

Une analyse empirique des stratégies d'interconnexion des opérateurs internet

Nathalie Colombier, Zouhaïer M'Chirgui et Thierry Pénard



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/rei/4178>

DOI : 10.4000/rei.4178

ISSN : 1773-0198

Éditeur

De Boeck Supérieur

Édition imprimée

Date de publication : 15 septembre 2010

Pagination : 25-50

ISSN : 0154-3229

Référence électronique

Nathalie Colombier, Zouhaïer M'Chirgui et Thierry Pénard, « Une analyse empirique des stratégies d'interconnexion des opérateurs internet », *Revue d'économie industrielle* [En ligne], 131 | 3e trimestre 2010, document 2, mis en ligne le 15 septembre 2012, consulté le 02 juin 2022. URL : <http://journals.openedition.org/rei/4178> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/rei.4178>

Nathalie COLOMBIER
CREM, M@rsouin

Zouhaïer M'CHIRGUI
CREM

Thierry PÉNARD
Université de Rennes 1, CREM, M@rsouin

UNE ANALYSE EMPIRIQUE DES STRATÉGIES D'INTERCONNEXION DES OPÉRATEURS INTERNET

Mots-clés : Internet, Peering, accords d'interconnexion, effets de réseaux, asymétrie.

Key words : Internet, Peering, Interconnection Agreements, Network Externalities, Asymmetry.

I. — INTRODUCTION

Le succès d'Internet se mesure par le nombre croissant d'internautes dans le monde et par la multitude d'applications et de services mis à la disposition de ces derniers. Mais toutes ces applications ne sont possibles que parce que des milliers de réseaux dans le monde sont interconnectés et s'échangent des données selon un protocole commun. L'interconnexion de ces réseaux repose historiquement sur un principe de « best effort ». Il s'agit d'un mode de routage décentralisé des paquets de données, guidé par le choix de la meilleure route pour acheminer ces paquets, mais sans garantie de qualité de service ou de priorité.

Sans accord d'interconnexion et sans un minimum de coopération entre opérateurs, la plupart des applications Internet que nous connaissons aujourd'hui (courrier électronique, Web, vidéo, ...) ne pourraient pas être fournies. Or la forte demande pour des services plus gourmands en bande passante et/ou plus exigeants en qualité de service (vidéo, voix sur IP, ...) crée des tensions dans les relations entre acteurs de l'Internet. D'un côté, ces nouveaux services nécessitent de la part des opérateurs plus de coordination ou de coopération

dans leurs choix technologiques, afin de garantir une meilleure qualité de service. De l'autre, ces nouveaux services sont au cœur de rivalités concurrentielles entre les opérateurs, chacun souhaitant obtenir une part de marché substantielle auprès des utilisateurs finals (professionnels et particuliers). Ainsi, certains opérateurs souhaiteraient remettre en question les modalités d'interconnexion et la tarification de l'accès à leurs réseaux, afin de renforcer leur position concurrentielle et mieux rentabiliser leurs investissements actuels et futurs. D'autant plus que ces investissements vont s'intensifier dans les années à venir avec le déploiement de réseaux d'accès en fibre optique (pour un accès Internet à très haut débit).

L'objectif de cet article est d'analyser les relations contractuelles entre opérateurs Internet et de voir si elles sont adaptées aux enjeux technologiques et économiques actuels. La structure d'interconnexion des acteurs de l'Internet peut-elle supporter la mise en œuvre de nouveaux services avec une qualité garantie ? En d'autres termes, la structure d'interconnexion est-elle favorable à des stratégies coopératives d'investissements et de partage de ressources, indispensables à la mise en œuvre de ces nouveaux services ? Pour répondre à ces questions, cet article étudie la topologie du réseau Internet et les stratégies d'interconnexion des acteurs majeurs de l'Internet, à partir d'une base de données (1) sur l'ensemble des accords d'interconnexion observés au niveau mondial entre 2005 et 2006.

L'analyse de la topologie du réseau Internet s'appuie sur la théorie des réseaux (Watts, 2003 ; Watts et Strogatz, 1998) et consiste à étudier le graphe des relations entre opérateurs. À ce jour, deux types de structure topologique ont été mis en évidence sur Internet. D'une part, le réseau Internet présenterait une structure sans échelle ou *scale-free* (Barabási et Albert, 1999 ; Faloutsos *et al.*, 1999 ; Vasquez *et al.*, 2002) et d'autre part, se caractériserait par une structure petit monde ou *small world* (Barceló *et al.*, 2004 ; Jin et Bestavros, 2006).

L'analyse des stratégies d'interconnexion entre opérateurs Internet renvoie aux travaux d'économie industrielle qui mettent l'accent sur les logiques de complémentarité (externalité de réseau) et de concurrence (substituabilité) qui sous-tendent ce type de décisions (Crémer *et al.*, 2000). Les incitations à s'interconnecter dépendent notamment du degré d'asymétrie entre les opérateurs et de la nature de la concurrence (Baake et Wichmann, 1999 ; Badasyan et Chakrabarti, 2008 ; Carter et Wright 2003 ; Foros et Hansen, 2001 ; Foros, Kind et Sand, 2005. Laffont *et al.*, 2003 ; Jahn et Prüfer, 2004 ; Weiss et Shin, 2004). Les études empiriques de D'Ignazio et Giovannetti (2006, 2007), Giovannetti *et al.* (2007) ou Lippert et Spagnolo (2007) ont aussi mis en évidence l'importance des effets de proximité dans les décisions d'interconnexion.

(1) Ces données ont été collectées par Orange, anciennement France Télécom.

L'originalité de cet article est de s'appuyer sur cette double littérature de théorie des réseaux et d'économie industrielle pour mieux comprendre les liens entre les stratégies d'interconnexion des opérateurs Internet et la place qu'ils occupent dans le réseau global. Nous montrons en particulier que seul le réseau des opérateurs situés au plus haut niveau de l'Internet présente une structure petit monde favorable à la mise en œuvre de services avec une qualité garantie. Par ailleurs, la topologie d'Internet se caractérise par une certaine instabilité liée à la concurrence que se livrent les opérateurs sur la fourniture d'accès et de service Internet au niveau local. Enfin, nous montrons que les stratégies d'interconnexion dépendent du degré de symétrie entre les opérateurs Internet, de leur proximité géographique et de l'ampleur des effets de réseau.

L'article est organisé de la manière suivante. La section 2 décrit la structure des relations entre acteurs de l'Internet. La section 3 présente les données utilisées et procède à une analyse topologique des relations inter-opérateurs. La section 4 concerne les déterminants des accords d'interconnexion entre opérateurs. Enfin, la section 5 conclut.

II. — LA STRUCTURE DES RELATIONS INTERNET

Internet est un ensemble de réseaux IP (Internet Protocol) interconnectés qui transportent des données, sous forme de paquets, à la demande des utilisateurs. Il existe une hiérarchie dans les opérateurs avec, au niveau supérieur, des opérateurs mondiaux, appelés Internet Backbone Providers (IBP) qui fournissent de la connectivité universelle aux opérateurs régionaux ou locaux qui sont appelés des Internet Service Provider (ISP). Un ISP ne peut pas 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 universel (*i.e.* un lien vers tous les autres réseaux Internet et donc vers tous les internautes et sites web existants).

Le nombre d'IBP est assez faible, de l'ordre d'une vingtaine, majoritairement américains (par exemple Level 3, VerizonUNET, AT&T, Sprint ou PSINet). Les IBP disposent d'une large couverture mondiale et sont interconnectés entre eux sous forme d'accords de peering qui ne prévoient pas de compensation financière. Concrètement, un accord de peering implique que chaque partenaire prend en charge le trafic de l'autre, sans exiger de rémunération (DangNguyen et Pénard, 1998, 2000). En revanche, les relations des IBP avec les ISP sont généralement 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 universelle.

Les ISP sont des opérateurs régionaux qui fournissent des services d'accès et de connectivité à des opérateurs locaux ou à des utilisateurs finals (entreprises ou particuliers). Là encore, deux types d'accords d'interconnexion peu-

vent prévaloir entre les ISP. La règle pour les échanges de trafic entre les 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.

Au final, les relations Internet sont donc caractérisées par une structure très hiérarchique, avec les opérateurs de premier niveau (IBP), appelés aussi Tier 1, qui forment le réseau cœur d'Internet et assurent la connectivité universelle. Ensuite, on distingue les acteurs de second niveau (Tier 2) qui disposent d'une couverture régionale, avec des points de présence dans plusieurs pays ou continents et ceux de niveau inférieur (Tier 3) qui sont en général des fournisseurs d'accès local à Internet, en contact avec l'utilisateur final.

L'absence de régulation internationale des accords d'interconnexion a largement contribué à renforcer la structure hiérarchique d'Internet. La présence d'opérateurs très hétérogènes (en termes de couverture géographique ou de nombre de clients) se traduit par des déséquilibres dans les pouvoirs de négociations des accords d'interconnexion et par un remplacement progressif des accords de peering par des accords de transit entre opérateurs asymétriques. Les besoins accrus en qualité de service (2) ont rendu les politiques d'interconnexion encore plus stratégiques. Le choix des partenaires avec lesquels un opérateur s'interconnecte détermine la nature et la qualité des services qu'il pourra proposer et le coût qu'il devra supporter. Il peut renoncer à s'interconnecter avec un opérateur parce que les coûts induits sont supérieurs aux avantages attendus, ou parce qu'ils sont tous les deux en concurrence directe. Nous allons, dans la suite de l'article, éclairer ces choix stratégiques par la théorie des réseaux et la théorie de l'organisation industrielle.

III. — ANALYSES ET RÉSULTATS

Dans un premier temps, nous présentons la base de données. Puis, nous étudions les propriétés structurelles du réseau interconnecté des principaux opérateurs Internet, avant d'analyser la position et la centralité de ces opérateurs.

3.1. Description des données

Les données utilisées dans cet article portent sur les relations d'interconnexion (existence d'un accord ou non et nature de l'accord, peering ou transit) entre des réseaux Internet identifiés comme des Systèmes Autonomes (AS), c'est-à-dire des réseaux gérés par une seule et même entité. Ces données ont été inférées pour les années 2005 et 2006, à partir des tables de routages BGP (*Border Gateway Protocol*) disponibles sur les routeurs ouverts de l'Internet.

(2) La qualité de service, appelé QoS, est un terme qui renvoie à un ensemble de paramètres de qualité pour les services Internet.

Le protocole de routage BGP permet à chaque Système Autonome (AS) de définir des politiques de routage vers les autres Systèmes Autonomes. Les politiques de routage permettent, par exemple, de filtrer les routes annoncées selon les accords d'interconnexion conclus entre les AS, de privilégier le choix de certaines routes, ou encore de prévoir des routes de secours pour l'acheminement d'un paquet vers une destination donnée. Ainsi, un système autonome (AS) ne transmet pas à ses pairs (avec lesquels il a un accord de peering) les routes qui transitent par ses fournisseurs de connectivité (avec lesquels il a un accord de transit) afin de ne pas payer son fournisseur pour du trafic sur lequel il ne perçoit aucune rémunération. En observant les transmissions de routes entre les AS, on peut donc inférer la nature de leurs relations : *i*) aucun accord si aucune route n'est transmise entre deux AS, *ii*) présence d'un accord de peering si les routes sont transmises de manière sélective et enfin, *iii*) présence d'un accord de transit si toutes les routes sont transmises.

Notre base de données finale regroupe l'ensemble des accords d'interconnexion établis par les 100 premiers opérateurs ou AS en termes de rang (3) entre 2005 et 2006 (sur une période de dix-huit mois). Le rang d'un opérateur est calculé à partir de son cône de clients, c'est-à-dire du nombre d'adresses abritées par cet opérateur (4). Le rang est donc un bon indicateur de la taille d'un réseau, en termes de clients.

Dans cette base de données, chaque observation correspond à une paire possible d'opérateurs. Chaque paire est identifiée par le nom des deux opérateurs associés, le premier opérateur étant par construction l'opérateur ayant le rang le plus élevé. Dans le cas d'un accord de transit (accord *provider-to-customer*), le *fournisseur* est le premier opérateur et le *client* le second opérateur. Dans le cas d'un accord de peering ou en l'absence d'accord, le choix de l'opérateur qui est désigné en premier est sans importance. Sachant que nous considérons les 100 premiers opérateurs Internet, la base de données est composée de 4950 paires (et donc autant d'accords d'interconnexion potentiels). À partir des informations collectées sur le routage BGP, 977 accords sont identifiés, soit 19,74 % des accords potentiels. 65 % de ces accords sont de type peering et 35 % de type transit.

(3) Le fait de se limiter aux 100 premiers opérateurs qui assurent le routage de plus de 95 % du trafic Internet permet de disposer de données plus fiables sur les politiques de routage (Bailey, 1997 ; Gorman et Malecki, 2000). Au-delà des 100 premiers opérateurs, les risques d'erreur d'inférence sur la nature des accords (peering *versus* transit) sont plus élevés. De plus, le nombre de petits AS (locaux) est tellement élevé (plusieurs dizaines de milliers) que les conserver dans la base de données aurait limité la compréhension de la topologie d'Internet au niveau global et n'aurait pas permis de faire ressortir les principes stratégiques d'interconnexions entre opérateurs.

(4) Voir J. Xia et L. Gao, *On the Evaluation of AS Relationship Inferences*, IEEE Globecom, 2004.

Dans la suite, nous allons analyser la structure des relations entre opérateurs en tenant compte de leurs positions hiérarchiques (*Tier 1*, *Tier 2* ou *Tier 3*). Étant situés au plus haut niveau, les *Tiers 1* (ou backbones) ne sont jamais clients d'un autre opérateur et peuvent être soit fournisseurs, soit dans une relation de pair à pair (avec des opérateurs de niveau 1 ou de niveau inférieur). Les *Tiers 2* ou 3, de leur côté, peuvent fournir de la connectivité à d'autres opérateurs de même niveau ou de niveau inférieur (statut de *provider*), mais aussi acheter de la connectivité auprès d'opérateurs de même niveau ou de niveau supérieur (statut de *customer*). Plus précisément, les *Tiers 2* regroupent l'ensemble des fournisseurs de services nationaux mais également les fournisseurs majeurs de contenu, alors que les *Tiers 3* sont principalement des fournisseurs d'accès locaux et des fournisseurs de contenu.

La figure 1 montre la structure hiérarchique de l'Internet et le tableau 1 présente la répartition des opérateurs ou AS présents dans notre base de données selon leur niveau hiérarchique (*Tiers 1*, 2 et 3) pour les trois périodes d'analyse suivantes (juillet 2005, janvier 2006 et juillet 2006).

3.2. Topologie des relations inter-opérateurs

La structure d'un réseau (réseau social, réseau physique, ...) peut être caractérisée par ses propriétés topologiques comme l'accessibilité (*path length*) (5) ou la cohésion (*clustering coefficient*) (6). 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 dans les années soixante (Milgram, 1967). Ces travaux renvoient à une expérience conduite à l'époque qui consistait à déterminer s'il était possible de relier deux individus, choisis de manière arbitraire sur le territoire des États-Unis, à partir de leur réseau de connaissance. Le résultat de cette expérience connu sous le terme *six degrees of separation* montrait qu'il était possible de relier deux per-

- (5) Il s'agit de mesurer pour chaque paire de nœuds du réseau le plus court chemin les reliant. L'*accessibilité* est alors la moyenne des plus courts chemins entre deux nœuds définie par

$$L = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i \geq j} d_{ij}, \text{ avec } d_{ij} \text{ la distance géodésique la plus courte entre un nœud } i \text{ et un nœud } j \text{ (le nombre de segments pour relier } i \text{ à } j \text{ par le plus court chemin) et } n \text{ le nombre total des nœuds dans le réseau.}$$

- (6) La *cohésion* correspond à la probabilité que deux individus connectés à un troisième soient également connectés entre eux. Cette mesure permet d'évaluer l'importance des cliques au sein du réseau. Formellement, le coefficient de cohésion C_i d'un nœud est le rapport entre le nombre de liens E_i qui existent entre les voisins d'un nœud i (ce dernier ayant k_i voisins) et le nombre total de liens possibles entre ces voisins $\frac{k_i(k_i-1)}{2}$, soit $C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}$. La cohésion du réseau C est alors la valeur moyenne du coefficient de cohésion de l'ensemble des acteurs du réseau.

FIGURE 1 : La structure hiérarchique de l'Internet

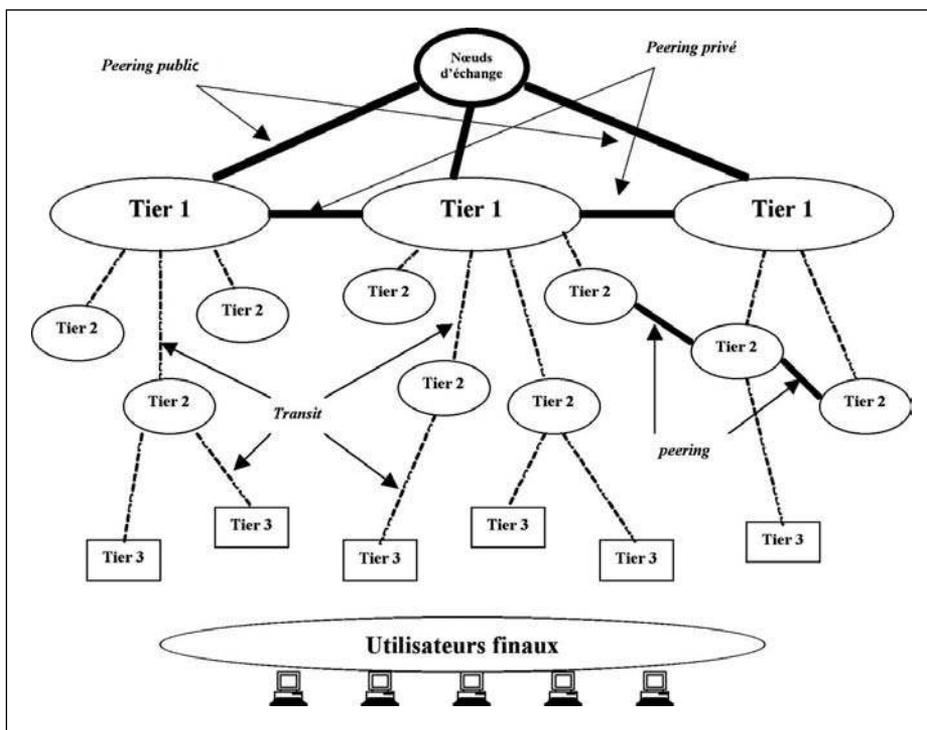


TABLEAU 1 : La répartition hiérarchique des AS selon les périodes d'observation

	07/2005	01/2006	07/2006
Tier1	13	12	19
Tier2	71	73	69
Tier 3	16	15	12
Total	100	100	100

sonnes prises au hasard par une chaîne de connaissances d'une longueur de six relations interindividuelles en moyenne. Ces travaux ont été par la suite remis à l'ordre du jour par Watts, doctorant en mécanique à l'université de Cornell (Watts [1999], Watts et Strogatz, [1998]).

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 et de liens (Watts 2003). Pour un réseau aléatoire, le niveau d'accessibilité est mesuré par $L_R(n,k) \equiv (\ln(n)/\ln(k))$ et le coefficient de cohésion par $C_R \equiv k/n$ 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 (7). Un réseau est alors 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 testons les propriétés petit monde du réseau Internet, à chacune des trois dates (juillet 2005, janvier 2006 et juillet 2006). Le tableau 2 présente les propriétés topologiques du réseau des 100 premiers opérateurs Internet (en termes de rang), ainsi que les propriétés du réseau en se restreignant aux seuls opérateurs de niveau 1, puis aux seuls opérateurs de niveau 2.

TABLEAU 2 : Les caractéristiques « petit monde » des trois réseaux (Top 100, Tier 1, Tier 2)

Période	Nombre d'AS	Nombre de relations	Moyenne des degrés	Moyenne accessibilité (L)	Moyenne accessibilité (aléatoire) (L_R)	L/L_R	Coefficient de cohésion (C)	Coefficient de cohésion (aléatoire) (C_R)	C/C_R	Coefficient Petit monde
Top 100										
07/2005	100	1964	19,64	1,97	1,54	1,27	0,58	0,19	2,97	2,33
01/2006	100	1836	18,36	2,05	1,58	1,29	0,52	0,18	2,83	2,19
07/2006	100	1944	19,44	2,05	1,54	1,32	0,55	0,19	2,82	2,13
Tier 1										
07/2005	13	968	74,46	2,03	1,90	1,06	0,84	0,11	7,11	6,66
01/2006	12	798	66,5	2,05	2,03	1,01	0,86	0,10	8,33	8,23
07/2006	19	970	51,05	2,02	1,85	1,09	0,62	0,12	4,81	4,40
Tier 2										
07/2005	71	1742	24,53	2,02	1,60	1,26	0,49	0,17	2,75	2,17
01/2006	73	1680	23,01	2,11	1,64	1,28	0,44	0,16	2,65	2,06
07/2006	69	1694	24,55	2,04	1,59	1,28	0,47	0,18	2,55	1,98

Le tableau 2 indique clairement que le réseau Internet affiche des propriétés « petit monde » surtout au niveau le plus élevé (accessibilité proche de celle d'un réseau aléatoire, mais cohésion plus forte que dans un réseau aléatoire). Le coefficient « petit monde » est entre 2,13 et 2,33 pour le réseau des 100 premiers opérateurs, alors que ce coefficient se situe dans une fourchette de 4,4 à 8,3 pour les seuls opérateurs de niveau 1. Ce résultat peut s'expliquer par la

- (7) 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 sont directement connectés. La condition $k \gg \ln(n)$ garantit que le réseau aléatoire est connecté.

nombre d'opérateurs ayant ce degré ne correspond pas à une ligne droite. Ce résultat indique l'existence d'une topologie qui ne respecte pas les propriétés d'un réseau sans échelle. Le réseau semble structuré autour de quelques « super-hubs » (une poignée de Tiers 1) ayant une attractivité plus que proportionnelle à leur nombre de liens et disposant de fait d'un pouvoir de marché important.

Après avoir caractérisé la topologie du réseau Internet, nous allons maintenant étudier la position des opérateurs dans le réseau d'interconnexion, en tenant compte de leur position hiérarchique.

3.3. Centralité des acteurs

Il existe de très nombreux travaux empiriques portant sur la position des acteurs dans les réseaux sociaux, par exemple sur les relations de salariés au sein d'une entreprise (Buckley et Van Alstyne, 2006), les relations des développeurs dans les communautés de logiciels libres (Fershtman et Gandal, 2008), les relations d'entreprises au sein d'une industrie (Powell *et al.*, 2005), etc. Nous allons ici mesurer la position des opérateurs, en termes de centralité, au sein du réseau des 100 premiers opérateurs Internet, et à chacun des niveaux hiérarchiques. Deux mesures de centralités sont calculées : la centralité de degré et la centralité d'intermédiarité (8). La centralité de degré d'un opérateur représente le nombre de liens ou de degrés directs formés par cet acteur avec d'autres opérateurs. Ainsi, l'acteur qui dispose du plus grand nombre de degrés est considéré comme un acteur central et joue un rôle essentiel dans le réseau. En revanche, un acteur qui dispose d'un faible nombre de degrés est considéré comme isolé par rapport aux autres acteurs, et joue par conséquent un rôle marginal dans le réseau. La centralité d'intermédiarité correspond à la proportion de routes reliant au plus court les différentes paires d'opérateurs, qui passent par cet acteur. Un opérateur caractérisé par un degré élevé de centralité d'intermédiarité peut très bien avoir une centralité de degré faible (être connecté directement à peu d'opérateurs), s'il constitue le point de passage obligé entre plusieurs groupes d'opérateurs non reliés directement entre eux. Un tel opérateur peut alors disposer d'un réel pouvoir de marché, en étant au cœur des échanges et des processus de coordination (9).

(8) L'annexe A présente les formules de calcul des différentes mesures de centralité.

(9) Nous avons aussi mené des analyses similaires basées sur la centralité de proximité (Freeman, 1979). Alors que la centralité de degré tient compte seulement du nombre de liens directs détenus par un opérateur, la centralité de proximité considère en plus les liens indirects (qui ne sont pas directement reliés à cet acteur). Les résultats obtenus pour la centralité de proximité sont quasi-identiques à ceux de la centralité de degré (même classement des dix premiers opérateurs). Nous avons donc choisi de ne présenter que la centralité de degré pour mesurer le pouvoir de marché de chacun des opérateurs en termes de nombre de relations et la centralité d'intermédiarité pour mesurer le pouvoir de marché en termes de positions au sein du réseau.

TABLEAU 3 : Centralité de degré pour le réseau Top 100

Juillet 2005	Degrés	Janvier 2006	Degrés	Juillet 2006	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
LAMBANET-AS (tier2)	44	TELENOR (tier2)	43	KPN (tier2)	43
CAIS-ASN (tier2)	43	TELECOMPLETE (tier2)	39	GBLX (tier2)	43

(*) Les opérateurs présents à la fois dans les trois périodes sont représentés en gras.

La centralité de degré

Le tableau 3 présente les dix premiers opérateurs Internet en termes de centralité de degré, au sein du réseau des 100 premiers opérateurs, en juillet 2005, janvier 2006 et juillet 2006. Seuls LEVEL3 (tier1), ABOVENET (tier1), PSINET (tier1) et HURRICANE (tier2) sont présents aux trois dates d'analyse. Ceci témoigne d'une certaine instabilité dans les positions des opérateurs. LEVEL3 semble toutefois détenir un rôle central dans les relations d'interconnexion entre 2005 et 2006. Il est présent parmi les dix premiers opérateurs la fois en termes de centralité de degré et d'intermédierité, sur toutes les périodes.

Le tableau 4 présente uniquement les dix premiers opérateurs de niveau 1. Les positions sont un peu plus stables à ce niveau hiérarchique, avec LEVEL3,

TABLEAU 4 : Centralité de degré pour le réseau Tier 1

Juillet 2005	Degrés	Janvier 2006	Degrés	Juillet 2006	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 (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 (tier1)	38	TELEGLOBE (tier1)	34	SEABONE-NET (tier1)	29
ALTERNET (tier1)	37	CWUSA (tier1)	34	SINGTEL-AS-AP (tier1)	29
AS702 (tier1)	35	ATT-INTERNET4 (tier1)	32	CWUSA (tier1)	27

(*) Les opérateurs présents à la fois dans les trois périodes sont représentés en gras.

TABLEAU 5 : Centralité de degré pour le réseau Tier 2

Juillet 2005	Degrés	Janvier 2006	Degrés	Juillet 2006	Degrés
SWISSCOM (tier2)	61	HURRICANE (tier2)	49	TDC (tier2)	52
HURRICANE (tier2)	49	INTERROUTE (tier2)	46	HURRICANE (tier2)	46
LAMBDANET (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 (tier2)	32	WEBUSUNET-1 (tier2)	33
VERIO (tier2)	38	REACH (tier2)	31	TISCALI-BACKBONE (tier2)	31

(*) Les opérateurs présents à la fois dans les trois périodes sont représentés en gras.

VERIO, TELIANET, COLT et TELEGLOBE qui apparaissent aux trois dates. Enfin, le tableau 5 présente les dix premiers opérateurs de niveau 2 et montre une très forte instabilité dans les positions, avec seulement HURRICANE et INTERROUTE présents aux trois dates (10).

La centralité d'intermédiation

Les tableaux 6, 7 et 8 présentent les dix premiers opérateurs en termes de centralité d'intermédiation sur l'ensemble du réseau et sur le réseau réduit aux opérateurs de niveau 1 et aux opérateurs de niveau 2. Les résultats sont assez similaires à ceux obtenus précédemment dans les tableaux 3, 4 et 5. La centralité d'intermédiation est très corrélée à la centralité de degré. Ainsi, 80 % des opérateurs présents dans le tableau 3 sont présents dans le tableau 6. De même, 93 % des opérateurs présents dans le tableau 4 se trouvent également dans le tableau 7. Enfin, 73 % des opérateurs présents dans le tableau 5 sont présents dans le tableau 8. Le tableau 9 page suivante présente la valeur des coefficients de corrélation entre centralité de degré et centralité d'intermédiation pour les différentes dates. Les coefficients sont tous supérieurs à 0,744. Ces résultats montrent que les acteurs les plus connectés (centralité de degré) sont aussi ceux qui jouent un rôle d'intermédiaires dans le réseau, leur conférant un réel pouvoir de marché. Toutefois, la forte instabilité dans les classements des opérateurs au cours du temps, même au niveau supérieur, est plutôt le signe d'une structure de marché concurrentielle et ouverte. Aucun acteur ne semble dominer les relations d'interconnexion. Ceci rejoint les conclusions d'Economides (2006) sur le caractère fortement concurrentiel de l'Internet dans les niveaux élevés.

(10) En annexe, le graphe des relations des opérateurs est présenté.

TABLEAU 6 : Centralité d'intermédiation pour le réseau Top 100

Juillet 2005	Coefficient	Janvier 2006	Coefficient	Juillet 2006	Coefficient
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)	11.85
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

Juillet 2005	Coefficient	Janvier 2006	Coefficient	Juillet 2006	Coefficient
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 (tier1)	302.75	Deutsche Telekom (tier1)	251.34	SPRINTLINK (tier1)	176.14
COLT (tier1)	255.14	VERIO (tier1)	176.96	ALTERNET (tier1)	161.68
TELIANET (tier1)	171.67	TELEGLOBE (tier1)	150.18	SEABONE-NET (tier1)	139.62
TELEGLOBE (tier1)	123.81	ALTERNET (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

Juillet 2005	Coefficient	Janvier 2006	Coefficient	Juillet 2006	Coefficient
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- (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

(*) Les opérateurs présents à la fois dans les trois périodes sont représentés en gras

TABLEAU 9 : Coefficients de corrélation degré/intermédiarité

	Juillet 2005	Janvier 2006	Juillet 2006
TOP 100	0,834	0,800	0,744
Tier 1	0,925	0,908	0,786
Tier 2	0,826	0,808	0,786

L'originalité de cette analyse topologique du réseau Internet par rapport aux travaux antérieurs a été de mettre en évidence la structure duale d'Internet, avec au niveau supérieur un réseau ayant une forte cohésion de type petit monde, et au niveau inférieur, un réseau plus faiblement connecté et plus instable. Ces résultats sont confortés lorsque l'on s'intéresse à l'assortativité de ces réseaux, consistant à regarder si les acteurs ayant le plus grand nombre de liens ont tendance à se connecter entre eux. Pour cela, nous avons calculé le coefficient de corrélation de Pearson généralement utilisé comme une mesure de l'assortativité (Newman, 2002). Les résultats montrent que le réseau est assortatif, la valeur du coefficient de corrélation de Pearson étant positive. C'est-à-dire que les opérateurs ayant un fort degré de centralité sont liés de préférence à d'autres opérateurs ayant aussi un fort degré de centralité, ces relations pouvant créer une situation de domination collective de l'Internet.

Dans la suite, nous allons revenir sur les motivations de s'interconnecter. Puis, nous procédons à des estimations économétriques à l'aide de modèles de choix discrets pour identifier les déterminants des accords de peering et de transit.

IV. — LES DÉTERMINANTS DES ACCORDS D'INTERCONNEXION

Les décisions d'interconnexion relèvent de considérations d'efficacité technique et économique, mais aussi de considérations stratégiques (11). À 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 motifs d'efficacité technique et économique

Les motifs d'efficacité technique et économique renvoient aux gains de s'interconnecter. Les accords d'interconnexion permettent à un opérateur d'améliorer la couverture et la qualité de son service, en utilisant une partie du réseau de son partenaire. Sans interconnexion, les opérateurs ne seraient technique-

(11) D'autres considérations peuvent aussi intervenir comme les obligations réglementaires s'appliquant aux opérateurs, qui peuvent varier d'un pays à l'autre, mais nous ne les abordons pas ici.

ment pas en mesure de fournir la plupart des applications et des services existants à leurs clients ou de les fournir dans des conditions économiquement viables. Les gains à s'interconnecter peuvent se mesurer en gains directs et indirects. Les gains indirects correspondent aux montants des investissements évités (en termes de couverture géographique) et à la possibilité de faire payer plus cher à ses clients des services plus nombreux et de meilleure qualité. En cas d'accords de transit, le fournisseur perçoit un gain direct à s'interconnecter, sous la forme d'un reversement monétaire de la part de l'opérateur client.

L'interconnexion génère toutefois des coûts directs et indirects. Tout d'abord, l'opérateur doit payer pour accéder aux nœuds d'échange dans lesquels il va s'interconnecter avec ses partenaires, et chaque nouvel accord d'interconnexion va entraîner des coûts d'activation et de maintenance de la connexion. Ensuite, il va devoir redimensionner son réseau pour prendre en charge le trafic de ses partenaires, afin d'éviter toute congestion et dégradation de la qualité du service pour ses propres clients.

L'importance des gains et des coûts induits par un accord d'interconnexion va dépendre, entre autres, de la taille respective des deux opérateurs, de leur couverture géographique et de leur bande passante (Besen *et al.*, 2001 ; Milgrom *et al.*, 2000 ; Jahn et Prüfer 2008 ; Weiss et Shin, 2004). Trois cas de figure peuvent se présenter. Si les gains dépassent les coûts pour les deux opérateurs, un accord de peering est alors envisageable (cet accord étant mutuellement bénéfique). Si un seul des deux opérateurs retire un gain supérieur aux coûts de s'interconnecter, alors un accord est possible, non pas sous forme de peering, mais sous forme d'un accord de transit (si l'opérateur dont le gain net est positif accepte de reverser une compensation monétaire à l'autre opérateur qui devient ainsi son provider). Enfin, dans le cas où les deux opérateurs retirent un gain inférieur aux coûts de s'interconnecter, aucun accord ne devrait voir le jour.

Le principal gain mutuel à s'interconnecter pour les opérateurs est de créer des externalités de réseau, qui ont pour effet d'augmenter la satisfaction des clients et donc leur disposition à payer les services proposés par ces opérateurs. À travers sa politique d'interconnexion, un opérateur peut offrir à ses clients de meilleures conditions d'accès aux clients et aux services des opérateurs partenaires (Crémer *et al.*, 2000). Les incitations à s'interconnecter devraient donc être d'autant plus fortes que les effets de réseaux attendus sont importants, ceux-ci étant directement liés à la taille cumulée des deux réseaux.

Hypothèse 1 : la probabilité d'établir un accord d'interconnexion devrait augmenter avec la taille globale des deux réseaux.

La proximité géographique peut aussi jouer un rôle important dans les décisions d'interconnexion, en augmentant les effets de réseau (échange de trafic plus intense) et en réduisant les coûts d'interconnexion (D'Ignazio et Giovannetti, 2006, 2007). Une décision d'interconnexion, en particulier un accord de peering, nécessite un niveau élevé de confiance et de coopération

informelle entre les opérateurs pour gérer l'incertitude et l'incomplétude contractuelle (Schumacher, 2006 ; Giovannetti *et al.*, 2007). La proximité géographique, notamment l'appartenance à un même pays, peut faciliter cette confiance (Beamish et Banks, 1987 ; Hennart et Reddy, 1997). Selon la théorie des coûts de transaction, les coûts de surveillance et de contrôle des partenaires diminuent lorsque les partenaires sont proches géographiquement. Le degré d'incertitude est aussi plus faible lorsque les opérateurs évoluent dans un environnement économique et institutionnel similaire.

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

4.2. Les motifs stratégiques

Si les opérateurs ont généralement un intérêt commun à s'interconnecter pour améliorer la qualité de leur service et réduire leurs coûts d'investissement, ils peuvent renoncer à le faire pour des raisons stratégiques. La première raison est le risque de comportements opportunistes, notamment dans le cadre des accords de peering. Un des opérateurs peut décider de sous-investir dans son réseau et ainsi adopter un comportement de *passager clandestin* en se reposant de manière excessive sur le réseau de son partenaire pour améliorer la qualité de ses propres services. S'il est interconnecté en plusieurs points avec un autre opérateur, 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 d'investissements en bande passante, d'autant plus que dans le cadre du peering, il utilise gratuitement les capacités de son partenaire (Dewan *et al.*, 2000 ; Manenti, 2000).

Les opérateurs sont toutefois moins tentés d'adopter ce type de comportements opportunistes lorsqu'ils sont dans une relation avec des opérateurs de même taille, la taille d'un opérateur pouvant être mesurée par le nombre d'accords d'interconnexion, son niveau hiérarchique, son volume de trafic, ses revenus d'accès Internet, le nombre d'adresses accessibles, le nombre de points de présence (Carter et Wright, 2003). Par exemple, Weiss et Shin (2004) montrent que les opérateurs préfèrent établir des accords de peering avec des opérateurs ayant des volumes de trafic similaires et proposer aux opérateurs plus petits des accords de transit, afin de se protéger contre les comportements opportunistes de type *passager clandestin*.

Hypothèse 3 : *la probabilité de passer un accord de peering (un accord de transit) devrait diminuer (augmenter) avec l'asymétrie entre réseaux.*

La seconde raison pouvant conduire les opérateurs à refuser de s'interconnecter est liée à la concurrence qu'ils se livrent dans la fourniture de service de connectivité et d'accès Internet. Il est ainsi possible que deux opérateurs proches en taille refusent de faire du peering parce qu'ils sont directement en

concurrence et qu'ils veulent différencier leur offre. En effet l'interconnexion rend leurs offres beaucoup plus proches en termes de qualité et donc plus substituables, ce qui peut réduire leur pouvoir de marché (Baake et Wichmann, 1999 ; Foros et Hansen, 2001 ; Foros et Kind, 2000).

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

Nous allons dans les deux sous-sections suivantes présenter la méthodologie de tests de nos quatre hypothèses et les résultats.

4.3. Méthodologie

Les décisions d'interconnexion sont modélisées comme des choix binaires. Nous estimons les déterminants des stratégies d'interconnexion à l'aide d'un modèle Probit bivarié, modélisant la décision de choisir entre un accord de peering et un accord de transit conditionnel à la décision de s'interconnecter. L'annexe C présente en détail le modèle estimé. Nous avons ainsi créé une variable $accord_{i,j}$, qui vaut 1 si les deux opérateurs i et j ont choisi de s'interconnecter quelle que soit la nature de l'accord et 0 sinon (12). Nous avons également créé une variable $peer_{i,j}$ égale à 1 si les deux opérateurs ont choisi de passer un accord de peering, plutôt qu'un accord de transit.

Du côté des variables explicatives, nous avons cherché à mesurer les effets de réseaux, le degré d'asymétrie entre opérateurs et leur degré de concurrence.

La variable *diffaccord* mesure la différence (en valeur absolue) entre le nombre d'accords d'interconnexion de l'opérateur i (quel que soit le type d'accord) et le nombre d'accords de l'opérateur j . Cette variable permet de mesurer le degré d'asymétrie entre les opérateurs, en termes de centralité dans le réseau et donc de mesurer les divergences d'intérêts économiques et stratégiques à signer un accord d'interconnexion (hypothèses 3 et 4).

La variable *somaccord* est le nombre cumulé d'accords des deux opérateurs. Cette variable permet de mesurer l'ampleur des externalités de réseaux et donc la valeur attendue d'un accord d'interconnexion (hypothèse 1).

De manière identique, les variables *diffpeer* et *sompeer* représentent respectivement la différence (en valeur absolue) dans le nombre d'accords de peering entre les deux opérateurs, et la somme cumulée d'accords de peering. Enfin, *diffprovider* et *somprovider* correspondent à la différence et à la somme des accords de type transit.

Par ailleurs, le degré d'asymétrie entre les opérateurs est aussi mesuré par le rapport entre le rang du plus grand opérateur et le rang du plus petit opérateur

(12) L'opérateur i a le rang le plus élevé des deux.

(*asrang*). Le rang est une mesure de la taille d'un opérateur, puisqu'il est calculé sur la base du nombre de clients ou d'adresses liés à ce réseau. Cette variable devrait avoir un effet positif sur les accords transit et négatif sur les accords de peering (hypothèse 3).

Par ailleurs, nous avons créé la variable *astier*, qui prend la valeur 1 si les deux opérateurs appartiennent au même niveau hiérarchique (tier 1, tier 2, ...) et 0 sinon. Des opérateurs de même niveau devraient être incités à faire du peering (hypothèse 3), mais pourraient aussi décider de ne pas s'interconnecter pour mieux différencier leurs services (hypothèse 4).

Enfin, nous testons l'hypothèse 2 de proximité géographique en introduisant la variable *aspays* qui vaut 1 lorsque les deux opérateurs sont de la même nationalité (en termes de siège social et/ou de lieu principal d'activité) et *ascontinent* qui vaut 1 si leurs principales activités sont sur le même continent.

Les estimations économétriques du modèle probit bivarié sur le choix de s'interconnecter et sur la nature de l'accord d'interconnexion ont été menées sur la base de données la plus récente (juillet 2006). Compte tenu de certaines données incomplètes, la base comprend 4851 paires d'opérateurs ayant ou non passé des accords d'interconnexion.

4.4. Résultats

Les résultats sont présentés dans le tableau 10. Les colonnes 1 et 3 présentent les estimations sur le choix de s'interconnecter, alors que les colonnes 2 et 4 correspondent aux estimations sur le choix des modalités d'interconnexion (peering ou transit), conditionnelle à l'existence d'un accord. Les résultats liés à la première spécification mettent en évidence un impact positif et significatif des *externalités de réseau* sur la probabilité de s'interconnecter en général, et plus particulièrement sous forme d'accords de peering. En effet, le nombre cumulé d'accords (*somaccord*) a un impact positif et significatif sur la probabilité de passer un accord et de choisir un contrat de peering.

Le degré d'asymétrie dans le nombre d'accords d'interconnexion entre deux opérateurs réduit les incitations de s'interconnecter. En cas d'accord, l'asymétrie augmente la probabilité de signer un accord de transit, conformément à l'hypothèse 3. Par ailleurs, le fait d'être deux opérateurs de même niveau (*astier*) augmente la probabilité de s'interconnecter en peering. De plus, la probabilité d'accord est plus grande en cas de proximité géographique (*aspays* et *ascontinent*). Enfin, l'asymétrie en termes de rang joue négativement sur la probabilité de s'interconnecter, et plus spécifiquement en peering, conformément à l'hypothèse 3.

Dans la deuxième spécification, nous avons estimé les probabilités de s'interconnecter et de passer un accord de peering ou de transit, en décomposant l'*effet agrégé de réseau* et d'*asymétrie de réseau* en un effet de peering et un

effet de transit (en remplaçant *somaccord* par *sompeer* et *somprovider* d'une part et *diffaccord* par *diffpeer* et *diffprovider* d'autre part). Les estimations confirment les résultats précédents : les effets de réseau des accords cumulés de peering et de transit se conjuguent pour augmenter la probabilité de s'interconnecter, alors que le degré d'asymétrie dans les accords de peering et dans les accords de transit a le même impact négatif sur la décision de s'interconnecter. Toutefois, les effets de réseau liés aux accords de peering jouent principalement sur la décision de s'interconnecter en peering, alors que les effets de réseau liés aux accords de transit renforcent les incitations de s'interconnecter en transit. Par ailleurs, les résultats soulignent un impact positif et significatif de l'asymétrie dans le nombre d'accords de peering sur la probabilité de signer un accord de transit.

Le tableau 10 page suivante s'attache à identifier les déterminants d'un accord d'interconnexion, en supposant implicitement que la décision relevait d'une discussion ou négociation bilatérale entre les deux opérateurs sur la base des gains et coûts attendus. Mais, il est sans doute plus raisonnable de considérer que le plus grand des deux opérateurs dispose du pouvoir de décider si un accord aura lieu ou non et la nature de cet accord. Dans ce cas, la décision dépendra seulement des gains et des coûts de cet opérateur. Au lieu de prendre en compte la somme cumulée des accords des opérateurs, il peut donc être préférable de considérer seulement la taille du plus petit opérateur qui reflète la valeur des externalités de réseaux que peut retirer le plus grand opérateur d'un accord d'interconnexion. Nous avons donc introduit dans la première spécification la variable *nbaccord2* qui indique le nombre d'accords que le plus petit opérateur a passé. Dans la seconde spécification, nous avons introduit à la place *nbpeer2* qui représente le nombre d'accords de peering et *nbprovider2* le nombre d'accords de transit passés par le plus petit opérateur.

Par ailleurs, nous avons vu dans le tableau 10 qu'une différence dans le nombre d'accords (*diffaccord*) avait un impact négatif et significatif sur la probabilité de s'interconnecter. Toutefois, il n'est pas évident qu'à l'inverse, une différence minimale entre les deux opérateurs conduise à une probabilité d'accord élevée. En effet, un effet de concurrence peut venir contrebalancer cet effet de symétrie et diminuer la probabilité d'accord entre deux opérateurs relativement semblables. Ainsi, il n'est pas certain que la relation entre le degré d'asymétrie et la probabilité d'accord soit linéaire et décroissante. Afin de tester l'existence de ce double effet d'*asymétrie* et de *concurrence*, une variable *diffaccord²* (*diffaccord*×*diffaccord*) est introduite dans la première spécification présentée dans le tableau 11 page suivante. De manière identique, les variables *diffpeer²* et *diffprovider²* sont prises en compte dans la seconde spécification.

Les résultats supportent l'existence d'un effet de concurrence qui s'oppose à l'effet de *symétrie*. 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 le degré d'asymétrie des opérateurs et la probabilité de réaliser un accord et ce, quelle que

TABLEAU 10 : Résultats économétriques du probit bivarié sur les choix de s'interconnecter (accord) et sur les modalités d'interconnexion (peering versus transit)

	(Spécification 1)		(Spécification 2)	
	Col. 1 accord	Col. 2 peering	Col. 3 Accord	Col. 4 peering
somaccord	0.047 (0.001)***	0.050 (0.002)***		
diffaccord	-0.016 (0.002)***	-0.020 (0.002)***		
asrank	-0.063 (0.034)*	-0.183 (0.042)***	-0.065 (0.035)*	-0.134 (0.043)***
aspays	0.249 (0.075)***	0.135 (0.084)	0.234 (0.074)***	0.134 (0.082)
ascontinent	0.255 (0.057)***	0.326 (0.065)***	0.239 (0.057)***	0.205 (0.064)***
astier	0.121 (0.052)**	0.349 (0.060)***	0.191 (0.056)***	0.249 (0.063)***
sompeer			0.052 (0.002)***	0.060 (0.002)***
diffpeer			-0.022 (0.002)***	-0.030 (0.003)***
diffprovider			-0.022 (0.010)**	-0.030 (0.010)***
somprovider			0.057 (0.008)***	0.029 (0.008)***
constant	-2.815 (0.095)***	-3.297 (0.120)***	-2.579 (0.094)***	-2.849 (0.113)***
Observations	4851	4851	4851	4851
Log-Likelihood	-2139.1798	-2139.1798	-2078.2573	-2078.2573

(i) Note: *, **, *** coefficients significatifs au seuil de 10 %, de 5 % et de 1 % respectivement, entre parenthèses: écart-type.

soit la nature de l'accord. Ainsi, la probabilité de réaliser un accord augmente avec la différence en termes de nombre d'accords entre les deux opérateurs, ce qui supporte l'hypothèse d'un *effet de concurrence* jusqu'à un certain niveau d'asymétrie, avant de diminuer. Ce point de retournement n'est toutefois pas identique selon la nature de l'accord. Le point de retournement se situe à 20 accords de différence pour une décision d'interconnexion, à dix pour un accord de peering et à 33 pour un accord de type transit.

Les autres résultats montrent que la taille du plus petit opérateur joue positivement sur la décision de s'interconnecter aussi bien en peering qu'en transit. Ceci montre que les externalités de réseau perçues par le plus grand opérateur constituent un élément central dans le processus de négociation de ce type d'accord. Par ailleurs, la proximité géographique augmente aussi la probabili-

*TABLEAU 11 : Résultats économétriques du probit bivarié
sur les choix de s'interconnecter (accord)
et sur les modalités d'interconnexion (peering versus transit)*

	(Spécification 1)		(Spécification 2)	
	Col. 1 accord	Col. 2 peering	Col. 3 Accord	Col. 4 peering
nbaccord ²	0.042 (0.002)***	0.042 (0.002)***		
diffaccord	0.013 (0.005)**	0.014 (0.006)**		
diffaccord ²	-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)**		
asrank	0.101 (0.030)***	-0.013 (0.038)	-0.003 (0.035)	-0.010 (0.043)
aspays	0.306 (0.069)***	0.208 (0.076)***	0.221 (0.070)***	0.113 (0.076)
ascontinent	0.182 (0.052)***	0.200 (0.057)***	0.236 (0.053)***	0.222 (0.058)***
Astier	0.124 (0.047)***	0.297 (0.053)***	0.363 (0.053)***	0.424 (0.058)***
diffpeer			0.001 (0.006)	0.002 (0.007)
diffprovider			0.103 (0.013)***	0.085 (0.015)***
nbpeer ²			0.045 (0.002)***	0.047 (0.002)***
diffpeer ²			-0.000 (0.000)	-0.000 (0.000)
nbprovider			0.014 (0.007)**	0.022 (0.007)***
diffprovider ²			-0.003 (0.001)***	-0.003 (0.001)***
Constant	-2.159 (0.086)**	-2.405 (0.102)***	-2.130 (0.092)***	-2.376 (0.104)***
Observations	4851	4851	4851	4851
Log-Likelihood	-2575.3237	-2575.3237	-2502.6102	-2502.6102

(i) Note : *, **, *** coefficients significatifs au seuil de 10 %, de 5 % et de 1 % respectivement, entre parenthèses : écart-type.

té de s'interconnecter. Enfin, la proximité en termes de rang ou de niveau hiérarchique augmente la probabilité de s'interconnecter.

V. — CONCLUSION

Dans cet article, nous avons montré que la structure actuelle de l'Internet reflétait une double logique de complémentarité et de concurrence entre les opérateurs Internet. Ceci explique la nature différenciée du réseau selon les

niveaux hiérarchiques. Le niveau le plus élevé (les opérateurs de niveau 1) présente un degré de cohésion et de stabilité plus fort que les niveaux inférieurs. Ce résultat peut s'interpréter comme le signe d'un pouvoir de marché plus élevé pour les fournisseurs de services de connectivité universelle (*backbones*) que pour les fournisseurs d'accès Internet et opérateurs régionaux. Les résultats montrent aussi que la fourniture de nouveaux services avec une qualité garantie nécessitera sans doute une révision des stratégies d'interconnexion pour aller vers un réseau présentant une plus forte cohésion entre les différents niveaux hiérarchiques, afin de réduire les coûts de coordination (techniques et économiques) et les coûts de transaction qui peuvent se révéler très importants pour ce type de services. En effet, une structure de réseau « petit monde » semble particulièrement adaptée à la mise en place de services différenciés avec qualité de service : une *cohésion forte* permet de réduire les risques d'opportunisme dans les relations inter-opérateurs (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 sont impliqués dans la fourniture du service de bout en bout).

Une des analyses qui reste à faire consiste à mieux distinguer les opérateurs selon la nature de leurs activités. Ainsi, certains opérateurs ne sont que des fournisseurs de transit, d'autres seulement des fournisseurs d'accès ou seulement des fournisseurs de contenus comme Yahoo ou Google. Par ailleurs, les opérateurs peuvent aussi être intégrés et apparaître dans les différents niveaux hiérarchiques de l'Internet. Les modèles d'affaires des acteurs sont aussi très différents selon leur activité et les accords d'interconnexions n'occupent pas la même place dans ces modèles d'affaires. L'intérêt d'être un acteur avec un fort niveau de centralité est faible pour les fournisseurs de contenus (on ne les retrouve jamais dans les dix premiers opérateurs), alors que les opérateurs intégrés de transit et d'accès Internet peuvent valoriser une position d'intermédiaire dans le réseau. Une caractérisation des opérateurs permettrait de mieux mettre en évidence les logiques de complémentarité et de concurrence entre les acteurs de l'Internet.

BIBLIOGRAPHIE

- BAAKE P., WICHMANN T. (1999), « On the economics of Internet peering », *Netnomics* 1, pp. 89-105.
- BADASYAN N., CHAKRABARTI S. (2008), « A simple game-theoretic analysis of peering and transit contracting among Internet service providers », *Telecommunications Policy*, vol. 32, Issue 1, February, pp. 4-18.
- BAILEY J. (1997). « The economics of Internet interconnection agreements ». In L.-W. McKnight, & J.-P. Bailey, *Internet economics* (pp. 155-168). Cambridge, MA : MIT Press.
- BALES M.-E., JOHNSON S.-B. (2006), « Graph theoretic modeling of large-scale semantic networks », *Journal of Biomedical Review*, vol. 39, n° 4, pp. 451-464.
- BARABÁSI A.-L., ALBERT R. (1999), « Emergence of scaling in random network », *Science*, vol. 286, pp. 509-512.
- BARCELÓ J.-M., NIETO-HIPÓLITO J.-I., GARCIA-VIDAL J. (2004), « Study of Internet autonomous system interconnectivity from BGP routing tables », *Computer Networks*, 45, pp. 333-344.

- BEAMISH P.-W., BANKS J.-C. (1987), « Equity joint ventures and the theory of the multinational enterprise », *Journal of International Business Studies*, 18(2): pp. 1-16.
- BESEN S. MILGROM P., MITCHELL B. and SRINAGESH P. (2001), « Advances in Routing Technologies and Internet Peering Agreements », *American Economic Review*, vol. 91 - 2. May, pp. 292-296.
- BUCCIROSSI P., FERRARI BRAVO L., SICILIANI P. (2005), « Competition in the Internet Backbone Market », *World Competition*, 28, n° 2, pp. 235-254.
- BULKLEY N., Van ALSTYNE M.W. (2006), « An Empirical Analysis of Strategies and Efficiencies in Social Networks », *MIT Sloan Research Paper*, n° 4682-08.
- CARTER M., WRIGHT J. (2003), « Asymmetric Network Interconnection », *Review of Industrial Organization*, 22, pp. 27-46.
- CRÉMER J., REY P., TIROLE J. (2000), « Connectivity in the commercial Internet », *Journal of Industrial Economics*, 48(4), pp. 433-472.
- D'IGNAZIO A., GIOVANNETTI E. (2006), « Antitrust Analysis for the Internet Upstream Market: a BGP Approach », *Journal of Competition Law & Economics*, vol. 2, n° 1, pp. 43-69.
- D'IGNAZIO A., GIOVANNETTI E. (2007), « Spatial Dispersion of Peering Clusters in the European Internet », *Spatial Economic Analysis*, vol. 2, (3), pp. 219-236.
- DANGNGUYEN G., PÉNARD T. (1998), « Les accords d'interconnexion dans Internet », *Communication & Strategies*, 32 (numéro spécial Internet: la Nouvelle économie d'Internet), pp. 107-133.
- DANGNGUYEN G., PÉNARD T. (2000), « Les accords d'interconnexion dans les réseaux de télécommunications: des comportements stratégiques aux droits de propriétés », *Revue d'Économie Industrielle*, n° 92, numéro spécial « Économie des contrats: bilan et perspectives », pp. 297-316.
- DEWAN R., FREIMER M., SEILDMANN A. (2000), « Interconnection agreements between competing Internet service providers », *Proceeding of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*. IEEE.
- ECONOMIDES N. (2006), « The Economics of the Internet Backbone », in *Handbook of Telecommunications*. Amsterdam: Elsevier Publishers.
- FALOUTSOS M., FALOUTSOS P., FALOUTSOS C. (1999), « On power-law relationships of the Internet topology », in *Proceeding of ACM SIGCOMM99*.
- FERSHTMAN C., GANDAL N. (2008), « Microstructure of Collaboration: The "Social Network" of Open Source Software », *CEPR Discussion Papers 6789*, CEPR Discussion Papers.
- FOROS Ø., KIND H.-J. (2000), « The Internet market structure: implications for national and international regulation? », *Teletronikk*, 2, pp. 45-58.
- FOROS Ø., KIND H.-J., SAND J.-Y. (2005), « Do internet incumbents choose low interconnection quality », *Information Economics and Policy*, vol. 17, pp. 149-164.
- FOROS Ø., HANSEN J. (2001), « Competition and compatibility among Internet service providers », *Information Economics and Policy*, 13, pp. 411-425.
- FRIEDEN R. (2000), « Does a hierarchical Internet necessitate multilateral intervention? », mimeo.
- GIOVANNETTI E., NEUHOFF K., SPAGNOLO G. (2007) « Trust and Virtual Districts: Evidence from the Milan Internet Exchange », *Metroeconomica*, 58:3, pp. 436-456.
- GORMAN S.-P., MALECKI E.-J. (2000), « The networks of the Internet: an analysis of provider networks in the USA », *Telecommunications Policy*, 24, pp. 113-134.
- HENNART J.-F., REDDY S. (1997), « The choice between mergers/acquisitions and joint-ventures: the case of Japanese investors in the United States », *Strategic Management Journal*, 18, pp. 1-12.
- JAHN E., PRÜFER J. (2008). « Interconnection and competition among asymmetric networks in the Internet backbone market », *Information Economics and Policy*, vol. 20, Issue 3, September, pp. 243-256.
- JIN S., BESTAVROS A. (2006), « Small-world characteristics of internet topologies and implications on multicast scaling » *Computer Networks*, 50, pp. 648-666.
- KENDE M. (2000), « The Digital Handshake: Connecting Internet Backbones », *Federal Communications Commission, OPP working Paper*, n° 32.
- LAFFONT J.-J., MARCUS S., REY P., TIROLE J. (2003), « Internet interconnection and the off-net-cost pricing principle », *The Rand Journal of Economics*, 34(2), pp. 370-390.

- LIPPERT S., SPAGNOLO G. (2007), « Internet Peering as a Network of Relations », *Telecommunications Policy*, vol. 32, Issue 1, February, pp. 33-49.
- MANENTI F.-M. (2003), « Congestion Private Peering and Capacity Investment on the Internet », Working Paper Discussion Paper DSE, n° 37, University of Padua.
- MILGRAM S. (1967), «The small world problem », *Psychology Today*, vol. 2, pp. 60-67.
- MILGROM P., BRIDGER M.-M., 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. pp. 175-195.
- NEWMAN M.-E.-J. (2002). « Assortative mixing in networks ». *Physical Review Letter*. 89, 208701.
- POWELL W.-W., WHITE D.-R., KOPUT K.-W., OWEN-SMITH J. (2005). « Network dynamics and field evolution: the growth of interorganizational collaboration in the Life Sciences ». *American Journal of Sociology*, 110/4: pp. 1132-1205.
- SCHUMACHER C. (2006). « Trust - A Source of Success in Strategic Alliances? », *Small Business Review*, 58, pp. 259-278.
- VÁSQUEZ A., PASTOR-SATORRAS R., 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., STROGATZ S.-H. (1998), « Collective dynamics of “small-world” networks » *Nature*, 393, 440-2.
- WATTS D.-J. (2003), *Six degrees: the science of a connected age*, New York: W. W. Norton & Company.
- WEISS M.-B., SHIN S.-J. (2004), « Internet Interconnection Economic Model and its Analysis: Peering and Settlement », *Netnomics*, 6(1), pp. 43-57.
- XIA L. Gao (2004), « On the Evaluation of AS Relationship Inferences », IEEE Globecom.

ANNEXE A – Les indices de centralité

Formellement la mesure de la centralité de degré C_D de Freeman (1979) est définie comme la somme du nombre des contiguïtés pour un point ou nœud j $C_D(j) = \sum_{i=1}^n a(i, j)$, où $a(i, j) = 1$ si i et j sont connectés par un lien ; autrement $a(i, j) = 0$. On peut obtenir une mesure relative de la centralité de degré pour un point j :

$$C_D^i(j) = \frac{\sum_{i=1}^n a(i, j)}{n - 1}$$

Où $n-1$ est le nombre maximum des points auquel un point j est connecté.

La centralité d'intermédiation est définie par :

$$C_B(j) = \sum_i \sum_{<k} \frac{g_{ik}(j)}{g_{ik}}$$

Où n est le nombre des points dans un graphe, g_{ik} est le nombre des géodésiques reliant i et k et $g_{ik}(j)$ est le nombre des géodésiques reliant i et k et qui contiennent le point j . La mesure relative de la centralité d'intermédiation est alors donnée par :

$$C_B^i(j) = 2 \sum_i \sum_{<k} \frac{g_{ik}(j)}{g_{ik}} \frac{1}{(n^2 - 3n + 2)}$$

ANNEXE B

Les figures 3, 4 et 5 représentent les graphes des relations d'interconnexion entre les opérateurs respectivement du top 100, des Tier 1 et des Tier 2. Ces

FIGURE 3 : Le réseau top 100 (période juillet 2006)

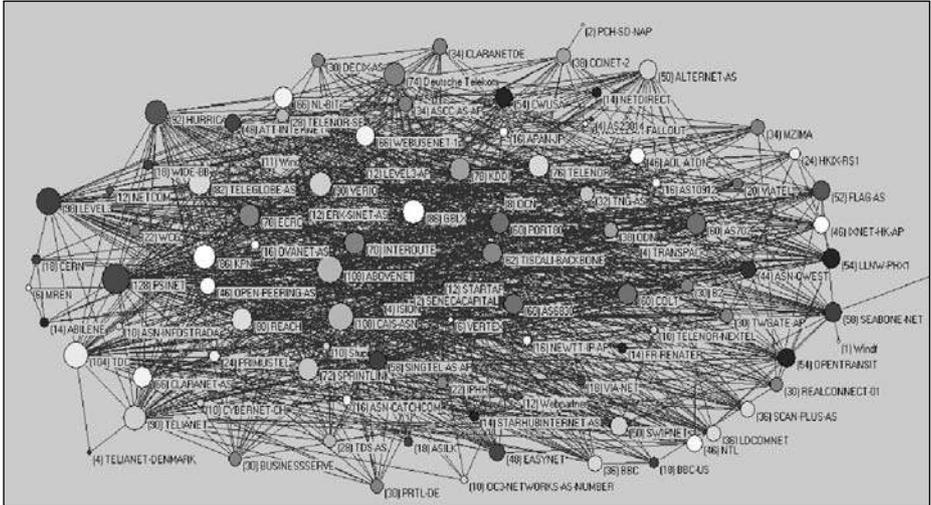


FIGURE 4 : Le réseau Tier1 (période juillet 2006)

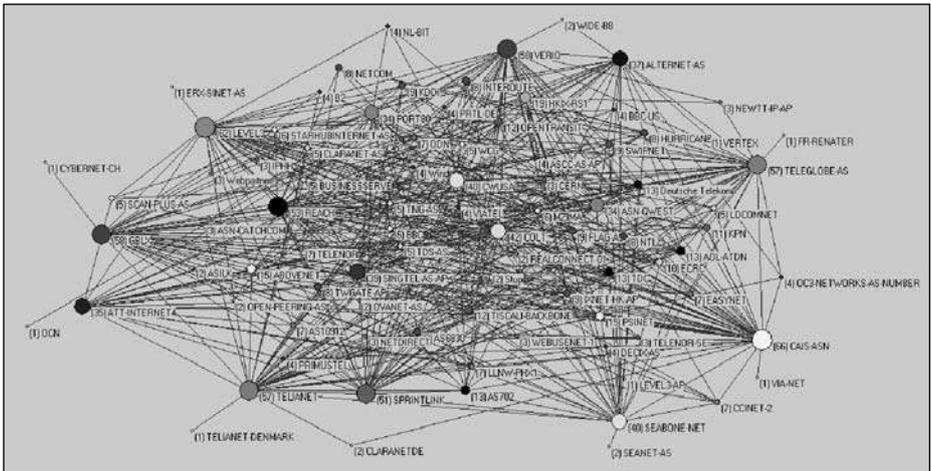
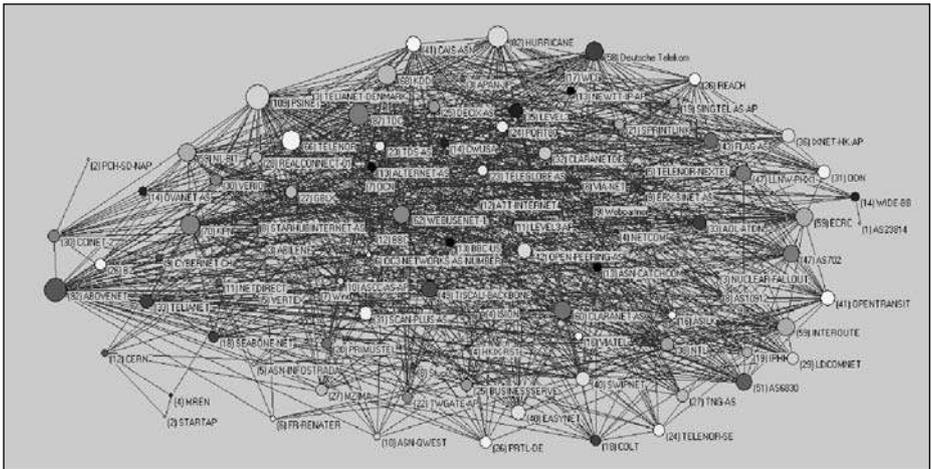


FIGURE 5 : Le réseau Tier2 (période juillet 2006)



graphes montrent la densité du réseau des accords d'interconnexion et la position des différents acteurs dans le réseau.

ANNEXE C – La méthode d'estimation d'un probit bi-varié

Les décisions d'interconnexion sont modélisées comme des choix binaires. Nous estimons les déterminants des stratégies d'interconnexion à l'aide d'un modèle Probit bivarié, modélisant la décision d'opter pour un accord de peering plutôt qu'un accord de transit conditionnelle à la décision de s'interconnecter.

Considérons que les opérateurs i et j (l'unité d'observation étant la paire d'opérateurs) s'interconnecteront ($y_{1ij}=1$) si $y_{1ij}^* = x_{1ij} \beta_1 + \varepsilon_{1ij} > 0$ avec x_{1ij} un ensemble de variables mesurant les gains et les coûts économiques et stratégiques pour les deux opérateurs de s'interconnecter et ε_{1ij} le terme d'erreur normalement distribué. Par ailleurs, les opérateurs i et j choisiront un accord de peering ($y_{2ij}=1$) si $y_{2ij}^* = x_{2ij} \beta_2 + \varepsilon_{2ij} > 0$ avec x_{2ij} un ensemble de variables mesurant les gains et les coûts économiques et stratégiques pour les deux opérateurs de choisir un accord de peering et ε_{2ij} le terme d'erreur normalement distribué.

Ainsi, les probabilités de ne pas s'interconnecter (P_0), de choisir un accord de peering (P_{11}) ou un accord de transit (P_{10}) peuvent être modélisées comme suit :

$$P_0 = P(y_{1ij} = 0) = P(x_{1ij} \beta_1 + \varepsilon_{1ij} \leq 0) = \int_{-\infty}^{-x_{1ij} \beta_1} \Phi(\varepsilon_{1ij}) d\varepsilon_1$$

$$P_{11} (y_{2ij} = 1) = P(x_{1ij} \beta_1 + \varepsilon_{1ij} > 0, x_{2ij} \beta_2 + \varepsilon_{2ij} > 0) = \int_{-x_{1ij} \beta_1}^{+\infty} \int_{-x_{2ij} \beta_2}^{+\infty} \Phi_{12}(\varepsilon_{1ij}, \varepsilon_{2ij}) d\varepsilon_1 d\varepsilon_2$$

$$P_{10} (y_{2ij} = 0) = P(x_{1ij} \beta_1 + \varepsilon_{1ij} > 0, x_{2ij} \beta_2 + \varepsilon_{2ij} \leq 0) = \int_{-x_{1ij} \beta_1}^{+\infty} \int_{-\infty}^{-x_{2ij} \beta_2} \Phi_{12}(\varepsilon_{1ij}, \varepsilon_{2ij}) d\varepsilon_1 d\varepsilon_2$$

Où Φ et Φ_{12} sont respectivement les fonctions de densité de ε_1 et de densité conjointe de $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$.

Les coefficients estimés sont ceux qui maximisent la fonction de log vraisemblance donnée par :

$$\text{Log}L = \sum_{ij=1}^n [(1 - y_{1ij}) \ln P_0 + y_{1ij} y_{2ij} \ln P_{11} + y_{1ij} (1 - y_{2ij}) \ln P_{10}]$$