



Une analyse du réseau aérien mondial

Titre original : *The worldwide air transportation network: Anomalous centrality, community structure and cities' global roles.*

R. Guimerà¹, S. Mossa², A. Turttschi¹ et L. A. N. Amaral¹

Article originellement paru sur le site ArXiv cond-mat/0312535 et dans le journal de l'Académie des sciences américaine n° 102, pp. 7794-7799 (2005).

Comme d'autres réseaux cruciaux, le réseau de transport aérien influe énormément sur les économies locales, nationales et internationales. De fait, il est naturel que les aéroports et les compagnies aériennes nationales soient souvent associées à l'image qu'un pays ou une nation souhaite donner d'elle-même [1, 2, 3, 4]. Mais le transport aérien est également responsable, indirectement, de la propagation de maladies comme la grippe et, dernièrement, le SRAS. Le réseau aérien joue pour certaines maladies un rôle analogue à celui que joue le réseau des partenaires sexuels [5] pour le SIDA ou d'autres infections [6, 7].

Le transport aérien prend en charge quotidiennement des millions de passagers. À peu près 700 millions de personnes volent chaque année, un chiffre qui maintient le trafic proche de l'asphyxie. Par exemple, les compagnies américaines et étrangères programment

chaque jour plus de 2700 vols arrivant ou partant de Chicago O'Hare, soit plus de 10 % du trafic commercial américain quotidien – et plus que l'aéroport ne peut en accueillir même pendant une journée idéale. Le brouillard peut réduire la cadence d'atterrissage de 100 à 72 par heure (!), ce qui entraîne automatiquement des retards et des annulations partout aux États-Unis. Les défaillances et les inefficacités du transport aérien ont un très lourd impact : rien qu'en 1999, les retards aériens auront coûté entre 150 et 200 milliards d'euros en Europe.

Ces chiffres posent différentes questions : qu'est-ce qui a entraîné une telle situation ? Pourquoi ne peut-on pas l'améliorer ? Pour répondre à ces interrogations, il est important d'analyser la structure du réseau aérien et les mécanismes responsables de son évolution. La solution est cependant loin d'être évidente. La structure du réseau résulte des multiples actions simultanées des

différentes compagnies – privées et publiques – qui tendent à vouloir maximiser leur rentabilité à court terme. Cependant, l'état du réseau est également le résultat de nombreux aléas historiques dûs à la conjugaison de facteurs géographiques, politiques et économiques.

Beaucoup d'études ont porté sur la définition de modèles et d'algorithmes visant à optimiser les réseaux [9, 10]. Cependant, une approche systémique mondiale du transport aérien n'a encore jamais été conduite, et cela manque. De même qu'on ne peut vraiment comprendre la dynamique d'un écosystème en ne regardant qu'une chaîne alimentaire [11] ou le comportement complexe des cellules en n'envisageant que certaines réactions biochimiques [12, 13], on ne peut saisir la dynamique du transport aérien sans le considérer globalement. L'analyse réticulaire moderne [14, 15, 16, 17, 18] procure un cadre idéal pour conduire une telle démarche.

¹ Département de chemical and biological engineering, Northwestern University, Evanston IL 60208, États-Unis.

² Site du synchrotron, BP. 220, 38043 Grenoble Cedex.

www.geomag.fr

Le site de **Géomatique** Expert



Geomag
Le site de la revue Géomatique Expert

Accueil
Géomatique Expert
Newsletter
Forum
Nous contacter

Devenez Software Business Partner
Thales Authorized Business Partner

Bienvenue sur le Site de la revue Géomatique Expert



Geomag
Le site de la revue Géomatique Expert

Accueil
Géomatique Expert
Newsletter
Forum
Nous contacter
Revue en ligne

Sommaire des numéros
Articles en ligne
Abonnement

STAR-APIC

Les articles en ligne de la revue

Choisissez une rubrique parmi la liste suivante :

Actualités Evénements Expériences Recherche Reportages Témoignages

Actualités

- Les secondes rencontres des SIG départementaux
- RATP : un réseau et des cartes centenaires

Evénements

- Ajouter à la partie géographique une dimension interactive
- Eignana, un nom légendaire
- Géoevénement
- Skyline, la 3D au service du paysage

Expériences

- Annecy : un SIG entre lac et montagne

Nous analysons donc ici le réseau aérien mondial en construisant un réseau de 3883 lieux, villages, bourgades et villes comptant au moins un aéroport et nous traçons un arc entre deux lieux reliés par un vol direct. Nous trouvons ainsi que le réseau aérien fait partie des « petits mondes » [19] pour lesquels :

1. Le nombre de vols directs à partir d'une ville ;
2. Le nombre de géodésiques passant par un ville ;

ont une distribution à échelle invariante (*scale-free*). Mais, en contraste avec ce que prévoient la plupart des modèles de réseau à échelle invariante, nous nous apercevons que les métropoles les mieux desservies ne sont pas nécessairement les plus « centrales », c'est-à-dire au point de concours du plus grand nombre de géodésiques. Nous montrons que ce résultat surprenant tient à la présence de différentes « communautés » au sein du transport aérien. Pour identifier celles-ci, nous appliquons des algorithmes récemment issus de la théorie des réseaux complexes, et montrons que la structure de ces communautés ne peut s'expliquer à elle seule par des contraintes géographiques, mais que des facteurs géopolitiques entrent également en ligne de compte. L'existence de ces communautés nous conduit à définir le poids global d'une ville, en fonction de ses liens inter- et intracommunautaire.

Les données

Beaucoup de chiffres – parmi lesquels le nombre total de passagers, de vols ou de fret – permettant de classer les aéroports par importance sont compilés et publiés [20]. Nous nous appuyons ici sur la base *OAG Max3*, qui recense les horaires de plus de 800 compagnies aériennes sur la période du 1^{er} novembre 2000 au 31 octobre 2001. Cette

base, compilée par *OAG*, une filiale de *Reed Business Information Group*, recense tous les vols réguliers et charters, aussi bien les gros porteurs – des grandes compagnies – que des petits avions, type taxi aérien.

Nous focalisons notre analyse sur un réseau de villes, non d'aéroports – par exemple, Roissy et Orly sont tous les deux assignés à Paris. Nous nous restreignons aux vols commerciaux dans la semaine allant du 1^{er} au 7 novembre 2000. Même si ces données ont déjà plusieurs années, le réseau modélisé sur leur fondement n'est guère différent du réseau actuel ; en effet, ce dernier est fortement corrélé avec, d'une part, des facteurs socio-économiques comme le développement économique ou la densité de population, et, d'autre part, des variables géopolitiques comme la distribution des continents ou les frontières administratives [21]. Clairement, ces facteurs ne varient guère en l'espace d'une dizaine d'années.

Durant la période considérée, on compte 531 574 vols commerciaux distincts, ou segments, entre 3883 villes. Nous avons identifié 27 051 paires de villes reliées par des vols directs. Comme la base de données est extrêmement redondante – c'est-à-dire qu'il y a, la plupart du temps, plus d'un vol entre une ville et une autre –, notre analyse n'en est que plus sûre. Plus précisément, le fait que nous ne considérons pas les vols exceptionnels ne signifie pas, en général, que l'arc reliant deux villes n'existe pas, puisque ces vols sont généralement doublés par des liaisons régulières. De même, si des compagnies ont annulé leurs dessertes de certaines villes, il est très improbable que toutes l'aient fait simultanément.

À partir des données, nous créons une matrice d'adjacence qui se révèle être quasi-symétrique. La

légère asymétrie provient du fait que certains vols sont circulaires : A vers B vers C vers A. Pour simplifier l'analyse, nous avons symétrisé la matrice.

En outre, nous avons créé des réseaux régionaux pour différentes régions (Table 1). Plus précisément, nous générons 31 réseaux régionaux à différents niveaux de granularité. Au degré le plus haut, nous avons six réseaux : un pour chaque continent. Pour chacun d'entre-eux, excepté l'Amérique du Nord et l'Océanie, nous créons de deux à cinq sous-réseaux. Par exemple, le réseau asiatique est divisé entre Asie du sud, Asie centrale, Asie du sud-est, Asie du nord-est et Moyen-Orient.

Région	Nombre de villes
Afrique	364
Asie et Moyen-Orient	719
Europe	691
Amérique du sud	523
Amérique du nord	1064
Océanie	522

Tableau 1 : nombre de villes possédant des plates-formes aéroportuaires importantes par continent.

Structure à grande échelle du réseau aérien

Une caractéristique omniprésente des réseaux complexes est dénommée propriété du « petit monde » [22]. Dans un réseau « petit monde », les nœuds sont connectés deux à deux par des chemins courts, ce que l'on attend d'un graphe aléatoire [23]. Mais ils appartiennent également à un grand nombre de cliques⁴, semblablement à ce que l'on observe dans les graphes d'ordre faible, mais non dans les réseaux aléatoires.

³ Pour plus d'informations, consulter : <http://oagdata.com/solutions/max.aspx>

⁴ Rappelons que l'on appelle *clique* un sous-graphe complet d'un graphe.

Dans le transport aérien, le chemin moyen le plus court correspond au minimum moyen de vols que l'on doit emprunter pour aller d'une ville à l'autre (le nombre d'escalas plus un). Par exemple, pour les 719 villes du réseau Asie et Moyen-Orient $d = 3,5$, alors que pour le réseau global et ses 3663 villes, on trouve un chiffre à peine plus élevé : $d = 4,4$. La majorité des villes (56 %) sont reliées par quatre vols ou moins. Plus généralement, on s'aperçoit que d est proportionnel au logarithme du nombre total de villes dans le réseau, S : $d \sim \log S$. Cette

loi est compatible avec celle des réseaux « petit monde » et aléatoires, mais non avec les réseaux d'ordre faible où d croît plus rapidement que cela.

Cependant, certaines villes sont bien plus éloignées l'une de l'autre que quatre vols. Pour aller de *Mount Pleasant*, dans les îles *Falkland* jusqu'à *Wasu*, en Papouasie, il faut prendre pas moins de quinze vols différents. Depuis *Mount Pleasant*, il faut aller jusqu'à *Punta Arenas* au Chili puis de là jusqu'à différents hubs d'Amérique latine. À l'autre extrémité, de *Wasu* il faut aller à *Port Moresby*, ce qui requiert de prendre une suite bien déterminée de huit vols. Entre *Punta Arenas* et *Port Moresby*, on ne peut faire moins que six vols, mais il existe des centaines de combinaisons possibles en six vols.

Le coefficient d'agrégation C , qui mesure la complétude d'un réseau, est défini par la probabilité que deux villes directement reliées à une troisième le soient également entre elles. Nous trouvons que C est significativement plus importante dans le réseau aérien que dans un réseau aléatoire et qu'il augmente avec le nombre de nœuds. Ce comportement est compatible avec un réseau de type « petit monde » mais non un réseau aléatoire. Ainsi, pour le réseau aérien mondial $C = 0,62$, alors que le même réseau aléatoire donne $C = 0,049$. Nous pouvons donc conclure que le réseau aérien mondial est bien de type « petit monde » [19].

Un autre aspect sur lequel les réseaux réels diffèrent de leurs contreparties aléatoires souvent étudiées en mathématiques [23] est la distribution de l'ordre, c'est-à-dire la distribution du nombre d'arcs qui arrivent ou partent de chaque nœud [24, 19, 15]. Dans les graphes binomiaux, tous les nœuds ont des ordres équivalents, alors

que dans beaucoup de réseaux réels, certains nœuds sont bien plus connectés que d'autres. Plus précisément, beaucoup de réseaux complexes, baptisés à échelle invariante, ont une distribution d'ordre qui décroît selon une loi en puissance. Une explication à ce phénomène réside dans l'attractivité préférentielle [24, 19] que présenteraient les nœuds déjà fortement connectés.

Pour approfondir notre étude, nous étudions donc la distribution de l'ordre des nœuds du réseau aérien. L'ordre d'une ville représente donc le nombre d'autres villes avec lesquelles elle est reliée par un vol direct. La figure 1a représente la distribution cumulative⁵ ainsi obtenue. Les données suggèrent que $P(>k)$ suit une loi asymptotique type puissance tronquée [24, 19] :

$$P(>k) \propto k^{-a} f(k/k_x)$$

où $a = 1,0 \pm 0,1$ est l'exposant de la loi, $f(u)$ une fonction de troncature et k_x un facteur d'échelle qui dépend de la taille du réseau. La valeur calculée de a impliquerait que l'ordre moyen des nœuds augmente légèrement avec la taille du réseau [15].

L'ordre d'un nœud nous renseigne sur son importance. Cependant, il ne dit rien sur le rôle du nœud dans le réseau. Pour mesurer ce dernier, nous utiliserons l'indice de centralité d'intercalation⁶ des villes parties du réseau aérien. Cet indice est défini comme étant le nombre de géodésiques passant par la ville considérée [25, 26, 27]. La centralité normalisée est la centralité divisée par la centralité moyenne du réseau. La figure 1b représente le graphe de la distribution cumulative de la centralité du réseau aérien. La courbe obtenue suggère une loi de type :

$$P(>b) \propto b^{-\nu} f(b/b_x)$$

où $\nu = 0,9 \pm 0,1$ similaire à celle obtenue ci-dessus.

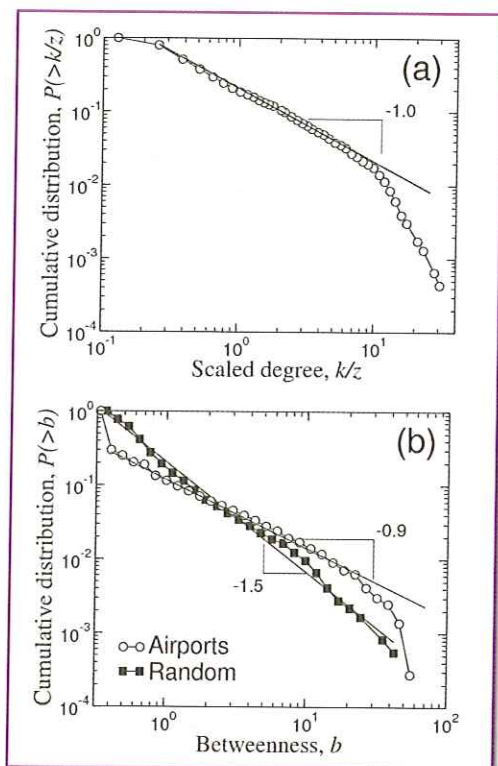


Figure 1 : Distribution de l'ordre et de l'indice de centralité du réseau aérien mondial. **1a** : distribution cumulative en échelle log-log. L'ordre k est normalisé par l'ordre moyen du réseau, z . La distribution exhibe un comportement en loi de puissance tronquée, avec un exposant $a = 1,0 \pm 0,1$. **1b** : Distribution cumulative de la centralité normalisée en échelle log-log. La distribution suit une loi de puissance tronquée d'exposant $\nu = 0,9 \pm 0,1$; pour un réseau aléatoire avec une distribution des ordres identique au réseau réel, l'exposant est égal à $\nu = 1,5 \pm 0,1$. Une comparaison des deux courbes montre clairement que le réseau réel comporte un nombre anormalement important de nœuds à centralité élevée.

⁵ La distribution cumulative $P(>k)$ est définie en fonction de la distribution p par $P(>k) = \sum_x p(l)$. Elle donne la probabilité qu'un nœud quelconque ait un ordre supérieur à k .

⁶ Voir le précédent numéro de *Géomatique Expert*.

La question qui se pose alors est de savoir si les nœuds dont l'ordre est grand ont également une centralité importante et vice-versa. Un premier élément de réponse est fourni par l'étude du réseau aérien rendu aléatoire (Fig. 1b). Nous trouvons dans ce cas que la centralité suit à peu près la même loi, mais avec un exposant ν égal à 1,5. Ceci indique clairement l'existence de fortes anomalies dans le réseau aérien réel. Lorsqu'on rend le réseau aléatoire, on trouve que l'ordre d'un nœud est fortement corrélé à sa centralité – c'est-à-dire que les villes les plus reliées sont aussi les plus centrales (Fig. 2a). *A contrario*, dans le réseau réel, certaines villes qui ne sont pas des transits importants – dont le degré est faible – sont néanmoins des plaques tournantes.

Pour mieux illustrer ce résultat, nous représentons les 25 villes les mieux desservies, et les 25 villes les plus « centrales » selon leur indice de centralité (Fig. 2b et 2c). Alors que les premières se situent majoritairement en Europe de l'ouest et en Amérique du nord, les secondes se répartissent à peu près uniformément sur le globe. Chaque continent possède au moins une ville centrale, qui, typiquement, est mieux reliée que ses « cocontinetales » : Johannesburg en Afrique, Buenos Aires et São Paulo en Amérique du sud. Outre ces villes d'ordre important, il existe des lieux – comme Anchorage en Alaska ou Port Moresby en Papouasie – qui, en dépit d'un ordre faible, comptent parmi les plus centrales du réseau (Tableau 2).

Centralité et réseaux

Les nœuds possédant un ordre faible mais une centralité forte peuvent être considérés comme anormaux. D'autres réseaux complexes analysés par ailleurs, comme par exemple l'*Internet* [28], n'exhibent pas ce comportement : les nœuds les plus connectés y sont aussi les plus

Rang	Ville	b	b/b_{ran}	Ordre
1	Paris	58,8	1,2	250
2	Anchorage	55,2	16,7	39
3	Londres	54,7	1,2	242
4	Singapour	47,5	4,3	92
5	New-York	47,2	1,6	179
6	Los Angeles	44,8	2,3	133
7	Port Moresby	43,4	13,6	38
8	Francfort	41,5	0,9	237
9	Tokyo	39,1	2,7	111
10	Moscou	34,5	1,1	186
11	Seattle	34,3	3,3	89
12	Hong Kong	30,8	2,6	98
13	Chicago	28,8	1	184
14	Toronto	27,1	1,8	116
15	Buenos Aires	26,9	3,2	76
16	São Paulo	26,5	2,8	82
17	Amsterdam	25,9	0,8	192
18	Melbourne	25,5	4,5	58
19	Johannesbourg	25,4	2,6	84
20	Manille	24,4	3,5	67
21	Séoul	24,3	2,1	95
22	Sydney	23,1	3,2	70
23	Bangkok	22,9	1,8	102
24	Honolulu	21,1	4,4	51
25	Miami	20,1	1,4	110

Tableau 2 : Les 25 villes les plus centrales dans le réseau aérien mondial, triées selon leur indice de centralité. On y ajoute également le rapport de cet indice à la valeur qu'il prendrait si le réseau était aléatoire. Les villes en italique ne font pas partie des 25 les plus desservies.

centraux [29]. Il n'est pas difficile de construire un réseau où un nœud possède un ordre faible tout en ayant une centralité élevée : il suffit pour ça que celui-ci soit le « passage obligé » d'une série d'autres nœuds, par exemple si le nœud en question est le seul dans un sous-ensemble à relier un autre nœud qui dessert lui-même tout un autre sous-ensemble. La question intéressante, en revanche, se formule plutôt comme : « quel mécanisme peut être à l'origine de l'apparition d'une telle topologie ? »

La réponse apparaît clairement lorsque l'on considère le cas de l'Alaska. L'Alaska est une région

à densité très faible, très isolée, possédant un réseau d'aéroports disproportionné – au vu de sa population. La plupart de ces aéroports sont reliés à d'autres aéroports du même État. Géographiquement, cela se comprend. Néanmoins, si l'on ne prend en compte que la distance, il ne semblerait pas absurde que certains soient reliés à des aéroports du nord canadien. Ces liaisons n'existent cependant pas. À l'inverse, seuls certains aéroports, dont Anchorage, desservent le reste des États-Unis. La raison est évidente : l'Alaska a besoin d'être reliée aux centres politiques des États-Unis « conti-

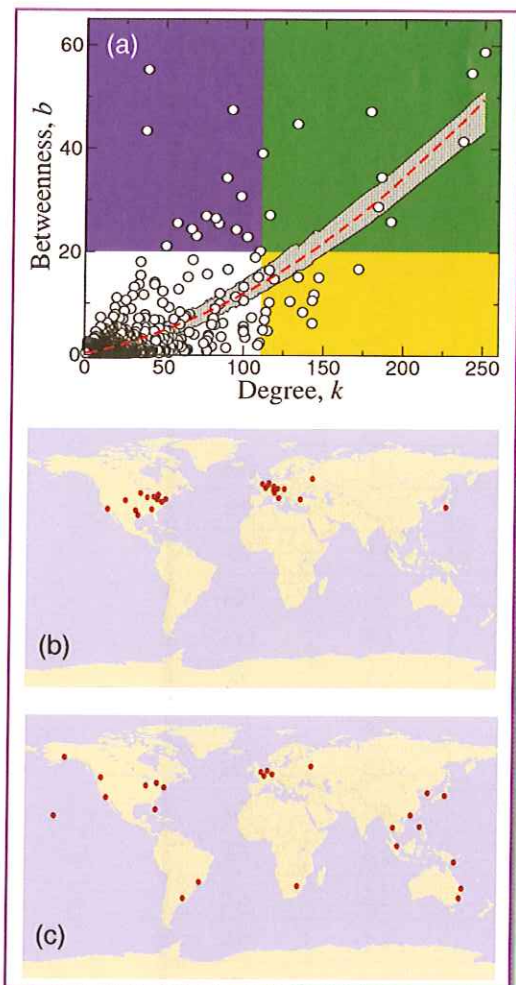


Figure 2 : Les villes les mieux desservies. 2a : centralité en fonction de l'ordre des villes (cercles). Dans le cas du réseau aléatoire, la centralité se modélise très bien par une parabole (en pointillés), 95 % des points tombant dans la zone hachurée en gris. En opposition à cette forte corrélation entre centralité et ordre, le réseau aérien réel comporte beaucoup de villes bien desservies mais à la centralité faible, ou vice-versa. Nous définissons une région bleue qui contient les 25 villes les plus centrales, et une région jaune qui contient les 25 villes les mieux desservies. Étrangement, seules quelques villes se trouvent à l'intersection des deux régions, dans la zone verte. Paris se trouve dans le coin supérieur droit : c'est la ville la mieux desservie et la plus centrale de tout le réseau. 2b : où se trouvent les 25 villes les mieux desservies. 2c : où se trouvent les 25 villes les plus centrales.

« nentaux », alors que les facteurs politiques excluent toute relation avec le Canada, même le Canada limitrophe [21]. La centralité d'Anchorage s'explique ainsi : il s'agit d'un des rares transits vers l'extérieur depuis une région à forte densité d'aéroports. L'anomalie de centralité provient donc de la présence de « communautés » dans le réseau.

Cette découverte inattendue de nœuds centraux d'ordre faible est très importante, car ces derniers jouent un rôle capital dans la diffusion ou la congestion [30], ainsi que dans la cohésion des réseaux complexes. Ainsi donc, nous devons d'une part identifier les communautés aériennes et, d'autre part, réévaluer le rôle des villes en se basant sur cette structure hiérarchique, et non plus simplement en termes d'ordre.

Structure des communautés

Pour isoler les communautés, nous utilisons la définition de la modularité introduite dans [32, 33]. La modularité d'un sous-ensemble est maximale lorsque ceux des nœuds y appartenant qui sont le plus reliés sont groupés ensemble et séparés des autres. Pour trouver la partition qui maximise la modularité, nous utilisons un algorithme de recuit simulé [34, 35, 36, 37]. Le résultat est visible sur la figure 3. Comme nous l'avions supputé, l'Alaska et la Papouasie forment à elles seules deux communautés séparées, ce qui explique la grande centralité d'Anchorage et de Port Moresby.

Autre résultat étonnant : si la distance géographique joue un rôle important dans la définition des communautés, la composition de certaines de celles-ci ne peut se déduire entièrement de critè-

res géographiques. Par exemple, le sous-ensemble qui contient le plus de villes européennes regroupe également la plupart des aéroports de la Russie asiatique. De même, si la Chine et le Japon sont agrégés à l'Asie du sud-est, l'Inde va avec la Péninsule arabique et le nord-est de l'Afrique. Ces faits confirment l'importance des considérations géopolitiques [21].

Rôle global des villes

Nous caractérisons le rôle de chaque ville par sa topologie inter- et intracommunautaire. Nous commençons par distinguer les *hubs* des *non-hubs*. Par exemple, une ville comme Anchorage est un hub au sein de sa communauté, mais ne joue qu'un rôle mineur au niveau mondial. C'est pourquoi l'on définit un ordre intracommunautaire. Si $k(i)$ est le nombre de liaisons du node i avec les autres villes de sa communauté $s(i)$, $Ks(i)$ la moyenne de k sur tous les nœuds de $s(i)$, et $\sigma_{Ks(i)}$ la variance de $k(i)$ dans $s(i)$, alors $z(i) = [k(i) - Ks(i)] / \sigma_{Ks(i)}$ est appelé *z-score*. Cet indice intracommunautaire mesure la « diversité » des destinations possibles vers les autres villes de la communauté.

Nous distinguons par la suite les villes suivant leurs liaisons aux autres villes ne faisant pas partie de leur communauté. Par exemple, deux agglomérations avec le même

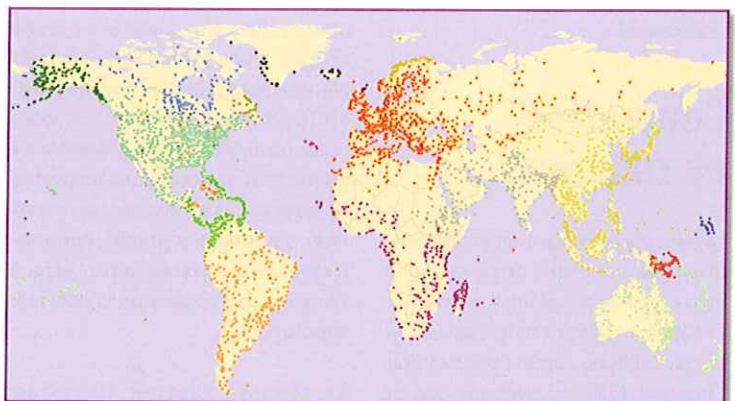


Figure 3 : Les communautés dans la gigantesque toile du réseau aérien mondial. Chaque point représente une ville et chaque couleur une communauté.

z-score seront classées différemment si l'une possède des vols intercommunautaires alors que l'autre non. Nous définissons le coefficient participatif, P_i , du nœud i par :

$$P_i = 1 - \sum_{s=1}^{N_M} \left(\frac{k_{is}}{k_i} \right)^2$$

où k_{is} est le nombre de vols du nœud i vers la communauté $s(i)$, et k_i le degré total du nœud i . Le coefficient participatif tend vers 1 si un nœud possède des liaisons équitablement réparties entre toutes les communautés, et vers 0 s'il n'est relié qu'à des villes de sa propre communauté.

Nous affirmons que le rôle d'un nœud peut se mesurer quasi-exclusivement en termes de coefficient participatif et d'ordre intracommunautaire [36, 37]. Heuristiquement, nous définissons sept classes « universelles », chacune correspondant à une région différente du plan zP . Selon l'ordre intracommunautaire, nous baptisons les villes ayant un $z > 2,5$ comme *hubs* et les autres comme villes « normales ». Ces deux catégories sont ensuite départagées par la valeur de leur coefficient participatif.

Nous divisons les villes « normales » en quatre rôles :

- *Nœuds provinciaux* : ceux qui ne sont reliés qu'à leur communauté ($P < 0,05$) ;
- *Nœuds périphériques* : qui ont la plupart de leurs liaisons dans leur communauté ($0,05 < P < 0,62$) ;
- *Nœuds connecteurs simples* : qui ont beaucoup de liaisons intercommunautaires ($0,62 < P < 0,80$) ;
- *Nœuds banalisés* : dont les liaisons sont réparties sur toutes les communautés ($P > 0,80$).

De même, les *hubs* sont divisés en trois rôles :

- *Hubs provinciaux* : qui relient les aéroports de leur communauté ($P < 0,30$) ;
- *Hubs connecteurs* : qui proposent des liaisons vers la plupart des autres communautés ($0,30 < P < 0,75$) ;

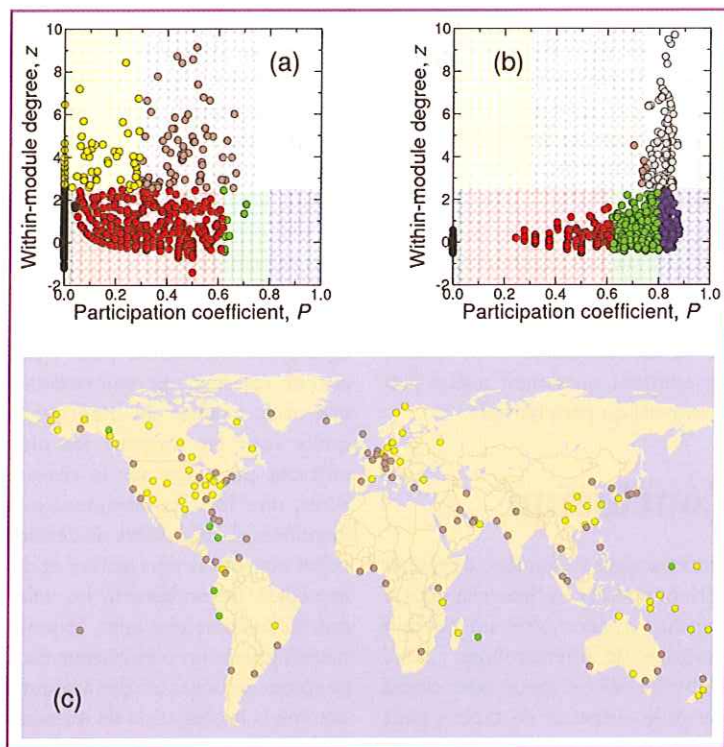


Figure 4 : une représentation spécifique du réseau aérien mondial. 4a : chaque point dans l'espace des phases zP représente une ville, et chaque couleur un rôle différent. La plupart des aéroports sont soit provinciaux (noir) soit périphériques (rouge). Un petit nombre sont des connecteurs simples (vert). On trouve à peu près le même nombre de *hubs* provinciaux (jaune) et connecteurs (marron). 4b : Même chose que 4a, mais sur un réseau aléatoire. L'absence de communauté se manifeste par l'émergence de *hubs* banalisés (gris) et de nœuds banalisés (bleu). 4c : position des connecteurs simples (vert), des *hubs* provinciaux (jaune) et des *hubs* connecteurs (principaux) en marron.

- *Hubs banalisés* : dont les liaisons se répartissent équitablement ($P > 0,75$).

Nous calculons pour chaque ville son ordre intracommunautaire z_i et son coefficient participatif P_i . Nous la classons ensuite suivant les catégories définies précédemment. Il apparaît ainsi que 95,4 % des villes ressortent soit comme périphériques, soit comme provinciales ; en outre, on trouve une faible quantité de connecteurs simples (0,5 %). Ce constat suggère que les villes qui ne sont pas des *hubs* dans leur communauté possèdent rarement des liaisons avec d'autres communautés du réseau mondial. Ceci contraste fortement avec certains réseaux biologiques, dans lesquels les nœuds connecteurs simples sont fréquents et semblent jouer un rôle important [36].

Les 4,1 % restants sont des *hubs*, répartis à peu près équitablement

entre provinciaux et connecteurs. Parmi les premiers, on trouve des villes qui, pour des raisons historiques, politiques ou géographiques, manquent de liaisons intercommunautaires. Par exemple : Denver, Philadelphie ou Détroit aux États-Unis ; Stuttgart, Copenhague, Istanbul ou Barcelone dans la communauté Europe-Sahel-U.R.S.S ; Adélaïde et Christchurch en Océanie ; Brasilia en Amérique du sud ; Fairbanks et Juneau en Alaska ; et Port-Moresby, déjà vu. Les *hubs connecteurs* incluent les archétypes de l'aéroport à fort trafic : Chicago, New-York, Los Angeles et Mexico en Amérique du nord ; Francfort, Londres, Paris et Rome en Europe ; Pékin, Tokyo et Séoul dans le sud-est asiatique ; Delhi, Abu-Dhabi et Koweït dans la communauté Inde-Arabie-Nord-est africain ; Buenos Aires, Santiago et São Paulo en Amérique du sud ; Melbourne, Auckland et Sydney en Océanie ; enfin Anchorage en Alaska.

Les résultats obtenus diffèrent notablement de leurs équivalents calculés sur un réseau aléatoire (Fig. 4b). Dans ce cas, même si l'algorithme de regroupement arrive à identifier des communautés, cette structure reste assez lâche. L'identification des rôles met en évidence l'aspect artificiel de ces communautés : la plupart des villes sont banalisées (*hubs* ou non) en raison de l'absence de structure, et le réseau ne contient quasiment aucun *hub* provincial ou périphérique.

Conclusion

Notre analyse systémique du réseau aérien mondial commercial nous a conduit à découvrir un certain nombre de phénomènes : tout d'abord, celui-ci peut être classé parmi les réseaux de type « petit monde », dans lequel le nombre de vols directs et le nombre de géodésiques passant par une ville donnée suivent des lois de distribution de type « échelle invariante ».

Bizarrement, les villes qui possèdent le plus de liaisons ne sont pas nécessairement les plus centrales. Nous postulons l'origine de cette anomalie dans la structuration en communautés, que nous identifions, et dont nous expliquons l'existence par des considérations géographiques et politiques.

Cette étude du réseau aérien est également importante pour deux autres raisons : premièrement, elle nous permet de déterminer quels sont les moyens les plus efficaces pour agir sur le réseau. Ainsi, une fois les communautés identifiées, il est possible de déceler celles qui sont le plus isolées et d'y remédier. Secondement, les villes qui connectent plusieurs communautés jouent un rôle majeur dans certains processus dynamiques comme la propagation de maladies type SRAS.

L'existence de communautés et la prise de conscience que toutes les villes sont loin d'avoir la même

importance dans le réseau aérien mondial enjoint à définir plus précisément le rôle de chacune. Sept classes sont ainsi définies, et nous trouvons que la quasi-totalité (95 %) des nœuds sont périphériques, c'est-à-dire qu'ils ne sont reliés majoritairement qu'à leur propre communauté. Nous voyons également que les nœuds qui relient différentes communautés sont typiquement des hubs régionaux, pas nécessairement globaux. Ce constat va à l'encontre de ce que l'on observe dans les réseaux biologiques, où les connecteurs non-hub sont plus fréquents [36].

Le fait que des réseaux différents émergent de semis de nœuds dont le rôle est spécifique pose la question plus générale de savoir quelles contraintes évolutives ou quelles pressions structurent la topologie des réseaux complexes, et comment la présence ou l'absence de rôles déterminés affecte l'efficacité de tels réseaux. ■

Bibliographie

- [1] Bisseur, A & Alamdari, F. (1998) *Transportation* 25, 331-355.
- [2] Dana, L. P & Vignali, D. (1999) *International Marketing Review* 16, 278-290.
- [3] Turton, B. J & Mutambirwa, C. C. (1996) *Tourism Management* 17, 453-462.
- [4] Raguraman, K. (1998) *Tourism Management* 19, 533-543.
- [5] Liljeros, F, Edling, C. R, Amaral, L. A. N, Stanley, H. E, & Aberg, Y. (2001) *Nature* 411, 907-908.
- [6] Liljeros, F, Edling, C. R, & Amaral, L. A. N. (2003) *Microbes Infect.* 5, 189-196.
- [7] Pastor-Satorras, R & Vespignani, A. (2001) *Phys. Rev. Lett.* 86, 3200-3203.
- [8] EUROCONTROL. (2000) *Cost of the air transportation delay in Europe, (EUROCONTROL - European Organisation for the Safety of Air Navigation), Technical report.* [http://www.eurocontrol.int/prc/reports/pr2/index.html].
- [9] Magnanti, T. L & Wong, R. T. (1984) *Transportation Sci.* 18, 1-55.
- [10] Minoux, M. (1989) *Networks* 19, 313-360.
- [11] Camacho, J, Guimerà, R, & Amaral, L. A. N. (2002) *Phys. Rev. Lett.* 88, art. no. 228102.
- [12] Kitano, H. (2002) *Science* 295, 1662-1664.
- [13] Jeong, H, Tombor, B, Albert, R, Oltvai, Z. N, & Barabási, A. L. (2000) *Nature* 407, 651-654.
- [14] Strogatz, S. H. (2001) *Nature* 410, 268-276.
- [15] Albert, R & Barabási, A.-L. (2002) *Rev. Mod. Phys.* 74, 47-97.
- [16] Dorogovtsev, S. N & Mendes, J. F. F. (2002) *Advances in Physics* 51, 1079-1187.
- [17] Newman, M. E. J. (2003) *SIAM Review* 45, 167-256.
- [18] Amaral, L. A. N & Ottino, J. (2004) *Eur. Phys. J. B* 38, 147-162.
- [19] Amaral, L. A. N, Scala, A, Barthélémy, M, & Stanley, H. E. (2000) *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 97, 11149-11152.
- [20] ACI. (1999) *ACI Annual Worldwide Airports Traffic Reports, (Airport Council International, Geneva), Technical report.* [http://www.airports.org].
- [21] Guimerà, R & Amaral, L. A. N. (2004) *Eur. Phys. J. B* 38, 381-385.
- [22] Watts, D. J & Strogatz, S. H. (1998) *Nature* 393, 440-442.
- [23] Bollobás, B. (2001) *Random graphs.* (Cambridge University Press, Cambridge, UK), 2nd edition.
- [24] Barabási, A.-L & Albert, R. (1999) *Science* 286, 509-512.
- [25] Freeman, L. C. (1977) *Sociometry* 40, 35-41.
- [26] Newman, M. E. J. (2001) *Phys. Rev. E* 64, art. n° 016131.
- [27] Newman, M. E. J. (2001) *Phys. Rev. E* 64, art. n° 016132.
- [28] Vázquez, A, Pastor-Satorras, R, & Vespignani, A. (2002) *Phys. Rev. E* 65, art. n° 066130.
- [29] Goh, K.-I, Oh, E, Kahng, B, & Kim, D. (2003) *Phys. Rev. E* 67, art. n° 017101.
- [30] Guimerà, R, Díaz-Guilera, A, Vega-Redondo, F, Cabrales, A, & Arenas, A. (2002) *Phys. Rev. Lett.* 89, art. n° 248701.
- [31] Holme, P & Kim, B. J. (2002) *Phys. Rev. E* 65, art. n° 056109.
- [32] Newman, M. E. J & Girvan, M. (2004) *Phys. Rev. E* 69, art. n° 026113.
- [33] Newman, M. E. J. (2004) *Phys. Rev. E* 69, art. n° 066133.
- [34] Kirkpatrick, S, Gelatt, C. D, & Vecchi, M. P. (1983) *Science* 220, 671-680.
- [35] Guimerà, R, Sales-Pardo, M, & Amaral, L.A.N. (2004) *Phys. Rev. E* 70, art. n° 025101.
- [36] Guimerà, R & Amaral, L. A. N. (2005) *Nature* 433, 895-900.
- [37] Guimerà, R & Amaral, L. A. N. (2005) *I. Stat. Mech.: Theor. Exp.*. P02001.