



## Analyse du réseau des voiries urbaines : une approche directe

Sergio Porta <sup>1</sup>, Paolo Crucitti <sup>2</sup>, Vito Latora <sup>3</sup>

Article disponible sur le site *ArXiv physics/0506009*  
Originellement paru dans la revue *Environment and Planning B : Planning and design 2006*, volume 33, pp. 705-725

### Quel ordre pour les réseaux de voies urbaines ?

« Entre lesquelles l'une des premières fut que je m'avisai de considérer que souvent il n'y a pas tant de perfection dans les ouvrages composés de plusieurs pièces, et faits de la main de divers maîtres, qu'en ceux auxquels un seul a travaillé. Ainsi voit-on que les bâtiments qu'un seul architecte a entrepris et achevés ont coutume d'être plus beaux et mieux ordonnés que ceux que plusieurs ont tâché de raccommo-der, en faisant servir de vieilles murailles qui avoient été bâties à d'autres fins. Ainsi ces anciennes cités qui, n'ayant été au commencement que des bourgades, sont devenues par succession de temps de grandes villes, sont ordinairement si mal compassées, au prix de ces places régulières qu'un ingénieur trace à sa fantaisie dans une plaine,

qu'en- core que, considérant leurs édifices chacun à part, on y trouve souvent autant ou plus d'art qu'en ceux des autres, toutefois, à voir comme ils sont arrangés, ici un grand, là un petit, et comme ils rendent les rues courbées et inégales, on diroit que c'est plutôt la fortune que la volonté de quelques hommes usants de raison, qui les a ainsi disposés. » (Descartes, Discours de la méthode). À l'aube de la modernité, Descartes définit la géométrie euclidienne comme le seul système ordonné capable, aux yeux d'un homme raisonnable, de s'appliquer à des motifs environnementaux, comme les jardins, les paysages, les routes et les villes. Presque trois cents ans après, Charles-Edouard Jeanneret-Gris dit Le Corbusier réagit violemment contre le retour, prêché par Sitte, à l'esthétique sociale des entre-lacs médiévaux, par cette célèbre invective : « La rue courbe est le chemin des ânes, la rue droite le chemin des Hommes » (1925). Seuls des ânes auraient pu conce-

voir les cités historiques d'Europe, avec leur fouillis de ruelles étroites et cet horrible, chaotique enchevêtrement d'intersections et de places. Actuellement encore, la géométrie euclidienne exerce une sorte de tyrannie sur les architectes et les aménageurs urbains, une obligation lorsqu'il s'agit de tracer des routes, des quartiers ou des villes. Tout comme lors du renouvellement urbain de naguère, les vieux quartiers restent sous-estimés quant à leurs valeurs les plus fondamentales : certes ils sont pittoresques, agréables et intéressants en raison de leurs architectures originales, mais leur structure est dévalorisée : ils sont désordonnés.

À l'encontre de cette stigmatisation contemporaine, un grand nombre de contre-arguments ont été opposés depuis le début des années 60 au nom de la « magie » des vieilles villes (Jacobs, 1993), non seulement du point de vue esthétique, mais aussi de celui

<sup>1</sup> Dipartimento di Progettazione dell'Architettura, Politecnico di Milano. sergio.porta@polimili.it

<sup>2</sup> Scuola superiore di Catania. pacrucitti@ssc.unict.it

<sup>3</sup> Dipartimento di fisica e astronomia, università di Catania e INFN sezione di Catania. vito.latora@ct.infn.it

de la vie. La ville moderne, que cela soit dit, est très peu vivable. Le succès social d'une création urbaine, conçue comme le résultat d'un mélange imprédictible entre sécurité, confiance, vitalité économique et diversité, émerge d'un complexe incontrôlable d'interactions d'une multitude de routes et d'expériences au sein d'un creuset favorable. Warren Weaver, cité par Jane Jacobs (Jacobs, 1961), définit la science comme plurielle (Weaver, 1948). Plurielle et évolutive. De fait, les problèmes sont analysés par des disciplines différentes selon qu'ils sont simples ou complexes, ces derniers requérant une science spécifique pour se laisser étudier. Jane Jacobs affirme que le défaut des aménageurs « orthodoxes » est qu'ils utilisent les bons outils mais pour le mauvais problème : les villes – expliqua-t-elle – sont des entités complexes et demandent pour être analysées correctement le recours à une science du complexe : « Sous le désordre apparent de la vieille ville, là où celle-ci fonctionne correctement, se cache un ordre merveilleux destiné à assurer la sécurité des rues et la liberté de la ville. C'est un ordre complexe. » (Jacobs, 1961, p. 50) : c'est seulement à l'aune de cette science de la complexité que se révèle toute l'organisation « féérique » des vieux quartiers, une organisation qui, à l'inverse de la géométrie euclidienne, n'est pas visible au premier coup d'œil, n'est pas imposée par un grand ordonnateur, mais résulte d'une accumulation de petits détails, de contributions cumulatives par une foule d'acteurs temporels, chacun suivant sa propre trajectoire. Cet ordre, conclut Jane Jacobs, est biologique ; c'est l'ordre de la vie, le seul qui puisse contribuer à rendre un quartier ou une ville vivable, donc celui qui doit nous guider vers la future ville « durable » (Newman et Kenworthy, 1999).

Tous les spécialistes de la communauté du réseau, un domaine de la recherche scientifique qui

étudie les systèmes complexes par des métaphores empruntées aux réseaux et à la théorie des graphes, qu'un grand nombre de résultats ont été établis sur la base du travail fondateur de Watts et Strogatz concernant ce qu'on appelle les « petits mondes », achevé en 1998 (Watts et Strogatz, 1998). La disponibilité de cartes détaillées d'un grand nombre de systèmes auto-organisés – depuis le naturel à l'artificiel, qu'ils soient chimiques, biologiques, neurologiques, sexuels ou linguistiques, voire encore autre – ainsi que l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs, nous ont permis de déceler des similitudes topologiques surprenantes entre tous ces réseaux (Barabasi, 2002 ; Albert et Barabasi, 2002). Entre autres, nos études sur le réseau de la voirie urbaine (Porta et al., 2004; Crucitti et al., 2005) – une espèce de réseau géographique, lequel dans la famille des systèmes complexes est caractérisé comme étant des espaces plans mesurables – ont montré que les mêmes règles s'appliquaient ici aussi. Ces résultats permettent d'entrevoir, sous le « désordre superficiel » des villes auto-organisées, les indices d'un ordre sous-jacent qui œuvre au sein des conditions climatiques, géographiques, économiques, sociales et culturelles les plus variées, un ordre partagé avec la plupart des systèmes non-géographiques naturels, biologiques ou sociaux (Portugali, 2000 ; Salingaros, 2003). Le « merveilleux ordre complexe » des vieilles villes de Jane Jacobs, la « magie » des grandes artères d'Allan Jacobs, apparaissent un peu moins abscons, dès lors que nous savons percer à jour l'œuvre universelle de la nature, de systèmes organiques complexes évoluant selon des règles d'attachement préférentiel et de topologie hiérarchique (Albert et Barabasi, 2002 ; Ravasz et Barabasi, 2003). La présence de ce type d'ordre, qui devrait désormais être envisagé comme une plus-value, un trésor, une sorte de « génie de la cité » (Whyte, 1988), adoube – Warren Weaver

le dirait – la genèse urbaine traditionnelle, auto-organisée, progressive, parmi les « problèmes d'organisation complexe » : ô combien éloignée est la structure riche, bigarrée, organique, vitale et profondément organisée des villes de ce bazar chaotique que, selon les yeux experts du Maître lui-même, seuls des ânes auraient pu concevoir !

Cela explique pourquoi la « science des réseaux » est si importante dans les sociétés urbaines actuelles : parce que la reconnaissance de cet ordre caché est un élément de dépassement de l'héritage moderniste dans la conception et le design urbain, mais aussi un nouvel ensemble de buts et d'occasions pour les urbanistes, les universitaires et les professionnels du secteur. Dans cet article, nous faisons un pas de plus en identifiant et en expérimentant un nouvel ensemble d'outils destinés à évaluer la centralité des réseaux de voirie urbaine. Dans la section 2, nous présentons un état des lieux des indices déjà proposés depuis les années 50 ; nous comparons alors les résultats de la « syntaxe spatiale », une méthode réputée pour analyser le dual des systèmes routiers, et de ses indices de centralité (ou indices centraux), ce qui nous conduit à mieux appréhender la syntaxe spatiale à la lumière d'un cadre plus général et d'en découvrir les origines. Dans la troisième section, nous présentons un bref exposé des deux approches – la directe et la duale – des graphes des réseaux routiers urbains ; nous accordons une attention toute spéciale à la distinction entre distance topologique et géométrique, ainsi qu'aux effets de l'utilisation d'un modèle de généralisation sur la proximité/intégration de la distribution de la centralité dans un réseau de voirie. Dans la section 4, nous confrontons des indices à des cas réels de deux façons : graphiquement, par la présentation de cartes thématiques, et statistiquement, en représentant leur distribution cumulative ; ces deux méthodes sont

conduites, dans chaque cas, sur les représentations directes et duales. Le principal enseignement de cet article est présenté section 5, en conclusion : aucun index ne suffit à lui seul à rendre compte de tout ; l'index central multiple (MCA, Multiple Centrality Assessment), une méthode innovante d'analyse spatiale fondée sur un ensemble d'indices différents établis sur la base d'une représentation réellement directe, métrique, des réseaux routiers urbains, nous permet de mieux cerner cette notion d'« ordre caché » qui sous-tend la structure des systèmes spatiaux réels, géographiques (non nécessairement limités aux routes et aux intersections).

## De la sociologie structurelle à la syntaxe spatiale

Parmi les « grands classiques » de la sociologie structurelle, le chef d'œuvre de Freeman (Freeman, 1977, 1979) sur la centralité organisa et synthétisa sous le même paradigme toutes les recherches effectuées depuis le début des années 50 (Bavelas, 1948, 1950 ; Leavitt, 1951 ; Shimmel, 1953 ; Shaw, 1954, 1964) et définit un premier ensemble d'indices : les centralités d'ordre  $C^D$ , de proximité  $C^C$  et d'intercalation (betweenness)  $C^B$ .

L'idée de base de la sociologie structurelle est de représenter un groupe de personnes placé dans un cadre social ou organisationnel comme un graphe dont les nœuds sont les individus et les arcs les relations entre ces individus (Wasserman et Faust, 1994). Bavelas a réalisé en premier que les individus « centraux » dans ce genre de réseaux sociaux jouent souvent un rôle prééminent dans ce groupe, autrement dit, occuper une place stratégique au sein du réseau équivaut à bénéficier d'une indépendance et d'un pouvoir d'influence sur autrui (Bavelas, 1948).

Naguère, la découverte que des réseaux complexes dans des domaines aussi variés que l'économie, la sociologie ou l'écologie partageaient des structures communes a relancé parmi les scientifiques l'utilisation des métaphores en termes de réseaux. Une première propriété commune a trait à la distance et à l'agrégation : on a en effet montré que la plupart de ces réseaux possédaient la propriété du « petit monde », ce qui signifie que la distance topologique moyenne entre deux nœuds demeure petite par rapport à la taille du réseau (elle n'augmente qu'en proportion du logarithme de cette dernière), bien que le réseau possède une agrégation locale importante, typique des maillages réguliers (Watts et Strogatz, 1998). Une seconde propriété a davantage trait à la centralité, en particulier à la distribution de l'ordre des nœuds. L'ordre d'un nœud est défini comme le nombre d'arcs non-orientés qui y aboutissent et, comme nous le verrons par la suite, n'est rien d'autre que son indice de centralité  $C^D$ . L'étude d'une multitude de réseaux, y compris purement technologiques comme la « toile » et l'Internet en général (Pastor-Satorras et Vespignani, 2004), sociaux comme les associations d'acteurs cinématographiques ou les réseaux de partenaires sexuels (Liljeros et al., 2001), ainsi que beaucoup d'organisations biologiques (Albert et Barabasi, 2002), a montré que dans la plupart des cas, la distribution de l'ordre, pourvu qu'il soit suffisamment élevé, suit une loi exponentielle inverse du type :

$$P(k) \sim N(k) \sim k^{-\gamma}$$

où l'exposant varie entre 2 et 3. Dans cette formule,  $N(k)$  représente le nombre de nœuds d'ordre  $k$ , et  $P(k)$  représente  $N(k)$  divisé par le nombre total de nœuds du réseau. Les réseaux dont l'ordre suit cette loi de distribution ont été dénommés « sans échelle » (scale free) (Albert et Barabasi, 2002). Les résultats obtenus sont très intéressants, surtout quand on les compare à ceux des maillages

aléatoires (Erdős et Rényi, 1959). À vrai dire, un graphe aléatoire de  $N$  nœuds et  $K$  arcs (et une moyenne de  $k$  par nœud), c'est-à-dire un graphe obtenu en sélectionnant au hasard l'origine et l'extrémité des arcs, produit une distribution poissonnienne centrée en  $k$ , avec une loi exponentielle et non inversement exponentielle pour de grandes valeurs de  $K$ .

Formellement, un réseau peut être représenté par un graphe  $G = (N, K)$ , une entité mathématique définie comme un couple de deux ensemble,  $N$  et  $K$ . Le premier ensemble contient un ensemble de  $n$  éléments appelés points ou nœuds, et  $K$  est un ensemble contenant  $k$  paires [ici] non-ordonnées d'éléments de  $N$  [ $K$  est formellement un sous-ensemble (ici réflexif) de  $N^2$ ] appelés liens ou arcs. Dans la suite, nous désignerons un nœud par son indice  $i$  dans l'ensemble  $N$  ( $0 < i \leq n$ ) ; s'il existe un arc entre deux nœuds  $i$  et  $j$ , celui-ci est noté  $(i, j) = (j, i)$  et les deux nœuds sont dits adjacents ou connexes. Parfois, il est nécessaire de considérer un graphe valué, ou pondéré,  $G = (N, K, \Omega)$  défini par un triplet d'ensembles  $N$ ,  $K$  et  $\Omega$ . L'ensemble  $\Omega$  contient  $k$  coefficients réels, lesquels sont attachés aux arcs et en définissent la « force ». Un graphe simple  $G=(N, K)$  peut être décrit par une matrice carrée d'ordre  $n$ , dite d'adjacence,  $A=\{a_{ij}\}$  où  $a_{ij}$  vaut 1 si  $(i, j)$  existe, et zéro sinon. Un graphe pondéré est lui décrit par sa matrice d'adjacence et une matrice de pondération  $W$  contenant les poids de chaque arc. Dans notre cas précis, nous préférons utiliser la matrice métrique  $L=\{l_{ij}\}$ , une matrice carrée d'ordre  $n$  dont l'élément  $l_{ij}$  représente la longueur de la rue reliant  $i$  à  $j$ , c'est-à-dire une quantité inversement proportionnelle au poids de l'arc  $(i, j)$ . Dans un graphe valué, la distance du trajet le plus court  $d_{ij}$  entre  $i$  et  $j$  est défini comme le parcours qui minimise la somme du poids des arcs qui le composent, là où, pour un graphe simple, il s'agit du nombre minimal d'étapes entre  $i$  et  $j$ .

On définit la longueur caractéristique de chemin  $L$  (Watts et Strogatz, 1998) comme la moyenne des longueurs de tous les chemins les plus courts :

$$L = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in N} d_{ij}$$

$L$  est un bon indicateur des propriétés connectives du réseau. Cependant, cet index ne peut être calculé pour des graphes non complets (c'est-à-dire où il existe au moins deux points qui ne sont pas reliés l'un à l'autre), sinon en faisant l'hypothèse artificielle d'une valeur quelconque pour  $d_{ij}$  même en l'absence d'arc  $(i, j)$ . Pour pallier cette difficulté, un nouvel index de performance a été inventé : l'efficacité globale  $E_{\text{glob}}$  (Latora et Marchiori, 2001). Semblablement à la longueur caractéristique de chemin,  $E_{\text{glob}}$  mesure le taux de communication internodale du réseau et se fonde sur l'efficacité de la communication entre deux nœuds. Celle-ci est tout simplement envisagée comme la réciproque de la longueur du chemin le plus court :  $e_{ij} = 1/d_{ij}$ . Dans le cas où un arc  $(i, j)$  n'existe pas, la distance entre les deux points est réputée infinie ( $d_{ij} = \infty$ ) et, en conséquence,  $e_{ij} = 0$ . L'efficacité globale d'un graphe  $G$  résulte du moyennage de  $e_{ij}$  sur tous les couples de nœuds du graphe.

$$E_{\text{glob}}(G) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in N} e_{ij} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in N} \frac{1}{d_{ij}}$$

L'efficacité globale est inversement proportionnelle à  $L$ , puisque une distance caractéristique élevée correspond à une efficacité faible. Par définition, dans le cas topologique (non valué),  $E_{\text{glob}}$  prend ses valeurs dans l'intervalle  $[0, 1]$  et vaut 1 dans le cas d'un graphe complet, c'est-à-dire où chaque nœud est relié à tous les autres, soit  $n(n-1)/2$  arcs. Dans un espace métrique (un graphe pondéré), toutefois, il est possible d'adopter une normalisation (Latora et Marchiori, 2001) différente, en divisant  $E_{\text{glob}}$  par  $E_{\text{glob}}(G^{\text{ideal}})$ ,  $G^{\text{ideal}}$  étant le graphe  $G$  complété, chaque arc

manquant  $(i, j)$  étant affecté du poids correspondant à la distance euclidienne entre  $i$  et  $j$  :

$$E_{\text{glob}}(G^{\text{ideal}}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j \in N} \frac{1}{d_{ij}^{\text{Eucl}}}$$

où  $d_{ij}^{\text{Eucl}}$  représente la distance euclidienne du segment  $[i, j]$ , c'est-à-dire la longueur d'une connexion virtuelle directe.

Une autre normalisation a été proposée par (Vragovic et al., 2004) :

$$E_{\text{glob},2}(G) = \frac{\sum_{i \neq j \in N} \frac{d_{ij}^{\text{Eucl}}}{d_{ij}}}{n(n-1)}$$

Les trois indices de centralité proposés par (Freeman 1977, 1979) peuvent être grossièrement divisés en deux familles séparées (Latora et Marchiori, 2004).  $C^D$  mesure la centralité comme « avoir beaucoup de personnes dans un voisinage immédiat », alors que  $C^C$  signifie être central comme « être le moins éloigné des autres » ; ainsi donc, ces deux indices peuvent être perçus comme tentant de définir la centralité comme la proximité d'autrui (Shimbel, 1953 ; Sabidussi, 1966 ; Nieminen, 1974 ; Freeman 1977, 1979 ; Scott, 2003). À l'inverse,  $C^B$  définit la centralité comme « être au milieu des autres », c'est-à-dire être un intermédiaire dans les liens qui unissent les personnes de la communauté (Anthonisse, 1971 ; Freeman 1977, 1979 ; Freeman et al. 1991 ; Newman et Girvan, 2003). Après un nombre d'amendements et d'utilisations sur quatre décennies environ (Bonacich, 1972, 1987, 1991 ; Stephenson et Zelen, 1989 ; Altman, 1993), ces indices ont été modifiés et étendus pour différents scénarii, mais les familles n'ont guère changé. Dans le domaine des transports, par exemple, l'accessibilité d'une place demeure définie par sa « capacité » à être atteinte rapidement de n'importe quel endroit, ce qui, fondamentalement – si l'on accepte que la distance soit ici remplacée par une fonction de coût bien plus complexe – représente une forme de  $C^C$ .

Vu l'intérêt grandissant pour l'analyse réticulaire de systèmes complexes, un intérêt qui n'a pas échappé aux mathématiciens et aux physiciens, d'autres indices n'ont pas tardé à être proposés. Dans cet article, nous n'en envisageons que trois, à savoir la centralité d'efficacité, de rectitude et d'information, toutes fondées sur la mesure déjà évoquée de l'efficacité globale (Latora et Marchiori, 2001) ; elles nous semblent les plus pertinentes. La centralité d'efficacité,  $C^E$ , qui est essentiellement une proximité, une fois appliquée à des graphes purement géographiques et normée par la comparaison de la longueur du plus court chemin avec la distance euclidienne (Vragovic et al., 2004) révèle un concept nouveau, intrinsèquement géographique, de centralité, que nous pouvons dénommer centralité de rectitude, notée  $C^S$  : être central comme atteignable plus directement par tous les membres du réseau. L'autre index, la centralité d'information,  $C^I$  (Latora et Marchiori, 2004), par un calcul en deux temps, combine  $C^C$  et  $C^B$  dans une même quantité, amenant par la même la définition d'être central comme indispensable pour tous les autres. Dans la suite, nous abordons la définition mathématique formelle et une discussion plus détaillée des familles de centralité sus-citées.

#### Être à côté des autres : Centralité d'ordre et de proximité

La centralité d'ordre exploite l'idée que les nœuds importants possèdent le plus grand nombre de connexions. L'ordre d'un nœud est, comme nous l'avons vu, le nombre d'arcs aboutissant ou commençant au nœud, c'est-à-dire le nombre de voisins immédiats du nœud. L'ordre  $k_i$  du nœud  $i$  se définit au moyen de la matrice d'adjacence par  $k_i = \sum_{j \in N} a_{ij}$ , pour tous les  $j \in N$ . La centralité d'ordre ( $C^D$ ) de  $i$  vaut (Nieminen, 1974 ; Freeman, 1979) :

$$C_i^D = \frac{k_i}{n-1} = \frac{\sum_{j \in N} a_{ij}}{n-1}$$

La normalisation utilisée amène  $C^D$  à varier entre 0 et 1, cette dernière valeur étant atteinte lorsqu'un nœud est relié à tous ses pairs. Cette notion de la centralité n'est pas très pertinente dans le cadre d'un réseau direct de rues où le degré d'un nœud (le nombre de rues qui y aboutissent) est limité par des contraintes géographiques.

Le plus simple concept de proximité dérive de celui de distance minimale ou géodésique  $d_{ij}$ , c'est-à-dire, comme déjà expliqué, la plus petite somme des poids des arcs le long de tous les trajets possibles entre  $i$  et  $j$  dans un graphe pondéré, ce qui se simplifie en nombre minimal d'arcs traversés dans le cas d'un graphe topologique non valué. La centralité de proximité du point  $i$  (Sabidussi, 1966 ; Freeman, 1979 ; Wasserman et Faust, 1994) vaut :

$$C_i^C = L_i^{-1} = \frac{n-1}{\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} d_{ij}}$$

où  $L_i$  représente la distance moyenne de l'acteur  $i$  à tous ses pairs.  $C^C$  doit être utilisé lorsque l'on désire des mesures ayant pour base l'indépendance (Freeman, 1979). Cet index n'a de sens que dans un graphe complet, à moins que l'on définisse une distance conventionnelle pour les arcs manquants ; il prend des valeurs entre 0 et 1 dans un graphe topologique.

### Être au milieu des autres : Centralité intercalaire

L'interaction entre deux nœuds non mitoyens peut dépendre d'intermédiaires, particulièrement ceux situés sur les chemins de connexion ; des points médians peuvent donc exercer un contrôle stratégique et influencer les autres. L'idée derrière la centralité d'intercalation (ou intercalaire) est qu'un acteur est central s'il se trouve entre (à la croisée de) beaucoup d'autres acteurs. Ce concept peut être quantifié facilement si l'on

suppose que la communication s'effectue le long de géodésiques. Plus précisément, si  $n_{jk}$  est le nombre de géodésiques reliant  $j$  à  $k$  [non nécessairement égal à 1, car un graphe est un espace discret non euclidien] et  $n_{jk}(i)$  le nombre de géodésiques reliant  $j$  à  $k$  en passant par  $i$ , la centralité intercalaire de l'acteur  $i$  se calcule comme (Freeman, 1979) :

$$C_i^B = \frac{1}{(n-1)(n-2)} \sum_{\substack{j, k \in N \\ j \neq k; j, k \neq i}} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}}$$

$C^B$  varie entre 0 et 1, et atteint son maximum lorsqu'un acteur se trouve au concours de toutes les géodésiques. Freeman a proposé quelques extensions de cette définition. En particulier, dans le cas où la communication ne s'effectue pas seulement le long des géodésiques, un index plus réaliste doit aussi tenir compte des chemins plus longs. Ici, nous nous contentons de mentionner l'existence de deux indices de ce type : l'intercalation de flux et l'intercalation aléatoire ; nous nous contenterons du cas le plus simple, à savoir celui défini dans la formule ci-dessus.

### Être directement chez les autres : Centralité d'efficacité et de rectitude

Les centralités d'efficacité et de rectitude puisent leur source dans l'idée que l'efficacité de la communication entre deux nœuds  $i$  et  $j$  équivaut à l'inverse de la longueur du chemin le plus court,  $d_{ij}$  (Latora et Marchiori, 2001). En particulier, la centralité d'efficacité du nœud  $i$  se calcule par :

$$C_i^E = \frac{\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \frac{1}{d_{ij}}}{\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \frac{1}{d_{ij}^{Eucl}}}$$

où  $d_{ij}^{Eucl}$  représente la distance euclidienne entre  $i$  et  $j$ ,  $\|(i, j)\|$ . La centralité de rectitude est une variante de la précédente, à laquelle on applique une norma-

lisation différente (Vragovic et al., 2004) ; on la calcule comme :

$$C_i^S = \frac{\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} \frac{d_{ij}^{Eucl}}{d_{ij}}}{n-1}$$

Cet index décrit dans quel mesure le chemin entre les nœuds  $i$  et  $j$  allonge le « vol d'oiseau » virtuel.

### Être indispensable pour tous les autres : Centralité d'information

La centralité d'information se fonde sur l'idée que l'importance d'un nœud est reliée à la faculté qu'a le réseau de pouvoir continuer à fonctionner sans lui. En particulier, sur l'évaluation de la facilité de propagation de l'information avec ou sans ce nœud. La centralité d'information d'un nœud  $i$  est définie par la perte relative d'efficacité du réseau due au retrait de tous les arcs incidents en  $i$  :

$$C_i^I = \frac{\Delta E_{glob,2}}{E_{glob,2}} = \frac{E_{glob,2}(G) - E_{glob,2}(G')}{E_{glob,2}(G)}$$

où  $G'$  représente un nouveau réseau de  $n$  points, mais de seulement  $k-k_i$  arcs, obtenu en retirant tous les arcs aboutissants à  $i$ . Ici, nous utilisons l'efficacité  $E_{glob}$ , mais n'importe quel indicateur de performance peut s'y substituer. Le retrait de certains arcs a pour conséquence d'augmenter la longueur minimale des chemins qui l'empruntent ; en conséquence, l'efficacité du nouveau graphe est inférieur à celle de l'ancien et l'index  $C_i^I$  prend encore une fois des valeurs entre 0 et 1, par définition. Il appert que  $C_i^I$  est, d'une manière ou d'une autre, corrélé à tous les autres index de centralité standards  $C_i^D$ ,  $C_i^C$ ,  $C_i^B$ . Plus particulièrement, la centralité d'information du point  $i$  dépend de son ordre, puisque plus celui-ci est grand, plus grand est le nombre d'arcs retirés. La corrélation avec  $C_i^C$  s'explique par la dépendance de ce dernier avec  $L_i^{-1}$ . Enfin,  $C_i^I$ , de même que  $C_i^B$ , dépend du nombre de géodésiques passant par  $i$ , mais

aussi de la longueur des nouvelles géodésiques qui deviennent des chemins d'échanges une fois que le nœud  $i$  a été désactivé. Aucune information concernant ces nouveaux chemins les plus courts n'est contenu dans chacun des trois indices.

### Syntaxe spatiale dans le domaine de la centralité : Intégration et $C^C$

L'approche réticulaire a été largement employée dans les études d'urbanisme. Depuis le début des années 60, beaucoup de recherches ont porté sur l'allotissement de terrains pour faire face à l'expansion urbaine le long des voies de communication (Wilson, 2000), sur la prédiction des flux de déplacements à partir de données topologiques ou géométriques sur les voies de communication (Larson, 1981), ou bien sur l'étude d'échanges de biens de consommation ou culturels entre villages, même aux époques reculées (Pitts 1965, 1979 ; Peregrine, 1991 ; Byrd, 1994). L'urbanisme comme discipline, à part au travers de quelques recherches théoriques (Batty et Longley, 1994 ; Alexander, 1998 ; Salinger, 1998), n'a jamais contribué de manière significative et opérationnelle à ces recherches, à une exception importante près : après le travail pionnier de Hillier et Hanson (Hillier et Hanson, 1984), un recours constant à l'approche réseau à l'échelle des villes, des quartiers, des rues voire des simples bâtiments, qui s'est généralisé sous l'étiquette « syntaxe spatiale », établissant une corrélation significative entre l'accessibilité topologique des voies et des phénomènes aussi variés que leur fréquentation (flots pédestres et véhiculaires), l'orientation, la sécurisation contre la petite délinquance, la vitalité du commerce, la spécialisation des activités et la pollution (Penn et Turner, 2003). Bien qu'elle ne soit pas limitée à un seul indice, le cœur de la méthodologie syntaxe spatiale, appliquée aux réseaux de voirie urbaine, est l'indice d'inté-

gration, jugé être « si fondamental qu'il est probablement lui-même la clef de la plupart des aspects de l'organisation spatiale humaine » (Hillier, 1996, p. 33). L'intégration d'une rue a été définie comme les « plus petits chemins de voyage entre chaque nœud (ou espace) et tous les autres du réseau (en définissant « plus petit » comme nécessitant le moins de changement de direction, le plus direct) » (Hillier, 1998, p. 36). En tant que tel, cette intégration se résume à un index  $C^C$  normalisé (Jiang et Claramunt, 2004b), le célèbre indice de proximité défini depuis le début des années 50 par les sociologues structuralistes – qui avaient eux aussi affaire aux réseaux topologiques – revu à la fin des années 70 par Freeman. Une comparaison succincte entre les définitions formelles de l'intégration – Hillier et Hanson, 1984, ch.3, p. 108 ; Teklenburg et al. 1993, p. 350 ; Hillier 1996, p. 36 note 16 ; Jiang et Claramunt, 2002, p. 298-299, et beaucoup d'autres – et celle de l'indice  $C^C$  présenté ci-dessus confirme complètement cette supposition.

## Approche directe et duale

L'analyse réticulaire, appliquée à des territoires, a principalement suivi une approche directe qui modélise les intersections par des nœuds et les rues (ou relations) par des arcs. Cette représentation paraît la plus naturelle dans le cadre de réseaux à fortes composantes géographiques, ce qui signifie que la distance n'est pas mesurée simplement par des critères topologiques (sauts) – comme, par exemple, les réseaux sociaux – mais plutôt en termes spatiaux (mètres), comme les systèmes de voirie urbaine. Les ingénieurs civils, les géoéconomistes ou géoarchéologues ont principalement, si ce n'est uniquement, suivi l'approche directe. C'est aussi le standard mondial en terme de construction et de diffusion de bases de

données géographiques, au point qu'actuellement une immense quantité d'information a déjà été structurée selon le paradigme « route = axe de la voie entre deux nœuds », le cas, par exemple, du gigantesque *Tiger* (Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing), une base de données développée au bureau du recensement américain ; ce paradigme ouvre la possibilité de pondérer les arcs par différents critères, comme le trafic, le coût des transports, la distance, etc.

Il peut sembler paradoxal que la syntaxe spatiale, porte-drapeau de l'urbanisme appuyé sur l'analyse réticulaire des espaces urbains, a décidé de suivre un chemin radicalement opposé, à savoir celui de la représentation duale des maillages routiers urbains. Dans cette représentation, les lignes droites qui représentent une extension des rues (plus précisément : « perspectives », « axes de déplacement aisé » le long des rues) deviennent des nœuds, et les intersections des arcs. Les avantages et les inconvénients de cette représentation ont été déjà passés en revue (Desyllas et Duxbury, 2001 ; Jiang et Claramunt, 2002 ; Batty, 2004a et b ; Ratti, 2004 ; Hillier et Penn, 2004 ; Porta et al., 2004). Dans le cadre de cet article, nous nous focalisons sur les questions de distance et sur l'impact des deux approches quant à l'index de distribution spatiale  $C^C$ .

Dans la construction d'un graphe dual, qui signifie la réduction de rues en nœuds, quelque chose de crucial se perd – quoique son importance pour l'expérience cognitive des espaces soit discutable (Penn, 2003) – qui rend compte de la perception sensorielle de l'espace : la distance. Quelle que soit sa longueur, une rue sera rendue par un simple point. En outre, aussi longtemps que le processus de généralisation étend le concept de « rue » à un axe coupé par une infinité d'intersections, il est possible de trouver dans le graphe dual un nombre

illimité d'arc incidents, alors que ce nombre dépend fortement de la longueur de la rue elle-même. Ainsi, plus l'axe (ou la rue) est long, plus il a de chances d'occuper une place centrale (en ordre), ce qui va à l'encontre du concept expérimental d'accessibilité, lequel est relié à la proximité (en distance réelle) de la destination de toutes les origines, comme dans les modélisations de transports. Une autre conséquence de la « concentration » des rues en des points est l'impossibilité de représenter les variations qui caractérisent si souvent les artères, variations de plus en plus marquées au fur et à mesure qu'elles s'allongent et qu'elles parcourent des quartiers différents – c'est le cas par exemple de la via Etna à Catane en Sicile, une rue du XVII<sup>e</sup> siècle, parfaitement droite, qui part du centre baroque pour finir dans la campagne au pied de l'Etna, un axe qui parcourt des zones aux profils sociaux, économiques, démographiques et environnementaux totalement différents, tout en croisant à peu près tous les paysages urbains répertoriés sur Terre !

Enfin, en termes plus structurels, la distance métrique a été reconnue comme le paramètre clef des réseaux de voirie, qui, précisément pour cette raison, doivent être traités comme une entité réticulaire totalement indépendante (Gastner et Newman, 2004) ; la nature essentielle de la distance euclidienne au cœur de tels systèmes conduit à d'autres phénomènes, par exemple la planéité, mais aussi la variance extrêmement réduite de l'ordre des nœuds, dont la distribution ne pourrait jamais rappeler, et ne rappelle pas, un comportement d'« sans échelle ». Cependant, une fois transformé en son dual, le même réseau routier s'affranchit de ces limitations : l'absence de bornes quant à l'ordre maximal d'un nœud, dû au fait qu'un nœud représente une route généralisée et qu'une route généralisée peut, du moins conceptuellement, croiser un nombre quelconque d'autres

voies, rend le graphe dual structurellement analogue aux autres systèmes topologiques récemment étudiés dans d'autres domaines, qui ne présentent aucune contrainte géographique ; cela conduit, par exemple, à l'apparition de grands facteurs d'échelle dans la distribution des ordres (Jiang et Claramunt, 2004a ; Rosvall et al., 2004). Les mêmes facteurs d'échelle se font jour dans les distributions des ordres et du coefficient d'agrégation  $C(k)$  lorsque l'on considère des réseaux routiers duaux de taille significative (Porta et al., 2004), le signe d'une structure pyramidale qui a été pourtant reconnue comme étrangère aux systèmes géographiques, c'est-à-dire des réseaux où la longueur des arcs ne joue absolument aucun rôle (Ravasz et Barabasi, 2003).

Ainsi donc, la représentation duale associée avec le modèle de géné-

ralisation – les deux fondations de la syntaxe spatiale – propulsent en réalité les systèmes routiers urbains, en stricts termes structurels, hors du champ de la géographie. Quoique des substituts de distance soient envisageables pour corriger cet effet des graphes duaux (Salheen et Forsyth, 2001 ; Salheen, 2003 ; Batty, 2004b), si l'on doit accorder un rôle fondamental à la distance géographique, l'approche directe route-axe-entre-deux-nœuds, où les intersections sont matérialisées par des nœuds et les rues par des arcs pondérés, s'impose évidemment comme la plus appropriée.

Le « problème métrique » qui différencie si profondément les approches directes et duales des réseaux routiers a également des conséquences importantes sur la façon d'appréhender la mesure de la centralité et la façon dont ces réseaux eux-mêmes sont modélisés sous forme de graphes. Récemment, nous avons inauguré une évaluation systématique des distributions de différents index de centralité calculés sur dix-huit échantillons de zones urbaines d'un mile carré extraites d'un travail antérieur d'Allan Jacobs (Jacobs, 1993), dans un cadre purement géographique (Crucitti et al., 2005). Quatre de ces échantillons (fig. 1), à savoir Ahmedabad en



Quatre échantillons de motifs urbains d'un mile carré tels qu'ils apparaissent dans les cartes originales (a-d, en haut), réduits à une schématisation sous forme de graphe route-axe-entre-deux-nœuds (a-d, en bas). Deux d'entre eux (a. Ahmedabad, b. Venise) sont essentiellement des motifs auto-organisationnels, alors que les deux autres (c. Richmond, d. Walnut Creek) sont essentiellement des motifs planifiés. Cependant, les quatre cas diffèrent radicalement quand on les considère sous un angle économique, historique, culturel, fonctionnel ou climatique. En particulier, Ahmedabad se compose d'un tissu urbain dense ininterrompu, alors que Venise est dominée par la coupure du Grand canal qui n'est franchissable qu'en deux points, les ponts de l'Académie et du Rialto. Si Richmond affiche une structure traditionnelle en gril, Walnut Creek arbore des entrelacs spiralés typique des banlieues de l'après guerre. Ces caractéristiques, si bien visibles dans les graphes directs, se perdent dans les graphes duaux où seules les propriétés topologiques sont préservées.

Inde, Venise, Richmond et Walnut Creek au Canada, sont ici étudiés d'une manière plus approfondie pour illustrer l'opposition entre les approches directes et duales.

De plus, si Ahmedabad et Venise sont des exemples typiques de motifs auto-organisés, en ce qu'ils sont majoritairement le résultat d'un développement graduel et imperceptible tout au long de l'histoire, sans aucun contrôle central, Richmond et Walnut Creek sont des exemples d'urbanisme planifié, créé suivant les instructions d'un pouvoir central en très peu de temps.

Dans ce travail sur les réseaux routiers d'un mile carré (fig. 1 a-d, haut), nous avons effectué les approches directes et duales et nous les avons comparées. Dans l'approche directe, les indices de centralité sont calculés sur les nœuds des graphes directs. Ceux-ci (fig. 1 a-d, milieu) sont construits selon l'approche route-axe-entre-deux-nœuds : les intersections se transforment en points et les routes en arcs ; les arcs sont définis par deux nœuds (leurs extrémités) et, si possible, par plusieurs sommets (points intermédiaires de fracture) ; les intersections entr'arcs sont toujours modélisées par des nœuds ; les arcs suivent la représentation cartographique de la route qu'ils représentent. Toutes les distances ont été mesurées dans l'espace géographique : ainsi, la distance entre deux nœuds n'est pas, mettons, trois sauts (c.à.d : 3 nœuds intermédiaires), mais plutôt, disons, 452,38 mètres. Après que le calcul de centralité a été effectué sur chaque nœud, on colorie le graphe (en rouge ou bleu) selon les scores obtenus. Dans le cas des arcs, vu que, dans le graphe direct, ceux-ci ne sont définis que par leur origine et leur extrémité, la centralité est simplement définie comme la moyenne de la centralité de ses deux nœuds extrêmes. Un exemple de représentation mettant en valeur les nœuds est présentée figure 2, alors qu'en figure 3a on insiste sur les arcs :

ces deux représentations résultent de la même approche directe.

Dans l'approche duale, les indices de centralité sont calculés sur les nœuds du graphe dual (fig. 1 a-d, bas) après le passage d'un algorithme de généralisation, ici le modèle de continuité intersecante (Intersection Continuity Negotiation, ICN) (Porta et al. 2004) qui accentue un biais de rectitude dans la recherche de routes aux intersections (Conroy Dalton, 2003 ; Thomson, 2004). Ici donc, les routes généralisées sont représentées par des points, et les intersections par des arcs ; la distance entre deux rues (nœuds) est égal au nombre d'intersections intermédiaires le long du chemin le plus court ; il s'agit donc d'une distance topographique non-métrique, qui rend compte du nombre de « pas » qu'il convient de faire pour aller d'un nœud à l'autre, quelle que soit la longueur de ces « pas ». Pour afficher le résultat, on revient à une représentation primaire où, en raison de cette transformation rue/nœud, les scores de centralité des nœuds duaux sont affectés aux tronçons de routes généralisées qu'ils représentent. Mis à part certaines différences, par exemple une méthode de généralisation différente (ICN au lieu de l'extension axiale), ceci respecte les principes de la syntaxe spatiale.

Avant de passer à l'analyse des différents indices de centralité, ce qui est l'objet de la section suivante, il est intéressant de se pencher sur le seul indice de proximité  $C^C$ , l'index d'intégration normalisé qui constitue le cœur même de la syntaxe spatiale. Sur les graphes directs (fig. 3a), la distribution spatiale de  $C^C$  est dominée par ce que l'on appelle l'effet de bord, c'est-à-dire que les scores élevés se regroupent au centre géométrique de l'image. Cet effet est dans une certaine mesure moins évident dans des zones assez lâches comme Walnut Creek, mais il devient plus que prépondérant dans le cas de zones très agglomérées

comme Ahmedabad ou Venise. Cependant, l'effet de bord affecte n'importe quel tissu urbain suffisamment pour empêcher l'émergence de motifs comme des artères centrales ou des points focaux – deux critères essentiels de l'urbanisme – ce qui rend son utilisation vaine.

Si l'effet de bord contamine l'approche primaire, son impact est moins important dans l'analyse duale (fig. 3b), en raison d'une part, de la perte de la métrique, et, d'autre part, de la généralisation qui regroupe des tronçons de voie morcelés. Ici, nous nous rendons compte que la généralisation joue un rôle vital en ce qu'il limite, dans une certaine mesure, l'effet de bord. Comment ? Parce que l'identification des grands axes via la généralisation se fait avant le calcul de l'index, à l'inverse de l'approche directe, où la première doit se déduire du second. Pour cette raison, le calcul de la centralité est directement influencé par des caractéristiques qui n'appartiennent pas à ce concept, mais plutôt à l'algorithme sous-jacent à la généralisation (ici ICN, linéarité ininterrompue – ou visibilité – dans le cas de l'extension axiale). Ainsi donc, notre analyse duale doit être interprétée comme résultant de l'action conjuguée de deux facteurs, le premier qui règle la généralisation, le second le calcul de la distribution spatiale de la centralité. Cette constatation confirme un travail antérieur où une analyse dual conventionnelle de syntaxe spatiale, appliquée sans généralisation à un modèle routier segmenté, a été polluée par un niveau énorme d'effet de bord (Dalton et al., 2003). Derechef, ceci n'est pas dû à une structure cachée du tissu urbain mais est causé par le caractère même de l'index choisi ; l'intégration, ou  $C^C$ , est fortement affecté par l'effet de bord en raison de sa nature, et ne conduit à aucune lecture aisée des axes urbains ou des points focaux.

Devant cette évidence, on a deux options. La première est



de persister dans l'approche duale, et de demander le plus de choses possibles à l'algorithme de généralisation, par exemple en l'automatisant davantage (Batty et Rana, 2002 ; Dalton et al., 2003), ou en caractérisant différemment l'identité viaire (Penn et al., 1997 ; Jiang et Claramunt, 2000, 2004b) ; Batty et Rana (2002) ont trouvé neuf méthodes différentes pour réaliser l'extension axiale, chacune produisant un résultat différent des autres, chacune exhibant une évidente distribution à échelle unique. L'effet de bord peut aussi être réduit dans un graphe dual en élargissant artificiellement l'espace étudié, de sorte à rejeter les zones affectées en-dehors des figures, un subterfuge efficace – mais peu performant. Autre solution : revenir à l'approche directe, en évaluant tout selon la distance géographique pondérant le modèle de la route-axe-entre-deux-nœuds ; cette approche permet une caractérisation beaucoup plus fine des (même très) longues rues ; plus besoin d'algorithme de généralisation, donc une meilleure efficacité, objectivité et lisibilité du calcul ; elle permet aussi l'usage de bases pléthoriques, mises à jour et disponibles ; enfin, elle améliore grandement le réalisme des simulations et des représentations, car elle associe la topologie

du système avec sa métrique, englobant donc simultanément les aspects cognitifs et proxémiques des comportements spatiaux. Beaucoup d'avantages donc, mais il demeure quand même un problème et une question.

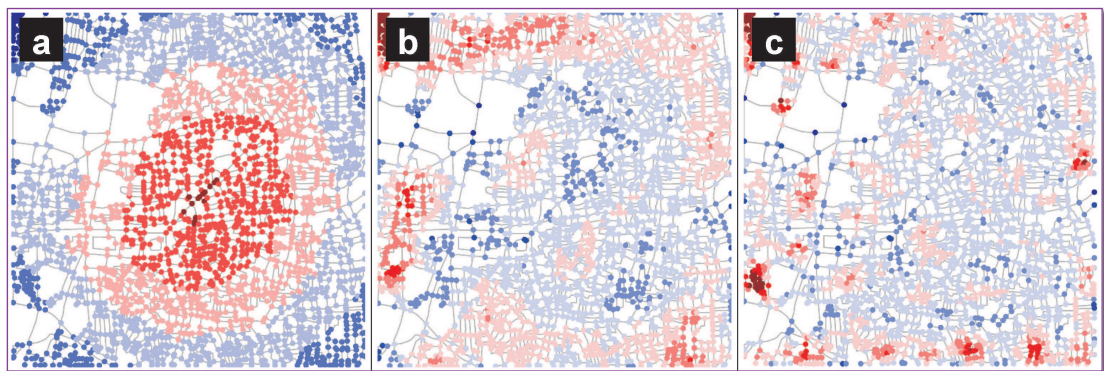
Le problème : comme nous l'avons vu, l'index d'intégration ne fonctionne tout bonnement pas sur de tels graphes directs. Il ne révèle rien, si ce n'est le centre de l'image. Heureusement,  $C^c$  n'est pas le seul indice dont nous disposons, la centralité est un concept polysémique. Ainsi, nous pouvons limiter notre calcul de  $C^c$  à une emprise locale, là où il garde un sens certain (fig. 2) et puiser dans d'autres définitions – par exemple au travers de  $C^b$ ,  $C^s$ ,  $C^l$  – de la centralité. C'est précisément ce que nous avons fait ; un exposé de nos résultats et une comparaison avec les analyses duales fait l'objet de la prochaine section.

La question : l'approche directe des réseaux routiers, en raison de la limitation inhérente de la valeur maximale de  $C^D$  à environ 3 à 6 (plus ou moins le nombre de rues par intersection dans des villes réelles), est-elle finalement inabordable dans le cadre plus général de l'analyse réticulaire des systèmes complexes empiri-

ques ? De nouveau,  $C^D$  n'est pas notre unique ressource ; nous montrerons qu'une fois que l'analyse de la distribution statistique de la centralité est étendue du seul  $C^D$  aux autres indices, des phénomènes cohérents d'échelle apparaissent, qui nous procurent une compréhension profonde de la nature complexe des réseaux routiers (et, plus globalement, des systèmes géographiques). Ainsi qu'il ressort de ceci, l'évaluation du maximum de concepts et d'index de centralité est un facteur clef pour pouvoir conduire une analyse directe significative, et replacer l'analyse réticulaire des systèmes géographiques dans la grande famille des « nouvelles sciences des réseaux ».

## La distribution spatiale et statistique

Les différences et les corrélations entre les différents index de centralité dans les réseaux sociaux ont été étudiés sous toutes les coutures par une littérature surabondante (Cook et al., 1983 ; Donninger, 1986 ; Bolland, 1988 ; Markovsky et al., 1988, Nakao, 1990 ; Mullen et al., 1991 ;



L'approche directe. La distribution spatiale de  $C^c$  d'Ahmedabad : les scores de centralité sont calculés sur les nœuds du graphe pondéré direct (fig. 1a, milieu), où les poids correspondent aux distances métriques. Dans cette figure, le coloriage rouge/bleu a été effectué sur les nœuds, alors que, dans la suite (figure 3a), on a colorié les arcs, dont la centralité est la moyenne de celle des deux nœuds extrêmes. (a) Proximité globale :  $C^c$  est calculé sur l'ensemble du réseau ; (b) Proximité locale :  $C^c$  est calculé sur un sous-graphe dont les nœuds sont à moins de 400 mètres du nœud étudié ; (c) Proximité locale : idem (b), mais avec une distance maximale de 200 mètres seulement. L'index  $C^c$ , lorsqu'on l'applique à l'ensemble du réseau, est sujet à un tel effet de bord que le résultat est inutilisable dans une étude d'urbanisme. Cependant, lorsqu'on effectue une analyse locale, comme dans (b) et (c),  $C^c$  reste un indicateur intéressant, mais son sens ne dépasse plus la proximité immédiate. Le problème de l'effet de bord est partiellement corrigé dans l'analyse duale (fig. 3b, cas n°1) en raison de sa nature topologique et de l'utilisation d'un modèle de généralisation. Cependant, outre qu'elle ne règle que partiellement le problème, cette correction paraît artificielle en ce sens qu'elle ne peut rendre compte des variations de centralité le long d'artères étendues. De plus, elle dépend significativement du processus de généralisation lui-même, qui n'a rien à voir avec la notion de centralité.

Rothenberg et al., 1995 ; Bell et al., 1999 ; Poulin et al., 2000 ; pour un résumé : Wasserman et Faust, 1994) dans le but de comprendre la signification réelle de ces indices appliqués à des groupes ou des organisations humaines. L'application des indices de centralité à des territoires – pas tous géographiques – n'a pas été aussi pléthorique, avec toutefois des exceptions dans des domaines variés et parfois inattendus (Pitts, 1965, 1979 ; Irwin-Williams, 1977 ; Irwin, 1978 ; Rothman, 1987 ; Peregrine, 1991 ; Byrd, 1994 ; Smith et Timberlake, 1995 ; Faust et al., 1999). En syntaxe spatiale, par exemple, le lien entre l'index  $C^C$ /intégration (ainsi que son indicateur associé  $C^D$ /connectivité) et la centralité dans les réseaux sociaux n'a été admise que très récemment (Jiang et Claramunt, 2004), et jamais véritablement creusée, si bien qu'il n'y a pas de comparaison pertinente concernant les autres index. Nos recherches sur les échantillons de réseau viaire d'un mile carré, analysés dans une démarche purement directe et géographique (Crucitti et al., 2005), révèlent que les quatre familles de centralité : « être proche »  $C^C$ , « être entre »  $C^B$ , « être droit »  $C^S$  et « être critique »  $C^I$  obéissent à des distributions spatiales très hétérogènes (fig. 3a). De ce point de vue, on peut tirer deux conclusions : d'un côté, aucun index ne rend compte de l'intégralité de l'organisation, puisqu'ils traduisent des réalités étonnamment diverses : ils matérialisent l'idée d'« être central » dans l'espace géographique selon des critères différents ; de l'autre côté,  $C^I$  apparaît comme l'index le plus synthétique du lot, résumant en un seul indicateur les propriétés d'au moins deux familles de centralité sur les trois que nous avons vues. Plus en détail,  $C^C$  (global) échoue à mettre en évidence une hiérarchie de routes centrales et n'est d'aucune aide en urbanistique ;  $C^B$  permet surtout de mettre en évidence une centralité des rues longues tout en étant, dans une certaine mesure, également

victime de l'effet de bord ;  $C^S$  donne les résultats les plus inattendus, faisant ressortir les zones hyper-centrales ainsi que les axes centraux, sans aucun effet de bord notable ;  $C^I$  représente bien l'importance des arcs qui jouent un rôle de « ciment », qui maintiennent l'unité du réseau, tout en préservant une partie des propriétés de  $C^B$ . En général, il faut noter l'efficacité particulière de l'analyse à mettre en évidence des variations de centralité le long d'une même route, par exemple  $C^B$  à Venise,  $C^S$  à Ahmedabad ou  $C^I$  à Richmond : et ce d'autant que ces routes sont l'expression de l'émergence « naturelle » d'un motif de centralité le long d'une multitude de tronçons, et ce sans aucune intervention exogène d'un quelconque subterfuge comme, par exemple, la généralisation ; en tant que tel, la MCA suggère que la centralité peut jouer un rôle bien particulier dans la formation « organique » d'une représentation mentale « grossière » des routes les plus fréquentées, représentation qui servira alors de cadre cognitif pour s'orienter dans un environnement complexe (Kuipers et al., 2003).

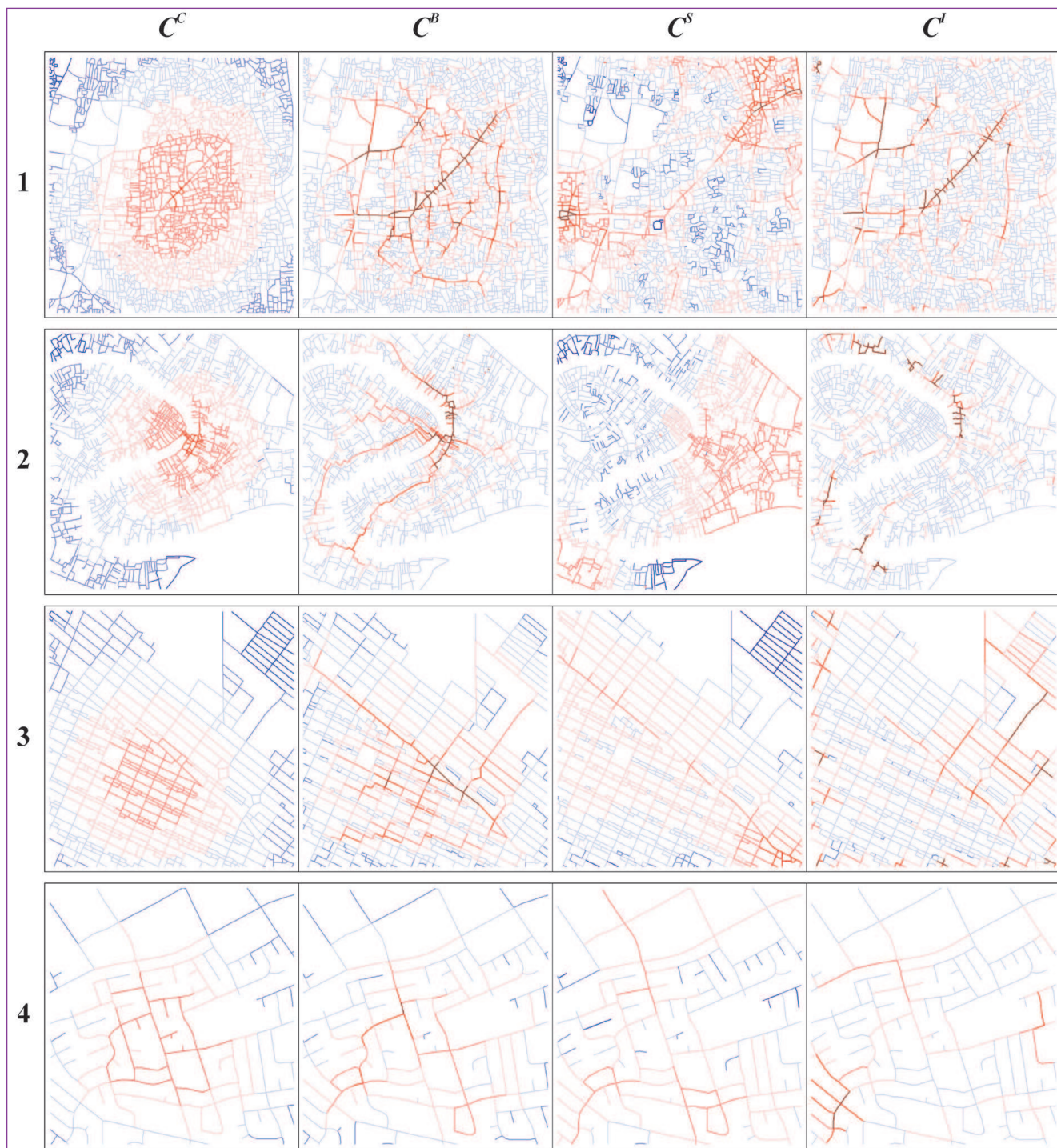
Dans la figure 3b, une comparaison similaire est effectuée sur le graphe dual, après application de la généralisation ICN (Porta et al., 2004). L'analyse de  $C^C$  donne de bons résultats (cf. par exemple Ahmedabad), mais demeure entachée d'un effet de bord, lorsque les motifs viaires, comme à Venise, deviennent très fragmentés. La généralisation fondée sur l'ICN, qui précède le calcul de la centralité proprement dit, affecte profondément le résultat dans tous les cas, rendant la conclusion finale plus artificielle et gommant les différences entre index. Alors que, dans l'approche directe, des routes droites ou des sous-quartiers émergent de la structure urbaine comme le résultat d'une « convergence » naturelle de la centralité sur une chaîne de tronçons limités par des intersections, dans l'approche dual

nous identifions d'abord les voies avant de leur affecter un coefficient de centralité. Ceci conduit à des résultats moins univoques, en ce qu'il est impossible de dire si un tronçon de route est véritablement central en lui-même, ou bien hérite sa centralité des tronçons mitoyens. Tout cela conduit à une image un peu artificielle du réseau routier.

De plus, l'analyse statistique des distributions de centralité sur les graphes directs (figure 4, haut) confirme que les distributions cumulatives de  $C^C$ ,  $C^B$ ,  $C^S$  et  $C^I$  suivent des règles d'échelle : ici, comme dans les exemples choisis par Crucitti et al. (2005), nous avons trouvé que  $C^C$  et  $C^S$  sont majoritairement linéaires,  $C^B$  se représente bien par une droite dans un diagramme log-linéaire, donc suit une loi exponentielle ; enfin,  $C^I$  différencie les villes planifiées des villes auto-organisées en suivant, dans le premier cas, une loi exponentielle, et dans le second, une loi réciproque. Dans la figure 4a, nous représentons la distribution des index de centralité pour Ahmedabad et Richmond, chacun considéré comme paradigme de ville à croissance spontanée et planifiée. Les homogénéités/hétérogénéités dans l'allocation de la « ressource » centralité aux différents nœuds, étudiées par l'application du coefficient de Gini (Dagum, 1980), ont été jugées suffisantes pour classer les villes selon une analyse agrégative, qui regroupe les villes aux motifs urbains similaires (Crucitti et al., 2005). Ceci confirme que, grâce à l'analyse directe et aux différents index de centralité, il est possible de mettre en évidence des propriétés fondamentales des réseaux routiers urbains réels suffisantes pour établir une classification pertinente.

À la différence de l'analyse directe, dans l'analyse duale la distribution statistique de  $C^D$  est significative, vu que le nombre d'arcs incidents par nœud est formellement illimité (voir *supra*) ; étudiée dans

# RECHERCHE



**Approche directe** : les quatre indices de centralité ( $C^a$  = proximité,  $C^b$  = intercalation,  $C^s$  = rectitude,  $C^i$  = information) calculés dans quatre cas (1. Ahmedabad, 2. Venise, 3. Richmond, 4. Walnut Creek) représentés par des graphes directs (nœuds = intersections, arcs = routes).

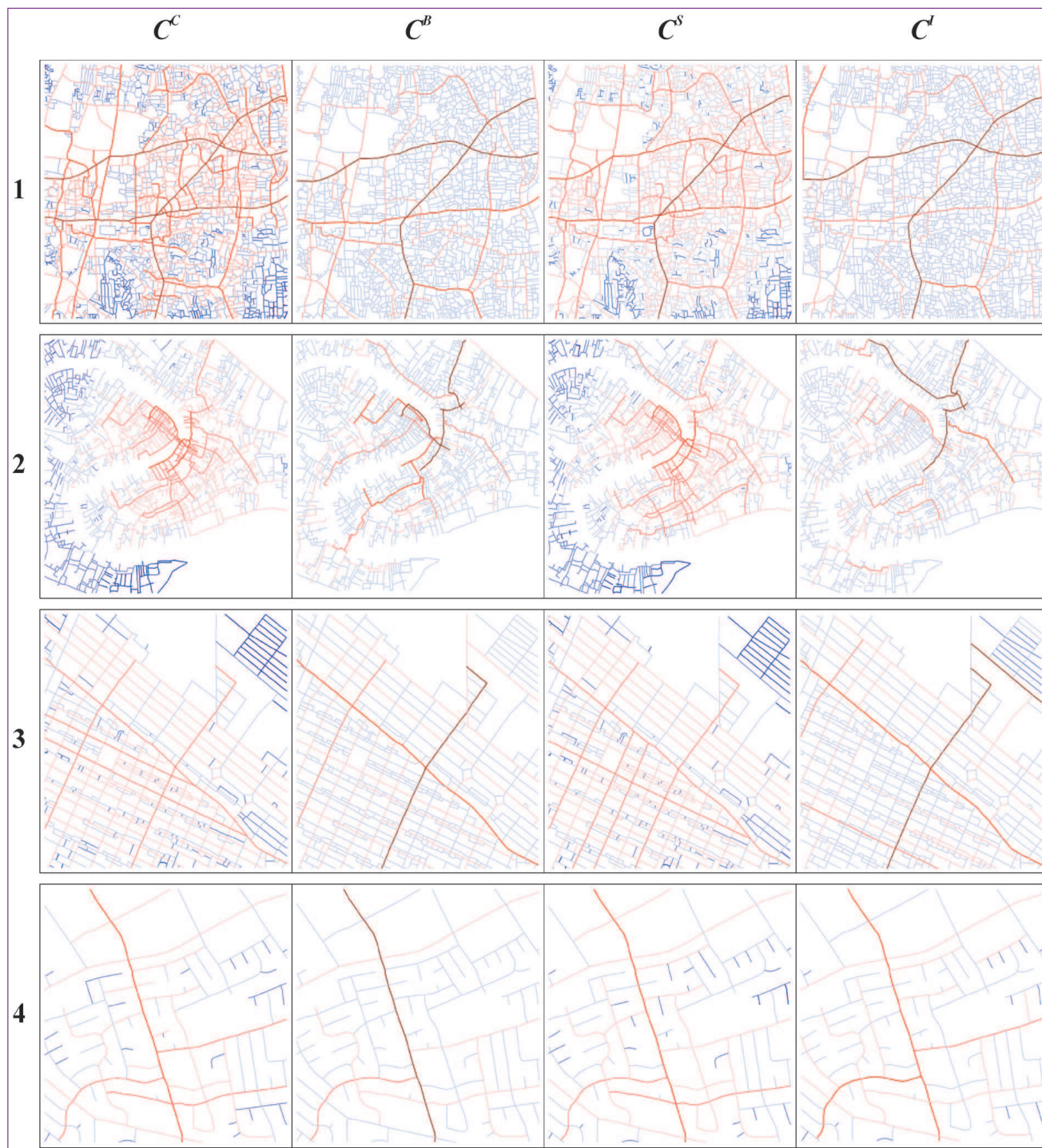
Dans l'approche directe, les scores de centralité sont calculés métriquement sur les nœuds qui représentent de réelles intersections ; ensuite, on peut les figurer dans un contraste rouge/bleu soit en coloriant les nœuds, soit, comme ici, les arcs ; dans ce cas, la centralité des arcs est choisie comme étant la moyenne du score des nœuds extrêmes en quoi l'arc participe à la topologie générale du réseau.

L'analyse montre que  $C^i$  est de loin l'indicateur le moins intéressant, puisqu'il ne permet ni d'identifier les axes principaux, ni les quartiers centraux en raison de sa contamination par l'effet de bord.

À l'inverse, les trois autres indices représentent autant de conceptions différentes de la centralité.

En outre, ils mettent facilement en évidence les routes ou les quartiers de plus grande centralité, même dans les topologies les plus exotiques.

Ainsi, cette identification est le résultat de la seule analyse de la centralité : en résumé, nous voyons ici comment la centralité « construit » différentes routes ou ponctuels dans l'espace urbain, dont l'identité est une fonction de leur qualification en termes, une nouvelle fois, de « pure » centralité.



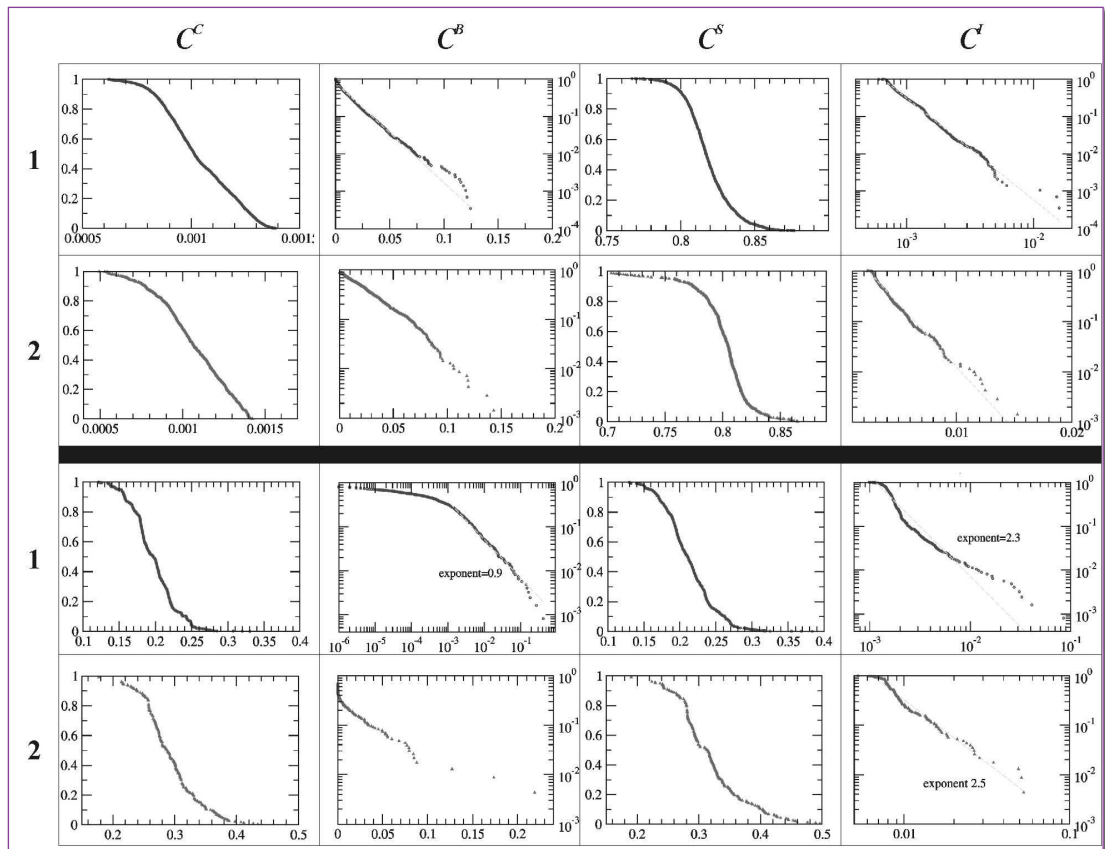
L'approche duale : les quatre indices de centralité ( $C^c$  = proximité,  $C^b$  = intercalation,  $C^s$  = rectitude,  $C^i$  = information) calculés dans quatre cas (1. Ahmedabad, 2. Venise, 3. Richmond, 4. Walnut Creek) représentés par des graphes duaux (les voies sont des points, les intersections des arcs).

Dans l'approche duale généralisée, les scores de centralité sont calculés de façon topologique sur les nœuds, qui représentent des axes généralisés (routes formées de plusieurs tronçons réels alignés).

Le passage d'un ensemble de rues à un ensemble de routes généralisées requiert un algorithme de généralisation.

Dans cette figure, nous avons utilisé la méthode dite de continuité intersecante (ICN) (Porta et al., 2004), qui est fondée sur l'alignement aux intersections ; dans l'analyse spatiale conventionnelle, l'extension axiale utilise une généralisation fondée sur une linéarité ininterrompue ; des modifications de cette méthode ont été récemment proposées, soit par le concept de la profondeur fractionnée (Dalton, 2001 ; Dalton et al., 2003), par des points caractéristiques d'orientation (Jiang et Claramunt, 2000) ou par le nom des rues (Jiang et Claramunt, 2004b) ; dans chaque cas, les routes généralisées sont identifiées avant le calcul de la centralité, introduisant ainsi un élément exogène à la centralité elle-même qui affecte profondément le résultat obtenu.

Ainsi, la centralité ne participe pas à l'identification des routes telles qu'on les voit en rouge ou en bleu sur ces cartes ; elle ne fait que les qualifier après coup.



Les distributions cumulatives des quatre indices de centralité ( $C^C$  = proximité,  $C^B$  = intercalation,  $C^S$  = rectitude,  $C^I$  = information) dans l'approche directe (en haut) ou duale (en bas) dans le cas d'Ahmedabad (cas n°1) et Richmond (cas n°2). Les distributions cumulatives sont définies comme  $P(C) = \int_0^C aC' dC'$ , où  $N(C)$  est le nombre de nœuds possédant la centralité  $C$ .

La représentation directe rend compte d'un comportement identique de chaque indices dans les deux cas de figure, alors que des lois différentes régissent des indices différents.  $C^C$  et  $C^S$  sont essentiellement linéaires ;  $C^B$  est à échelle simple et les pointillés dans le diagramme log-linéaire mettent en évidence une loi de type exponentielle  $P(C) \sim e^{-C^B}$  pour les villes auto-organisées (Ahmedabad,  $\sigma_{Ahm} = 0,016$ ) et gaussienne  $P(C) \sim \exp(-x^2 / 2\sigma^2)$  pour les quartiers planifiés (Richmond,  $\sigma_{Rich} = 0,049$ ). Une telle distinction est encore plus évidente pour  $C^I$  qui suit une loi réciproque  $P(C) \sim C^{-\alpha}$  dans les villes auto-organisées ( $\sigma_{Ahm} = 2,74$ ) et exponentielle dans les zones planifiées ( $\sigma_{Rich} = 0,002$ ).

La représentation duale :  $C^C$  et  $C^S$  sont linéaires ;  $C^I$  et  $C^B$  exhibent des distributions à grande et simple échelle, dans les cas d'Ahmedabad et de Richmond respectivement. Quoiqu'il soit possible de deviner l'expression de ces lois, les écarts aux courbes analytiques sont souvent plus que significatives.

un article précédent (Porta et al., 2004), la distribution de  $C^D$  suit une loi réciproque dans les systèmes de taille significative. La même analyse est conduite ici sur les autres indices (fig. 4b, bas) ; elle révèle que, à l'instar de la représentation directe,  $C^C$  et  $C^S$  suivent des lois linéaires,  $C^B$  et  $C^I$  semblent suivre des lois de grande échelle dans le cas d'Ahmedabad et à échelle simple dans le cas de Richmond. Toutefois, ces lois sont largement moins évidentes que dans l'analyse primaire (voir, par exemple, la déviation de l'interpolation analytique de  $C^I$  dans le cas d'Ahmedabad), ce qui confirme, si besoin était, que l'analyse directe possède une capacité supérieure à extraire cette organisation cachée des motifs urbains.

## Les avantages de l'approche directe et la MCA

On effectue une analyse réticulaire directe et duale de quatre échantillons d'un mille carré. On en tire des conclusions qui identifient clairement l'approche directe, dans le cadre d'une analyse réticulaire des réseaux routiers urbains, comme plus significative, plus objective et plus réaliste. Fondée sur la représentation route-axe-entre-deux-nœuds, l'approche directe peut optimiser l'utilisation des quantités fabuleuses d'information collectées et mise à disposition dans différents domaines. D'autant que l'approche directe réduit la subjectivité de l'analyse en

éliminant l'étape de généralisation. Alors que dans l'analyse duale les distributions statistiques de la centralité montrent des déviations importantes par rapport aux interpolations analytiques, la représentation directe met en évidence des lois simples et cohérentes : rien que pour cela, l'approche directe arrive à capturer des structures essentielles des réseaux routiers urbains réels. Ce résultat semble lié à la différence la plus fondamentale entre les deux approches : alors que la représentation directe préserve la métrique, le concept géométrique de distance, sans abandonner la topologie du système, l'approche duale conduit nécessairement à une distance topologique discrète qui rend les index et les processus fondamentalement plus abstraits, en

ce qu'ils ne tiennent pas compte de la dimension perceptive de l'environnement humain. Enfin, notre travail montre que la centralité est une notion plurielle, un concept multi-facettes qui, pour cerner l'« importance » d'acteurs individuels, d'organisation ou de lieux dans des réseaux complexes, donne naissance à différents index. Nous montrons que ces index, du moins ceux étudiés ici, appartiennent à quatre conceptions différentes de la centralité : la proximité, l'intercalation, la rectitude et l'importance vis-à-vis des autres : les différences entre ces « familles » se manifestent par leur distribution spatiale de centralité particulière, que ce soit en termes spatiaux comme représentée par l'alternance rouge/bleu sur une carte, ou en terme de graphique de distribution statistique cumulative. Nous voyons également que chaque index, appliqué aux réseaux géographiques, matérialise chacun une façon bien particulière d'être central, toutes participant à la compréhension approfondie du fonctionnement urbain. La figure 3a offre un bon résumé de cette diversité de la notion de centralité dans un réseau routier où l'intercalation, la rectitude et l'information « décrivent » chacun la ville différemment, tout en restant cohérent entre-eux.

Une nouvelle approche de l'analyse réticulaire de la centralité dans les systèmes géographiques, comme

les réseaux routiers urbains, émerge. Ses trois motos sont :

1. L'utilisation de graphes directs ;
2. L'usage d'une distance métrique ;
3. Le recours à de multiples index de centralité.

En tant que tel, nous pouvons parfaitement l'appeler approche multicentralité (MCA). Les avantages de la MCA, par rapport aux approches duales, sont multiples :

1. Elle ne dépend nullement de l'application préalable d'un algorithme de généralisation, donc elle est plus lisible, faisable et objective, c'est-à-dire qu'elle identifie les axes centraux par la convergence naturelle de la centralité le long de chaînes tronçonnées ;
2. Elle est compatible immédiatement avec la somme gigantesque d'information structurée selon le modèle standard route-axe-entre-deux-nœuds, en autres les bases de données routières utilisées dans le cadre d'études du trafic, de modélisations et de cartographie ;
3. Elle est plus réaliste et compréhensible, en ce sens qu'elle couple la topologie avec la métrique du système ;
4. Elle donne un aspect pluriel de la réalité, plutôt qu'une unique idée, conduisant ainsi à un discours plus nuancé et moins affirmatif.

D'un point de vue purement scientifique, la MCA permet de regrouper l'analyse des réseaux géographiques dans la même discipline

que celles des études des réseaux non-géographiques (biologiques, technologiques ou sociaux).

Sur cette base, les axes de recherches futures sont triples : premièrement, les procédures pour l'évaluation systématique des index devront être coordonnées et standardisées dans un outil unique ; deuxièmement, des progrès importants sont à attendre lorsque l'on établira des relations entre les centralités des réseaux (qui sont des incidences structurelles) et les dynamiques sur les réseaux (comme les motifs d'occupation des sols, le prix du foncier, la répartition des groupes sociaux, les taux de criminalité, le commerce de proximité, les flots pédestres et véhiculaires, etc.), c'est-à-dire par la reformulation des index de centralité dans un nouveau contexte de graphes « pondérés » (Barrat et al., 2004). On ne devrait pas être surpris de découvrir que, en règle générale, certaines dynamiques se révèlent être strictement corrélées à une seule famille d'index, alors que d'autres sont fonction d'une famille différente, ce qui amènerait une réflexion importante sur la notion d'être un lieu central dans un réseau géographique, et probablement une utilisation plus pertinente de ces outils dans le cadre du design et de la planification urbaine. Enfin, un effort particulier doit être fait pour normaliser tous les index de façon à pouvoir comparer entre eux des systèmes de taille quelconque. ■

## Références

Albert R, Barabasi A L, 2002 : « Statistical mechanics of complex networks » *Review of Modern Physics* 74 47 - 97

Alexander C, 1998 : *The Nature of Order* (Oxford University Press, Oxford)

Altman M, 1993 : « Reinterpreting network measures for models of disease transmission » *Social Networks* 15 1 - 17

Anthonisse J M, 1971 : *The Rush in a Graph* University of Amsterdam Mathematical Centre, Amsterdam, ND

Barabasi A L, 2002 : *Linked: The New Science of Networks* (Perseus, Cambridge, MA)

Batty M, 2001 : « Exploring isovist fields: space and shape in architectural and urban morphology » *Environment and Planning B: Planning and Design* 28 123 - 150

Batty M, 2003 : « Network geography », WP 63, Center for Advanced Spatial Analysis, University College, London, <http://www.casa.ucl.ac.uk/publications>

Batty M, 2004a : « A new theory of space syntax », WP 75, Center for Advanced Spatial Analysis, University College, London, <http://www.casa.ucl.ac.uk/publications>

Batty M, 2004b : « Distance in space syntax », WP 80, Center for Advanced Spatial Analysis, University College, London, <http://www.casa.ucl.ac.uk/publications>

Batty M, Longley P, 1994 : *Fractal Cities* (Academic Press, London)

Batty M, Rana S, 2002 : « Reformulating space syntax: the automatic definition and generation of axial lines and axial maps », WP 58, Center for Advanced Spatial Analysis, University College, London, <http://www.casa.ucl.ac.uk/publications>

- Bavelas A, 1948 : « A mathematical model for group structures » *Human Organization* 7 16 – 30
- Bavelas A, 1950 : « Communication patterns in task oriented groups » *Journal of the Acoustical Society of America* 22 271 – 282
- Bell C D, Atkinson J S, Carlson J, 1999 : « Centrality measures for disease transmission networks » *Social Networks* 21 1 – 21
- Bolland J M, 1988 : « Sorting out centrality: an analysis of the performance of four centrality models in real and simulated networks » *Social Networks* 10 233 – 253
- Bonacich P, 1972 : « Factoring and weighting approaches to status scores and clique identification » *Journal of Mathematical Sociology* 2 113 – 120
- Bonacich P, 1987 : « Power and centrality: a family of measures » *American Journal of Sociology* 92 1170 – 1182
- Bonacich P, 1991 : « Simultaneous group and individual centralities » *Social Networks* 13 155 – 168
- Byrd B F, 1994 : « Public and private, domestic and corporate: the emergence of the southwest Asian village » *American Antiquity* 59 639 – 666
- Carvalho R, Batty M, 2004 : « Encoding geometric information in road networks extracted from binary images » *Environment and Planning B: Planning and Design* 32 179 – 190
- Conroy Dalton R, 2003 : « The secret is to follow your nose: route path selection and angularity » *Environment and Behavior* 35 107 – 131
- Cook K, Emerson R, Gilmore M, Yamagishi T, 1983 : « The distribution of power in exchange networks: theory and experimental results » *American Journal of Sociology* 89 275 – 305
- Crucitti P, Latora V, Porta S, 2006 : « Centrality measures in spatial networks of urban streets » *Physical Review E* 73 1 – 5
- Dagum C, 1980 : « The generation and distribution of income, the Lorenz curve and the Gini ratio » *Économie Appliquée* 33 327 – 367
- Dalton N, 2001 : « Fractional configurational analysis and a solution to the Manhattan problem », in *Proceedings 3rd International Space Syntax Symposium Atlanta, GA*, <http://undertow.arch.gatech.edu/homepages/3sss>
- Dalton N, Peoponis J, Dalton R, 2003 : « To tame a tiger one has to know its nature: extending weighted angular integration analysis to the description of GIS road-centerline data for large scale urban analysis », in *Proceedings 4th International Space Syntax Symposium London*, <http://www.spacesyntax.net/SSS4>
- Descartes R : *Discours de la Méthode: Pour Bien Conduire sa Raison et Chercher la Vérité*.
- Desyllas J, Duxbury E, 2001 : « Axial maps and visibility analysis: a comparison of their methodology and use in models of urban pedestrian movement », in *Proceedings 3rd International Space Syntax Symposium Atlanta, GA*, <http://undertow.arch.gatech.edu/homepages/3sss>
- Donninger C, 1986 : « The distribution of centrality in social networks » *Social Networks* 8 191 – 203
- Erdos P, Renyi A, 1959 : « On random graphs » *Publicationes Mathematicae* 6 290 – 297
- Faust K, Entwisle B, Rindfuss R, Walsh S, Sawangdee Y, 1999 : « Spatial arrangement of social and economic networks among villages in Nang Rong district Thailand » *Social Networks* 21 311 – 337
- Fisher-Gewirtzman D, Shach Pinsky D, Wagner I A, Burt M, 2005 : « View-oriented three-dimensional visual analysis models for the urban environment » *Urban Design International* 10 23 – 37
- Freeman L C, 1977 : « A set of measures of centrality based on betweenness » *Sociometry* 40 35 – 41
- Freeman L C, 1979 : « Centrality in social networks: conceptual clarification » *Social Networks* 1 215 – 239
- Freeman L C, Borgatti S P, White D R, 1991 : « Centrality in valued graphs: a measure of betweenness based on network » *Social Networks* 13 141 – 154
- Gastner M T, Newman M E J, 2004 : « The spatial structure of networks », <http://arxiv.org/abs/cord-mat/0407680>
- Hall E T, 1966 : *The Hidden Dimension* (Doubleday, New York)
- Hillier B, 1996 : *Space is the Machine: A Configurational Theory of Architecture* (Cambridge University Press, Cambridge)
- Hillier B, 1998 : « From research to designer-engineering the space in Trafalgar Square » *Urban Design Quarterly* 68 35 – 37
- Hillier B, Hanson J, 1984 : *The Social Logic of Space* (Cambridge University Press, Cambridge)
- Hillier B, Iida S, 2005 : « Network and psychological effects in urban movement », in *Proceedings of Spatial Information Theory: International Conference, COSIT 2005 Ellicottville, NY, 14 - 18 September Lecture Notes in Computer Science Number 3693*, Eds A G Cohn, D M Mark (Springer, Berlin) pp 475 – 490
- Hillier B, Penn A, 2004 : « Rejoinder to Carlo Ratti » *Environment and Planning B: Planning and Design* 31 501 – 511
- Irwin G J, 1978 : « Pots and entrepôts: a study of settlement, trade and the development of economic specialization in Papuan prehistory » *World Archaeology* 9 299 – 319
- Irwin-Williams C, 1977 : « A network model for the analysis of prehistoric trade », in *Exchange Systems in Prehistory* Eds T Earle, J Ericson (Academic Press, New York) pp 141 – 151
- Jacobs A, 1993 : *Great Streets* (MIT Press, Cambridge, MA)
- Jacobs J, 1961 : *The Death and Life of Great American Cities* (Random House, New York)
- Jiang B, Claramunt C, 2000 : « Extending space syntax towards an alternative model of space within GIS », papier présenté à la 3ème European Agile Conference on Geographic Information Science, Helsinki, Finlande
- Jiang B, Claramunt C, 2002 : « Integration of space syntax into GIS: new perspectives for urban morphology » *Transactions in GIS* 6 151 – 162
- Jiang B, Claramunt C, 2004a : « A structural approach to the model generalization of an urban street network » *Geoinformatica* 8 157 – 171
- Jiang B, Claramunt C, 2004b : « Topological analysis of urban street networks » *Environment and Planning B: Planning and Design* 31 151 – 162
- Kuipers B, Tecuci D, Stankiewicz B, 2003 : « The skeleton in the cognitive map: a computational and empirical exploration » *Environment and Behavior* 35 81 – 106
- Larson R, 1981 : *Urban Operations Research* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ)
- Latora V, Marchiori M, 2001 : « Efficient behavior of small-world networks » *Physical Review Letters* 87 198701

- Latora V, Marchiori M, 2002 : « Is the Boston subway a small-world network? » *Physica A* 314 109 – 113
- Latora V, Marchiori M, 2003 : « Economic small-world behavior in weighted networks » *European Physical Journal B* 87 198701
- Latora V, Marchiori M, 2004 : « A measure of centrality based on network efficiency », <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0402050>
- Leavitt H J, 1951 : « Some effects of certain communication patterns on group performance » *Journal of Abnormal and Social Psychology* 46 38 – 50
- Le Corbusier, 1994 : *Urbanisme* (Flammarion, Paris); première publication 1925
- Lilijeros F L, Edling C R, Amaral N, Stanley H E, Aberg Y, 2001 : « The web of human sexual contacts » *Nature* 411 907 – 908
- Markovsky B, Patton T, Willer D, 1988 : « Power relations in exchange networks » *American Sociological Review* 53 220 – 236
- Mullen B, Johnson C, Salas E, 1991 : « Effects of communication network structure: components of positional centrality » *Social Networks* 13 169 – 186
- Nakao K, 1990 : « Distribution of measures of centrality: enumerated distributions of Freeman's graph centrality measures » *Connections* 13 10 – 22
- Newman M E J, Girvan M, 2003 : « Finding and evaluating community structure in networks », <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0308217>
- Newman P, Kenworthy J, 1999 : *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence* (Island Press, Washington, DC)
- Nieminen J, 1974 : « On centrality in a graph » *Scandinavian Journal of Psychology* 15 322 – 336
- Pastor-Satorras R, Vespignani A, 2004 : *Evolution and Structure of the Internet* (Cambridge University Press, Cambridge)
- Penn A, 2003 : « Space syntax and spatial cognition: or why the axial line? » *Environment and Behavior* 35 30 – 65
- Penn A, Conroy R, Dalton N, Dekker L, Mottram C, Turner A, 1997 : « Intelligent architecture: new tools for three dimensional analysis of space and built form », in *Proceedings 1st International Space Syntax Symposium London*, copie sur demande au Professor A Penn, University College London, London
- Penn A, Turner A, 2003 : « Space layout affects search efficiency for agents with vision », in *Proceedings 4th International Space Syntax Symposium London*, <http://www.spacesyntax.net/SSS4>
- Peregrine P, 1991 : « A graph theoretic approach to the evolution of Cahokia » *American Antiquity* 56 66 – 75
- Pitts F R, 1965 : « A graph theoretic approach to historical geography » *The Professional Geographer* 17 15 – 20
- Pitts F R, 1979 : « The medieval river trade network of Russia revisited » *Social Networks* 1 285 – 292
- Portugali J, 2000 : *Self-organization and the City* (Springer, Berlin)
- Poulin R, Boily M C, Masse B R, 2000 : « Dynamical systems to define centrality in social networks » *Social Networks* 22 187 – 220
- Ratti C, 2004 : « Space syntax: some inconsistencies » *Environment and Planning B: Planning and Design* 31 487 – 499
- Ravasz E, Barabasi A L, 2003 : « Hierarchical organization in complex networks » *Physical Review Letters* 67 026112
- Rosvall M, Trusina A, Minnhagen P, Sneppen K, 2005 : « Networks and cities: an information perspective » *Physical Review Letters* 94 028701
- Rothenberg R B, Potterat J J, Woodhouse D E, Darrow W W, Muth S Q, Klovdahl A S, 1995 : « Choosing a centrality measure: epidemiologic correlates in the Colorado Springs study of social networks » *Social Networks* 17 273 – 297
- Rothman M, 1987 : « Graph theory and the interpretation of regional survey data » *Paleorient* 13 73 – 91
- Sabidussi G, 1966 : « The centrality index of a graph » *Psychometrika* 31 581 – 603
- Salheen M, 2003 : « An application of universal distance using space syntax analysis », in *Proceedings 4th International Space Syntax Symposium London*, <http://www.spacesyntax.net/SSS4>
- Salheen M, Forsyth L, 2001 : « Addressing distance in the space syntax syntactical model » *Urban Design International* 6 93 – 106
- Salingaros N A, 2003 : « Connecting the fractal city », *Discours général, 5ème Biennale des cités et urbanistes d'Europe, Barcelone, Avril*, <http://www.math.utsa.edu/sphere/salingar/connecting.html>
- Salingaros N A, 1998 : « Theory of the urban web » *Journal of Urban Design* 3 53 – 71
- Scott J, 2003 : *Social Networks Analysis* 2nd edition (Sage, London)
- Shaw M E, 1954 : « Some effects of unequal distribution of information upon group performance in various communication nets » *Journal of Abnormal and Social Psychology* 49 547 – 553
- Shaw M E, 1964 : « Communication networks », in *Advances in Experimental Social Psychology* volume 6, Ed. L Berkovitz (Academic Press, New York) pp 111 – 147
- Shimbel A, 1953 : « Structural parameters of communication networks » *Bulletin of Mathematical Biophysics* 15 501 – 507
- Smith D, Timberlake M, 1995 : « Conceptualising and mapping the structure of the world system's city system » *Urban Studies* 32 287 – 302
- Stephenson K, Zelen M, 1989 : « Rethinking centrality: methods and examples » *Social Networks* 11 1 – 27
- Teklenburg J, Timmermans H, van Wageningen A, 1993 : « Space syntax: standardized integration measures and some simulations » *Environment and Planning B: Planning and Design* 20 347 – 357
- Thomson R C, 2004 : « Bending the axial line: smoothly continuous road centreline segments as a basis for road network analysis », in *Proceedings 4th International Space Syntax Symposium London*, <http://www.spacesyntax.net/SSS4>
- Turner A, Doxa M, O'Sullivan D, Penn A, 2001 : « From isovists to visibility graphs: a methodology for the analysis of architectural space » *Environment and Planning B: Planning and Design* 28 103 – 121
- Vragovic I, Louis E, Diaz-Guilera A, 2004 : « Efficiency of informational transfers in regular and complex networks », <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0410174>
- Wasserman S, Faust K, 1994 : *Social Networks Analysis* (Cambridge University Press, Cambridge)
- Watts D J, Strogatz S H, 1998 : « Collective dynamics of small-world networks » *Nature* 393 440 – 442
- Weaver W, 1948 : « Science and complexity » *American Scientist* 36 536 – 544
- Wilson G A, 2000 : *Complex Spatial Systems: The Modelling Foundations of Urban and Regional Analysis* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ)