

Réseaux multi-niveaux : l'exemple des échanges aériens mondiaux de passagers

Magali AMIEL, Université de Montréal,

Guy MÉLANÇON, LIRMM UMR CNRS 5506, Montpellier

Céline ROZENBLAT, UMR ESPACE, CNRS-Université Montpellier 3

Résumé.— Le système des interconnexions du réseau aérien mondial, organisé autour de certains *hubs* qui sont des passages obligés, fait apparaître différents niveaux de desserte. Une approche par les graphes valués (représentant les trafics aériens de ville à ville) permet de définir de fortes connectivités entre des groupes de nœuds (villes). Cette approche peut être réitérée à l'intérieur de chaque groupe (ou *cluster*). Il résulte une définition multi-niveaux des groupes de villes les plus interconnectées dans le monde, soulignant les étapes nécessaires pour voyager d'un groupe vers un autre. Ces groupes paraissent parfois relever de logiques spatiales, mais on voit aussi se former des réseaux spécialisés de tourisme ou d'activités économiques ou institutionnelles spécifiques. Ces méthodes ouvrent de nouvelles voies pour penser et représenter les réseaux et les systèmes spatiaux d'interactions.

Graphes • Réseau aérien • Territoires réticulaires

Abstract.— **Multi-level networks: international flows of airline passengers.**— International air interconnections divide the world into several layers of cities serviced through hubs. This paper describes an approach based on weighted graphs (representing inter-city air traffic) from which highly connected groups of nodes (cities) are inferred. The approach can be iterated within each group (or cluster). The method generates a multilevel presentation of the most interconnected cities in the world, highlighting the necessary stops for travelling from one group to another. Some groups appear to be based on spatial rules, but other specialised subgroups are emerging in response to economic, institutional or more specialised reasons, such as tourism. The method offers new perspectives for studying and representing networks and spatial interaction systems.

Air network • Graphs • Reticular territories

Resumen.— **Redes multiniveles: el ejemplo de los intercambios aereos mundiales de pasajeros.**— El sistema de interconexión de la red aerea mundial, organizada alrededor de algunos *hubs* obligatorios, deja aparecer distintos niveles de servicios. Un acercamiento con los grafos valuados (representando los tráficos aereos de ciudad a ciudad) permite definir fuertes conectividades entre grupos de nudos (ciudades). Este acercamiento puede hacerse en el interior de cada grupo (o *cluster*). Resulta entonces una definición multi-niveles de los grupos de ciudades mas interconectadas del mundo, indicando las etapas necesarias para viajar de un grupo hacia un otro. Estos grupos parecen a veces resultar de lógicas espaciales, pero se puede también observar redes especializadas de turismo, o de actividades económicas o institucionales específicas. Estos métodos ofrecen nuevas vias para pensar y representar redes y sistemas espaciales de interacciones.

Grafos • Red aerea • Territorios reticulares

Les réseaux d'échanges aériens sont devenus très denses et complexes à tous les niveaux d'échelle géographique. Leur analyse et leur représentation conduisent à répondre à un triple enjeu :

- rendre intelligible la vision des flux et des lieux les plus interconnectés ;
- délimiter les territoires inter-reliés et interdépendants ;
- montrer les logiques d'organisation du réseau aérien mondial.

Ces trois objectifs sont liés, puisque c'est par la compréhension des logiques d'organisation du réseau que l'on peut déceler les configurations spatiales sous-jacentes.

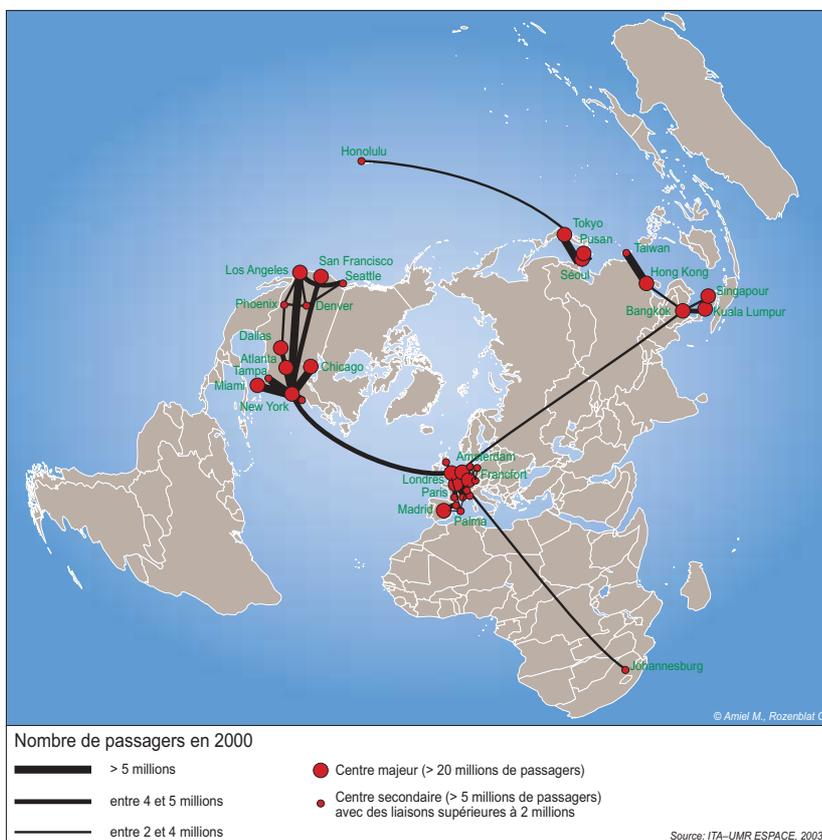
1. Les logiques complexes de l'organisation du réseau aérien mondial

Les caractéristiques de l'organisation du réseau aérien mondial sont perceptibles à travers sa forme (graphe, poids des échanges), elle-même produite par des acteurs économiques ou politiques qui ont largement évolué depuis une dizaine d'années.

Une forme « petit monde » du réseau aérien

Le réseau aérien mondial a des propriétés spécifiques de « petit monde » qu'il faut intégrer dans sa représentation. Un degré élevé de connexité entre les nœuds et de courts chemins pour arriver de n'importe quel nœud à un autre caractérisent ces petits mondes (Watts, 1999). Tous les points du réseau ne participent toutefois pas à ce type de configuration. Il faut, par exemple, emprunter 15 vols différents pour se rendre de Mount Pleasant (dans les îles Falkland) à Wasu (Papouasie-Nouvelle-Guinée) : c'est là le-plus-court-chemin le plus long du réseau aérien mondial (Guimera *et al.*, 2005).

Le réseau peut être décomposé en graphes plus connexes à l'intérieur du graphe général. Ces sous-graphes correspondent à des aéroports échangeant davantage de passagers, directement ou indirectement (c'est-à-dire avec des escales). Plusieurs « communautés » de villes aéroportuaires très interconnectées coexistent dans ce système complexe (Guimera *et al.*, 2005).



1a. Principales liaisons aériennes mondiales (plus de 2 millions de passagers)

Les principaux trafics du réseau

À cette configuration spécifique de la forme du réseau, il faut ajouter la distribution du trafic sur ses différentes branches. Si l'on réduit l'analyse aux liaisons passagers les plus importantes (fig. 1a), le trafic se concentre entre un nombre restreint de villes dominantes. Les 49 liaisons de plus de 2 millions de passagers par an (en 2000) ne relient que 41 villes (dont 23 villes des États-Unis). Paradoxalement, les liaisons qui totalisent les plus forts trafics de passagers sont des liaisons de courte ou moyenne distance. Les liaisons les plus

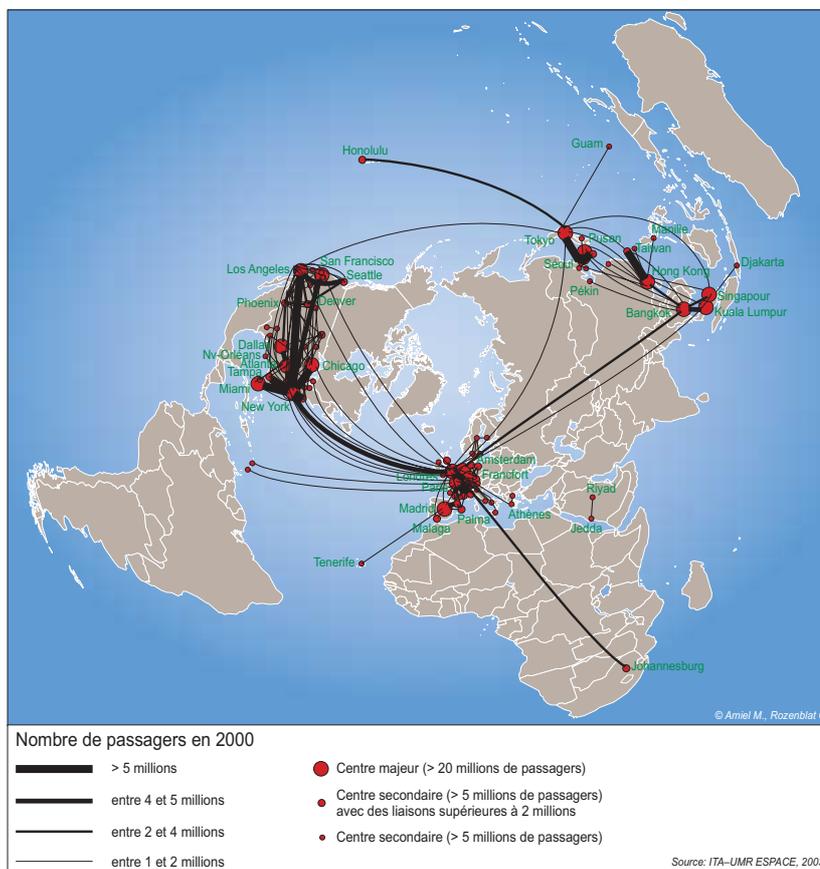
fréquentées sont Pusan-Séoul (plus de 6 millions de passagers), Fort Lauderdale-New York, Hong Kong-Taipei, Chicago-New York, New York-Orlando, Los Angeles-New York et Boston-New York (toutes ont plus de 5 millions de passagers). La première liaison européenne, Dublin-Londres, se place au 13^e rang (avec 4,1 millions de passagers), suivie au 15^e rang par Barcelone-Madrid (3,9 millions). Au total, parmi les 49 liaisons de plus de 2 millions de passagers, 32 relient des villes des États-Unis, 10 des villes européennes et 6 des villes asiatiques. Londres-New York constitue la seule liaison majeure transcontinentale (12^e place, 4,2 millions de passagers).

Les liaisons mineures (de plus de 1 million de passagers) étendent peu la couverture mondiale mais au contraire densifient les zones déjà bien desservies (fig. 1b). On remarque qu'aucune ville d'Amérique latine n'apparaît dans ce réseau majeur mondial. La première liaison de ce continent est Buenos Aires-Santiago du Chili (850 000 passagers par an), suivie de Buenos Aires-São Paulo (725 000).

Effets de la déréglementation sur la forme du réseau

On pourrait faire l'hypothèse que cette concentration mondiale est le résultat de logiques gravitaires où les villes les plus riches et les plus peuplées de la planète échangeraient d'autant plus de passagers aériens qu'elles sont proches. Toutefois l'application de ce modèle aux échanges aériens ne montre qu'un faible effet classique des distances euclidiennes ou des distances-temps (Amiel, 2003). L'organisation actuelle des trafics mondiaux est le résultat de différents processus de libéralisation apparus dans le transport aérien. Depuis la déréglementation du transport aérien, entamée en 1978 aux États-Unis et qui s'est généralisée dans le monde à partir de 1993, les parcours suivis par les avions ne dépendent plus seulement des capacités des lieux à échanger, ni des limites « technologiques » des appareils (capacités de distance). D'autres logiques viennent structurer l'organisation des échanges aériens :

- des logiques économiques de concurrence entre les compagnies ou de partenariat à l'intérieur d'« alliances » dont les plus connues sont Sky Team, Star Alliance et One World. Ces alliances organisent le partage des réseaux entre différentes compagnies ainsi que des offres de destinations plus grandes pour les passagers. La seconde logique économique de ces alliances est la fidélisation des passagers par divers programmes proposant des avantages spécifiques (garantie de réservation, choix des sièges, prime miles) ;



1b. Principales liaisons aériennes mondiales (plus de 1 million de passagers)

- des logiques de gestion à l'intérieur de chaque compagnie pour recentrer l'activité sur les parcours aériens et les secteurs de services à plus haute valeur ajoutée. À cela s'ajoute le processus de fusion-acquisition entre compagnies. La fusion entre Air France et KLM en 2004, celle de Lufthansa-Swiss en 2005 viennent confirmer cette dynamique qui consiste à créer des groupes d'envergure internationale capables de se positionner sur un plus grand nombre de marchés ;

- des logiques aéroportuaires et de réseau à travers des accords entre les compagnies et les aéroports définissent des *hubs and spokes* (« moyeux et rayons »), où les trafics de courte ou moyenne portée sont concentrés afin d'alimenter plus régulièrement les liaisons de longue distance. La présence de terminaux et de portes d'embarquements réservés, et l'augmentation du nombre de décollages et d'atterrissages sont les éléments qui guident les compagnies dans leur choix d'un aéroport servant de *hub*. Ainsi, Fort Lauderdale (Hollywood) aux États-Unis a été choisi comme aéroport intermédiaire par de nombreuses compagnies (Delta Airlines, Continental Airlines, South West, Spirit, etc. pour les liaisons intérieures, Lynx Air International pour l'international). La liaison Fort Lauderdale-New York est devenue la première liaison états-unienne.

Les échanges s'organisent donc réellement dans une logique réticulaire où des aéroports-étapes sont chargés par les compagnies de redistribuer les passagers selon des accords de partenariat entre les compagnies et entre les aéroports et les compagnies. On dénombre quatre grands niveaux de *hubs*: régionaux, nationaux, internationaux et intercontinentaux. Les *hubs* développés aux échelles intercontinentales constituent les centres d'échange majeurs de la planète comme Atlanta, Chicago, New York, Londres ou Paris, qui enregistrent les plus forts trafics de passagers et les mouvements d'avions les plus nombreux. Depuis n'importe quel endroit dans le monde, on passe par des étapes pour rejoindre le réseau dominant, qui conduisent à d'autres étapes pour gagner l'endroit souhaité. De nombreux aéroports interviennent ainsi comme des relais successifs entre l'ensemble des villes de la planète et les grands échanges intercontinentaux, ce qui ne fait que renforcer la centralité des nœuds dominants.

La structuration des réseaux, qui était jusqu'alors soumise à la volonté des États, passe sous la tutelle des stratégies des compagnies. Ces dernières sont pour la plupart privées et organisent leur réseau de sorte qu'il soit le plus performant et rentable possible au détriment d'une desserte homogène des territoires. Les chemins tracés par des compagnies de moins en moins nationales (même si leur histoire nationale apparaît encore dans leur structure actuelle [Amiel, 2004]) outrepassent les frontières et créent de nouvelles structurations transnationales de territoires équivalents (c'est-à-dire reliés au même point focal ou *hub*). Ainsi les logiques territoriales qui prévalaient avant la déréglementation sont obsolètes et de nouvelles territorialités se mettent en place.

L'objectif de notre approche est de souligner ces « nouveaux territoires réticulaires », définis par les liens du réseau aérien qui partagent le monde en différents niveaux de desserte à travers des passages obligés par certains *hubs*. La forme en étoile des réseaux, héritée de la déréglementation de l'industrie aérienne aux États-Unis, favorise l'émergence d'un système composé de multiples plates-formes aériennes. Des dynamiques spatiales de type centre-périphérie y sont renforcées. Les grands centres sont souvent devenus plus puissants (New-York, Londres, Chicago, Paris), des centres secondaires ont émergé (Séoul, Fort Lauderdale) (Amiel, 2005).

Il est toutefois difficile de représenter ces nouvelles configurations sur des cartes « classiques » de flux. Les principales liaisons aériennes mondiales ne constituent qu'une infime partie du réseau (fig. 1). Quoique les moyens informatiques actuels nous autorisent

à manipuler l'ensemble du réseau, aucune représentation « ad hoc » du réseau ne permettrait d'en produire une carte qui soit lisible. Outre la compacité des liens, la complexité des interconnexions du réseau ne se prête pas à une représentation fidèle et exhaustive.

Une approche par les graphes valués (correspondant au trafic aérien passagers de ville à ville) a donc été mise en œuvre ici afin d'aboutir à une représentation graphique plus claire des interconnexions aériennes.

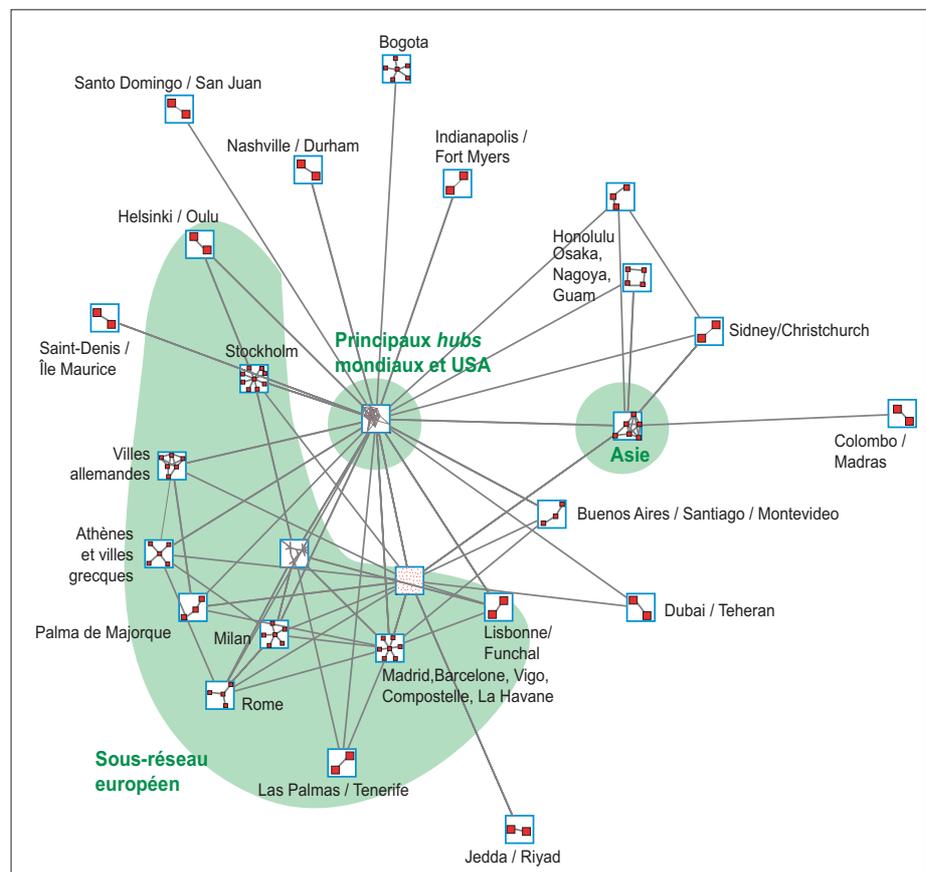
2. Les « petits mondes » du réseau aérien mondial

Une décomposition du réseau aérien mondial a pu être effectuée selon une méthodologie mise en place par D. Auber *et al.* en 2003, puis adaptée (cf. [encadré méthodologique](#)). Celle-ci permet de hiérarchiser le réseau en sous-réseaux emboîtés, en fonction de la densité locale des réseaux. Cette méthode souligne les groupes de villes plus inter-reliées entre elles qu'elles ne le sont avec le reste du système aérien et qui forment donc des « petits mondes ». La démarche est réitérée à l'intérieur de chaque groupe afin d'y définir des sous-groupes de villes encore plus inter-reliées. Cette démarche de classification descendante hiérarchique est répétée jusqu'à isoler chaque ville. Il en résulte un nombre de niveaux différent selon les parties du graphe, faisant apparaître des « profondeurs » différenciées dans le graphe. Les profondeurs de ces niveaux sont d'autant plus fortes que le niveau de dépendance et la complexité augmentent à l'intérieur des groupes formés.

La méthode permet de visualiser, à différents niveaux, des graphes qu'il serait impossible de représenter de manière intelligible sur un plan unique. La taille de la matrice exploitée a davantage été limitée par la capacité de traitement du logiciel TULIP, utilisé, que par la visibilité escomptée (ce logiciel TULIP, élaboré pour représenter des graphes multiniveaux a été principalement appliqué à des données de biologie: <http://www.tulip-software.org/>).

Ainsi, la matrice des flux aériens considérée prend en compte les 1 000 liaisons ayant engendré des trafics supérieurs à 300 000 passagers en 2000. Ces interconnexions concernent 250 villes du monde.

Au niveau le plus haut du réseau aérien mondial (fig. 2), le réseau est organisé autour d'une composante centrale, que nous avons nommée « principaux hubs mondiaux ». Autour de cette composante se déploie une topologie en étoile, faisant ressortir le rôle des hubs intercontinentaux. Au même



2. Réseau aérien mondial hiérarchisé (niveau 1)

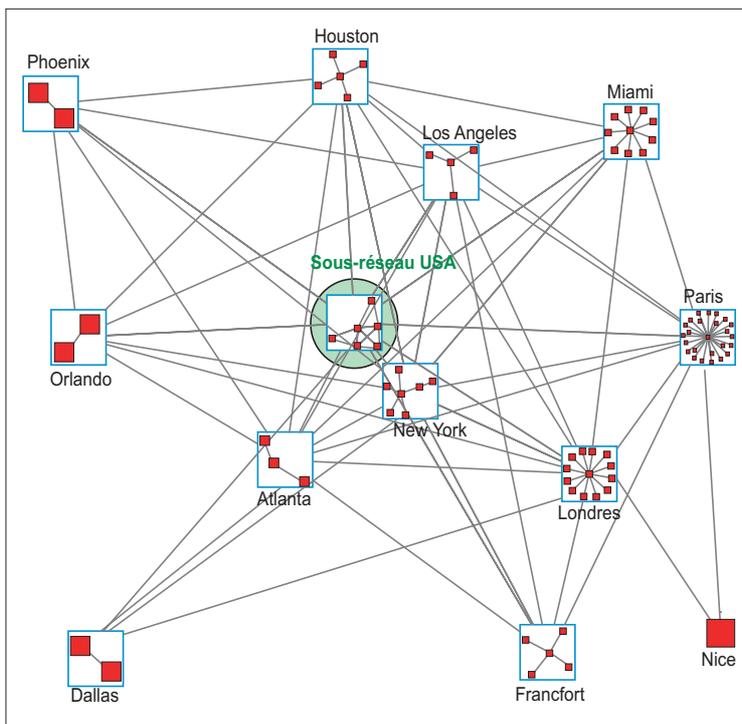
niveau, s'organisent des petits noyaux fortement interconnectés à ce réseau central. Parmi eux apparaissent des sous-réseaux à logique continentale, notamment en Europe et en Asie. En descendant les niveaux du graphe, on peut préciser cette organisation générale. L'algorithme de décomposition appliqué à chaque composante permet d'isoler de manière itérative des niveaux de connexité formant, à partir du niveau le plus général, des sous-graphes emboîtés de niveau 2, 3, etc.

Un groupe de villes centrales

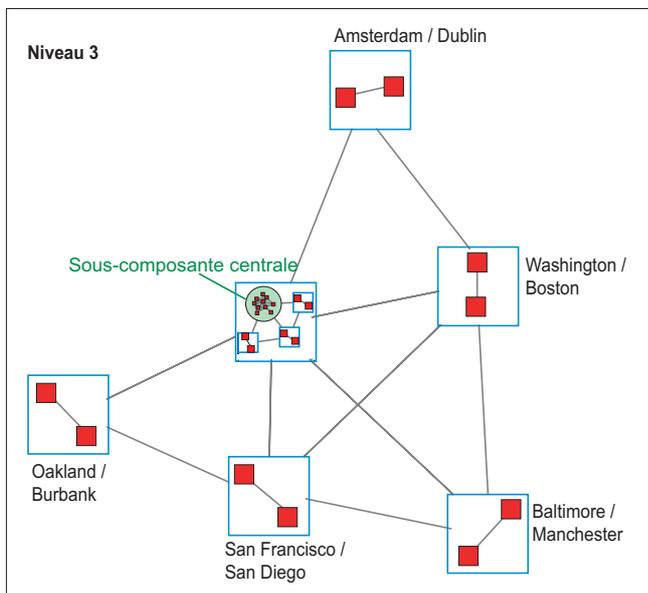
Les villes qui forment le groupe des « principaux hubs mondiaux » sont américaines et européennes (fig. 3). L'examen à ce deuxième niveau, plus fin, de cette région du graphe fait apparaître certains hubs du continent européen, comme Paris, Londres ou Francfort, ainsi que les principaux hubs états-uniens comme New York, Los Angeles, Houston ou Miami. Ces hubs états-uniens sont ceux qui ressortent pour deux raisons principales : ils sont les portes d'entrée continentales pour les liaisons arrivant d'Europe, et ils ont été en majorité choisis pour constituer les hubs des grandes compagnies états-uniennes, comme Delta Airlines à Miami ou American Airlines à New York (Vowles, 2000).

Un sous-réseau états-unien se démarque au centre, que l'on peut préciser à un troisième niveau (fig. 4). L'étendue du territoire américain impose, de fait, une organisation aérienne plus complexe qu'en Europe, puisque les compagnies qui la composent sont plus anciennes et que leurs dessertes se complètent, mais aussi se chevauchent et s'entrecroisent. Si cet ensemble est principalement composé de villes états-uniennes, trois villes européennes lui apparaissent particulièrement liées : Amsterdam, Dublin et Manchester, ce que l'on peut expliquer par les accords bilatéraux et les alliances entre compagnies, notamment Continental Airlines présente dans les trois aéroports et membre de l'alliance Skyteam.

La composante centrale de ce graphe de troisième niveau peut également être décomposée à deux niveaux inférieurs, soit à un cinquième niveau (fig. 5). Ce cinquième niveau met en exergue l'organisation locale des régions du centre et du Nord-Ouest américain. Il s'agit de villes états-uniennes secondaires, très liées entre elles et en



3. Hubs majeurs mondiaux et USA (niveau 2)



4. Sous-réseau USA (niveau 3)

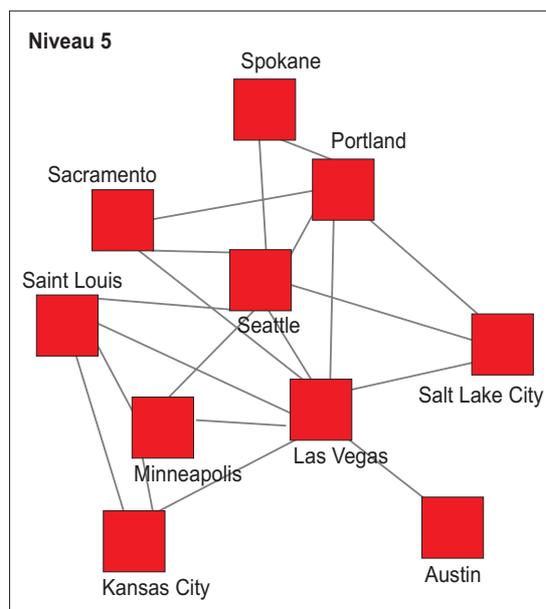
même temps très « encastrées » dans le système des *hubs* états-uniens (niveaux 3 et 2) qui, eux-mêmes, sont prépondérants au niveau mondial (niveau 1). Les fortes liaisons entre les villes secondaires états-uniennes et le niveau mondial découlent d'une particularité organisationnelle de l'espace états-unien qui a très tôt hiérarchisé son espace aérien selon trois grandes catégories de *hubs* en fonction de leur localisation géographique : les « *gateways* » traditionnels (Los Angeles, Chicago, Boston, San Francisco), les *hubs* principaux (Philadelphie, Atlanta, Détroit, Houston, Dallas) et les *hubs* secondaires (Minneapolis, Denver, Phoenix, Cincinnati, Saint Louis, Tampa, Las Vegas) (Weber, Williams, 2001 ; O'Connor, 2003). Cette organisation hiérarchisée permet aux villes secondaires états-uniennes d'être particulièrement bien intégrées dans le réseau mondial.

L'ensemble de ces villes se trouve ainsi au cœur du dispositif mondial aérien. La forme emboîtée de ces graphes montre un système très intégré, essentiellement sur des parties du territoire des États-Unis.

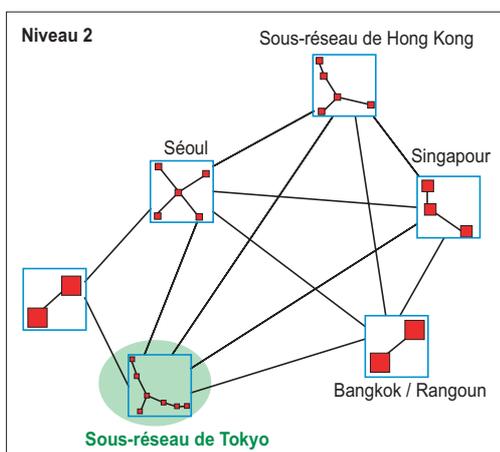
Groupes continentaux

En opposition au système nord-américain, les systèmes asiatiques et européens semblent moins intégrés au système mondial. Toutefois, si les villes européennes non intégrées dans le système de *hubs* semblent assez éclatées en différents groupes, le système asiatique est très connecté et forme un groupe à part entière (fig. 2).

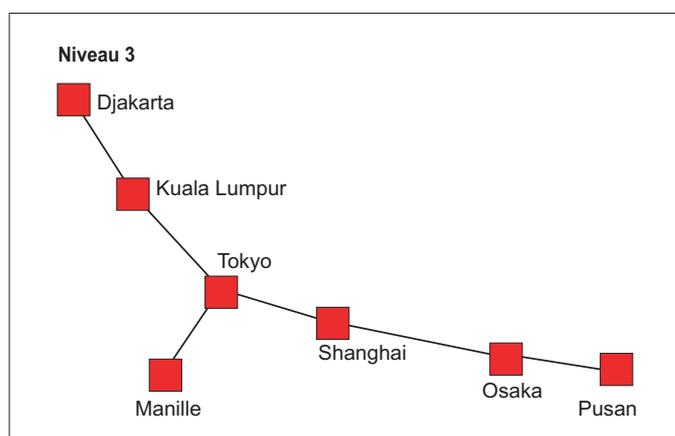
Le système asiatique peut être décomposé à un deuxième niveau (fig. 6). Ce système est organisé notamment autour de deux pôles, Hong Kong et Tokyo. La décomposition à un troisième niveau autour du pôle de Tokyo montre un système international fortement intégré autour de la capitale nipponne, système allant de Jakarta à Pusan, en passant par Shanghai (fig. 7). L'insularité présente dans la région asiatique justifie en partie la forte intégration du réseau régional. En outre, le potentiel et la demande en transport aérien en Asie entraînent une concurrence et une compétitivité de plus en plus forte entre les aéroports et entre les villes (Park, 2003).



5. Sous-composante centrale (niveau 5)



6. Réseau asiatique (niveau 2)



7. Sous-réseau de Tokyo (niveau 3)

Le système européen apparaît, quant à lui, peu intégré de Stockholm à Lisbonne, sans doute à cause de l'héritage prégnant d'une structure éclatée de l'espace aérien. En effet, les compagnies nationales, sous la pression des États, avaient organisé des *hubs* dans chacune des grandes capitales européennes. Il a fallu attendre la déréglementation du ciel aérien européen en 1993 pour que s'opère le transfert des compétences dans la gestion des routes aériennes des États vers les compagnies aériennes privées (Burghouwt, Hakfoort, Ritsema van Eck, 2003). Malgré les efforts de l'Union européenne pour construire un espace aérien cohérent, il demeure encore de grandes rivalités entre les principaux *hubs* européens, Londres, Paris, Francfort et Amsterdam (Graham, 1998).

Des villes fortement dépendantes du réseau central

Certaines villes sont, bien que fortement dépendantes des *hubs* majeurs ou des deux systèmes continents, peu connectées entre elles. C'est le cas de villes d'Amérique latine comme Bogota, Buenos Aires, Santiago du Chili, ou de villes du Proche ou Moyen-Orient comme Dubai, Téhéran, Jedda, ou Riyad. Les liens entre grandes capitales sud-américaines et le réseau central sont intenses car les échanges vers l'international se font en grande majorité de manière exclusive à partir des grandes capitales. Ces capitales ont reproduit le mouvement issu des politiques néolibérales d'ouverture de l'espace aérien, qui débouche sur la constitution de réseaux en étoile formés autour du système *hub and spokes* (Lipovich, 2002).

3. Des territoires réticulaires multiniveaux en formation

La méthode de représentation choisie fait apparaître les réseaux bien intégrés de *hubs* majeurs états-uniens et européens qui organisent le réseau mondial des échanges aériens en 2000. Les villes européennes qui ne sont pas dans ces réseaux de *hubs* majeurs apparaissent éclatées dans plusieurs groupes de premier niveau. Le réseau asiatique est en marge, même s'il est, régionalement, fortement connecté. Ces groupes très connectés, caractérisés par de fortes proximités topologiques, peuvent être nommés « territoires réticulaires » puisqu'ils sont délimités et contrôlés par un système économique formé par les compagnies aériennes, les aéroports et les différentes institutions de régulation. Ces territoires évoluent sous l'effet du jeu des marchés, des stratégies des groupes et des lois les régissant.

L'organisation des réseaux aériens, ainsi représentée, est révélatrice d'un intéressant processus d'intégration spatiale. En effet, les réseaux s'articulent autour d'un noyau central constitué par les principaux *hubs* mondiaux. L'organisation des « territoires réticulaires » permet de distinguer les trois ensembles zonaux organisateurs de l'économie mondiale : États-Unis, Europe, Asie orientale. Aux États-Unis, les structures sont très hiérarchisées et les relations avec les différents territoires bien structurées. L'exemple de l'Europe montre un espace aérien relativement peu organisé et peu hiérarchisé. Une multitude d'aéroports et de relations de même niveau se côtoient sans organisation unique comme celle des États-Unis. Avec la nouvelle politique européenne des transports, on peut supposer que ce phénomène va s'atténuer au cours des prochaines années (notamment par l'application du Livre blanc sur *la Politique européenne des transports à l'horizon 2010* [Commission européenne, 2001]).

La région asiatique est à considérer avec attention. L'Asie est, en effet, la région qui connaît actuellement la plus forte croissance du transport aérien. Il faudra suivre de près son évolution, car il y a fort à parier que le groupe des principaux *hubs* mondiaux inclura prochainement des aéroports comme Tokyo, Hong Kong ou Singapour.

Des espaces fortement intégrés à ce réseau principal sont visibles notamment en Amérique latine et au Moyen-Orient, ce qui laisse supposer qu'une nouvelle dynamique se met en place avec la croissance du transport aérien dans ces régions, qui vont sans doute créer à leur tour de nouveaux « territoires réticulaires ».

Les économies, les marchés et les restructurations internes des compagnies aériennes sont des facteurs qui complètent l'explication de ces tendances. Le transfert des compétences des États vers des compagnies privées rend les espaces aériens de moins en moins cloisonnés et donc davantage tournés vers des logiques de compétitivité. Ainsi les stratégies privées sont désormais les grandes organisatrices des « territoires réticulaires » aériens. Les seules instances régulatrices de ce système sont les organisations aériennes internationales (IATA, OACI). Le transport aérien étant un des secteurs les plus concurrentiels au monde (Spinetta, 2003), on doit s'attendre à une évolution constante des réseaux et à une organisation de plus en plus complexe de ses territoires réticulaires.

Conclusion

La prise en compte des propriétés de « petits mondes » dans l'analyse du réseau aérien mondial conduit à identifier les groupes ou « communautés » d'aéroports constituant l'armature du réseau mondial. Une hiérarchie est rendue visible, plus complexe qu'une simple hiérarchie des trafics, parce que multiple. Au niveau le plus élevé de l'agrégation, sont définis les groupes les plus connexes qui forment des « petits mondes » d'aéroports très inter-reliés. L'ensemble des villes des États-Unis est intégré dans le « petit monde » des « hubs majeurs » que les compagnies états-uniennes ont contribué à forger. Les principaux aéroports européens, que sont Londres, Paris et Francfort, sont insérés dans ce réseau central, en prise directe avec les aéroports états-uniens. Leur rôle est stratégique dans le réseau puisqu'ils contribuent à relier de nombreuses villes (notamment européennes) au réseau mondial. Quelques rares villes européennes apparaissent ancrées dans le système aérien états-unien : Amsterdam, Manchester et Dublin. Les autres villes européennes demeurent isolées de ce réseau central et constituent un ensemble éclaté, ce qui s'explique par l'héritage prégnant des anciennes structures nationales. Les villes asiatiques, quant à elles, s'isolent dans un « petit monde » à part. La mondialisation y est d'abord continentale grâce à l'essor de quelques grandes compagnies nationales comme Japan Airlines, China Airlines ou Korean Airlines, complétées par de nombreuses autres compagnies nationales, notamment chinoises.

L'information originale soulignée par ce type de représentation est la structure en deux « petits mondes » du réseau aérien : l'un est occidental et l'autre oriental. Les « délaissés » de ces petits mondes se retrouvent en périphérie du transport aérien, moins accessibles à l'ensemble de la planète que les autres. L'approfondissement de l'étude de ces petits mondes contribuera, par des études dynamiques, à mieux évaluer l'impact des stratégies des compagnies sur la structuration des échanges aériens mondiaux.

Références bibliographiques

- ALPERT C.J., KAHNG A.B. (1995). « Recent Developments in Netlist Partitioning : A Survey ». *Integration, the VLSI Journal*, vol. **19**, n° 1-2, p. 1-81.
- AMIEL M. (2003). *Le Réseau aérien mondial en 2000 : étude empirique*. Mémoire de maîtrise, Université Montpellier 3.
- AMIEL M. (2004). *L'Impact des stratégies des compagnies aériennes sur le réseau aérien mondial : l'exemple d'Air France*. Mémoire de DEA, Université Montpellier 3.

- AMIEL M. (2005). *La Restructuration d'Air France, 1991-2001*. CRT-2005-01, Université de Montréal, 32 p.
- AUBER D. *et al.* (2003). « Multiscale Navigation of Small World Networks ». In *IEEE Symposium on Information Visualisation*, Seattle, GA, USA. IEEE Computer Science Press.
- BERKHIN P. (2002). *Survey of Clustering Data Mining Techniques*. San Jose, CA: Accrue Software.
- BURGHOUWT G., HAKFOORT J., RITSEMA VAN ECK J., (2003). « The spatial configuration of airline networks in Europe ». *Journal of Air Transport Management*, 9, p. 309-323.
- CHIRICOTA Y., JOURDAN F., MÉLANÇON G. (2002). « Clustering as a Strategy for the Visualization of Large Graphs: A Metric-Based Approach ». In *DIMACS Workshop on Data Mining and Visualization*. Piscataway, NJ: DIMACS Center, Rutgers University.
- COMMISSION EUROPÉENNE (2001). *La Politique européenne des transports à l'horizon 2010 : l'heure des choix*. Luxembourg: Office des publications officielles des Communautés européennes, 35 p. http://europa.eu.int/comm/energy_transport/library/lb_texte_complet_fr.pdf
- GRAHAM B. (1998). « Liberalization, regional economic development and the geography of demand for air transport in the European Union ». *Journal of Transport Geography*, vol. 6, p. 87-104.
- GUIMERA R., MOSSA S., TUTSCHI A., AMARAL A.N. (2005). « The worldwide air transportation network: Anomalous centrality, community structure, and cities' global roles ». *Proc. Nat. Acad. Sc. USA*, vol. 102, n° 22, p. 7794-7799.
- LIPOVICH G.A. (2002). « Cielos Cerrados en el Mercosur. La Integra(domina)ción Regional en el Transporte Aéreo ». *Cuarto Encuentro Internacional Humboldt*. Puerto Iguazu, Argentina.
- MANCORIDIS S. *et al.* (1998). « Using Automatic Clustering to Produce High-Level System Organizations of Source Code ». *IEEE Proceedings of the 1998 Int. Workshop on Program Understanding (IWPC'98)*.
- O'CONNOR K. (2003). « Global air Travel: toward concentration or dispersal? ». *Journal of Transport Geography*, 11, p 83-92.
- PARK Y. (2003). « An analysis for the competitive strength of Asian major airports ». *Journal of Air Transport Management*, 9, p. 353-360.
- SPINETTA C. « Quelle stratégie pour les majors: la participation capitaliste est-elle un atout fondamental dans les consolidations d'alliances? ». In COMBES M., MONTERRAT J.M., TRIBOT LA SPIÈRE L. (2003). *Transport Aérien: les nouveaux défis*. Paris: Publisud, 238 p.
- VOWLES T.M. (2000). « The geographic effects of US airline alliances ». *Journal of Transport Geography*, 8, p. 277-285.
- WATTS D.J., STROGATZ S.H. (1998). « Collective Dynamics of "Small-World" Networks ». *Nature*, 393, p. 440-442.
- WATTS D.J. (1999). *Small Worlds*. Princeton: Princeton University Press, 266 p.
- WEBER M., WILLIAM G. (2001). « Drivers of long-haul air transport route development ». *Journal of Transport Geography*, 9, p. 243-254.
- WIJK J.V., HAM F.V. (2004). « Interactive Visualization of Small World Graphs ». In *IEEE Symposium on Information Visualisation*, Austin, TX: IEEE Computer Science Press.

Adresse des auteurs

Magali Amiel, Université de Montréal. Courriel : magali.amiel@umontreal.ca

Guy Mélançon, LIRMM UMR CNRS 5506, Montpellier. Courriel : Guy.Melancon@lirmm.fr

Céline Rozenblat, Université Montpellier 3-UMR ESPACE. Courriel : rozenblat@mgm.fr

Découpage hiérarchique du réseau

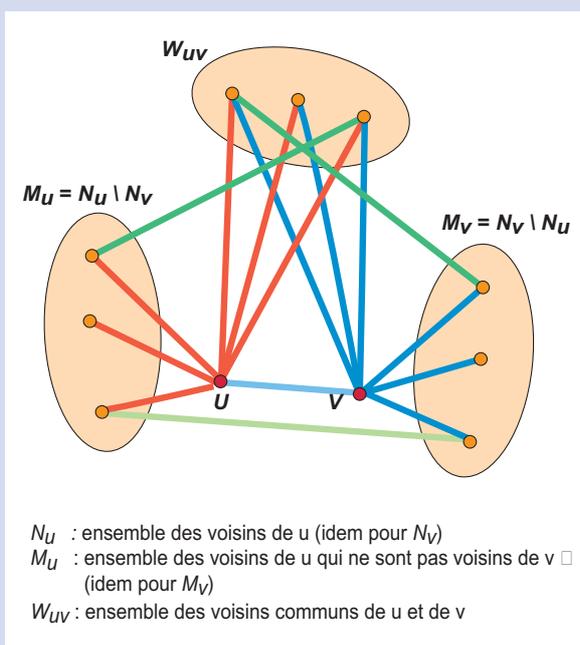
Nous avons envisagé d'appliquer au réseau une méthodologie élaborée par D. Auber *et al.* en 2003, qui permet de hiérarchiser le réseau en fonction des densités de connexion entre des groupes de nœuds. Les algorithmes qu'ils ont mis au point sur des graphes non-valués ont été adaptés pour les graphes valués.

Éclatement de la topologie du réseau

La technique développée par Auber *et al.* procède par filtrage des arêtes d'un graphe connexe afin de le décomposer en sous-graphes. Ces sous-graphes correspondent simplement aux composantes les plus connexes du graphe, mises en évidence en supprimant les arêtes qui participent le moins aux connectivités locales. La procédure peut être répétée sur chacun des sous-graphes et fait ainsi apparaître une hiérarchie de sous-graphes emboîtés.

Filtrage des arêtes

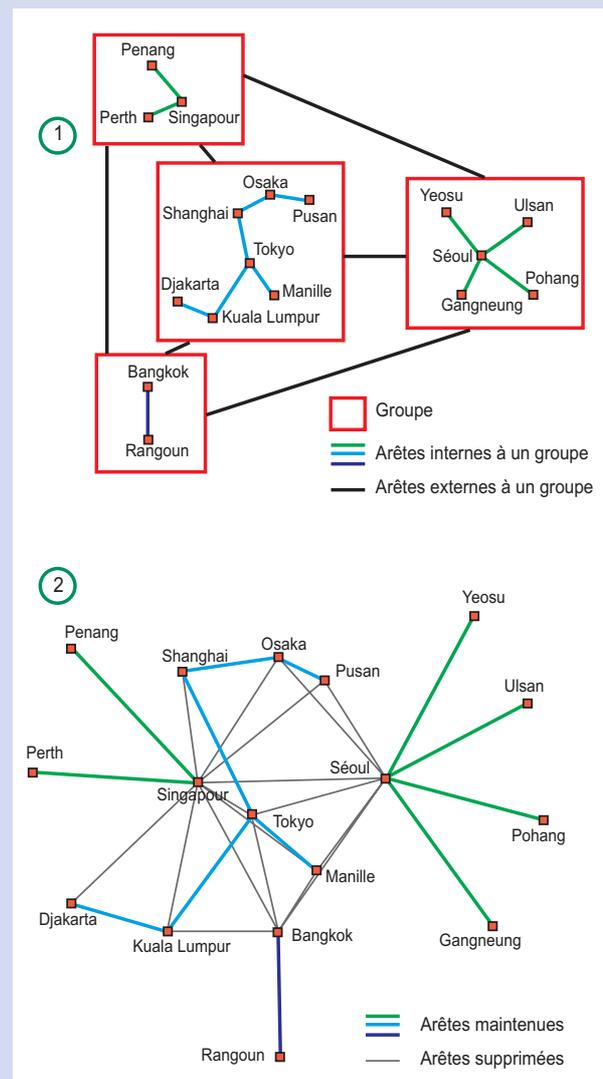
Un filtrage est effectué sur la base d'une valeur associée à chaque arête. La valeur associée à une arête reflète la cohésion qu'elle apporte à son voisinage. L'indice de cohésion d'une arête est en quelque sorte une généralisation de l'indice de *clustering* d'un sommet introduit par Watts et Strogatz dans la théorie des réseaux « petits mondes » (*small world networks*) (Watts, Strogatz, 1998; Watts, 1999). Cet indice de cohésion s'obtient en calculant le ratio entre le nombre de liens effectifs entre les voisins des sommets incidents à l'arête, et le nombre maximal de liens qui pourraient être observés (fig. I). Parmi les



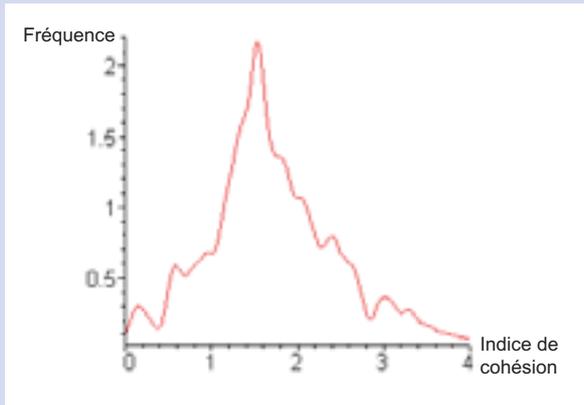
I. Méthode de filtrage des arêtes

voisins des deux sommets incidents à l'arête, il est nécessaire de distinguer leurs voisins communs (l'ensemble W_{uv} sur la figure) et ceux qui ne sont voisins que de l'un des deux sommets. L'importance du nombre de voisins communs par rapport à ceux qui ne sont pas communs va déterminer si l'arête est maintenue ou non. Par exemple, sur la figure II, seules les arêtes dont les nœuds ont plus (ou autant) de voisins communs que de voisins non communs sont maintenues (en rouge).

L'indice de cohésion des arêtes du graphe suit une distribution qu'il est nécessaire de représenter (fig. III). Seules les arêtes dont la valeur de l'indice est inférieure à un seuil fixé sont supprimées. Ce seuil est choisi selon un indicateur de qualité $MQ(t)$ emprunté à Mancoridis (1998), qui est similaire à de nombreux critères d'optimisation que l'on peut trouver dans la littérature (Alpert, Kahng, 1995; Berkhin, 2002; Chiricota *et al.*, 2002).



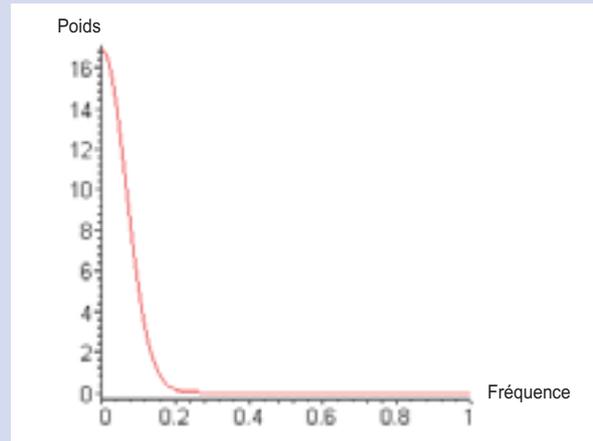
II. Exemples de filtrage des arêtes



III. Distribution de l'indice de cohésion des arêtes

Prise en compte du trafic

Pour obtenir un découpage pertinent du réseau formé des flux aériens de passagers, il nous a fallu adapter la méthodologie de *Auber et al.*, en prenant en compte le poids des arêtes du graphe qui représentent le trafic aérien. En effet, cette méthode repose sur la topologie du réseau étudié, misant entièrement sur ses propriétés « petits mondes » et laissant de côté l'importance des échanges.



IV. Distribution des poids des arêtes (trafics aériens)

La distribution de ces échanges, soit le poids des arêtes du graphe, suit ici une distribution « *scale-free* » ce qui rend compte de la forte hiérarchisation du réseau aérien mondial (fig. IV). Afin de tenir compte de ces poids, nous avons soumis à l'examen du filtrage les valeurs obtenues en multipliant l'indice de cohésion des arêtes par leurs poids respectifs. Ainsi, la prise en compte des poids produit un découpage du réseau plus pertinent.