C. (1987) "Equity joint ventures and the theory of the multinational enterprise," *Journal of International Business Studies*, 18(2): 1-16.
- Buccirossi P., Ferrari Bravo L., and Siciliani P., 2005, Competition in the Internet Backbone Market, *World Competition*, 28(2): 235-254.
- Carter M., and Wright J., 2003, Asymmetric Network Interconnection, *Review of Industrial Organization* 22: 27–46, 2003.
- Crémer J, Rey P, and Tirole J., 2000, Connectivity in the commercial Internet, *Journal of Industrial Economics*, 48(4), pp 433-472.
- Cowan, R. and Jonard, N. 2004, 'Network Structure and the Diffusion of Knowledge' *Journal of economic Dynamics and Control*, vol 28, pp 1557-1575
- D'Ignazio, A. and Giovannetti, E., 2006. "Spatial Dispersion of Peering Clusters in the European Internet," Cambridge Working Papers in Economics 0601, Faculty of Economics (formerly DAE), University of Cambridge.
- D'Ignazio, A. and Giovannetti, E., 2005. "Antitrust Analysis for the Internet Upstream Market: a BGP Approach," Cambridge Working Papers in Economics 0554, Faculty of Economics (formerly DAE), University of Cambridge.
- D'Ignazio, A. and Giovannetti, E., 2006. "'Unfair' Discrimination in Two-sided Peering? Evidence from LINX," Cambridge Working Papers in Economics 0621, Faculty of Economics (formerly DAE), University of Cambridge.
- Economides, N. 2006, "The Economics of the Internet Backbone," in Handbook of Telecommunications. Amsterdam: Elsevier Publishers.

- Economides N., 2007, Economics of the Internet, Forthcoming, Palgrave Dictionary
- Evans J., and Mavondo F. T., 2002, Psychic Distance and Organizational Performance: An Empirical Examination of International Retailing Operations, *Journal of International Business Studies*, Vol (33)
- Faloutsos M., Faloutsos P., and Faloutsos C., 1999, "On power-law relationships of the Internet topology" in *Proceeding of ACM SIGCOMM99*.
- Foros Ø. and Hansen J., 2001, Competition and compatibility among internet service providers, *Information Economics and Policy*, 13, 411-425.
- Frieden R., 2000, Does a hierarchical Internet necessitate multilateral intervention, mimeo.
- Giovannetti, E., Neuhoff K., and Spagnolo G. (2007) « Trust and Virtual Districts: Evidence from the Milan Internet Exchange », *Metroeconomica*, 58:3, 436-456.
- Hennart, JF. and Reddy, S. (1997): "The choice between mergers/acquisitions and joint-ventures : the case of Japanese investors in the United States", *Strategic Management Journal*, vol 18 p1-12.
- Jahn E. and Prüfer J., 2005, Transit versus (Paid) Peering: Interconnection and Competition in the Internet Backbone Market, Goethe University Frankfurt, mimeo.
- Jin S., and Bestavros A., 2006, " Small-world characteristics of internet topologies and implications on multicast scaling" *Computer Networks*, 50, pp 648-666.
- Laffont J.J., Marcus S., Rey P., and Tirole, J., 2003, Internet interconnection and the off-net-cost pricing principle, *The Rand Journal of Economics*, 34(2), pp 370-390.
- Lippert, S., and Spagnolo G., 2007. "Internet Peering as a Network of Relations" Working Paper, <http://ssrn.com/abstract=995636>
- Milgram, S. 1967, 'The small world problem' *Psychology Today*, vol° 2, pp 60-67.
- Milgrom, P., Bridger M. M. and Padmanabhan S., 2000 "Competitive Effects of Internet Peering Policies" in *The Internet Upheaval - Raising Questions, Seeking Answers in Communications Policy* [Edited by I. Vogelsang and B.M. Compaine], Cambridge, Mass., and London: MIT Press.
- Schumacher, C. 2006. Trust – A Source of Success in Strategic Alliances? *Small Business Review* 58: 259-278
- Vásquez A., Pastor-Satorras R., and Vespignani A., 2002, 'Large scale topological and dynamical properties of the Internet' *Physical Review E*, 65, 066130.
- Watts, D. J. 1999, 'Small worlds: the dynamics of networks between order and randomness' Princeton, NJ: Princeton University Press.

- Watts, D. J. 2003, 'Six degrees: the science of a connected age' New York: W. W. Norton & Company.
- Watts, D. J. & S. H. Strogatz 1998, 'Collective dynamics of "small-world" networks' *Nature*, 393, 440–2.
- Wasserman S., Faust K., 1994. Social network analysis: methods and applications. New York: Cambridge University Press.
- Weiss M. B. and Shin S.J., 2004, Internet Interconnection Economic Model and its Analysis: Peering and Settlement, *Netnomics*, 6(1), pp 43-57.
- Xia and L. Gao, 2004, On the Evaluation of AS Relationship Inferences, *IEEE Globecom*.