

Compacité et forme urbaine, une analyse environnementale dans la perspective d'un développement urbain durable

Gilles MAIGNANT, Chargé de recherche CNRS, UMR 6012 ESPACE, CNRS, maignant@unice.fr

Mots Clefs : compacité, forme, indicateurs de durabilité, pollution de l'air, fractale, risques

INTRODUCTION

De nombreuses études préconisent une ville compacte comme ville durable. Pourtant aucune étude ne démontre clairement qu'une ville compacte a de meilleures performances environnementales. Cet article se propose d'étudier les liens entre forme urbaine et environnement en mettant l'accent sur l'aspect pollution de l'air, climatologie et santé, notamment à travers de nouveaux indicateurs d'exposition personnelle. Après avoir défini quelques concepts liés à l'analyse de la forme urbaine (indices de forme, densité, dimension fractale, indice de construction de Landsberg, etc.), nous tenterons de savoir si la densification du tissu urbain est souhaitable ou pas ? Et si oui, selon quels critères ? L'analyse proposée est tridimensionnelle, la verticalité urbaine est ainsi introduite dans les modèles numériques construits. En effet, la forme urbaine ne peut être appréhendée de manière réaliste en deux dimensions, en particulier en matière de flux de polluants transportés par les champs de vent directement modifiés par la troisième dimension des constructions. Ces modèles permettent d'évaluer comment les flux de polluants, émis par le trafic, sont transportés et modifiés par la morphologie urbaine et les champs de vents. De plus, ils sont un complément d'analyse de la pollution intra urbaine par rapport au faible nombre de stations de mesures des agences de surveillance de la qualité de l'air. Par ailleurs, nous montrons comment la morphologie urbaine freine, accélère ou bloque la dispersion de polluants. Nous chercherons ainsi des configurations spatiales urbaines optimales pour la dispersion de polluants (largeur des artères, hauteurs des constructions, espacements, porosité etc.).

Enfin des indices d'exposition de la population face à la charge polluante quotidienne, à l'échelle de la rue ou d'un quartier, sont créés. Ces indicateurs, qui sont à la fois qualitatifs et quantitatifs, permettent de rendre compte de l'anisotropie spatiale des immissions et donc des charges polluantes respirées par le citoyen, à l'échelle de la rue. De nouvelles analyses, basées sur la géométrie fractale et la morphologie mathématique, en particulier sur l'analyse de l'évolution de la dimension fractale en fonction de la hauteur des bâtiments, sont présentées. Les liens entre morphologie urbaine, concentrations et expositions sont tissés.

Les impacts de la forme urbaine sur les risques sanitaires – bruit et canicule seront également abordés et une réflexion sera engagée sur la vulnérabilité de la ville compacte. La ville de demain sera sûrement la ville qui minimisera les contraintes environnementales tout en maximisant la qualité de vie et de services, une telle ville ne peut être conçue que dans le cadre d'une recherche pluri – disciplinaire et grâce à une vision globale.

1. ELEMENTS DE CARACTERISATION DE LA FORME URBAINE, DEFINITION D'INDICATEURS

Le mot forme revêt dans la langue française un grand nombre de sens. La plupart d'entre eux renvoie à une notion voisine de l'apparence (état, aspect, ...). La forme a donc une connotation subjective liée à la notion de perception qui est fonction des acquis de chaque individu. Elle est aussi analytique, il existe des outils concrets, plus ou moins efficaces, de caractérisation des formes. Il peut exister plusieurs variantes d'un même type de formes. Les mathématiciens se sont beaucoup intéressés à cette notion, avec une vision essentiellement géométrique, les physiciens, eux, se sont davantage intéressés aux configurations spatiales notamment avec l'arrangement des molécules. La géographie ou plus généralement les sciences sociales se sont, quant à elles penché vers l'analyse des formes en tant qu'espace perçu, vécu, dans l'analyse de formes cachées et dans la représentation des formes spatiales.

Une forme est compacte¹ si elle est constituée d'un seul morceau et sans trou, une forme connexe est elle aussi constituée d'un seul morceau mais peut comporter des trous : pour passer d'un point de la structure à un autre, le chemin en ligne droite n'existe pas forcément, mais un chemin existe tout de même (continuité du substrat : une

¹Au sens mathématique du terme, les géographes utilisent des indicateurs du degré de compacité.

île et la terre ferme constituent non pas une forme mais deux) ; elle est dit simplement connexe si tout chemin fermé reliant deux points de la forme appartient à la forme.

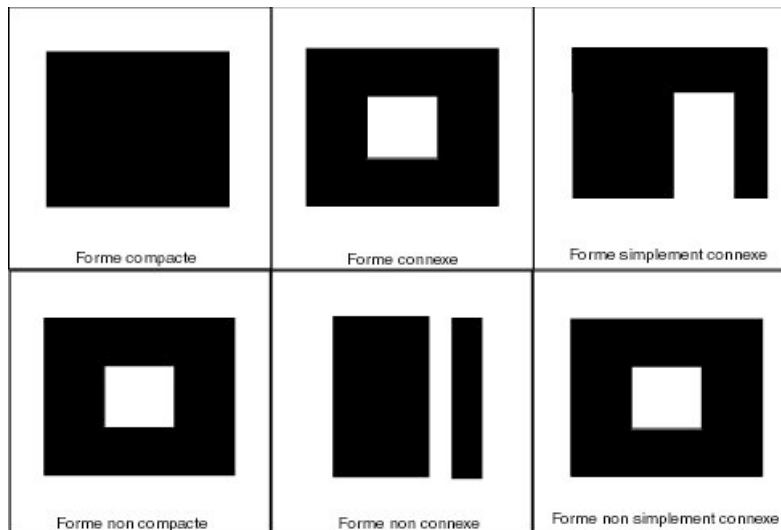


Fig. 1 : Formes compactes, connexes, simplement connexes ou non

Les formes qui nous entourent peuvent être appréhendées par différents indicateurs. Par définition, un indicateur est une donnée, sélectionnée dans un ensemble statistique plus important qui possède une signification et une représentativité particulières, c'est aussi un instrument capable de convoyer de l'information sous forme synthétique, par le biais de différentes représentations (nombres, graphiques, cartes thématiques, etc.). Un indicateur n'est donc pas forcément quantitatif.

Trois indices classiques d'étude des formes sont à notre disposition, connus sous les noms de Miller, Morton et Gravélius. Pour les trois formules, S désigne la surface de la forme, P le périmètre de la forme et T désigne l'étalement de la forme, c'est à dire la longueur maximale dans toutes les directions. Ce type d'indices est très utilisé dans les calculs d'optimisation de formes, par exemple obtenir la plus grande surface avec le périmètre le plus petit possible.

Forme géométrique	Indice de Miller $I_{Miller} = \frac{4\pi S}{P^2}$	Indice de Morton $I_{Morton} = \frac{S}{\pi(0.5T)^2}$	Indice de Gravélius $I_{Gravélius} = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}}$
Cercle (rayon = R)	1	1	1
Hexagone (côté = a)	$\frac{\sqrt{3}\pi}{6} = 0.90$	$\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} = 0.83$	$\frac{3\sqrt{2}}{\sqrt{3\pi}\sqrt{3}} = 1.05$
Carré (côté = c)	$\frac{\pi}{4} = 0.78$	$\frac{2}{\pi} = 0.63$	$\frac{2}{\sqrt{\pi}} = 1.12$
Rectangle (longueur = L, largeur = l) exemple : L=10 ; l=5	$\frac{\pi L \cdot l}{(L+l)^2}$ 0.69	$\frac{4}{\pi} \frac{L \cdot l}{L^2 + l^2}$ 0.51	$\frac{L+l}{\sqrt{\pi L \cdot l}}$ 1.20
Ligne (longueur = L)	0	0	Non défini

Fig. 2 : Indices de Miller, Morton et Gravélius de formes géométriques simples

L'indice de Miller varie de 0 (forme linéaire) à 1 (forme circulaire), tout comme l'indice de Morton. Ainsi pour ces deux indices, plus la forme est régulière plus l'indice se rapproche de 1, à la limite un cercle est un polygone régulier à n côtés avec n tendant vers l'infini (l'aire d'un cercle a d'ailleurs été découverte par ce procédé). L'indice de Gravélius quant à lui, varie dans le sens inverse des deux autres indices, de 1 à l'infini. Remarquons que ces trois indices n'ont pas de dimension², leur valeur représente une donnée absolue, elle permet d'établir

²Un indice est sans dimension s'il est le rapport de données de même dimension.

des comparaisons quelles que soient les formes retenues. Les trois indices renseignent sur la compacité des formes. Ainsi plus une forme est compacte, plus son indice tend vers 1.

Pour la ville de Nice, la surface est de 74 km², le périmètre de 60.15 km et l'étalement est de 14.7 km. A partir de ces données produites par un SIG, nous avons calculé les trois indices précédents sur la ville de Nice, les résultats sont les suivants. L'indice de Miller et l'indice de Morton sont respectivement de 0.26 et 0.44. Ces faibles valeurs informent que la ville se rapproche plus d'une ligne que d'un cercle. L'indice de Gravélius vient confirmer cette idée avec une valeur de 1.97. Ces résultats montrent que la ville de Nice est très peu compacte.

Indicateurs de formes urbaines bi et tridimensionnels

Trois indicateurs de formes urbaines composent l'analyse bidimensionnelle :

- Le rapport **surface/périmètre**, il peut prendre toutes les valeurs possibles : une surface peut être plus grande ou plus petite que le périmètre de cette forme. Il s'exprime en unité de longueur.
- Le rapport **surface de la ville/surface du cercle circonscrit** (centré sur le centre géodésique), il est nécessairement inférieur à 1. Il n'a pas de dimension.
- Le rapport du **rayon du cercle inscrit/surface du cercle circonscrit**, il est aussi nécessairement inférieur à 1 car le rayon du cercle inscrit est inférieur ou égal au rayon du cercle circonscrit. Il s'exprime comme l'inverse d'une longueur.

Différents indices ont été mis en place pour rendre compte de la complexité **tridimensionnelle** de la morphologie urbaine. Les deux principaux sont **l'indice de forme et l'indice de construction de Landsberg**. Ils constituent deux éléments de caractérisation de l'espace bâti en milieu urbain.

L'indice de forme urbaine, directement lié à la construction, peut être défini par la formule suivante : $I_F = h^2/S$, avec h : la hauteur du bâti et S la surface au sol, autrement dit l'emprise. Cet indice est sans dimension car h² et S ont la même dimension, la dimension d'une surface. Autrement dit, il est un indicateur absolu. Cet indice est un **indicateur morphologique, calculable pour un immeuble, sur le quartier ou la ville entière, donnant une information sur chacun des bâtiments indépendamment des autres** (autrement dit l'espacement entre eux-ci). Plus l'indice de forme urbaine est grand et plus la ville est dense verticalement. L'indice appartient à l'intervalle]0,α] avec α=sup (h²/S) permis par les contraintes de construction (COS³).

Quant à l'indice de construction de Landsberg, défini par : $I_C = h/L^4$, avec h : la hauteur du bâti et L la largeur de la rue, il informe sur la morphologie des artères. En effet, il permet de souligner l'écartement entre deux bâtiments situés de part et d'autre de l'artère. Il est lui aussi sans dimension, il représente donc une valeur absolue. L'indice de construction de Landsberg est indispensable à la compréhension des phénomènes de pollution, en effet **deux artères de même largeur, de hauteurs de bâti différentes et supportant le même trafic n'auront pas la même charge polluante**. Statistiquement, en Europe le rapport h/L est souvent proche de 1 mais certaines rues ne sont pas symétriques dans le sens où les constructions de part et d'autre de la rue peuvent ne pas avoir la même hauteur, de plus il peut exister des portions d'artères sans bâtiments d'un côté. C'est surtout dans les quartiers anciens que l'on trouve des artères de type canyon, car non conçues initialement pour l'automobile. Ces différentes considérations font qu'une étude sur la pollution urbaine ne peut être appréhendée que par des modèles tridimensionnels.

³Le COS fixe la surface des constructions pouvant être supportée sur un terrain. Il détermine la densité de construction admise c'est à dire le rapport exprimant le nombre de mètres carrés de plancher hors oeuvre nette ou le nombre de mètres cubes susceptibles d'être construits par mètre carré de sol.

⁴Les anglo-saxons utilisent le même indice mais inversé W/H où W est la largeur et H la hauteur. Dans ce cas, une rue canyon est une rue pour laquelle le rapport W/H est inférieur à 1.


Désignation de l'indice	Formule de l'indice	Valeur pour la ville de Nice 
Indice de Miller	$I_{Miller} = \frac{4\pi S}{P^2}$	0.26
Indice de Morton	$I_{Morton} = \frac{S}{\pi(0.5T)^2}$	0.44
Indice de Gravélius	$I_{Gravélius} = \frac{P}{2\sqrt{\pi S}}$	1.97
Indice n°1	$\frac{S}{P}$	1.23
Indice n°2	$\frac{S_V}{S_{\text{cercle circonscrit}}}$	0.42
Indice n°3	$\frac{r_{\text{rayon cercle inscrit}}}{S_{\text{cercle circonscrit}}}$	0.015
Indice de forme (valeur moyenne)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{h^2}{S}$	Non calculé, manque de données
Indice de Landsberg (valeur moyenne)	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{h}{L}$	Non calculé, manque de données

Fig. 3 : Synthèse des indices morphologiques et exemple de la ville de Nice

La forme bâtie joue alors un rôle fondamental dans cette lecture. C'est d'ailleurs vue d'en haut, que la structure de la forme urbaine se dévoile. La vision tridimensionnelle permet une meilleure approche de la structure, décèle les espaces libres, utilisables ou non, elle révèle aussi la trame urbaine difficilement perceptible pour l'observateur.

De nombreuses études sur l'étalement urbain considère la notion de densité moyenne (hab./km²) comme critère dominant. Pourtant cette notion est assez pauvre en informations, même si des liens existent entre densité de population et morphologie de bâti. Dans les villes méditerranéennes, la diversité de types de bâti engendre une grande dispersion autour de la moyenne et rend chaotique toute vision synthétique de la ville même à l'échelle d'un quartier.

Il est beaucoup plus pertinent de travailler sur la densité volumétrique de bâti que sur la densité de population, autrement dit sur l'indice de l'utilisation du sol qui exprime le rapport entre la surface du terrain à bâtir et la surface de plancher habitable. Cet indice est donc en lien étroit avec le nombre d'étages. L'analyse des textures urbaines (formes bâties, disposition, écartement entre les structures) montre une diversité sur la ville avec des contrastes plus ou moins marqués. La mesure fractale du bâti intra urbain permet de calculer la densité de bâti et révéler ainsi les contrastes intra urbains (remplissage inégal de l'espace urbain).

On trouve dans la nature des formes⁵ qui ne peuvent être définies par des figures géométriques simples telles que le cercle, le rectangle, le triangle etc. Ceci est du à l'irrégularité de celles-ci. L'impossibilité de décrire ces formes, de façon simple, a poussé les scientifiques à développer une nouvelle géométrie permettant de les appréhender, il s'agit de la **géométrie fractale**. "La géométrie fractale est la géométrie des objets qui sont invariants quand on opère sur eux une dilatation." (Sapoval) La géométrie fractale est apparue sérieusement, dans les années 70, dans les travaux de Mandelbrot, mais cette notion regroupe différentes recherches énoncées, bien avant, dans les écrits de nombreux mathématiciens comme Cantor et Peano.

Le bâti niçois, pris de manière individuelle, est très hétérogène, tant horizontalement que verticalement. La superficie moyenne du bâti (superficie cadastrale, c'est à dire l'emprise au sol) est de 184 m². Mais il existe des bâtiments possédant une superficie au sol de plus de 6000 m², rendant la moyenne très peu significative. Même s'il existe des zones relativement homogènes, la grande variabilité des surfaces se retrouve à travers le calcul de la dimension fractale du bâti niçois. Plus la dimension fractale du bâti tend vers 2, plus le bâti occupe l'espace et plus la porosité décroît. Comme le précise Woloszyn, "les mesures fractales caractérisent directement le degré d'homogénéité de la répartition des éléments urbains de l'espace."

La notion de fractale est essentiellement déterminée par la propriété de similarité, bien évidemment dans le cas des structures urbaines, cette similarité ne peut être respectée complètement, elle est simplement statistique. Pour souligner ce point nous avons calculé la dimension fractale du bâti de trois zones : Nice centre, Nice Est, Nice Ouest. Ces calculs ont été effectués par la méthode des boîtes, implémentée dans un logiciel de morphologie mathématique. Le processus utilise des dilatations et des érosions successives sur la forme bâtie. Plus les bâtiments sont proches, plus les espaces dilatés se joignent vite. Les agrégats formés donnent les zones les plus densément bâties (vision bidimensionnelle) et révèlent les vacuités.

Les résultats sont les suivants : 1.71 pour Nice centre, 1.59 pour Nice Est et 1.45 pour Nice Ouest. Ainsi la morphologie urbaine est multi fractale, c'est à dire fractale à plusieurs échelles d'analyse de la ville. A l'échelle intra urbaine, les mesures renseignent sur la densité de bâti par zone et révèle les zones d'agglomération condensée de la ville. Les mesures fractales sont complémentaires des mesures traditionnelles sur la forme urbaine. Pour l'ensemble de la ville de Nice, on trouve une dimension fractale de bâti égale à 1.69. Ces résultats ont été faits sur des données bidimensionnelles de bâti mais il est fortement probable que ces différences seraient conservées dans une analyse tridimensionnelle car les zones peu densément peuplées, le sont aussi verticalement (habitat résidentiel).

Plus la dimension fractale est proche de 2, plus la masse bâtie occupe de l'espace et moins les vacuités exploitables ou pas sont présentes, et plus la zone considérée est compacte.

⁵Aussi appelées monstres mathématiques



Fig. 4 : Les trois zones considérées pour le calcul des dimensions fractales du bâti

2. CONFIGURATIONS SPATIALES D'ARTERES ET CONCENTRATIONS DE POLLUANTS

Le but de ce paragraphe est d'étudier la sensibilité des configurations urbaines face à la pollution de l'air. Pour cela on utilise un logiciel simple d'évaluation et de simulation de la qualité de l'air à l'échelle de la rue STREET.

L'utilisateur doit renseigner le logiciel avec les données ou les estimations suivantes :

- Affectation des voies dans la typologie proposée (98 configurations)
- Intégration des paramètres géographiques, orientation de la rue, pente...
- Classification des zones environnantes selon la charge polluante de fond
- Détermination ou évaluation des conditions météorologiques locales (direction et vitesse moyenne du vent)
- Entrée des données spécifiques de circulation automobile : quantité de véhicules (dans les deux sens de la rue, par jour), répartition fine du trafic (part des poids lourds / véhicules personnels, taux d'encombres, bouchons).

Le modèle d'évaluation *STREET* indique à l'utilisateur si, à un carrefour ou sur les trottoirs, les valeurs limites en vigueur ont toutes les chances d'être dépassées ou si elles sont régulièrement dépassées. Les polluants considérés sont : le dioxyde d'azote, les particules, les composés organiques volatils dont le benzène, les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone et le dioxyde de soufre. Le raisonnement est basé sur les moyennes annuelles à l'exception du dioxyde d'azote pour lequel on considère le percentile 98, le percentile 50 et la moyenne. Les calculs de moyennes annuelles et de percentiles 98 sont établis à partir des données de type de voie, de trafic, sur la pollution de fond et sur les paramètres météorologiques (direction et vitesse moyenne du vent).

STREET est un outil précieux de prospective et d'aide à la décision (utilisé par les DDE, les mairies, les collectivités territoriales etc.) axé vers les plans de déplacements urbains et les plans régionaux de qualité de l'air. En effet, il permet de simuler différents scénarios sans nécessiter de campagnes de mesures particulières et permet de faire des simulations, pour le long terme, pour des années allant de 1995 à 2020.

Les immissions de polluants au niveau des piétons peuvent varier très fortement en fonction de nombreux paramètres dont l'orientation de la rue, de son exposition aux vents dominants, de sa pente, de sa largeur, du caractère continu, discontinu ou de l'absence de constructions qui la bordent. **Aussi le but de ce paragraphe est d'étudier la sensibilité du choix des configurations de rues, non pas dans le but de modéliser la situation présente, qui de toute manière est peu fluctuante, mais plutôt d'envisager des perspectives futures d'aménagement de l'espace tenant compte de ces aspects morphologiques.** Ainsi cette étude de sensibilité morphologique est réalisée toutes choses égales par ailleurs c'est à dire pour des mêmes conditions de circulation et des conditions météorologiques constantes. En effet, afin d'étudier l'impact de la morphologie urbaine sur les concentrations de polluants, il n'est pas souhaitable de faire varier les conditions météorologiques notamment la vitesse du vent car il est reconnu que statistiquement, le taux des concentrations dans l'air ambiant (immissions) à un endroit donné varie de manière quasi linéaire avec la vitesse du vent. Plus la vitesse est forte, plus la concentration des immissions baisse pour des émissions constantes. Les vents faibles sont donc les vents polluants. Les concentrations ont été calculées pour sept polluants (les composés organiques volatils, le benzène, les particules de taille inférieure à 10 µm (PM10), les oxydes d'azote, le dioxyde d'azote, le monoxyde de carbone et le dioxyde de soufre) et 98 configurations de rues englobant toute la diversité urbaine. Pour le dioxyde d'azote, le percentile 98, la moyenne et le percentile 50 (médiane) sont évalués. De plus, le nombre de jours annuels de dépassement de seuil pour les PM10 et le dioxyde d'azote sont comptabilisés. Les paramètres fixés au préalable sont condensés dans le tableau suivant :

Morphologie de l'artère		Trafic		Pollution	
Orientation de la rue	140	Référence	2003	Pollution de fond	SZ
Bon état de la rue	oui	Circulation journalière	10000	Valeurs guides	2002
Pente de l'artère	0 %	VUL (%)	10		
Confiance	90 %	PL (%)	5		
Jour de pluie	30 %	Bus (%)	5		
Direction du vent	Nord-Sud	2 roues (%)	5		
Vitesse du vent	2,5 m/s	Catégorie de circulation	F2 ⁶		
		Bouchons (%)	20		

Fig. 5 : Paramètres fixés pour l'étude

⁶La catégorie de circulation F2 correspond à une voie principale avec feux, faiblement perturbée pour laquelle la vitesse moyenne de circulation est de 28 km/h, catégorie qui représente la situation la plus fréquente dans les centres villes étudiés, la catégorie SZ correspond à une pollution de fond caractéristique des centres-villes.

Il est couramment admis dans les études de pollution qu'une direction de vent égale à l'axe de la rue, favorise la dispersion de polluants, aussi nous nous sommes placés dans un cas différent.

En ce qui concerne le calcul des immissions de particules (PM10) deux calculs préliminaires sont nécessaires, il s'agit des particules produites par échappement et par abrasion. Pour calculer la remise en suspension des PM10 par l'abrasion, il est nécessaire de connaître le nombre de jours de pluies en pourcentage. Par définition, un jour de pluie est un jour où il est tombé plus de 0.1 l/m² en 24 heures. L'abrasion est alors calculée selon la méthode établie par Düring et Lohmeyer à partir des travaux initiaux de l'EPA. La formule est la suivante :

$$PM10_{abr} = PM10_a * 0.18 (PM10_{sl})^{0.52} * (poids\ moy)^{2.14} * (1/0.85) * (1 - 0.5 * jours\ de\ pluie)$$

Le poids moyen des véhicules circulant sur l'axe est exprimé en tonnes (en général : 1.1 t pour les voitures, 1.9 t pour les véhicules utilitaires légers et 9 t pour les camions). Les valeurs des paramètres PM10_a et PM10_{sl}, exprimées en g/m², valeurs moyennes indépendantes du type de véhicules, sont consignées dans le tableau suivant. Le paramètre mauvais état de la rue correspond à une rue sans couche goudronnée et avec des trous en formation, ce qui est assez rare ou temporaire dans le cœur des agglomérations. Dans le doute, il est préférable d'effectuer les calculs avec le paramètre "bon état de la rue".

	Bon état	Mauvais état
PM10 _a	0.8	2.0
PM10 _{sl}	0.2	0.4

Fig. 6 : Tableau des valeurs des facteurs pour le calcul de l'abrasion

Ces calculs sont effectués pour des conditions moyennes de trafic.

PM10 _{abr}	Bon état	Mauvais état	Amplification
Voitures particulières	0.08	0.28	3.5
Véhicules utilitaires légers	0.25	0.91	3.64
Poids lourds	7.07	25.35	3.58

Fig. 7 : Calcul des PM10 par abrasion selon les catégories de véhicules et l'état de la rue.

Un mauvais état de la rue amplifie l'intensité des PM10 par abrasion d'un facteur 3.5. Les poids lourds produisent à eux seuls, 95,5% des PM10 par abrasion que ce soit pour une rue en bon état ou en mauvais état. Autrement dit, pour diminuer les PM10 par abrasion en ville, il faut des rues en bon état et limiter l'accès au poids lourds dans les villes. C'est en outre un des éléments développés dans les plans de déplacements urbains des grandes agglomérations. Un premier calcul montre qu'en moyenne, pour des trafics identiques (toutes choses égales par ailleurs), une rue à quatre voies sera moins polluée qu'une rue à deux voies de circulation. Cependant, en matière d'aménagement, cela ne signifie pas qu'il faille instaurer des quatre voies partout, car le trafic pourrait alors être augmenté et réduirait à néant les bienfaits du travail sur la morphologie.

Rues à deux voies

Regardons plus en détail les différentes configurations possibles de rues à deux voies et possédant des bâtiments de part et d'autre⁷ de l'artère (configurations : S2LB, S2DB, S2DH, S2BS, S2DS, S2BG, S2GS, S2NB, S2U1, S2U2, S2U3). Le descriptif de ces configurations est consigné dans le tableau suivant :

Noms des configurations	Descriptifs des configurations
S2LB	Rue à 2 voies – bâtiments alignés à grandes distances H : L=1 : 3
S2DB	Rue à 2 voies – bâtiments alignés à moyennes distances H : L=1 : 2
S2DH	Rue à 2 voies – bâtiments hauts alignés à moyennes distances H : L=1 : 1.5
S2BS	Rue à 2 voies – bâtiments alignés à courtes distances H : L=1 : 2
S2DS	Rue à 2 voies – bâtiments hauts et immeubles à étages à courtes distances H : L= 1 : 1
S2BG	Rue à 2 voies – bâtiments mitoyens H : L=1 : 2

⁷Dans ces configurations, on ne considère pas les rues sans bâtiments, ni celles comportant un alignement unilatéral de bâtiments, qui sont des cas rares dans le cœur des villes et qui ne représentent pas un danger majeur en matière de pollution.

S2GS	Rue à 2 voies – bâtiments mitoyens H : L=1 : 1
S2NB	Rue à 2 voies – bâtiments alignés à moyennes distances et pare-bruits bilatérales, distance rue-bâtiment 10 mètres - H : L=1 : 2.5
S2U1	Rue à 2 voies – passage d'un alignement à grandes distances à une rangée fermée – H : L= 1 : 2
S2U2	Rue à 2 voies – passage d'un alignement à grandes distances à une rangée fermée - H : L=1 : 1
S2U3	Rue à 2 voies – passage d'une grande à une petite distance des rangées – bâtiments alignés à moyennes distances, H : L=1 : 4 □ 1 : 1

Fig. 8 : Ensemble des configurations possibles sous STREET pour une rue à deux voies avec bâtiments

Dans toutes les configurations à deux voies, intervient le rapport $H : L^8$, ce rapport est appelé indice de construction de Landsberg, où H désigne la hauteur du bâti et L la largeur de la rue, il informe sur la morphologie des artères. En effet, il permet de souligner l'écartement entre deux bâtiments situés de part et d'autre de l'artère. Il est sans dimension, il représente donc une valeur absolue, exploitable pour tout type de morphologie. L'indice de construction de Landsberg est indispensable à la compréhension des phénomènes de pollution, en effet **deux artères de même largeur, de hauteurs de bâti différentes et supportant le même trafic n'auront pas la même charge polluante**. Statistiquement, en Europe le rapport H/L est souvent proche de 1 mais certaines rues ne sont pas symétriques dans le sens où les constructions de part et d'autre de la rue peuvent ne pas avoir la même hauteur, de plus il peut exister des portions d'artères sans bâtiments d'un côté (alignement unilatéral). C'est surtout dans les quartiers anciens que l'on trouve des artères de type canyon, car non conçues initialement pour l'automobile. **Ces différentes considérations font qu'une étude sur la pollution urbaine ne peut pas être appréhendée par des modèles bidimensionnels.**

En ce qui concerne les composés organiques volatils, le benzène, les PM10, le monoxyde de carbone et le dioxyde de soufre, on constate que les configurations qui produisent les plus fortes concentrations sont S2U2, S2DS et S2GS. Or ces configurations correspondent à des indices de construction de Landsberg de 1, c'est à dire des rues canyons favorables à l'accumulation de polluants. La configuration la plus néfaste est la S2GS. Le passage de la configuration S2DS à la configuration S2GS fait augmenter les concentrations en COV de 52.5 %, de benzène de 22.9%, de PM10 de 26.8%, d'oxydes d'azote de 25.2 %, de monoxyde de carbone de 25.2% et de dioxyde de soufre de 15.3%. Essayons de voir ce qui différencie ces deux configurations (figure suivante).

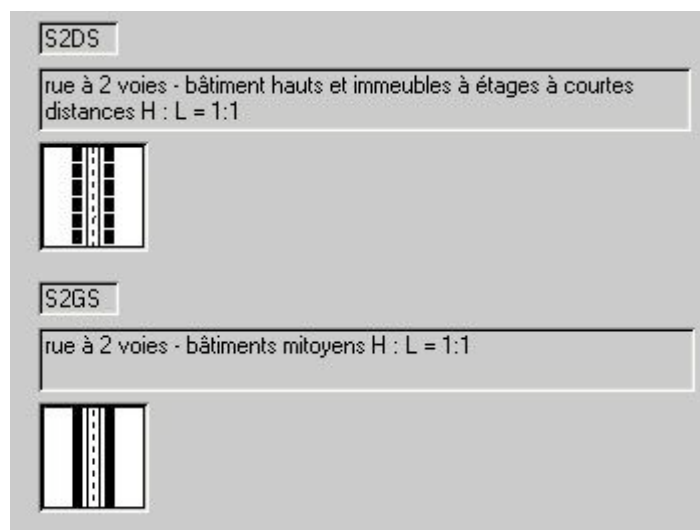


Fig. 9 : Configurations S2DS et S2GS sous STREET

Dans les deux configurations, l'indice de construction de Landsberg est le même, pourtant les niveaux de polluants varient dans des proportions importantes. Un autre élément intervient donc, il s'agit de l'écartement entre bâtiments qui permet à la pollution de coloniser un espace plus grand et faire ainsi baisser les taux (facteur de porosité). Plus la ville est poreuse, plus les espaces colonisables ou pas par les flux de polluants sont importants et plus les concentrations ont des chances de baisser.

⁸Les anglo-saxons utilisent le même indice mais inversé W/H où W est la largeur et H la hauteur. Dans ce cas, une rue canyon est une rue pour laquelle le rapport W/H est strictement inférieur à 1.

Rues à quatre voies

En ce qui concerne les rues à quatre voies avec bâtiments de par et d'autre de l'axe, les configurations suivantes sont possibles (S4LB, S4DB, S4DH, S4BS, S4DS, S4BG, S4GS, S4NB, S4U1, S4U2, S4U3). Le descriptif de ces configurations est consigné dans le tableau suivant :

Noms des configurations	Descriptifs des configurations
S4LB	Rue à 4 voies ou plus - bâtiments alignés à grandes distances H : L=1 : 3
S4DB	Rue à 4 voies ou plus - bâtiments alignés à moyennes distances H : L=1 : 2
S4DH	Rue à 4 voies ou plus - bâtiments hauts alignés à moyennes distances H : L=1 : 1.5
S4BS	Rue à 4 voies ou plus - bâtiments alignés à courtes distances H : L=1 : 2
S4DS	Rue à 4 voies ou plus - bâtiments hauts et immeubles à étages à courtes distances H : L=1 : 1
S4BG	Rue à 4 voies ou plus - bâtiments mitoyens H : L=1 : 2
S4GS	Rue à 4 voies ou plus - bâtiments mitoyens H : L=1 : 1
S4NB	Rue à 4 voies ou plus - bâtiments alignés à moyennes distances et pare - bruits bilatéraux, distance rue - bâtiment 12 mètres - distances H : L=1 : 4
S4U1	Rue à 4 voies ou plus - passage d'un alignement à grandes distances à une rangée fermée - H : L=1 : 1.5
S4U2	Rue à 4 voies ou plus - passage d'un alignement à grandes distances à une rangée fermée - H : L=1 : 2
S4U3	Rue à 4 voies ou plus - passage d'une grande à une petite distance des rangées - bâtiments mitoyens, H : L=1 : 4 □ 1 : 2

Fig. 10 : Ensemble des configurations possibles sous STREET pour une rue à quatre voies avec bâtiments

Que ce soit à deux ou quatre voies, on constate que la configuration S4GS (respectivement S2GS) est la plus défavorable, de même la configuration S4NB (respectivement S2NB) est la plus performante.

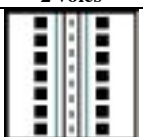
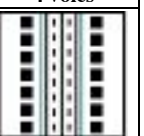
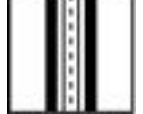

Configuration	2 voies	4 voies
Meilleure		
Pire		

Fig. 11 : Configurations spatiales et scores d'immissions (meilleure et pire configurations)

La meilleure configuration correspond à une rue dont les bâtiments sont éloignés de l'axe de la rue d'au moins dix mètres et pour laquelle l'indice de construction de Landsberg est faible (0.4 pour la rue à deux voies et 0.25 pour celle à quatre voies). De plus, dans ces deux configurations, les bâtiments sont alignés à moyennes distances, ce qui crée des échappatoires possibles au flux de polluants et fait baisser les concentrations moyennes. La pire configuration, quant à elle, correspond à une rue dont l'indice de construction de Landsberg est égal à 1 (rue canyon) et pour laquelle les bâtiments sont mitoyens créant des zones propices à l'accumulation (pièges à polluants).

Nous avons réalisé la même étude pour les croisements et les intersections à deux et quatre voies. Les résultats sont les suivants : exception faite pour les composés organiques volatils, l'amplitude $[C_{max}]/[C_{min}]$ est plus importante pour les rues, les croisements et les intersections à deux voies que pour celles à quatre voies. Ce qui signifie que l'impact de la morphologie urbaine est davantage prépondérant pour les artères à deux voies que pour celles à quatre voies. En effet, pour une zone dont la hauteur de bâti est fixée au préalable, l'indice de construction de Landsberg joue davantage pour les rues à deux voies.

Rapport $[C_{max}]/[C_{min}]$	COV	Benzène	ΣPM_{10}	NO_x	NO_2 98	NO_2 moyenne	NO_2 50	CO	SO_2
Rue à 2 voies	4,4	1,7	1,9	1,8	1,3	1,4	1,5	1,8	1,4
Rue à 4 voies	8,9	1,5	1,6	1,6	1,2	1,3	1,4	1,6	1,3
Croisement à 2 voies	3,1	1,4	1,4	1,4	1,1	1,2	1,2	1,4	1,2
Croisement à 4 voies	2,3	1,2	1,3	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,1
Intersection à 2 voies	3,2	1,4	1,6	1,5	1,1	1,2	1,3	1,5	1,3
Intersection à 4 voies	2,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,2	1,2	1,1

Fig. 12 : Amplitudes maximales des concentrations de polluants par type d'artères pour les sept polluants

Hormis les composés organiques volatils pour lesquels le gain entre la meilleure et la pire configurations est conséquent, le facteur de gain est proche de 1.5 pour l'ensemble des polluants. Le tableau suivant répertorie les configurations les plus optimales et les moins optimales.

Configurations	Meilleure	Pire
Rue à 2 voies		
Rue à 4 voies		
Croisement à 2 voies		
Croisement à 4 voies		
Intersection à 2 voies		
Intersection à 4 voies		

Fig. 13 : Configurations (rues, croisement, intersection) optimales et non – optimales en matière de pollution.

Comme le montre le classement des configurations spatiales optimales ou pas (figure 13), le remplissage des dents creuses de la ville est néfaste à la dispersion de polluants.

3. MODELES EN TROIS DIMENSIONS ET INDICATEURS D'EXPOSITION

Comme nous l'avons déjà précisé, seuls des modèles tridimensionnels permettent de rendre compte de la pollution intra urbaine. Dans le cadre de notre thèse de doctorat, nous avons construit un certain nombre de modèles. Sans détailler ceux-ci⁹, il est nécessaire de comprendre ce qu'ils produisent. Ces modèles fournissent des cartes de concentrations de polluants sur un espace tridimensionnel découpé en mailles élémentaires. Ils permettent non seulement de comprendre comment la morphologie urbaine agit sur la dispersion de polluants mais aussi d'effectuer des calculs d'indicateurs que nous développons ici.

⁹ Le lecteur intéressé pourra se référer à la thèse dont les références se trouvent dans la bibliographie.

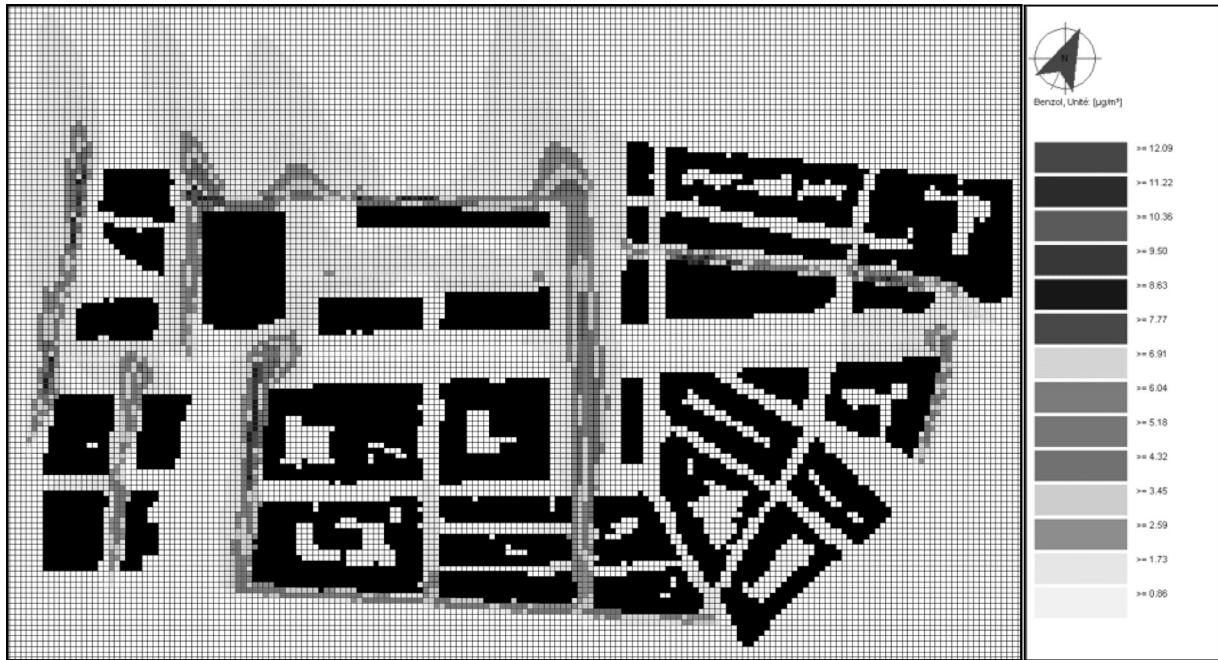


Fig. 14 : Exemple de cartes de concentrations obtenues : Marseille, benzène, altitude [0,2] m. (source : thèse de doctorat Gilles MAIGNANT)

Les simulations, ayant été établies pour des conditions moyennes de trafic et pour des situations météorologiques moyennes ; les cartes illustrent les zones permanentes de dépassement de seuil. L'espace étant découpé en pixels, il est possible d'effectuer certains comptages. Ainsi l'indice surfacique de dépassement de seuil est établi. Il représente le pourcentage de la surface du réseau dépassant une valeur seuil¹⁰ (S_{Di}) par rapport à la surface totale du réseau (S_{Ri}). Il est inspiré d'une méthode percentile.

$$I_s = \frac{\text{surface de dépassement du seuil}}{\text{surface totale du réseau urbain}} = \frac{S_{D_i}}{S_{R_i}}$$

L'indice est compris entre 0 et 1, la valeur 0 signifie que le réseau est sain, la valeur 1 indique que tout le réseau est pollué, auquel cas des mesures d'urgence doivent être prises. Cet indicateur possède l'avantage d'être facilement calculable et d'intégrer dans sa conception l'aspect qualitatif (répartition spatiale) et quantitatif (pourcentage).

Pour comprendre comment la morphologie urbaine crée des différenciations spatiales en matière de pollution, nous avons calculé la dimension fractale des amas de polluants de benzène en fonction de l'altitude.

¹⁰ Valeurs limites, guides ou autres.

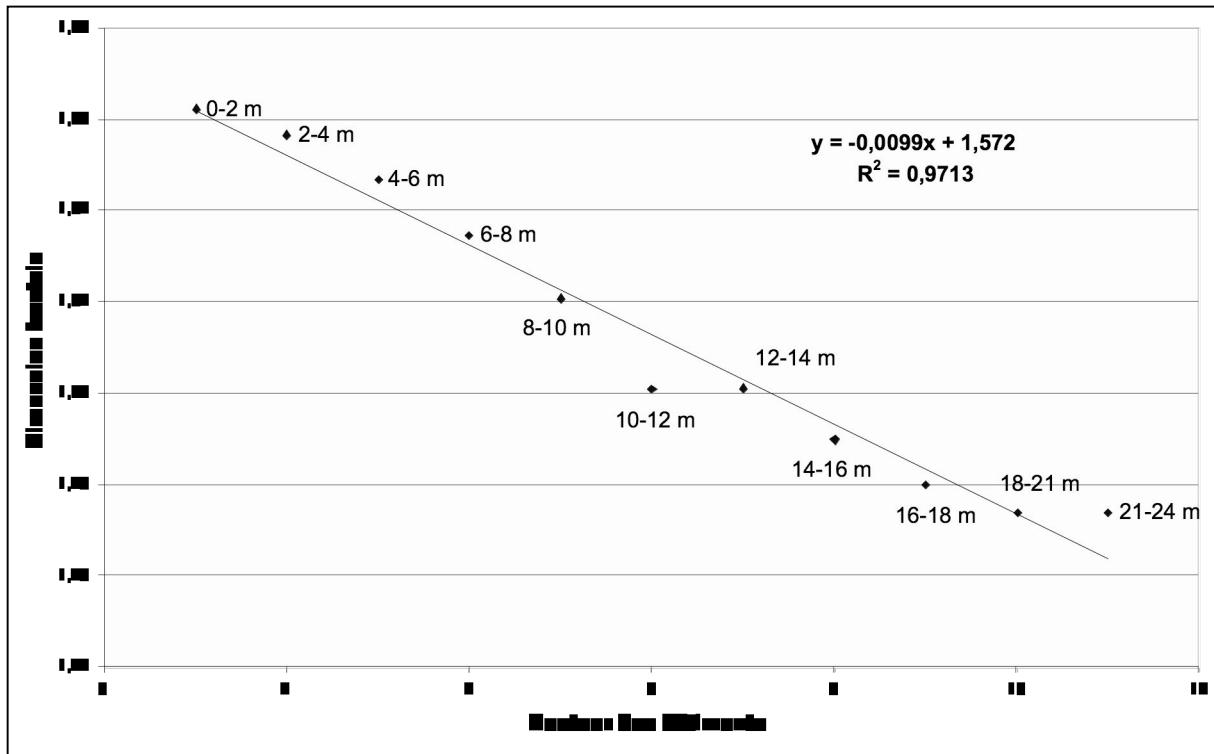


Fig. 15 : Evolution de la dimension fractale des amas de benzène à Marseille en fonction de la hauteur des bâtiments. Pour les deux autres polluants considérés (oxydes d'azote et monoxyde de carbone), la tendance est la même.

La courbe précédente montre une décroissance linéaire quasi parfaite de la dimension fractale en fonction de la hauteur des bâtiments. Ainsi, la dimension fractale permet d'analyser l'hétérogénéité **des concentrations de polluants au sein du quartier**. Elle diminue linéairement au fur et à mesure que l'on s'élève, ce qui signifie que les concentrations tendent à s'uniformiser au niveau des toits et ainsi valider l'hypothèse de l'influence de la morphologie urbaine sur la diffusion.

De plus, les dimensions fractales obtenues pour les amas de polluants sont toutes comprises entre 1 et 2 (quelle que soit la ville). Elles représentent donc un mouvement qui fait qu'un point¹¹ s'écarte dans des directions privilégiées de l'espace, phénomène correspondant à une dispersion. Mandelbrot précise qu'une dimension fractale comprise entre 1 et 2 est caractéristique du déplacement d'un corps (ici les émissions qui se dispersent). Ainsi, comme toutes les dimensions fractales des amas de polluants sont comprises entre 1 et 2, la partie entière de la dimension fractale, à savoir 1 ne fournit pas d'information sur la déformation dans l'espace. En revanche, la partie décimale indique comment varie l'intensité de la déformation selon chacune des directions de l'espace. Ainsi, plus la partie décimale est importante, plus la déformation, par rapport à un flux homogène, est conséquente. Ce qui signifie que la déformation est plus grande pour de faibles hauteurs. La cause principale de cette déformation est la morphologie urbaine. En effet, initialement, le flux de polluants émanant des pots d'échappement est homogène puis la diffusion spatiale a lieu en fonction des paramètres météorologiques (essentiellement vitesse et direction du vent) et de la morphologie urbaine. Cette différenciation est mesurée par la dimension fractale des amas de polluants qui "colonisent" plus ou moins les espaces offerts, selon des directions privilégiées.

4. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA FORME URBAINE, LA FORME COMPACTE EST-ELLE UN OPTIMUM ?

De nombreuses études préconisent la compacité des villes, compacité qui permettrait une minimisation des dépenses énergétiques. En effet, une ville compacte permet, au premier abord, de réduire la longueur des déplacements et bien souvent de recourir à des modes de déplacements moins polluants comme le tramway ou

¹¹Ce point correspond à une configuration initiale de l'air. Par configuration initiale, il ne faut pas sous-entendre air non pollué, mais configuration à l'instant t (avant dispersion).

même la marche à pied. Pourtant la densification¹² des villes n'est pas non plus la solution idéale. En effet, même si la ville compacte permet de diminuer de manière notable les émissions de gaz, notamment par la réduction des flux de circulation, la modification de la morphologie urbaine par le comblement des vides et la densification en hauteur des villes entraînent des redistributions spatiales des flux de polluants pouvant créer des zones de très fortes concentrations, largement supérieures aux seuils de recommandation de santé publique. De plus, des études sanitaires, menées lors de la canicule de l'été 2003, par l'équipe du professeur Besancenot¹³ ont montré une surmortalité plus importante dans les quartiers au bâti resserré.

La ville renferme l'ensemble des topologies possibles : formes compactes, connexes et simplement connexes. Par exemple, un immeuble avec une cour intérieure est une forme compacte, deux bâtiments de part et d'autre de la rue représente une forme non connexe. Cette diversité de formes constituant la ville participe à sa complexité. Mais, **au sens mathématique du terme, une ville ne peut être compacte**. En effet, une ville compacte serait une ville sans espaces entre bâtiments, donc sans rues. Les géographes parlent donc de **degré de compacité** en comparant généralement la ville à la forme mathématique la plus compacte, à savoir le cercle.

La ville compacte, un optimum ?

Comme le souligne Fischler, "la forme urbaine n'est pas seulement une notion esthétique, une question de composition architecturale. Comme l'indiquent ses références aux liens de transport, aux espaces verts et à la ségrégation spatiale, la forme urbaine doit aussi être évaluée selon des critères d'efficacité, de durabilité et d'équité. Et comme le montrent ses allusions aux processus sociaux qui expliquent l'étalement urbain, cette forme doit également être comprise comme le résultat d'un ensemble d'actions, d'un système de forces. La forme urbaine est matière à discussion et à invention depuis que les villes existent. Mais les termes qui la désignent restent vagues."

De nombreux auteurs soulignent que la notion de ville compacte va de pair avec la notion de ville dense, pourtant rien n'est aussi sûr. En effet, une ville peut être très compacte mais peu dense, c'est le cas de Tokyo ; ou au contraire, assez dense mais peu compacte, ce qui est le cas de Madrid. De même, la densité n'a aucun lien direct avec la forme de la ville. La compacité renseigne sur le bâti, la densité sur la population. Il est évident qu'il existe un lien entre les deux, mais ce lien n'est pas linéaire. C'est pour cela que le terme de densité est pris ici dans le sens de densité de constructions.

Nombreuses sont les études préconisant une ville compacte pour des questions de durabilité urbaine. Un rapport canadien¹⁴ sur la qualité de l'environnement dans les villes canadiennes précise de manière implicite "qu'une forme urbaine compacte est davantage viable au plan écologique que les modèles de croissance urbaine que l'on trouve souvent en Amérique du Nord, notamment la "suburbanisation" ou l'étalement urbain, mais **reconnait que les conséquences précises de la forme urbaine, par exemple, sur le nombre de déplacements en automobile, la congestion, la pollution de l'air et les coûts des infrastructures ne sont pas clairement établies.**"

En effet, **en matière de pollution aussi bien de l'air que sonore, il n'est pas aussi clair que la forme compacte soit la forme optimale**. Frankhauser s'interroge sur la structure compacte des villes qui risque d'affecter la ventilation des centres-villes. Si l'on reprend l'exemple de la canicule de l'été 2003, la forte compacité de certaines villes, a diminué la ventilation et fait augmenter de manière importante la surmortalité, comme le souligne les propos de Besancenot¹⁵ : "toutes les études révèlent enfin une surmortalité caniculaire très significative dans les grandes agglomérations, où divers facteurs (impacts micro météorologiques de la morphologie urbaine, activités émettrices de chaleur...) contribuent à la création d'îlots de chaleur urbains."

Une ville compacte permet de lutter contre l'étalement urbain et minimise les déplacements intra urbains. En revanche, la densification des villes modifie les conditions de dispersion atmosphérique et crée des zones propices à des accumulations sonores et polluantes. La ville compacte dispose de peu d'espaces verts et de loisirs et risque d'inciter ses habitants à des déplacements plus importants, notamment les week-end. Ainsi pour fuir les problèmes de pollutions, on en crée d'autres. Ceci est particulièrement frappant sur l'agglomération niçoise ou la

¹² La densification est à comprendre au sens de densification de constructions et non de populations.

¹³ Groupement de recherche, Climat et santé, Dijon.

¹⁴ La qualité de l'environnement dans les villes canadiennes : le rôle du gouvernement fédéral, Coll. L'état du débat, Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, 103 p.

¹⁵ Besancenot JP. "vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines" Environnement, risques et santé, vol.1, n°4, pp. 229-240.

mobilité dominante change de nature entre la semaine et le week-end, la population fuyant la ville pour l'arrière pays ou descend à la plage.

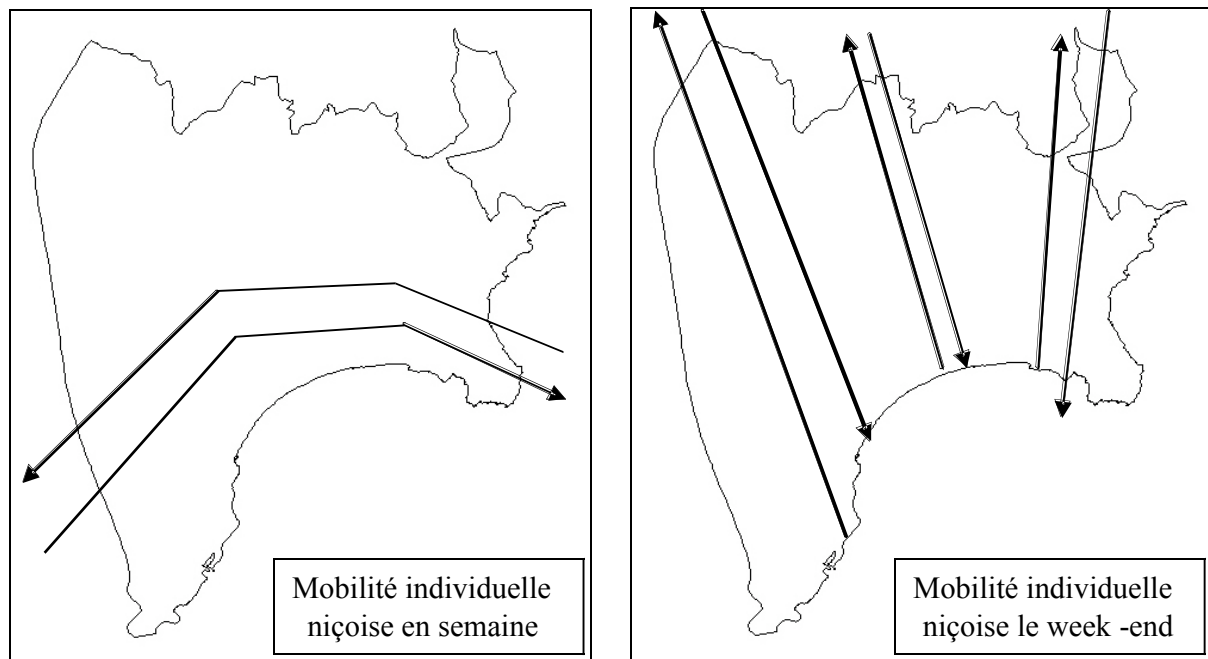


Fig. 16 : Mobilité individuelle des niçois en semaine et le week-end

Afin d'évaluer les impacts de la forme urbaine sur l'environnement, nous avons construit un modèle systémique explicatif (figure 17) que nous allons détailler maintenant.

Densifier les villes, notamment par le comblement de vides interstitiels (dents creuses) ou par la reconstruction de la ville sur elle-même (densification verticale de bâti) augmente la compacité de la ville. Cette compacité plus forte modifie les champs de vent qui sont tantôt accélérés, tantôt freinés. La modification de l'écoulement a un double impact. Premièrement, elle peut créer des zones d'inconfort (accélération trop importante du vent, effet Venturi...) et ainsi agir sur la qualité de vie. Deuxièmement, les champs de vent modifiés par la morphologie urbaine resserrée augmentent les immissions (concentrations réellement respirées par le citadin), particulièrement dans certaines rues propices à l'accumulation : les rues canyons. Même si une ville compacte permet de minimiser les déplacements intra urbains ou du moins de choisir des modes de déplacements doux pour de petits trajets ; les nuisances sonores, amplifiées par une morphologie urbaine resserrée, et les concentrations de polluants asphyxient les centres-villes. La vulnérabilité environnementale de l'espace urbain est amplifiée ; elle engendre des déplacements de plus en plus importants vers l'extérieur. **Pour diminuer l'ampleur de certains problèmes environnementaux, on en a créé de nouveaux.** Cette vulnérabilité est la cause de problèmes de santé comme le rappelle par exemple les effets de la canicule ou des épidémies de grippe. La plupart des épidémies se propage par percolation¹⁶, c'est à dire par contiguïté. Il est donc nécessaire de ne pas trop resserrer le bâti pour éviter d'augmenter la propagation de certaines épidémies. D'ailleurs si l'on regarde l'histoire de Paris, la principale raison des aménagements (élargissement des artères ...) prônée par le baron Haussmann est la lutte contre l'insalubrité. Ces problèmes de santé et la baisse de qualité de vie en milieu urbain, due aux différentes nuisances, incitent à des déplacements vers l'extérieur, soit de manière ponctuelle (week-end, vacances), soit de manière permanente voire quotidienne (personnes travaillant en ville et habitant à l'extérieur).

¹⁶La percolation est un phénomène de diffusion dans un milieu aléatoire selon des directions privilégiées de l'espace.

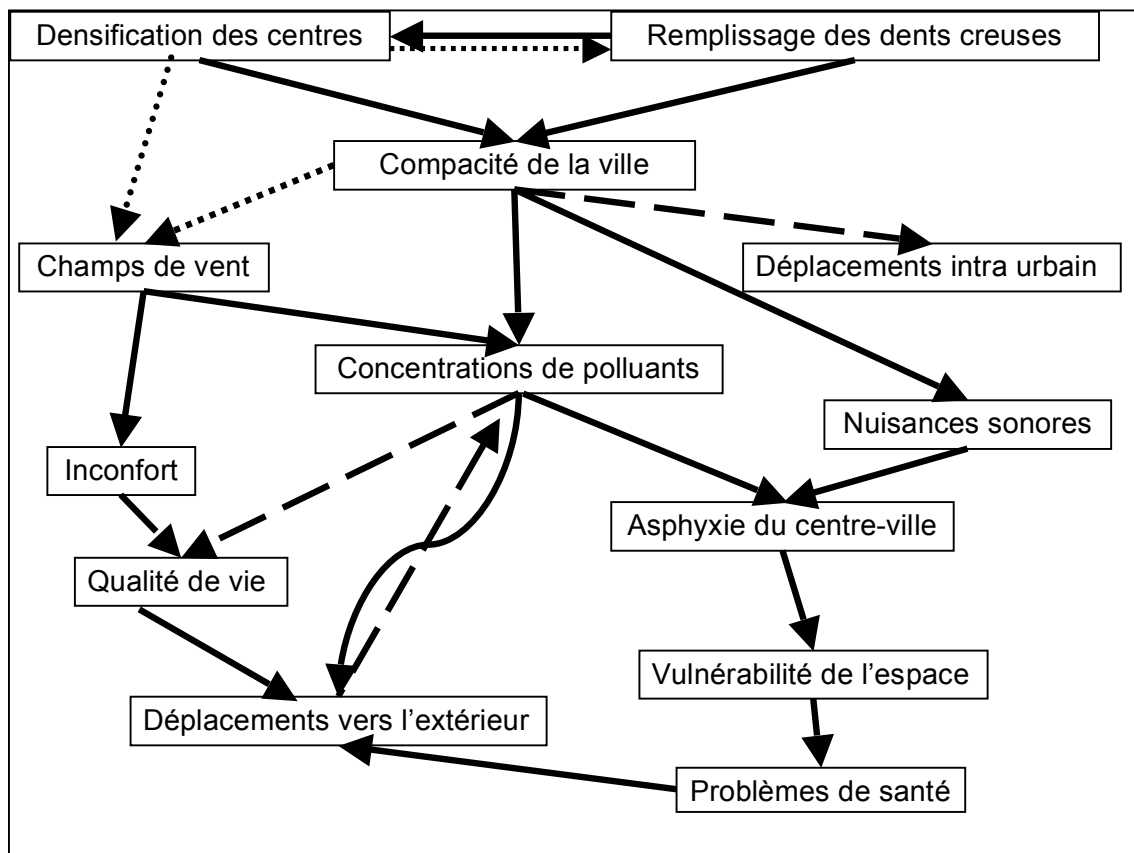


Fig. 17 : Modèle systémique des impacts environnementaux de la ville compacte (les flèches en tirets induisent une réduction, les flèches en pointillés sont de simples flèches d'action, les autres induisent une augmentation)

CONCLUSION

Lorsque l'on définit un optimum, les critères de définition et d'établissement de celui-ci doivent être clairement explicités. Les formes urbaines optimales correspondent à une minimisation d'un certain nombre de problèmes environnementaux sous contraintes. En ce qui concerne la charge polluante respirée par le citoyen, il est clair que la morphologie urbaine agit sur elle en l'amplifiant. Pour de mêmes émissions polluantes, la disposition des bâtiments par rapport aux écoulements (champs de vents) et l'écartement entre ceux-ci amplifient ou amoindissent les immissions. L'étude réalisée sur 98 configurations d'artères spatiales confirme que rendre plus compacte la ville n'est pas souhaitable ; les concentrations de polluants étant bien supérieures dans le cas de la ville compacte (toutes choses égales par ailleurs).

La ville compacte et la ville éclatée (ou non compacte) sont deux concepts qui sont des optimums selon la pondération de certains critères mais pas dans l'absolu. La polymorphie de l'espace urbain rend trop complexe toute vision synthétique de la ville.

BIBLIOGRAPHIE

ABDO J., MICHAUT JP., MOLINOS M. et PETITGRAND JC. (1999) : Le dimensionnement structurel, 1^{ère} partie, Guide pratique de la voirie urbaine, revue générale des routes, mars 1999, vol 4, 11 p.

ADEME. (1997) : La qualité de l'air dans les agglomérations françaises, Bilan 1998 de l'indice ATMO, données et références, 16 p.

ADEME. (1998) : Emissions de polluants et consommation liées à la circulation routière : paramètres déterminants et méthode de quantification, Coll. connaître pour agir, guides et cahiers techniques, 112 p.

ADEME - CERTU. (1999) : Prise en compte de la pollution de l'air, du bruit et de la consommation d'énergie", Plans de déplacements urbains, Coll. Guide méthodologique, 300 p.

- APPA. (1998) : La pollution de l'air : sources, effets, prévention, APPA ville de Besançon – service hygiène santé, 83 p.
- BARLES S. et GUILLERME A. (1998) : Histoire, statuts et administration de la voirie urbaine. Guide pratique de la voirie urbaine, revue générale des routes, octobre 1998, vol 1, 19 p.
- BASLY L. (2000) : Télédétection pour la qualité de l'air en milieu urbain, thèse de doctorat de l'université de Nice – Sophia Antipolis, 168 p.
- BERAL-GUYONNET I. (1996) : Influence des facteurs météorologiques sur la pollution atmosphérique : le cas de l'agglomération lyonnaise, RGL Risques et pollution industriels et urbains, volume 71, n°1, Lyon, p71-77.
- BERTRAND M.J. (1978) : Pratique de la ville, Coll. Géographie, Masson, 210 p.
- BONNAFOUS A. et PUEL H. (1983) : Physionomies de la ville, Economie et Humanisme, 165 p.
- CHOVIN P. et ROUSSEL A. (1968) : La pollution atmosphérique, Coll. Que sais-je? , PUF, 128 p.
- COMMISSARIAT GENERAL DU PLAN (2001) : Transports : choix des investissements et coûts des nuisances, rapport du groupe de travail sous la direction de Marcel Boiteux, 325 p.
- CREPIF. (1988) : Climat, Pollution, Santé, à Paris et en Ile-de-France : Amélioration du cadre de vie : l'exemple de Villeneuve St Georges, Cahiers du C.R.E.P.I.F, n° 22, 184 p.
- DAB W., ROUSSEL I. (2001) : L'air et la ville, Hachette, 219 p.
- DESQUEYROUX H. (2000) : Effet à court terme de la pollution atmosphérique urbaine sur l'aggravation de l'état de santé de patients asthmatiques et insuffisants respiratoires : étude de deux panels à Paris, doctorat d'université en santé publique, Université René Descartes, Paris V, 178 p.
- DURAND-DASTES F. (1969) : La géographie des airs, Presses Universitaires de France, 276 p.
- ESCOURROU G. (1996) : Transports, contraintes climatiques et pollutions, Coll. Mobilité spatiale, Sedes, 172 p.
- ESCOURROU G. (1991) : Le climat et la ville, Coll. Géographie d'aujourd'hui, Nathan, 190 p.
- FAURE B., SOUDIEU B. et SCHMELTZ P. (1999) : Le bruit sur la voirie urbaine, Guide pratique de la voirie urbaine, revue générale des routes, mai 1999, vol 5, 10 p.
- FRANKHAUSER P. (1994) : La fractalité des structures urbaines, Coll. Villes, Anthropos, 291 p.
- GLOCKMER S. (2000) : Contribution à la modélisation de la pollution dans les villes, Thèse de doctorat en sciences physiques et de l'ingénieur, Mécanique, Bordeaux 1, 174 p.
- GRASSBERGER P. (1991) : "La percolation ou la géométrie de la contagion", La science du désordre, La recherche n°232, pp. 640-646.
- IAURIF. (1995) : Climat et microclimat urbains, pollutions atmosphériques et nuisances météorologiques localisées, 168p.
- IONESCU A. (1998) : Contribution à la compréhension de la dispersion des polluants atmosphériques en zone urbaine, thèse de doctorat en sciences appliquées, Paris 12, 218 p.
- KASTLER A., MATHIEU JP., FLEURY P. (1991): Dictionnaire de physique, troisième édition, Masson, 568 p.
- MANDELROT B. (1984) : Les objets fractals : deuxième édition, Coll. Nouvelle bibliothèque scientifique, Flammarion, 204 p.
- MAIGNANT G. (2002) : Pollution et développement durable des villes françaises, étude de cas : Nice, Marseille, Lyon et Paris. Thèse de Doctorat de l'Université de Nice Sophia-Antipolis, 3 volumes 460 p + 1 atlas de 135 pages.
- OCDE. (1994) : Lutte contre la pollution : regard sur l'avenir à la lumière du passé, OCDE, 53 p.
- OCDE. (1995) : La pollution des véhicules à moteur: stratégies de réduction au-delà de 2010, OCDE, 148 p.
- RONCAYOLO M. (1996) : Les grammaires d'une ville, essai sur la genèse des structures urbaines à Marseille, EHSS, 507 p.
- RUSS John C. (1994) : Fractal Surfaces, Plenum, 309 p.
- SACRE C., CHIRON M. et FLORI JP. (1993) : Elaboration d'un indice d'exposition à la pollution atmosphérique d'origine automobile à l'usage des études épidémiologiques, INRETS, CSTB, 60 p.
- SAHIMI M. (1994) : Applications of percolation theory, Taylor & Francis, 258 p.
- SAPOVAL B. (1997) : Universalités et fractales, NBS, Flammarion, 275 p.
- STAUFFER D. (1985) : Introduction to percolation theory, Taylor & Francis, 124 p.
- TARNIER P. (2001) : Le scandale de l'air contaminé, Mango, 196 p.
- THIBAUT G. (1996) : La pollution atmosphérique en milieu urbain, Direction de la protection de l'environnement, service des pollutions atmosphériques, Air et Silence, Mairie de Paris, 57 p.
- VOIRON C. (1995) : Analyse spatiale et analyse d'images, Coll. Espaces modes d'emploi, Reclus, 192 p.
- WEBER C. (2001) : Formes urbaines et répartition des polluants, V^e rencontre de Théo Quant, Besançon.