

QUEL RÔLE DU RÉSEAU DE VOIRIE URBAINE SUR LA DISTRIBUTION DES FLUX PIÉTONNIERS ?

JEAN-CHRISTOPHE FOLTÊTE

THÉMA

UMR 6049 CNRS-UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

1. INTRODUCTION

Il est habituellement reconnu qu'en milieu urbain, les nuisances qui sont la conséquence de l'« automobilité » exigent une revalorisation des autres modes de transport, et notamment de la marche à pied. Augmenter la connaissance de ce mode de déplacement est donc devenu un enjeu important pour l'aménagement urbain (BATTY, 1997). Outre l'identification et la hiérarchisation des facteurs qui influent sur le choix de ce mode (ALFONZO, 2005 ; HANDY, 1996), il s'agit de comprendre les déterminants de l'intensité de la pratique pédestre, pour proposer des informations utiles aux planificateurs urbains. Ce thème a donné lieu à plusieurs travaux de recherche, à propos par exemple de la mixité des espaces urbains (CERVERO, KOCKELMAN, 1997), de facteurs sociologiques et psychologiques (FUJIYAMA, 2005) ou encore au sujet du rôle de la configuration de la voirie (HILLIER, HANSON, 1984 ; GENRE-GRANDPIERRE, 2001 ; GENRE-GRANDPIERRE, FOLTÊTE, 2003). Le travail présenté porte sur les différents aspects structurels du réseau viaire qui influent sur la

distribution des fréquences de transit piétonnier.

La fréquence d'usage des tronçons de voirie peut être définie comme le nombre de trajets individuels transitant par ces tronçons pendant une certaine durée. A un niveau global, il a été montré que les disparités de cette fréquence entre les tronçons est partiellement expliquée par la géométrie du réseau viaire et son degré de connectivité. Cet effet structurel a déjà été identifié et il apparaît sous plusieurs formes dans les recherches focalisées sur les relations entre réseaux de voirie et déplacements. Les effets induits par la configuration spatiale du réseau viaire ont par exemple été signalés par GENRE-GRANDPIERRE (2000 ; 2001), qui a montré la relation entre des fréquences observées et des fréquences théoriques issues de trajets simulés.

Des facteurs structurels ont par ailleurs été explicitement définis dans de nombreux travaux se plaçant dans le mouvement scientifique de la syntaxe spatiale (HILLIER, HANSON, 1984 ; HILLIER, 1996). Selon les théories de la syntaxe spatiale, la notion de « mouvement naturel » correspond à la distribution des fréquences piétonnières telle qu'elle est induite par la configuration du réseau viaire (HILLIER et al., 1993), incluant simultanément des aspects psychologique et topologique (PENN, 2003). Selon ces auteurs, la recherche d'une meilleure co-visibilité et d'une mémorisation d'itinéraire facilitée incite les piétons à préférer les rues rectilignes joignant les espaces convexes (les espaces ouverts) ; en conséquence, le nombre de changements d'axe directionnel est supposé être minimisé dans les choix ou les usages des itinéraires. Parmi les divers indices proposés par la syntaxe spatiale, l'intégration est une mesure structurelle apparentée à un indice d'accessibilité, qui permet d'estimer la distribution du mouvement naturel (JIANG et al., 1999 ; JIANG et al., 2000 ; JIANG et al., 2002).

Dans l'ensemble des travaux portant sur les facteurs explicatifs de la fréquence piétonnière, le rôle de la structure viaire est considéré de façon indépendante des lieux d'origine et de destination (OD) de chaque trajet. Les indices structurels de la syntaxe spatiale sont en effet fondés sur des calculs mettant en relation chaque lieu avec l'ensemble des autres, comme pour les indices d'accessibilité classiques (voir par exemple INGRAM, 1971 ; ALLEN et al., 1993). Par construction, ils représentent des déplacements théoriques issus d'une distribution homogène des OD. Dans le même ordre d'idée, les fréquences théoriques de GENRE-GRANDPIERRE (2000) partent aussi d'une distribution spatiale homogène. Cette démarche s'explique par le fait qu'au sein de la « fourmilière urbaine », le poids de la structure viaire sur les niveaux de transit minimise le facteur de localisation des OD.

Dans cette étude, la fréquence piétonnière sera analysée à partir d'un échantillon de trajets qui ne restituent pas nécessairement la véritable distribution des transits. C'est pourquoi cette fréquence est a priori largement dépendante des lieux d'origine et de destination (OD). Ainsi, pour expliquer cette fréquence, on peut supposer que le degré d'usage piétonnier est conditionné

par un premier facteur de localisation, reliant les individus ayant fait le choix du mode de déplacement pédestre et les lieux qui motivent leur déplacement.

Cependant, d'autres facteurs sont supposés jouer sur la fréquence d'usage piétonnier de chaque tronçon. La façon dont les individus vont construire leur itinéraire pour joindre leur destination dépend ainsi de plusieurs critères potentiels. En premier lieu, l'hypothèse d'une rationalité physique des piétons les conduisant à minimiser la distance à parcourir (ou l'énergie à dépenser) est la plus intuitive, en raison de la forte « adhérence » du mode de déplacement pédestre vis-à-vis de l'espace urbain (AMAR, 1993). Cette hypothèse déjà vérifiée par ailleurs (SENEVIRATNE, MORALL, 1985 ; BORGERS, TIMMERMANS, 1986) conduit donc à définir le facteur *accessibilité métrique*. Toutefois, comme le montrent certaines enquêtes (MARCHAND, 1974 ; FOLTÊTE et al., 2002), l'hypothèse du plus court chemin n'est pas nécessairement vérifiée, ce qui suggère le rôle possible d'autres facteurs sur les choix d'itinéraires. Parmi ceux-ci, des critères géométriques peuvent être mentionnés, notamment à propos des changements de direction (TURNER, 2001 ; CONROY DALTON, 2001). La *linéarité de la voirie*, c'est-à-dire la recherche des axes les plus rectilignes (lignes axiales), est le critère utilisé dans la syntaxe spatiale appliquée à un espace réticulaire ; sa pertinence a déjà été constatée à la suite de très nombreuses études empiriques. Les lignes axiales ne sont pas seulement considérées sous un angle géométrique, puisque selon les concepteurs de la syntaxe spatiale (HILLIER et al., 1993), les attributs fonctionnels des segments de voirie (présence de commerces, degré de criminalité par exemple) sont très souvent la conséquence de leur position stratégique à l'échelle de la ville. Toutefois, si on peut supposer que les lignes axiales sont elles-mêmes des supports privilégiés de déplacements, un autre facteur peut être défini comme la minimisation des changements directionnels propre à chaque OD. Il s'agit alors de la *linéarité des itinéraires*, où la géométrie du réseau dans sa globalité n'est pas prise en compte. En considérant ainsi le contexte réticulaire de chaque OD séparément, la structure générale de la ville n'intervient pas, il s'agit donc d'un critère strictement géométrique. Enfin un autre critère structurel pouvant jouer sur les choix d'itinéraire est la nature plus ou moins continue des parcours à effectuer : le franchissement de carrefour constitue souvent une contrainte forte pour les piétons, à la fois pour des raisons de temps, de sécurité ou encore de barrière psychologique. Ceci nous amène à définir le facteur *continuité des itinéraires*.

Dans cet article, nous proposons d'étudier les différents facteurs structurels mentionnés, qui sont supposés conditionner la distribution spatiale des fréquences piétonnières. Seront présentés successivement : les données d'application et les méthodes de calcul de ces facteurs (2), les résultats obtenus dans la démarche de modélisation statistique des fréquences piétonnières observées (3) et enfin leur interprétation (4).

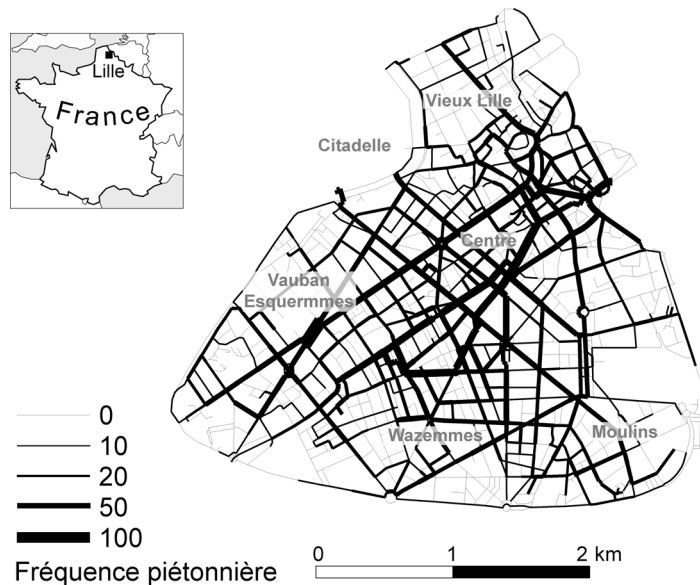
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. LE SITE D'ÉTUDE

L'étude porte sur la partie centrale de la commune de Lille, dont le site plat est *a priori* favorable aux déplacements pédestres, tout en permettant d'analyser les relations entre la mobilité pédestre et la structure du réseau sans le rôle éventuellement perturbateur du relief. La part des déplacements pédestres effectués dans la conurbation y est supérieure à la moyenne française (28 % contre 23 %) mais c'est dans la commune de Lille que cette valeur est la plus forte (43 %) (LILLE MÉTROPOLE, 1999). Cependant, depuis 30 ans, la part modale de la marche à pied chute au profit de l'automobile.

L'espace d'étude correspond à une zone qu'on peut considérer comme un système quasi-fermé du point de vue de la marche à pied, dans la mesure où la partie centrale de la commune est entourée d'une ceinture de rocades périphériques et de fortifications. Dans cet espace, 545 trajets piétonniers ont été précisément enregistrés dans un SIG, incluant pour chacun le point d'origine et de destination ainsi que la séquence des tronçons de rues empruntés (GENRE-GRANDPIERRE, FOLTÈTE, 2003). La somme des trajets passant par chaque tronçon a permis de calculer la fréquence de transit piétonnier (Figure 1).

Figure 1 : La zone d'étude et les données utilisées :
fréquences de transit piétonnier



2.2. MODÉLISER LES FRÉQUENCES PIÉTONNIÈRES : HYPOTHÈSES ET DÉMARCHÉ MATHÉMATIQUE

Pour évaluer le rôle respectif des facteurs qu'on suppose responsables du mouvement naturel, nous proposons de rester à un niveau agrégé, c'est-à-dire

d'analyser le degré d'usage de chaque segment de voirie. Ceci implique de produire pour chaque facteur des fréquences théoriques qui représentent cet usage, à partir de la même collection de points OD issus des 545 trajets collectés. La comparaison de ces fréquences avec les fréquences résultant de l'ensemble des trajets tels qu'ils ont été enregistrés va donc permettre d'estimer le poids de ces facteurs.

Chaque facteur peut s'exprimer par une représentation particulière du réseau de voirie sous la forme d'un graphe. L'accumulation de trajets sur ce graphe permet de calculer une ou plusieurs séries de fréquences théoriques. Ces fréquences sont calculées pour chaque arc, selon la représentation initiale du réseau de voirie.

Le calcul du pouvoir explicatif de chaque série de fréquences théoriques peut être fondé sur la régression linéaire par rapport aux fréquences observées. Sur la zone étudiée, la population de 2 465 arcs se prête bien à cette mesure ; toutefois la distribution statistique des fréquences étant toujours dissymétrique, l'analyse porte sur leur transformation logarithmique. La part explicative de chaque facteur est en principe exprimée par le coefficient r^2 de régression obtenu avec les fréquences observées. Cependant, par la construction même de ces facteurs, leurs redondances sont très fortes : la minimisation du nombre de carrefours à traverser répond par exemple à une logique assez proche de la minimisation de la distance métrique, puisque le franchissement de carrefours correspond à une plus ou moins grande augmentation de la distance. C'est pourquoi les régressions multiples sont appliquées ici en mode pas à pas, afin de sélectionner des modèles statistiques où les colinéarités demeurent faibles. Dans ce travail, les variables sont proposées si leur seuil de significativité est inférieur à une probabilité de 0,05.

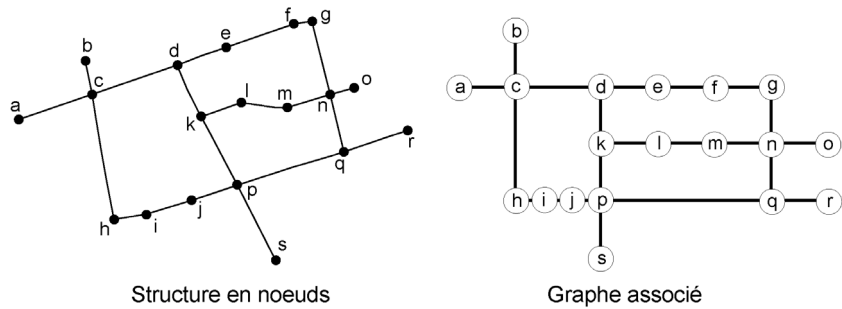
2.3. FACTEURS STRUCTURELS CONSIDÉRÉS

La voirie urbaine est modélisée sous la forme d'un réseau composé de segments linéaires (les arcs) reliés par des points (les nœuds). À partir de cette représentation, chaque facteur donne lieu à une certaine transformation du réseau initial pour aboutir à un graphe spécifique sur lequel sont identifiés des trajets du plus court chemin. L'algorithme de plus court chemin utilisé est celui de DIJKSTRA (1959).

Accessibilité métrique : minimisation de la distance physique

Ici aucune transformation du réseau n'est nécessaire pour définir les trajets du plus court chemin métrique : l'algorithme est appliqué sur le graphe planaire classique où les nœuds constituent les sommets et les arcs constituent les arêtes (Figure 2). L'impédance des arêtes correspond à la longueur métrique des arcs.

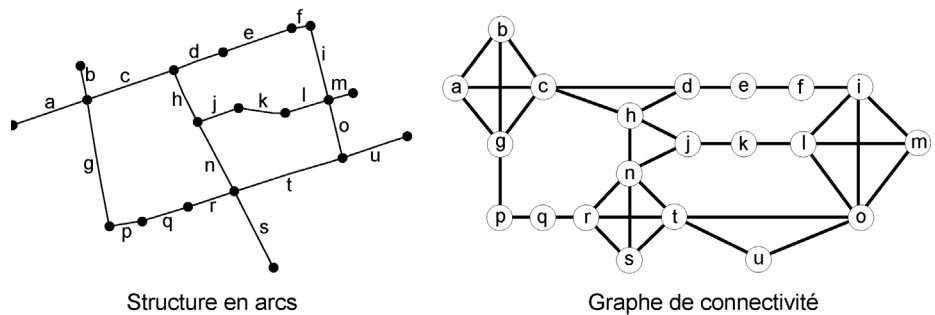
Figure 2 : Réseau de voirie et graphe associé



Principe général des autres facteurs proposés

Les autres facteurs sont tous dérivés de la transformation du graphe précédent en un graphe dual, où les arcs du réseau initial deviennent les sommets et où les nœuds deviennent les arêtes (Figure 3). Chaque facteur implique une certaine agrégation des sommets, selon une logique propre au type de minimisation qui le définit. Sur les graphes qui résultent de cette agrégation, les calculs du plus court chemin sont strictement topologiques. Dans les cas où cette agrégation est très forte, notamment concernant la linéarité de la voirie, le problème des itinéraires de distance totalement identique est évité par modification aléatoire de l'impédance des arêtes à un niveau « microscopique » (ajout de l'ordre de 10^{-5}). Cette méthode revient à désigner de façon aléatoire un itinéraire parmi ceux qui correspondent au chemin le plus court.

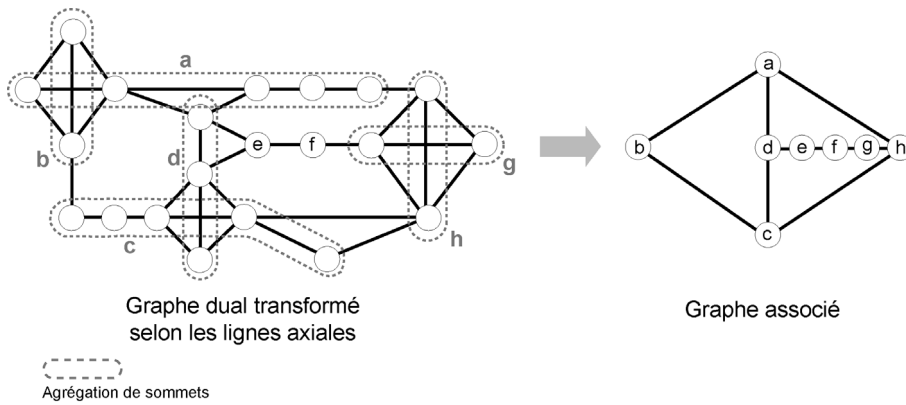
Figure 3. Graphe dual construit à partir du réseau de voirie



Linéarité de la voirie : minimisation du nombre de lignes axiales

Sur le graphe dual, les sommets sont progressivement agrégés pour représenter des « lignes axiales » quand leur différence angulaire avec les autres sommets déjà intégrés n'est pas supérieure à une certaine tolérance fixée *a priori*. Appelée carte axiale, cette transformation du graphe dual n'est pas planaire puisque les lignes axiales peuvent se croiser (BATTY, 2004 ; PORTA et al., 2006) (Figure 4).

Figure 4 : Modification du graphe dual pour représenter le facteur linéarité de la voirie



L'application des plus courts chemins sur ce graphe représentant les lignes axiales équivaut à trouver le trajet qui minimise le nombre de changements de ligne entre deux points OD. Ce trajet équivaut dans un premier temps à une suite de lignes axiales, qui est ensuite modifiée à chaque extrémité pour représenter strictement le parcours entre les points O et D à l'échelle des arcs du réseau initial. Pour tenir compte de la difficulté d'automatiser la constitution des lignes axiales, reconnues dans plusieurs travaux (BATTY et RANA, 2004 ; TURNER et al., 2005), la sensibilité à la tolérance angulaire mentionnée plus haut peut être étudiée en comparant les différentes fréquences théoriques qui en résultent.

Linéarité des itinéraires : minimisation des changements directionnels

À partir du graphe dual, l'impédance i de ces arêtes est ici définie par une fonction booléenne où l'angle séparant un des deux arcs et le prolongement de l'autre est comparé à l'angle α , qui définit *a priori* un changement de direction (Figure 5). L'algorithme de DIJKSTRA est appliqué à ce graphe. Plusieurs angles α peuvent être comparés pour identifier le seuil angulaire qui se répercute le plus sur la définition du mouvement naturel.

Pour un angle donné, l'attribution binaire de ces impédances revient à agréger les sommets, comme le montre la Figure 6 pour un angle d'environ 25° . Pour des angles de faible valeur, le résultat est très proche du graphe issu du précédent facteur. La particularité de ce facteur est d'autoriser plusieurs seuils angulaires pour définir ce qui doit être un changement d'angle, tel qu'il a pu être perçu par les piétons comme une sorte de coût. Dans l'étude présente, un balayage de nombreux seuils a été effectué jusqu'à 100° .

En comparant les Figures 4 et 6, on constate que les deux facteurs de linéarité sont très proches dans leur construction, puisque la transformation du graphe dual suit la même logique. Il reste néanmoins une différence de principe entre les deux : la linéarité de la voirie, en se fondant sur des lignes axiales définies

a priori, traduit une structure en alignements à l'échelle de la zone d'étude dans son ensemble, alors que la linéarité des itinéraires est sensible à tout changement directionnel intervenant de proche en proche au cours d'un itinéraire, à l'échelle de la jonction entre deux rues. Ainsi des changements de directions très progressifs et dans le même sens : 1) n'autoriseront pas d'alignement global puisque la différence angulaire entre les extrémités de la ligne axiale va dépasser le seuil fixé ; 2) autoriseront un alignement local si l'écart angulaire entre les arcs voisins ne dépasse pas le seuil.

Figure 5 : Impédance des arêtes pour le calcul de la linéarité des itinéraires.
L'impédance des arêtes N1 et N2 dépend de la différence entre l'angle mesuré et le seuil fixé par α .

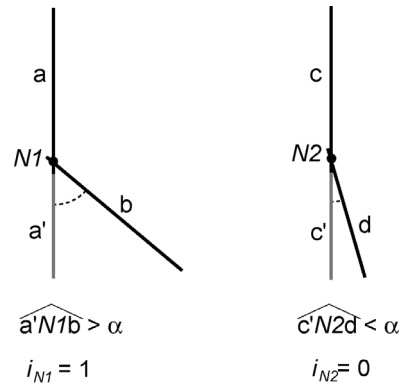
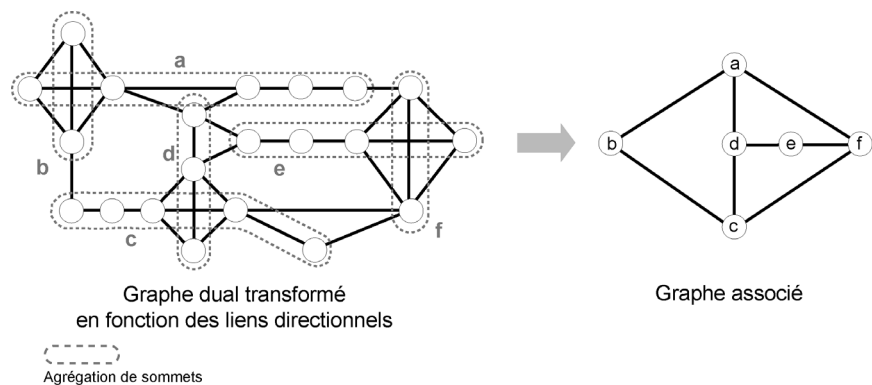


Figure 6. Modification du graphe dual pour représenter le facteur linéarité des itinéraires

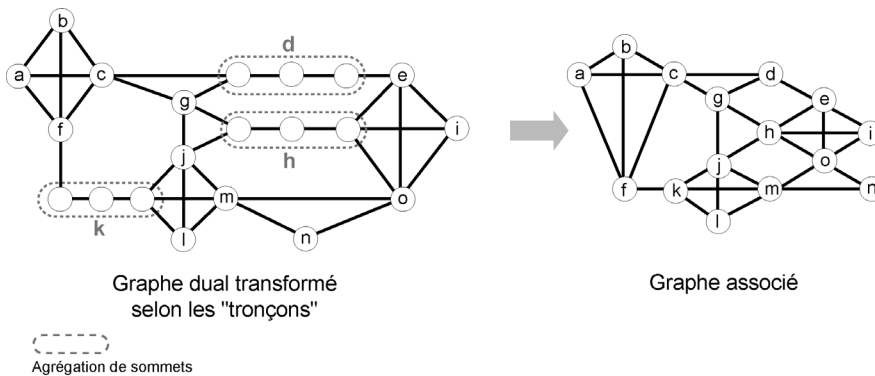


Continuité des itinéraires : minimisation de la traversée de carrefours

Ici les sommets du graphe dual sont regroupés pour constituer des tronçons, c'est-à-dire les segments de voirie compris entre deux nœuds particuliers, soit des carrefours, soit des cul-de-sac (Figure 7). À partir du graphe qui résulte de ces regroupements et en considérant toutes les impédances comme unitaires, l'application de l'algorithme du plus court chemin permet de

trouver les itinéraires qui minimisent la traversée de carrefours. Mentionnons que pour mettre en œuvre cette méthode, chaque point d'origine ou de destination est affecté au tronçon sur lequel il se place ; dans le cas où un de ces points coïncide avec l'extrémité d'au moins deux tronçons, il est affecté aléatoirement à l'un d'entre eux.

Figure 7. Modification du graphe dual pour représenter le facteur continuité des itinéraires



3. RÉSULTATS

Le premier résultat est obtenu à partir des fréquences issues du facteur d'accessibilité métrique, par simple calcul des plus courts chemins entre tous les couples OD. Les fréquences théoriques sont liées aux fréquences observées avec un coefficient r^2 de 0,59 ($p < 0,001$), ce qui signifie que presque 60 % de la variance de la fréquentation pédestre est redevable à un critère de minimisation de la distance métrique.

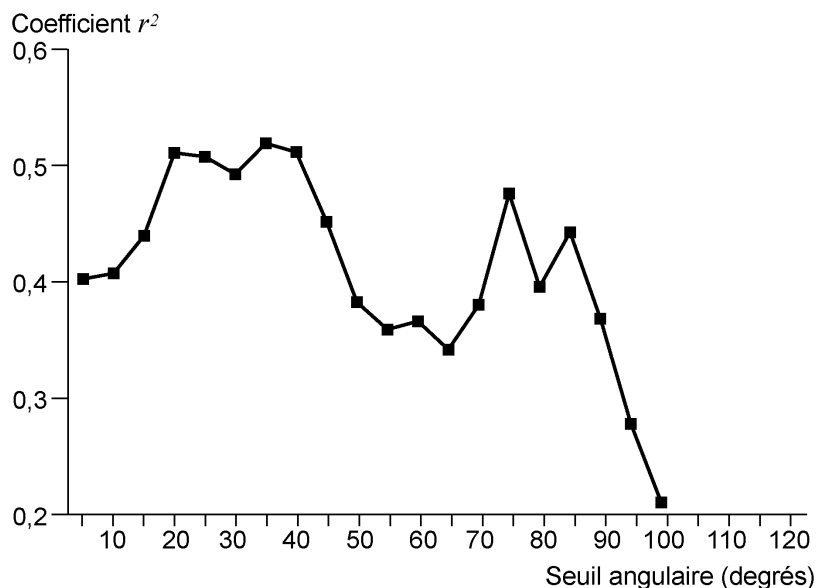
Pour mesurer le poids du facteur de localisation des OD, le même facteur d'accessibilité métrique est appliqué à un ensemble de 500 couples OD tirés de façon semi-aléatoire, en contraignant la moyenne et l'écart-type de la portée spatiale (i.e. la distance euclidienne entre O et D) à s'approcher des mêmes paramètres calculés à partir des OD observées, c'est-à-dire une moyenne de 1 000 m et un écart-type de 750 m. En utilisant cet échantillon d'OD, le pouvoir explicatif des fréquences théoriques est seulement de 25 %, ce qui confirme sans ambiguïté l'hypothèse du rôle de la localisation des OD sur le résultat agrégé des fréquences. Nous supposons que ce rôle est d'autant plus fort ici que la méthode d'acquisition des trajets ne permet pas de représenter fidèlement les fréquences réelles de transit piétonnier.

Les fréquences obtenues à partir du facteur linéarité de la voirie sont à présent testées. Plusieurs cartes axiales ont été successivement construites, en faisant varier la tolérance angulaire utilisée pour la définition des lignes axiales. Les distributions de fréquences obtenues en identifiant les itinéraires de moindre profondeur aboutissent à des coefficients r^2 en moyenne de 0,32.

Assez peu sensibles à la tolérance angulaire, ces coefficients restent nettement inférieurs à celui produit par le facteur d'accessibilité métrique.

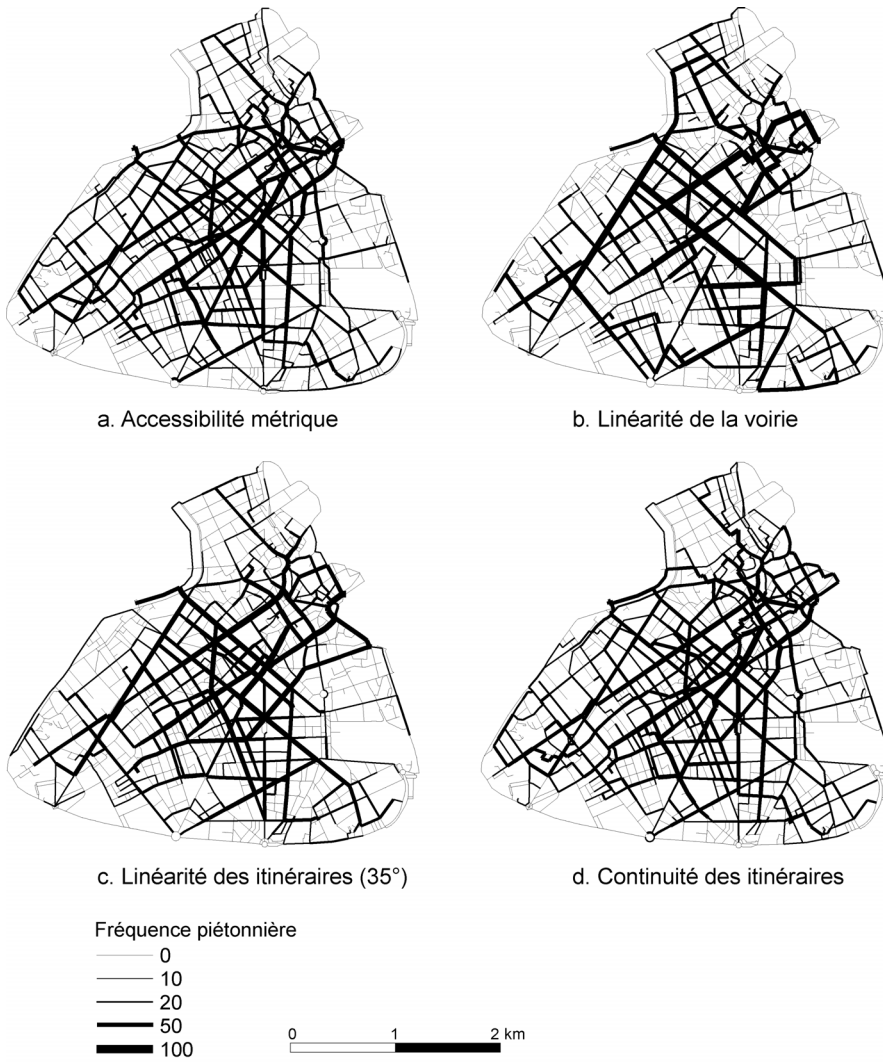
Le facteur linéarité des itinéraires a été appliqué en faisant varier le seuil angulaire de changement directionnel tous les 5° depuis 5° jusqu'à 120°. Les fréquences qui résultent des itinéraires minimisant ces changements directionnels montrent une relation variable avec les fréquences observées (Figure 7). La courbe du coefficient r^2 en fonction de l'angle montre deux pics : un premier autour de 30°, atteignant au maximum 0,52 ; un second autour de 80° ne dépassant pas 0,48. Pour les angles supérieurs à 90°, les valeurs chutent fortement. Enfin l'application du facteur continuité des itinéraires conduit à un coefficient r^2 de 0,50.

Figure 7. Pouvoir explicatif du facteur linéarité des itinéraires en fonction du seuil angulaire



Ce premier test portant sur la capacité de chaque facteur à prédire les fréquences observées montre d'abord la nette supériorité de l'accessibilité métrique. Les autres facteurs se placent tous à un niveau assez comparable en termes de part de variance. Leur cartographie montre une opposition entre les motifs spatiaux des flux (Figure 8) : alors que l'accessibilité métrique (a) et la continuité des itinéraires (d) se traduisent par une distribution relativement diffuse des piétons, avec un usage possible des rues de moindre importance, les critères de linéarité (b, c) produisent une forte concentration des fréquences sur des axes précis. Ceci est particulièrement visible pour la linéarité de la voirie (b), où une très forte hiérarchie est instaurée entre les rues, celles qui concentrent les flux suggérant les lignes axiales qui auraient obtenu un fort indice d'intégration selon les calculs de la syntaxe spatiale.

Figure 8. Cartes des fréquences piétonnières théoriques selon chaque facteur structurel



Il est à présent question de préciser les relations mutuelles entre les facteurs, en appliquant des régressions multiples en mode pas à pas. Les fréquences issues de l'accessibilité métrique étant les plus corrélées aux fréquences observées, elles sont combinées successivement aux autres groupes de fréquences. Dans tous les cas, la courbe de progression du coefficient r^2 en fonction de l'ajout des variables explicatives suggère que seulement deux variables suffisent, les autres n'apportant pas d'information utile. Partant d'un coefficient r^2 de 0,59, l'ajout du facteur linéarité de la voirie porte ce coefficient à 0,64 (Tableau 1) ; l'ajout du facteur linéarité des itinéraires est plus avantageux avec un coefficient à 0,67 ; enfin l'ajout du facteur continuité des itinéraires n'amène qu'à une valeur de 0,60.

Tableau 1 : Régressions multiples pour expliquer les fréquences piétonnières

Modèle	Variable	Coefficient de régression	Coefficient standardisé
Accessibilité métrique ($r^2=0,59$)	Constante	0,20	
	AM	0,82	0,77
Accessibilité métrique + Linéarité de la voirie ($r^2=0,64$)	Constante	0,16	
	AM	0,68	0,64
	LV	0,23	0,24
Accessibilité métrique + Linéarité des itinéraires ($r^2=0,67$)	Constante	0,16	
	AM	0,56	0,53
	LI (40°)	0,39	0,37
Accessibilité métrique + Continuité des itinéraires ($r^2=0,60$)	Constante	0,16	
	AM	0,59	0,56
	CI	0,25	0,24

AM représente la variable des fréquences issues du facteur d'accessibilité métrique, LV celle obtenue avec la linéarité de la voirie, LI avec la linéarité des itinéraires et enfin CI avec la continuité des itinéraires.

La régression appliquée avec toutes les séries de fréquences, c'est-à-dire combinant tous les facteurs, conduit à plusieurs modèles possibles, mais ici encore la progression du coefficient est très rapidement stabilisée suite à l'ajout du facteur linéarité des itinéraires. Ceci montre que les différents facteurs sont peu complémentaires d'un point de vue statistique.

L'ensemble des mêmes calculs a été réitéré avec des sous-échantillons d'OD correspondant à certains motifs de déplacement. Cette démarche peut être justifiée par l'idée que la relation entre les individus et le réseau viaire varie selon ces motifs. On peut supposer par exemple que le rôle de l'accessibilité métrique augmente dans le cas de déplacements à caractère obligatoire (travail), ou que le critère de continuité des itinéraires prend davantage d'importance quand il s'agit d'emmener des enfants à l'école. Cependant, les résultats obtenus ne permettent pas de confirmer ce type d'hypothèse, la hiérarchie entre les quatre facteurs proposés restant la même pour les différents motifs de déplacement. Il est néanmoins possible de remettre en cause ce constat en raison des faibles échantillons de trajets observés pour certains motifs.

4. DISCUSSION

Les comparaisons entre fréquences observées et théoriques montrent que l'accessibilité métrique est le premier critère qui entre en jeu, conformément à l'hypothèse intuitive « du moindre coût physique » déjà confirmée dans des travaux antérieurs (SENEVIRATNE, MORALL, 1985 ; BORGERS, TIMMERMANS, 1986).

La notion de continuité des itinéraires permet de modéliser 50 % de la variance des fréquences observées, mais n'apporte quasiment aucune information supplémentaire à l'accessibilité métrique. La grande ressemblance

entre les résultats de ces deux facteurs ($r = 0,89$) s'interprète comme une bonne homogénéité du réseau viaire, où les carrefours s'échelonnent de façon régulière en fonction de la distance métrique. Une amélioration du calcul de la continuité est possible en tenant compte de la plus ou moins grande difficulté de franchissement des carrefours ou de la présence éventuelle d'aménagement spécifiques. Pour réaliser cet affinement de l'analyse, il faudrait 1) soit modéliser le coût de franchissement à partir des seules données géométriques du réseau, par exemple en attribuant une difficulté supplémentaire aux carrefours impliquant davantage de voies ; 2) soit intégrer des informations supplémentaires comme le trafic routier, les conditions d'aménagement et le temps moyen d'attente aux passages pour piétons. La première option, qui a fait l'objet de quelques tests pour l'instant non concluants, ouvre le champ à de nouvelles questions, notamment celle de la fonction mathématique qu'il faudrait appliquer à la quantification de la pénibilité de franchissement. La seconde option nécessite une importante phase de collecte de données, si bien qu'elle n'apparaît pas facile à réaliser sur un réseau de taille conséquente comme celui qui a été étudié ici.

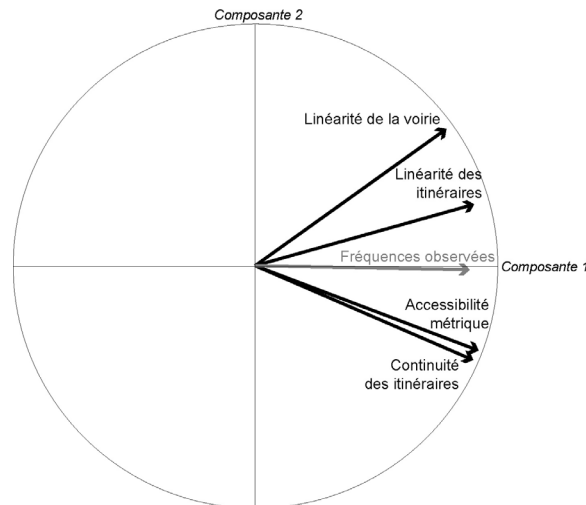
La contribution des deux facteurs de linéarité est plus importante que la continuité. La linéarité des itinéraires joue un rôle pour plusieurs gammes angulaires, autour de 30 et 80°. Le second seuil semble logique puisqu'il représente les changements directionnels radicaux propres aux plans urbains en damiers. Les résultats obtenus pour le premier seuil sont plus surprenants, les changements directionnels à 30° étant intuitivement moins pénalisants que les angles droits. Peut-être la nature peu marquée de ces changements de direction est-elle précisément en cause, puisqu'il a été montré que les angles intermédiaires pouvaient perturber la représentation mentale des successions de tronçons (SADALLA, MONTELO, 1989). Dans ce cas, la nature binaire des calculs effectués représente peut-être une simplification trop grande du rôle de la linéarité sur la cognition spatiale des piétons, et d'autres formes de prise en compte des changements directionnels seraient à mettre en œuvre. Attribuer des impédances continues en fonction des écarts angulaires semble une piste intéressante, mais qui conduit comme précédemment à la question de la fonction mathématique à utiliser. Une première série d'investigations a été menée, en faisant jouer les valeurs angulaires de façon continue et en utilisant plusieurs fonctions (linéaire, logarithmique, exponentielle) ; ainsi calculé, le facteur de linéarité a obtenu un pouvoir explicatif égal au facteur défini par un seuil angulaire de façon binaire, sans toutefois apporter de gain supplémentaire. Globalement, le résultat obtenu ici souligne la tendance à privilégier les itinéraires plus rectilignes, au détriment éventuel de la plus courte distance. Ce constat rejoint les analyses effectuées par MARCHAND (1974).

Le facteur de linéarité de la voirie, empruntant la notion de ligne axiale à la syntaxe spatiale, contribue à un résultat proche du facteur précédent en ce qui concerne la part de variance expliquée. Ceci montre que malgré une logique de construction différente, les deux facteurs restent fortement redondants. Le

facteur de linéarité de la voirie présente toutefois moins de redondance avec l'accessibilité métrique, puisque seulement 30 % étaient expliqués initialement : la minimisation du nombre de lignes axiales parcourues (ou minimisation de la « profondeur ») s'avère donc plus complémentaire du facteur d'accessibilité métrique. Suivant ce constat, l'hypothèse du rôle de la configuration géométrique du réseau sur l'usage et les fonctions urbaines, telle qu'elle est proposée dans la syntaxe spatiale, semble pertinente. C'est toutefois par une analyse des trajets individuels qu'il serait possible de comparer plus précisément les deux facteurs de linéarité. Ici encore les plus courts chemins ont été calculés à partir d'une structure strictement topologique, et il serait utile de tester l'intérêt d'une pondération des changements directionnels, comme dans les travaux de TURNER (2000 ; 2001).

La synthèse des relations mutuelles peut être visualisée par le biais d'une analyse en composantes principales (Figure 9). Suivant la position des facteurs par rapport aux composantes, on constate que la linéarité de la voirie apporte une information plus spécifique que les autres facteurs par rapport à l'accessibilité métrique. Par rapport à certaines critiques adressées à la syntaxe spatiale (STEADMAN, 2004 ; RATTI, 2004), l'ensemble de ces résultats montre qu'une combinaison de facteurs doit être prise en compte. La notion de ligne axiale, insuffisante pour modéliser finement des choix d'itinéraires, restitue néanmoins dans l'usage du réseau viaire un aspect hiérarchique qui n'est pas intégré dans le critère de minimisation de la distance physique. Enfin sur le plan méthodologique, la démarche suivie pour le calcul du facteur linéarité de la voirie montre que malgré la forte coupure séparant les analyses de transport classiques et la syntaxe spatiale, il est néanmoins possible d'emprunter à ce domaine des concepts tout en les appliquant à la modélisation d'itinéraires.

Figure 9 : Cercle des corrélations de l'ACP réalisée avec les facteurs sélectionnés par régression.



Les fréquences observées ont été utilisées comme une variable passive.

5. CONCLUSION

Partant d'un ensemble de trajets piétonniers observés, un protocole d'analyse a permis de préciser la façon dont le réseau de voirie joue sur les fréquences de transit. Pour chaque OD, des itinéraires ont été définis à partir de quatre types de facteurs, aboutissant au calcul de fréquences théoriques de transit. Les analyses statistiques visant à prédire les fréquences observées à partir de ces fréquences théoriques ont permis de hiérarchiser les facteurs, en confirmant le rôle prépondérant de la distance métrique, modulé essentiellement par un critère de linéarité. Tels qu'elles ont pu être représentées à partir du réseau viaire, les coupures occasionnées par les carrefours n'apportent pas d'information pertinente par rapport à ces deux types de facteurs.

Plusieurs perspectives de ce travail peuvent être signalées, outre les raffinements méthodologiques déjà mentionnés. En l'état, les résultats obtenus pourraient être valorisés dans des démarches d'estimations des fréquences de transit, à partir des réseaux de voirie associés à des informations sur les générateurs et attracteurs de déplacement. Dans cette perspective, le facteur de linéarité des itinéraires pourrait ainsi s'ajouter au facteur classique de minimisation de la distance métrique.

Le choix d'une analyse à un niveau agrégé au tronçon de voirie a permis d'obtenir un premier ensemble de résultats, mais une investigation à un niveau plus fin serait souhaitable. En examinant chaque trajet indépendamment, des analyses de choix discrets (ANTONINI et al., 2006 ; PIOMBINI, FOLTÊTE, 2007) pourraient permettre de préciser davantage le rôle des facteurs structurels, et de lier ceux-ci à des informations individuelles (profil des personnes enquêtées par exemple).

Par ailleurs, le mouvement naturel conditionné par le réseau de voirie n'explique pas la totalité de la distribution des flux piétonniers. Parallèlement aux aspects métriques, topologiques et géométriques, des facteurs contextuels liés à des aspects environnementaux et paysagers peuvent aussi jouer un rôle : la morphologie des éléments de bâti (HANDY, 1996) et plus largement la visibilité sur les éléments constituant le paysage urbain (FOLTÊTE, PIOMBINI, 2007) sont des facteurs dont le rôle, même secondaire, a été montré. Par une intégration de ces facteurs dans la pondération des différents segments de la voirie (DUPUY, 1991), leur analyse est donc complémentaire à l'étude du rôle des structures viaires.

6. REMERCIEMENTS

Les analyses présentées ont été réalisées à partir de données acquises dans le cadre d'une ACI « Ville » du ministère de l'éducation, de la recherche et de la technologie (contrat 99V38). L'auteur remercie les membres du comité de lecture qui ont relu ce texte pour leurs remarques constructives.

RÉFÉRENCES

- ALFONZO M. A. (2005) To walk or not to walk? The Hierarchy of walking needs. **Environment and Behaviour**, n° 37, pp. 808-836.
- ALLEN W.B., LIU D., SINGER S. (1993) Accessibility measures of U.S. metropolitan areas. **Transportation Research B**, n° 27, pp. 439-449.
- AMAR G. (1993) Pour une écologie urbaine des transports. **Les annales de la recherche urbaine**, n° 59-60, pp. 140-151.
- ANTONINI G., BIELAIRE M., WEBER M. (2006) Discrete choice model of pedestrian walking behavior. **Transportation Research Part B**, n° 40, pp. 667-687.
- BATTY M. (1997) Predicting where we walk. **Nature**, n° 388, pp. 19-20.
- BATTY M. (2004) A new theory of Space Syntax. **CASA working papers series**, n° 75, University College London, 34 p.
- BATTY M., RANA S. (2004) The automatic definition and generation of axial lines and axial maps. **Environment and Planning B: Planning and Design**, n° 31, pp. 615-640.
- BORGERS A., TIMMERMANS H. (1986) A model of pedestrian route choice and demand for retail facilities within inner-city shopping areas. **Geographical Analysis**, n° 18, pp. 115-128.
- CERVERO R., KOCKELMAN K. (1997) Travel demand and the 3Ds: density, diversity, and design. **Transportation Research Part D**, n° 3, pp. 199-219.
- CONROY DALTON R. A. (2001) The secret is to follow your nose. **Proceedings of the 3rd International Space Syntax Symposium**, Atlanta, n° 47.
- DIJKSTRA E. W. (1959) A Note on Two Problems in Connection with Graphs. **Numerische Mathematik**, n° 1, pp. 269-271.
- DUPUY G. (1991) **L'urbanisme des réseaux, théories et méthodes**. Paris, Economica.
- FOLTÊTE J.-C., GENRE-GRANDPIERRE C., HOUOT H., FLITTI M. (2002) **Structures urbaines, offres de transport et comportement de mobilité**. Rapport de recherche ACI Ville-99V358, Ministère de l'Enseignement de la Recherche et de la Technologie, 199 p.
- FOLTÊTE J.-C., PIOMBINI A. (2007) Urban layout, landscape features and pedestrian usage. **Landscape and Urban Planning**, n° 81, pp. 225-234.
- FUJIYAMA T. (2005) **Investigating use of space of pedestrians**. Working Paper, Centre for Transport Studies, London.
- GENRE-GRANDPIERRE C. (2000) **Forme et fonctionnement des réseaux de transport : approche fractale et réflexion sur l'aménagement des villes**. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.

GENRE-GRANDPIERRE C. (2001) La structure topologique et fonctionnelle des réseaux routiers urbains comme déterminant de la géographie des flux de déplacements. **Actes du colloque Géopoint 2000**, Avignon, pp. 61-67.

GENRE-GRANDPIERRE C., FOLTÊTE J.-C. (2003) Morphologie urbaine et mobilité en marche à pied. **Cybergéo**, n° 248 (<http://193.55.107.45/articles/248res.htm>).

HANDY S. (1996) Methodologies for exploring the link between urban form and travel behaviour. **Transportation Research Part D**, n° 1, pp. 151-165.

HILLIER B. (1996) **Space is the machine: a configurational theory of architecture**. Cambridge, Cambridge University Press.

HILLIER B., HANSON J. (1984) **The social logic of space**. Cambridge, Cambridge University Press.

HILLIER B., PENN A., HANSON J., GRAJEWSKI T., XU J. (1993) Natural movement: or, configuration and attraction in urban pedestrian movement. **Environment and Planning B: Planning and Design**, n° 20, pp. 29-66.

INGRAM D. R. (1971) The concept of accessibility: a search for an operational form. **Regional Studies**, n° 5, pp. 101-107.

JIANG B., CLARAMUNT C., BATTY M. (1999) Geometric accessibility and geographic information: extending desktop GIS to space syntax. **Computers, Environment and Urban Systems**, n° 23, pp. 127-146.

JIANG B., CLARAMUNT C., KLARQVIST B. (2000) An integration of space syntax into GIS for modelling urban spaces. **Journal of American Geographers**, n° 2, pp. 161-171.

JIANG B., CLARAMUNT C. (2002) Integration of Space Syntax into GIS: new perspectives for urban morphology. **Transactions in GIS**, n° 6, pp. 295-309.

LILLE MÉTROPOLÉ (1999) **Les déplacements urbains dans la métropole lilloise**. Mission PDU de Lille Métropole.

MARCHAND B. (1974) Pedestrian traffic planning and the perception of the urban environment: A French example. **Environment and Planning A**, n° 6, pp. 491-507.

PENN A. (2003) Spatial Syntax and Spatial Cognition or Why the Axial Line? **Environment and Behavior**, n° 35, pp. 30-65.

PIOMBINI A., FOLTÊTE J.-C. (2007) Évaluer les choix d'itinéraires pédestres en milieu urbain. In C. TANNIER, M.-H. DE SEDE-MARCEAU (dir.) *Dynamiques urbaines et mobilités*. **Revue Internationale de Géomatique**, n° 17, pp. 207-225.

PORTA S., CRUCITI P., LATORA V. (2006) The network analysis of urban streets: a primal approach. **Environment and Planning B**, in press.

- RATTI C. (2004) Space syntax: some inconsistencies. **Environment and Planning B: Planning and Design**, n° 31, pp. 487-499.
- SADALLA E.K., MONTELLO D. R. (1989) Remembering changes in direction. **Environment and Behavior**, n° 21, pp. 346-363.
- SENEVIRATNE P.N., MORRALL J. F. (1985) Analysis of factors affecting the choice of route of pedestrians. **Transportation Planning and Technology**, n° 10, pp. 147-159.
- STEADMAN P. (2004) Guest editorial. **Environment and Planning B: Planning and Design**, n° 31, pp. 483-486.
- TURNER A. (2001) Angular analysis. **Proceedings of the 3rd International Space Syntax Symposium**, Atlanta, n° 30.
- TURNER A. (2000) Angular analysis: a method for the quantification of space. **CASA Working Paper**, n° 23.
- TURNER A., PENN A., HILLIER B. (2005) An algorithmic definition of the axial map. **Environment and Planning B: Planning and Design**, n° 32, pp. 425-444.