

Titre

Résumé

Mots clés

Abstract

Keywords

Introduction

Limites visibles ou invisibles, la ville actuelle s'efface derrière un espace urbain insaisissable entre bâti et non bâti.

En cela, l'étude des formes urbaines représente un vrai défi pour le géographe, et sans doute plus encore depuis l'émergence du périurbain. S'il existe aujourd'hui une abondante littérature sur cette question de la morphologie urbaine, il semble se distinguer deux approches principales.

L'analyse de la forme urbaine par les géographes est essentiellement basée sur le critère du bâti. Sur ce point, nous retiendrons principalement les travaux fondateurs de Frankhauser (1994, 1997) et Batty (Batty Longley 1986). D'autres approches, toujours sur le bâti, privilégient les analyses radiales de la densité de bâti (Guerois 2003, Weber et Hirsh 2000, Enault 2004).

De l'autre côté, se trouvent les études plus économiques dont le support est celui de la densité (densité de population, densité d'emploi). Elles forment, aujourd'hui, l'essentiel de la production sur la question de la forme urbaine. Mobilisée par l'économie spatiale dès la fin des années 60 (Mills 1970, Bussière 1975), la notion de densité semble être le support le plus approprié pour l'étude des répartitions des populations autour des agglomérations (Anas and al. 1998, Mills et Tan 1980).

Si les premières études avaient pour objectif de catégoriser les villes, les suivantes se sont plus orientées vers la recherche des déterminants des formes urbaines. Sur ce point, les travaux fondateurs d'Alonso (1964) apportaient une réponse tout à fait éclairante. L'économie spatiale a alors mis en avant cette question des rentes urbaine. D'autres facteurs ont pu par la suite être mis au jour.

De l'ensemble de ces facteurs, les transports ont semblé importants pour un certain nombre de d'auteurs dont Leroy et Sonstelie (1983).

Mais ce n'est que bien plus tard (années 1990, 2000) que les premiers travaux clairement orientés sur le thème de la forme urbaine et du transport ont pu voir le jour. Sur ce point, Bonnafous et Tabourin (1998) furent les premiers à mettre en relation forme urbaine et transport avec le modèle de Bussière amendé. Inspiré par les travaux plus anciens de géographes (time geography de Hagerstrand) et le développement des SIG, Peguy (2000) propose, quelques années plus tard, de supprimer l'amendement en introduisant directement l'accessibilité au cœur du modèle de forme urbaine ; il s'agit là d'un des premiers travaux étudiant, à partir d'un exemple concret les effets de la vitesse sur la morphologie de la ville.

Aujourd'hui, la question de la relation entre forme urbaine et fluidité de l'espace reste à débattre. Des solutions originales ont pu être proposées mais il reste encore à affirmer ce socle par des approches plus théoriques.

Ce papier se propose d'explorer cette dimension théorique par une orientation essentiellement mathématique. En cela, elle conduira le raisonnement à partir d'un exemple déjà étudié : Dijon et son aire urbaine.

En quoi la fluidité des déplacements routiers influe de manière univoque sur la forme urbaine aujourd'hui ? Nous pouvons aussi décliner cette interrogation plus simplement en : « comment la vitesse routière, la densité de population et l'espace sont-ils reliés ? ».

Pour répondre à cette question, nous proposons d'argumenter par quelques réflexions conceptuelles et pratiques sur la vitesse routière puis nous aborderons les relations entre vitesse, densité et espace.

1) La vitesse routière : théorie et pratique, une donnée stratégique

Inventée dès le 16^{ième} siècle, le concept de vitesse ne prendra pourtant sa forme définitive qu'en 1698 avec Pierre Varignon. Aujourd'hui, c'est en cinématique que la notion de vitesse est la plus courante. Elle s'applique alors à un mobile, sert à comparer les déplacements, les positions respectives entre objets. Il n'est donc pas étonnant que la notion de vitesse fût introduite dès le début pour l'analyse du trafic routier. Les théories du trafic constituent aujourd'hui une base solide pour comprendre et prévoir les phénomènes de congestion routière. Jusqu'à peu, il ne s'agissait que de la seule solution pour envisager les déplacements urbains micro et il a fallu attendre l'arrivée de l'informatique dans les systèmes de gestion du trafic pour que les techniciens puissent acquérir de la donnée de vitesse fiable.

Les réseaux principalement urbains sont aujourd'hui couverts de capteurs de trafic, ce qui permet une optimisation pour la régulation de la circulation mais malgré tout cela n'est pas encore suffisant car il reste de nombreux vides sur les différents axes. Par ailleurs, l'entretien des capteurs est onéreux, d'où un parc très partiellement utilisable (en moyenne 40 à 50%).

Aussi, avec le développement des nouvelles technologies de téléphonie mobile et des systèmes embarqués, d'autres options ont pu être proposées aux gestionnaires de la voirie, comprenant des données en plus grand nombre, mais également dont la complétude dépassait de loin celle que les mairies et autres collectivités pouvaient espérer par leurs seules actions.

La donnée de vitesse est aujourd'hui vitale et précieuse du fait de la difficulté à l'obtenir. Les collectivités sont aujourd'hui en capacité de la mesurer mais très ponctuellement et souvent sur de courtes durées. Aussi, les fournisseurs principaux restent des opérateurs privés qui procèdent au traitement des informations usagers (téléphonie, GPS) afin d'obtenir des données d'état du trafic agrégées. Les collectivités comme les grands organismes d'Etat (SETRA, CERTU, CETE) n'ont à leur disposition que des données reconstituées par des indicateurs tels que le BRP ou le BPR.

1.1) Définition de la vitesse routière

La vitesse est une grandeur simple à définir puisqu'il s'agit du rapport entre la distance parcourue sur la durée nécessaire pour la parcourir.

On pourra ensuite affiner cette définition la plus élémentaire en différenciant la vitesse moyenne de la vitesse instantanée. La vitesse moyenne représente alors des grandeurs fixes (distance, temps) alors que la vitesse instantanée se présente comme une dérivée en encore un rapport infinitésimal toujours de la distance sur la durée soit :

$$V_t = \frac{dx}{dt}$$

Où V_i représente la vitesse en km/h, dx la distance infinitésimale parcourue et dt la durée infinitésimale pour la parcourir. Il s'agit donc d'un calcul de dérivée (limite du rapport x/t quand x tend vers 0).

D'autres calculs sont envisageables. En raisonnant dans le temps, on peut ainsi construire non plus une vitesse instantanée, qui ne s'appliquerait qu'à un unique véhicule, mais un indicateur plus global de vitesse. On parle alors de vitesse agrégée dans le temps. On réalise la moyenne de plusieurs vitesses pour un lieu donné.

Une autre solution consiste à obtenir une vitesse agrégée cette fois-ci dans l'espace. La vitesse est alors une moyenne pour tout un axe ou un espace défini.

Enfin, une combinaison dans l'espace et dans le temps nous donne la vitesse d'un flot (flux) de véhicules pour un axe ou une aire géographique donnée soit :

$$V_a = \frac{\sum_{i=0}^{i=n} \sum_{j=0}^{j=p} \frac{dx}{dt}}{ij}$$

1.2) Acquérir les données de vitesses routières

Dès lors que l'on parle de vitesse appliquée au seul domaine de la route, il faut donc rester précis. On distinguera alors deux grands types de données produites.

1.2.1) La vitesse instantanée, le simple comptage

Il existe d'abord la méthode la plus simple qui consiste à relever une horodate de passage pour un véhicule donné et une seconde horodate quelques centimètres plus loin ; on en déduit la vitesse instantanée d'un véhicule pour un lieu donné. Ce principe est appliqué à la fois dans le cas de comptage temporaire (par boudin ou plaque) et dans le cas d'autres systèmes, qui sont quant à eux fixes. Il existe une grande variété de systèmes de capteurs (capteur radar, infrarouge, camera, boucle électromagnétique, boîtier magnétomètre wifi).

Dans tous les cas de figure, il n'est possible d'obtenir de la vitesse que si l'on dispose de deux dispositifs de capteurs sur une même file de circulation.

Les données produites sont ensuite envoyées dans un dispositif de collecte et de traitement de l'information.

1.2.2) Les opérations et calcul sur la vitesse, station de comptage et PC

Il est ensuite possible de traiter l'information brute afin d'obtenir des données plus agrégées directement à la sortie du système de mesure. On distinguera alors deux types d'équipements :

- Les stations de mesure
- Les algorithmes des PC de régulation

Dans le premier cas, toute l'intelligence du système se trouve dans la station de mesure sur le terrain et c'est cette dernière qui agrège les données de trafic, vitesse... Nous avons le principe d'agrégation dans le temps, comme nous l'avons suggéré mais ensuite on peut agréger les données par couloir de circulation (c'est-à-dire en agrégeant toutes les données de vitesse de l'ensemble des files de circulation dans un même sens).

Dans le second cas, cette opération ne s'effectue plus sur le terrain. Les données brutes de vitesse sont acquises par des détecteurs branchés sur les entrées des contrôleurs de feux. Les données sont ensuite dirigées vers le PC de régulation où sont déclarés les points de mesures.

Le PC dispose alors d'algorithmes pour agréger les données de trafic. On obtient ainsi le même type de données que pour les stations de mesure.

Une variante nouvelle est possible avec la mise en place sur le terrain de stations de comptage spéciales qui sont capable de procéder à une catégorisation du trafic (petit PL, gros PL, VL, bus et 2 roues motorisés). Ces systèmes sont malgré tout aujourd'hui encore confidentiels sur le territoire français.

1.2.3) la vitesse agrégée dans l'espace et dans le temps, des données principalement fournies par les nouvelles technologies mobiles

La mise en œuvre de ces technologies de collecte de données de vitesse reste particulièrement onéreuse et il paraît difficile pour une collectivité de couvrir l'ensemble de son réseau de capteurs et plus encore de maintenir la totalité du parc.

Aussi, pour répondre aux besoins croissants des mairies, Départements et régions, les techniciens se sont orientés vers de nouveaux systèmes moins chers.

Depuis 2008, les opérateurs de téléphonie et de GPS se sont lancés dans un nouveau service : celui de la revente de données agrégées de trafic. L'opération présentait pour eux un double avantage :

- Ils disposaient directement des données brutes issues des remontées des GPS et des Iphones. Il ne restait à la charge de l'entreprise plus que le développement des algorithmes capable d'agréger les données
- Les collectivités et organismes d'Etat pouvaient produire de la donnée instantanée ou légèrement agrégées dans le temps mais étaient bien incapables d'obtenir des données agrégées dans l'espace (par exemple vitesse moyenne sur un tronçon routier).

Les données de vitesse avec ces systèmes peuvent aujourd'hui couvrir l'ensemble du réseau français de la voirie locale aux grands axes structurants.

Il subsiste toutefois deux problèmes pour les collectivités désireuses d'acquérir ces données :

- L'échantillonnage par tronçon dérive directement du parc de véhicules équipés par les équipements de l'opérateur d'où une volonté affichée de diversifier les sources. Les récentes évolutions tendent vers des systèmes d'entrepôt de données (sources multi-opérateurs). Cela ne peut toutefois pas gommer le problème de base : on ne dispose pas de la totalité des données de véhicules ; il est donc impossible d'obtenir des données de trafic.
- Tout cela a un coût pour les collectivités et même si en moyenne la facture est moins élevée que pour les capteurs de trafic, il n'est toujours pas possible d'acquérir la totalité des données de vitesse pour les réseaux gérés.

Aussi, dans les perspectives de restriction budgétaire, des stratégies autres ont pu être employées pour produire de la donnée de vitesse agrégée.

1.3) Reconstituer les données de vitesses routières : une autre solution pour acquérir de la donnée de vitesse ou de temps de parcours

Au delà d'une simple donnée issue de collecte par des capteurs sur le terrain ou de technologie mobile, la vitesse routière est aussi un indicateur qui permet de raisonner de temps de parcours. Son usage peut être local comme plus global dès lors que l'on agrège les données.

Aussi l'entreprise de reconstitution des temps de parcours peut aussi servir pour un usage direct (collectivité et autre) ou indirect (analyse du trafic et réflexion sur les mécanismes de la congestion dans les villes).

Dans ce paragraphe, nous présenterons essentiellement le premier volet tout en gardant à l'esprit que les indicateurs définis ici pourront servir dans la suite de notre propos.

1.3.1) La vitesse et les modèles macroscopiques de trafic

La notion de vitesse est d'abord une grandeur que l'on emploie couramment dans les modèles servant à définir le trafic routier. En ingénierie du trafic, les modèles existants se divisent en deux catégories :

- Les modèles microscopiques pour l'analyse des conditions locales du trafic. On suit alors la trajectoire des véhicules un par un. Les grandeurs associées sont l'accélération (variation de la vitesse par rapport au temps) et les positions des véhicules
- Les modèles macroscopiques pour suivre les déplacements des flots de véhicules. Les grandeurs sont la vitesse, le débit et la concentration.
- Enfin il reste le mésoscopique pour suivre les déplacements des paquets de véhicules.

Les modèles macroscopiques font donc intervenir la vitesse (on en aura un aperçu synthétique dans ...). Ils reposent sur une analogie entre la mécanique des fluides et le trafic. Trois grandeurs sont alors utilisées.

La vitesse V que nous avons définie précédemment (il s'agit ici de la vitesse agrégée pour un tronçon)

Le débit Q qui représente le nombre de véhicules par unité de temps $Q = N/t$

Enfin il reste la concentration véhiculaire K . Elle se définit comme le rapport entre le nombre de véhicules par unité de distance. $K = N/x$

Dans les modèles macroscopiques¹, on définit trois relations fondamentales :

1) La relation caractéristique

Elle lie la vitesse, le débit et la concentration suivant la relation :

$$Q = KV \quad [1]$$

Dans certains cas, en particulier pour les praticiens du trafic, la concentration peut être substituée par une autre grandeur : le taux d'occupation de la chaussée TO

On définit le taux par le rapport entre le temps où un capteur est occupé par les véhicules et le temps total de la mesure. On établit le lien entre TO et K par une simple proportionnalité (voir Cohen 1983) :

$$K = \lambda TO \quad [2]$$

2) La relation d'équilibre

On considère alors dans la plupart des cas que la somme des flux qui rentrent sur le tronçon i est égal à la somme des tronçons qui en sortent² soit la formule suivante :

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial K}{\partial t} = 0 \quad [3]$$

A noter qu'il existe d'autres options qui consistent alors ne plus envisager un équilibre. Cela correspond à la situation de bouchon extrême. Le trafic se diffuse alors sur les autres voies. On parlera de modèle macroscopique d'ordre supérieur à 1³ (Payne 1971, Ross 1988, Zhang 1998).

3) Le diagramme fondamental

Il s'agit de la dernière relation qui lie le débit avec la concentration ou le taux.

Diverses solutions ont pu être proposées.

¹ Le plus simple et le plus connu est le modèle LRW (Lightill, Witham, Richards 1956) un descriptif nous en est donné dans Lebacque 1993

² Il s'agit des modèles macroscopiques de premier ordre

³ Cf plus de référence sur les ordres des modèles LRW (Lebacques Lesort 1999)

On retiendra le modèle le plus simple (Greenshields 1935).

L'équation est rarement donnée mais elle pourrait prendre la forme suivante :

$$Q^2 = -aK^2 + bK \quad [4]$$

Avec Q débit, K concentration et a et b deux paramètres à calibrer.

Les grandeurs que nous employons ici resteront les mêmes pour la suite de notre papier.

1.3.2) Reconstituer les données de vitesse à partir du débit et du taux : le BRP

Dans un grand nombre de collectivités, on utilise depuis quelques années un indicateur de vitesse pour évaluer les temps de parcours moyens sur les différents tronçons.

En suivant les travaux de B.R.P. (1985,...)⁴, il est possible de comprendre comment on a pu parvenir à l'algorithme du BRP.

La première idée et la plus importante consiste à énoncer une loi statistique s'appliquant en moyenne à tous les temps de parcours.

Le temps de parcours moyen d'un tronçon i est lié linéairement avec le taux d'occupation de la chaussée TO soit :

$$TP_i = mTO + n \quad [5]$$

Pour évaluer les paramètres m et n, on utilise ensuite les conditions limites de circulation.

Dans le premier cas, quand la circulation est extrêmement fluide, le taux d'occupation de la chaussée tend vers 0, on peut donc calculer n.

$$TP_i = n = t_{0i}$$

Le temps de parcours t_{0i} est qualifié de temps à vide.

Dans le second cas, nous partons sur l'inverse de cette situation ; le tronçon est entièrement saturé. Le taux d'occupation TO tend alors vers 1 ou 100%.

Par ailleurs, le débit Q_i du tronçon s'évalue selon l'expression :

$$Q_i = \frac{N_{i\max}}{TP_i} \quad \text{avec } N_{i\max} \text{ le nombre maximal de véhicules pouvant occuper le tronçon.}$$

On peut alors exprimer N_imax comme : $N_{i\max} = Li/(lv + EIV)*fi$

Avec Li longueur du tronçon, lv longueur moyenne d'un véhicule, EIV écart intervéhiculaire moyen à l'arrêt et fi nombre de files du tronçon.

On déduit alors d'après [5] la relation suivante :

$$a = \frac{N_{i\max}}{Q_i} - t_{0i}$$

Le modèle [5] peut alors être entièrement explicité sous la forme du BRP classique :

$$TP_i = \frac{N_{i\max}}{Q_i} TO_i + t_{0i}(1 - TO_i) \quad [6]$$

La vitesse peut ensuite être évaluée aisément en calculant :

$$V_i = \frac{L_i}{TP_i} \quad [7]$$

L'algorithme [6] représente la forme la plus simple. Or, nous avons vu que le BRP reposait principalement sur des conditions limites de circulation ; cela implique donc que les valeurs obtenues pour les conditions extrêmes soient fausses. Ainsi, dans une situation de condition de saturation extrême, le BRP tend vers l'infini.

⁴ Les temps de parcours sont reconstitués par cette technique par un grand nombre de collectivités et administrations en France : les plus importantes sont Paris, le réseau DIRIF (système SIRIUS) en Ile de France, Le Département du Val de Marne, le Grand Lyon, Toulouse, Aix et Cannes.

Pour améliorer l'adéquation entre le réel et le théorique, une proposition d'amendement a pu être entreprise. Elle consiste en un ajout de trois paramètres d'équilibrage : h_i , w_i et s_i . La formule amendée de [6] devient alors :

$$TP_i = \frac{N_{i\max}}{w_i Q_i} h_i TO_i + s_i t_{0i} (1 - h_i TO_i) \quad [8]$$

La méthode du BRP, bien que très employée dans les collectivités n'en reste pas moins confidentiel dans le monde de la recherche et au niveau des services de l'équipement, on lui préfère généralement le BPR (modèle inventée aux USA).

1.3.3) Reconstituer les données de vitesse à partir du seul débit : le BPR (différent du BRP)

Initiée en 1964 par le Bureau of Public Road, le modèle BPR a servi de base pour les préconisations du SETRA sur la fonction temps-débit⁵. En 1994, le modèle a été validé dans une forme plus avancée par l'étude *Highway Capacity Manual*.

Aujourd'hui, ce modèle reste d'actualité et sert encore de base pour des estimations de temps de parcours en particulier dans les différents services du ministère de l'écologie.

La définition retenue dans sa forme la plus simple est la suivante⁶ :

$$TP_i = L m_v \left[1 + \gamma_v \left(\frac{Q_i}{Q_{\max}} \right)^{\alpha_v} \right] \quad [9]$$

TP_i représente alors le temps de parcours du tronçon i , Q_i le débit du tronçon i , Q_{\max} la capacité maximale du tronçon i , L_i la longueur du tronçon i et m_v , γ_v et α_v , des paramètres à définir.

Pour cela, prenons les conditions extrêmes :

Dans l'hypothèse où le tronçon est entièrement fluide, le débit Q_i tend vers 0 et ainsi [9] se simplifie en $TP_i = L_i m_v = L_i t_{0i}$ (avec t_{0i} temps de parcours à vide)

Dans la situation d'atteinte du régime saturé (c'est-à-dire $Q_i = Q_{\max}$), [9] revient à :

$$TP_i = L t_{0i} [1 + \gamma_v]$$

On atteint alors une vitesse plancher basse appelée V_{sat} . On peut alors exprimer le paramètre γ_v :

$$\gamma_v = \frac{1 - V_{sat} L_i t_{0i}}{L_i t_{0i} V_{sat}} \quad [10]$$

Le modèle final est alors :

$$TP_i = L_i t_{0i} \left[1 + \frac{1 - V_{sat} L_i t_{0i}}{L_i t_{0i} V_{sat}} \left(\frac{Q_i}{Q_{\max}} \right)^{\alpha_v} \right] \quad [11]$$

On en déduit que la vitesse pour un lieu i ou un tronçon i est de la forme :

$$V_i = \frac{V_{\max}}{1 + \gamma_v \left(\frac{Q_i}{Q_{\max}} \right)^{\alpha_v}} \quad [12]$$

⁵ Etude de 1978 à 1984 de planification routière du ministère des Transports

⁶ Voir le rapport SETRA fonction temps-débit sur les autoroutes interurbaines, rénovation des relations entre temps de parcours et débit pour la simulation du trafic 2001

Observons que ce modèle présente les mêmes défauts que le BRP, à savoir qu'il ne fonctionne que pour le régime fluide. A l'approche de la congestion, le modèle fonctionne encore jusqu'au point de saturation ($Q_i = Q_{max}$).

Le régime congestionné introduit alors le processus de diffusion des bouchons. L'origine externe de la congestion rend inopérant le BPR.

Les données de vitesse et de temps de parcours s'avèrent de plus en plus nécessaires pour l'évaluation des politiques publiques en matière de transport. Si on connaît depuis longtemps la notion de vitesse, on a encore aujourd'hui bien du mal à produire ou acquérir la donnée que ce soit par les instruments de mesure du trafic ou des méthodes de substitution.

Nous avons vu que produire de la donnée coûte cher aux collectivités territoriales et autres gestionnaires de la voirie. Aussi, d'autres solutions existent aujourd'hui comme la téléphonie mobile et les GPS. Certes les coûts d'acquisition de cette information routière auprès d'opérateurs privés restent élevés mais le taux de couverture est considérablement étendu.

Malgré tout, la problématique du coût reste la plus cruciale. C'est pourquoi, dans les conditions actuelles de contrainte budgétaire, les organismes publics ou parapublics ont opté pour des solutions de substitution avec la reconstitution de données de vitesse et de temps de parcours à partir de grandeurs du trafic plus simples à acquérir ou à produire. Nous avons ici présenté trois solutions bien connues de reconstitution des valeurs de vitesse :

- Le calcul de la vitesse par la relation caractéristique $V = Q/K$
- L'estimation de la vitesse par l'indicateur du BRP (reconstitution des vitesses à partir des débits et des taux)
- Enfin la méthode la plus connue et la plus employée, le calcul de la vitesse à partir du débit (BPR)

Au-delà de l'intérêt politique des données de vitesse, les méthodes de reconstitution de la vitesse sont en soit intéressantes pour appréhender le mécanisme de congestion.

Le BPR, indicateur le plus simple à manipuler car ne faisant appel qu'au débit, semble être une porte d'entrée originale pour analyser la congestion à l'échelle d'une ville ou d'une région urbaine. Existe-il alors une relation entre l'espace et la vitesse et plus encore entre la densité de population et la vitesse ?

2) vitesse routière et morphologie urbaine : définition de la relation statique distance-vitesse-densité

Depuis quelques années, les phénomènes de pollution urbaine et d'étalement des villes ont placé la question de la vitesse au centre des débats de la ville durable. La solution de la ville dense apparaît pour un grand nombre d'auteurs comme la meilleure option pour réduire les coûts de la croissance urbaine. De l'ensemble des leviers existants pour favoriser cette forme, la vitesse semble le paramètre le plus aisé à manipuler. Avec les effets des Plan de Déplacement Urbain, les usagers de la route paraissent découvrir, aujourd'hui, une nouvelle donne en matière de transport. Aussi la congestion s'est grandement accentuée ces dernières années dans nos villes européennes, aidée en cela par une politique drastique de réduction des vitesses ; cela ne doit toutefois pas masquer la préexistence de logiques spatiales bien plus anciennes au niveau des vitesses dans les régions urbaines.

Or, ces phénomènes ont longtemps été peu étudiés en liaison avec l'espace du fait de l'absence de données utilisables ou fiables. Avec le développement de nouvelles technologies

et d'un corpus théorique sur les vitesses plus fouillé (comme l'a montré notre première partie), on dispose aujourd'hui de moyens suffisants pour étudier avec précision la liaison entre le territoire et la vitesse.

Mais au-delà d'une approche impliquant espace et vitesse, c'est bien la relation vitesse-morphologie urbaine qui est ici recherchée et donc le lien à la densité de population.

De nombreuses investigations ont été menées sur cette question transversale, mais le plus souvent d'un point de vue plus empiriques. Les travaux les plus anciens et aussi les plus connus au niveau mondiale sont ceux de Newman et Kenworthy (1989, 1991, 1996, Kenworthy et Laube 1996, 1999), Muller (1995) ou encore Badoe et Miller (2004). Wiel (1999, 2002) observe, comme les auteurs australiens, une supposée relation statistique inverse liant vitesse et densité. C'est également le sentiment de Dupuy (1995a et 1995b) ou Beaucire (2002).

A côté des travaux des géographes et aménageurs, on trouve également l'approche des économistes spatiaux (Pouyanne 2004) avec une première tentative de mise en relation avec le paramètre K du modèle de Bussière amendé et plus récemment les écrits de Peguy⁷ (2002) sur les temps de parcours.

Si la question a donc été largement abordée ces dernières années, il reste encore à déterminer avec plus de précision la nature de cette relation vitesse densité à l'échelle infra urbaine.

La première étape consiste à rechercher d'éventuelles logiques d'organisation infra urbaines pour les vitesses.

En parvenant à cet objectif, il nous serait alors possible de poursuivre vers une relation vitesse-densité.

2.1) Mise en évidence des logiques générales des vitesses routières dans les espaces urbains.

Des données de vitesse sont aujourd'hui disponibles pour l'ensemble des réseaux urbains⁸ mais il subsiste le problème du coût. Ainsi, de nombreux auteurs ont fait plutôt le choix de la de la reconstitution de données de vitesses routières. C'est partiellement la méthodologie que nous avons adopté pour l'aire urbaine dijonnaise (Enault 2005). Encore aujourd'hui, disposer d'un jeu de données aussi complet pour un espace de cette taille reste assez rare. C'est pour cette raison que nous proposons de partir des éléments de ce papier pour comprendre l'organisation récente des vitesses en milieu mixte urbain périurbain.

2.1.1) Description des données

Les données présentées dans ce papier reposent sur un modèle mixte associant des calages par rapports à des relevés sur le terrain, des données issues de mesures par les services de l'équipement et un algorithme introduisant divers facteurs.

Nous devons toutefois bien prendre garde à l'ancienneté relative des données (1999).

Sommairement le modèle globale enchaîne les procédures suivantes :

- Dans un premier module on recherche la vitesse en fonction de la courbure de la voirie et de la largeur de l'infrastructure. Le pourcentage de PL intervient également.
- Ensuite, le deuxième module limite à 50 km/h les vitesses en milieu urbain

⁷ Substitution de la distance par le temps de parcours au centre

⁸ En faisant appel à des opérateurs privés

- Le troisième module introduit la congestion du trafic en calculant d'abord la concentration critique ou de saturation. La vitesse est alors calculée en fonction du modèle LRW.
- Enfin, le dernier module ajoute l'effet de la signalisation tricolore sur la vitesse. Ce dernier aspect est traité de manière stochastique.

Concernant l'origine des données, les sources sont très variées.

Les données d'entrée du modèle ont été ainsi le débit par tronçon (données DDE 1999), la tache urbaine (fichier shp 1999), le réseau principal de l'aire urbaine de Dijon (1999) reconstitué (fichier shp), le pourcentage de poids lourds par tronçon (données DDE 1999), la courbure de la voirie principale (données BD carto 1999), la signalisation tricolore Dijon et son agglomération (ville de Dijon 1999).

2.1.2) L'organisation spécifique des vitesses dans l'aire urbaine dijonnaise : les particularités de l'aire urbaine dijonnaise

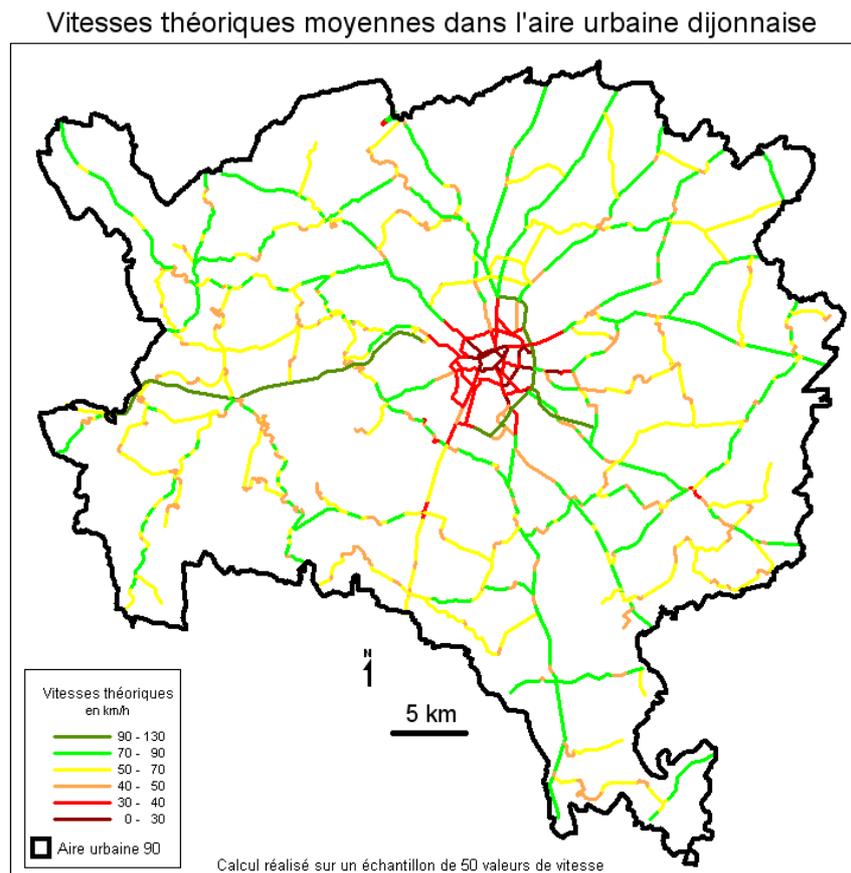


Figure 1. Vitesses moyennes dans l'aire urbaine dijonnaise en 1999

L'analyse détaillée de la vitesse moyenne théorique dans l'aire urbaine dijonnaise montre la coexistence de deux logiques :

- Une première laissant apparaître des « lois » générales
- Une seconde donnant un aspect local aux vitesses routières.

Dans ce paragraphe, nous étudierons essentiellement les différenciations de l'espace.

- 1) Le fait le plus important est sans doute l'opposition entre l'est et l'ouest de l'aire urbaine avec des vitesses d'avantage affectés par le relief dans la partie ouest. Les

vitesse y sont donc plus faibles même si on retrouve la RN71 et surtout l'A38. L'infrastructure apparaît comme le seul axe majeur de l'ouest dans la vallée de l'Ouche.

Dans la partie est, les axes sont plus rectilignes et il existe d'avantage de grandes départementales. On notera également l'existence de deux grandes autoroutes A39 et A 31.

- 2) La seconde remarque porte sur l'opposition de vitesse entre les grands axes structurants et les campagnes avoisinantes pour lesquelles les routes sont nettement plus tortueuses.
- 3) Enfin, il reste l'aspect spécifique de la zone viticole (Sud de l'aire urbaine). Les villages s'y succèdent et donc affectent de manière très importante la vitesse de ces espaces

2.1.3) Régularité des vitesses : les aspects globaux non spécifiques à Dijon

A partir de la figure 1, nous pouvons dégager un schéma global des vitesses pour les aires urbaines françaises (figure 2).

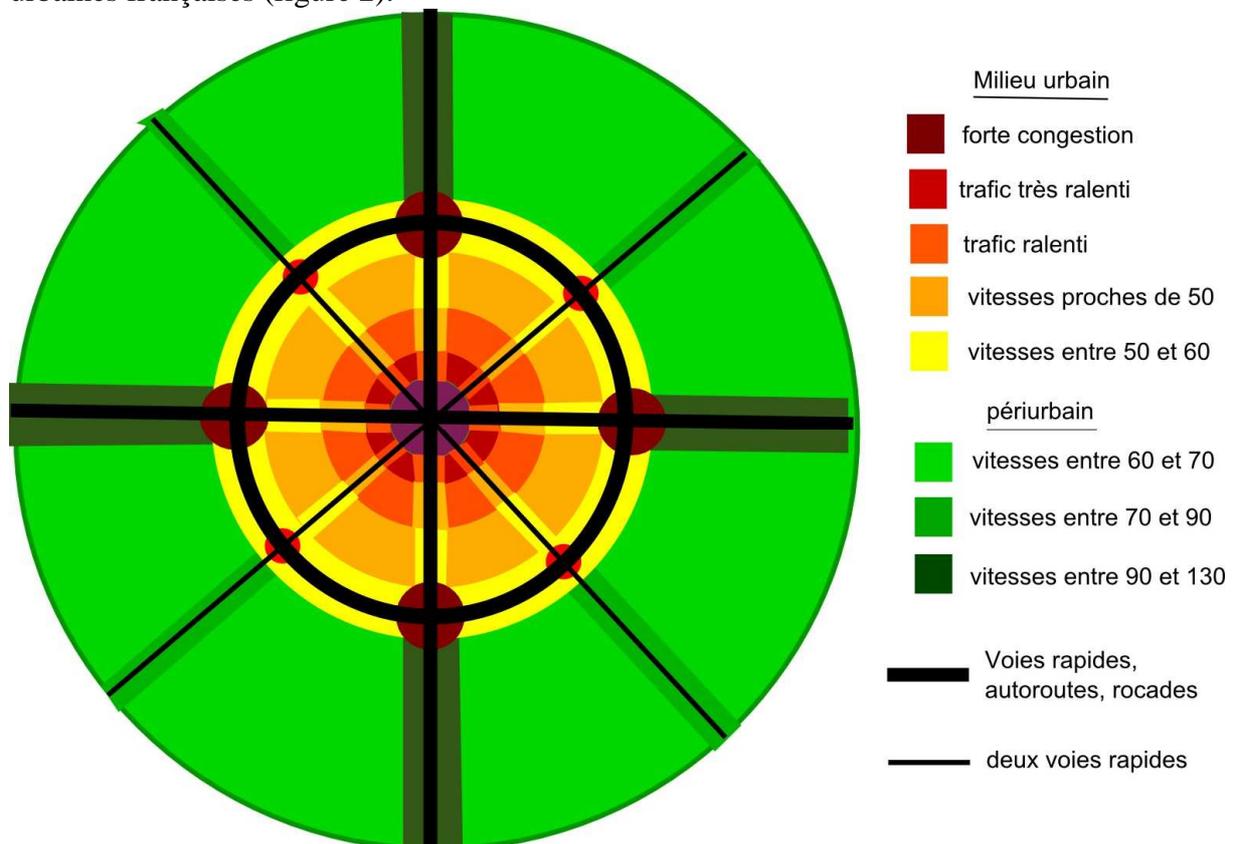


Figure 2. Schéma synthétique de la répartition des vitesses routières dans les aires urbaines françaises

On retiendra alors trois grandes logiques :

- Le modèle global est d'abord concentrique avec les vitesses les plus faibles au centre de l'agglomération. A mesure que l'on s'éloigne du centre ville, on observe un gradient des vitesses qui mène à la limite de 50, 60 km/h aux marges de l'agglomération. On sort alors toujours graduellement de l'espace urbain à proprement

parlé pour se rendre dans le périurbain (en vert), les vitesses sont alors les plus importantes (entre 70 et 130)

- Le modèle est ensuite radiale avec des axes qui convergent vers le centre. On distinguera deux types d'axes : les autoroutes et voies rapides et les deux voies rapides. Dans le premier cas, les vitesses sont les plus importantes et à peu près constantes dans le périurbain. Dans le second cas, les vitesses sont un peu plus faibles mais restent en moyenne plus élevées que dans le reste du périurbain. Dès lors que l'on rentre dans l'agglomération, les vitesses s'abaissent pour les deux types d'axes en dessous de 60 km/h. On observe toutefois que ces dernières restent toujours supérieures à celles des voiries avoisinantes. Cela offre donc une pénétration plus aisée vers le centre ville.
- Enfin, on relèvera des points de congestion localisés aux entrées de l'agglomération : points plus importants au niveau des échangeurs autoroutiers que sur la voirie plus secondaire.

Dans ce schéma synthétique, la logique concentrique semble la plus importante. Nous proposons donc de la retenir comme point d'entrée pour nos analyses futures.

2.2) Le principe de la ville monocentrique

Le modèle centre périphérie est un classique de la géographie. Il présuppose que la ville dispose d'un unique centre et que ses périphéries s'organisent de manière concentrique autour de ce point.

La première étape consiste donc à définir le centre. Si dans les villes européennes l'opération semble relativement évidente, cela peut être plus complexe pour les villes américaines. Il s'agit du reste d'une des limites de ce modèle centre périphérie.

Mais restons sur le cas de la ville historique européenne. Le centre est naturellement le centre-ville à l'intérieur de ses anciens remparts.

A partir de ce point, on va alors définir l'ensemble des lieux en fonction de la distance au centre.

Aussi, toutes les villes seront envisagées par le biais d'une demi droite $[Ox)$ avec O centre-ville et x la distance au centre.

Toutes les positions de l'espace seront alors projetées sur cette demi-droite et on réalisera pour l'analyse les moyennes des variables pour des distances du centre donné. On parle d'analyses radiales.

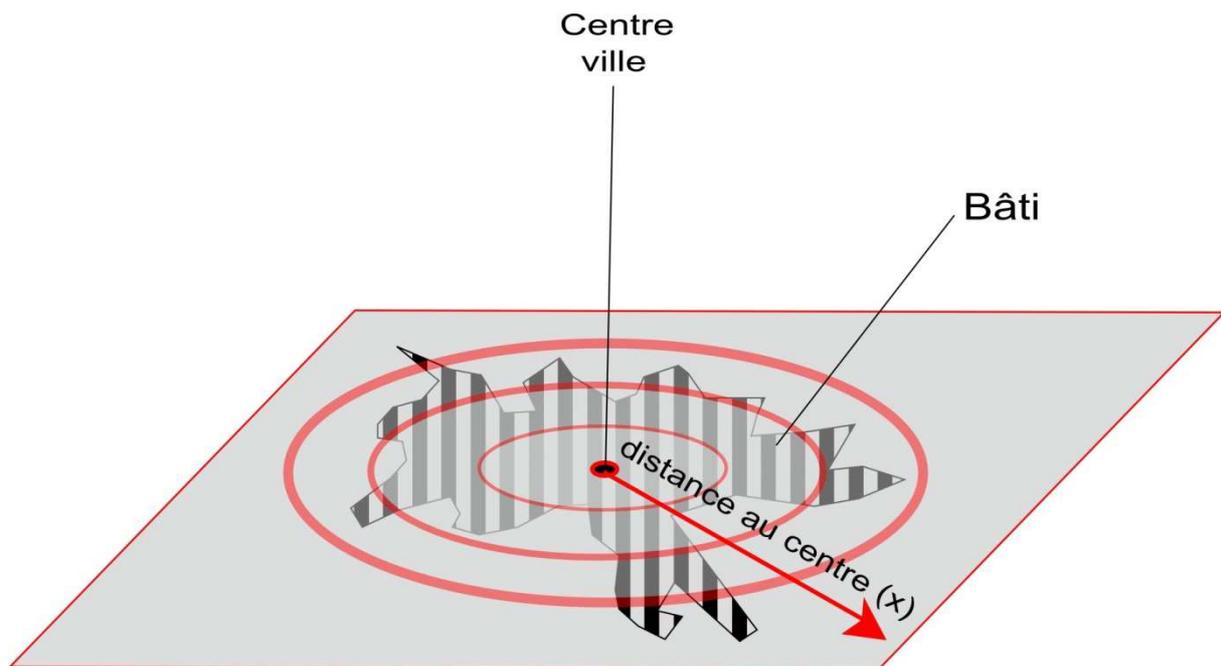


Figure 3. Le modèle centre périphérie : une projection sur une demi droite Ox

Dans la figure 3, la ville est donc envisagée comme circulaire, monocentrique, entièrement accessible, sans limite et isotrope.

Les hypothèses sont ainsi les mêmes que celles développées par Alonso (1964).

2.3) Mise en évidence de la relation radiale entre la vitesse et la distance

L'analyse radiale est au cœur des méthodologies portant sur la forme urbaine. Sur ce point, il est de coutume de travailler principalement sur la notion de densité (population, emploi). Nettement moins d'auteurs abordent aujourd'hui cette question de la morphologie à partir d'autres éléments. On citera les études sur la densité de bâti (Guerois 2003, Weber et Hirsh 2000, Enault 2004).

Dès lors que l'on se positionne sur la question des transports, le nombre d'études de type radiales sur la forme urbaine apparaît encore plus tenu. On retiendra principalement les travaux de Peguy (2000) et de Bonnafous Tabourin (1998).

Ce paragraphe prolonge cette étude en appuyant les observations par une explication fondée sur les « lois » gravitaires habituelles de la géographie.

Mais avant d'explicitier les principes théoriques de cette relation, examinons statistiquement la répartition des vitesses à partir du cas d'étude de Dijon.

2.3.1) Analyse radiale des vitesses : approche statistique à partir de l'exemple dijonnais

Amorçons notre raisonnement par la nature des données que nous présentons dans la figure 4. Ces dernières dérivent d'une analyse radiale portant sur la totalité du réseau des principales infrastructures routières de l'aire urbaine dijonnaise.

Les données de vitesse par tronçons sont ensuite agrégées par couronnes de pas de 500 m. on réalise alors la moyenne des vitesses.

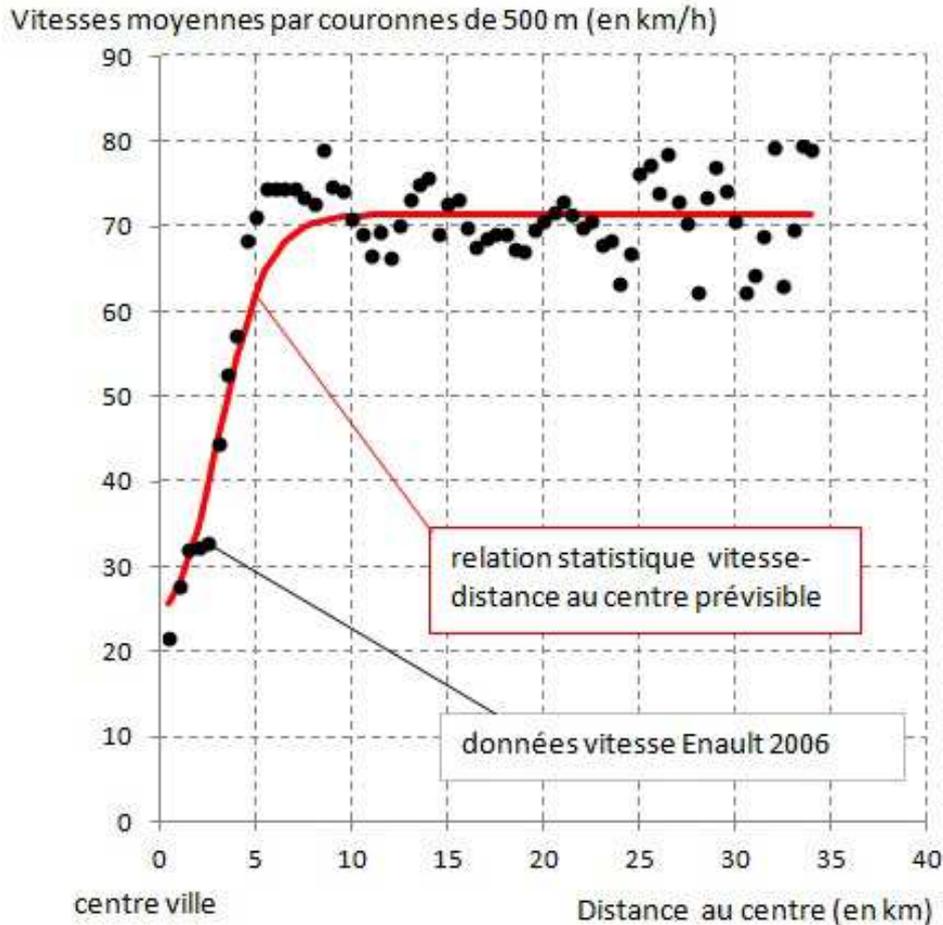


Figure 4. Mise en évidence statistique de la relation vitesse-distance au centre

Le résultat est intéressant dès lors que l'on met en relation cette vitesse moyenne avec la distance au centre de la ville. On perçoit clairement une relation entre l'espace et la vitesse. Il convient de déterminer la nature de cette dernière. Le graphique précédent présente une courbe qui pourrait correspondre à ce type de profil.

Il faudra toutefois bien souligner les nuances de cette logique.

D'un point de vue général, on soulignera le centre urbain (l'agglomération) où les vitesses décroissent à mesure que l'on se rapproche des espaces les plus centraux. Une vitesse théorique moyenne basse est atteinte au cœur du centre historique. A l'inverse, dans les espaces périurbains, les vitesses tendront à se stabiliser⁹. On atteint alors une vitesse maximale que nous noterons V_{max} , dont on a pu observer que les valeurs oscillaient pour la plupart des villes françaises autour de 70 km/h¹⁰.

Dans la pratique, la moyenne pour des couronnes de petite taille oscille entre deux bornes :

- 62 km/h pour la valeur basse (correspondant à la moyenne des petites routes de desserte locale
- 80 km/h pour les moyennes entre la voirie rapide et les grandes routes départementales.

L'analyse statistique a bien montré l'existence d'une supposée relation liant la vitesse moyenne à la distance au centre. Il convient à présent d'en déterminer la formule.

⁹ Ce raisonnement tient en établissant des moyennes pour des couronnes de taille plus importantes (>2 km)

¹⁰ Cela correspond à la moyenne entre les vitesses des grandes RD (entre 70 et 80 km/h) et RN (entre 80 et 90 km/h), autoroutes (entre 100 et 120 km/h) et la desserte locale (entre 40 et 70 km/h).

2.3.2) Justification théorique et définition de la relation mathématique

La solution peut nous être apportée par la « loi » la plus connue et aussi la plus employée en géographie, à savoir le modèle gravitaire. On connaît depuis le 19^{ième} siècle cette analogie avec la physique (Ravenstein 1885, Carrothers 1956). Un aperçu plus récent de ces types de modèle nous est donné dans Batten Boyce (1987).

D'un point de vue général, il est possible d'exprimer le flux émis à partir d'une masse de population M_i ou s'établissant entre deux masses de populations M_i et M_j .

Sur le plan général, en analogie avec les lois de la physique, on émet l'hypothèse que le flux émis à partir d'un point i est de type :

$$Q_i = GM_i \quad [13]$$

Avec Q_i le flux ou le débit émis à partir de i et G un paramètre d'équilibrage du flux et M_i population présente en i . En cumulant deux origines, on obtient le flux entre deux masses, soit l'analogie stricte avec la gravitation universelle :

$$Q_{ij} = G \frac{M_i M_j}{x_{ij}^2} \quad [14]$$

Avec Q_{ij} le flux s'établissant en i et j , G un paramètre d'équilibre à définir, M_i la population en i et M_j la population présente en j et enfin x_{ij} , la distance séparant les deux lieux i et j .

Naturellement, dans cette hypothèse le flux ou débit se présentait essentiellement comme un champ autour d'une émission de masse (Isard Bramhall 1960) soit :

$$Q_i = \frac{Gm_i}{x_i} \quad [15]$$

Avec m_i la population d'une couronne de rayon dx_i .

On peut alors développer m_i en introduisant la densité g_i à une distance x_i du centre. On obtient :

$$Q_i = \frac{2\pi G x_i g_i}{x_i} \quad \text{d'où, en simplifiant une expression reliant densité et débit :}$$

$$Q_i = Gg_i \quad [16]$$

Avec g_i densité de population présente à une distance x_i du centre.

Dans les modèles de la ville monocentrique, il existe une grande variété d'expressions pour la densité de population. L'abondante littérature sur la question le confirme.

De l'ensemble de ces modèles, le plus connu et le plus testé reste le modèle de Clark (1951) dont la formule suit une exponentielle négative de la distance au centre soit :

$$g_i = g_o e^{-\alpha x_i} \quad [17]$$

Avec g_o densité extrapolée au centre et α le gradient de densité

En croisant [17] et [16], on peut exprimer le débit en fonction de la distance au centre x_i .

$$Q_i = Gg_o e^{-\alpha x_i} \quad [18]$$

Observons que ce modèle correspond à une forme réduite du modèle de Wilson (1970).

La seconde étape consiste à introduire l'expression [18] au sein du BPR (modèle [12]).

On en déduit que :

$$V_i = \frac{V_{\max}}{1 + \gamma_v \left(\frac{g_o e^{-\alpha_i}}{Q_{\max}} \right)^{\alpha_v}}$$

On pose ensuite $p = \log(\gamma_v g_o^{\alpha_v} / Q_{\max}^{\alpha_v})$ et $\mu = \alpha \alpha_v$
On obtient alors le modèle suivant :

$$V_i = \frac{V_{\max}}{1 + e^{-\mu x_i + p}} \quad [17]$$

Avec V_{\max} vitesse moyenne maximale du périurbain, V_i vitesse moyenne pour une distance x_i du centre, μ et p deux paramètres à calibrer.

La formule [17] est bien connue puisqu'il s'agit du modèle logistique de croissance limitée.

En conservant, la densité g_i , on montre au final que la densité suit une relation de la vitesse soit :

$$g_i = g_o e^{\beta \ln \left(\frac{V_{\max} - V_i}{V_i} \right)} \quad [18]$$

$$\text{Avec } g_o = \left(\frac{1}{G^{\alpha_v}} \right)^{\frac{1}{\alpha_v}} \left(\frac{Q_{\max}^{\alpha_v}}{\gamma_v} \right)^{\frac{1}{\alpha_v}} \text{ et } \beta = \frac{1}{\alpha_v}$$

2.3.3) Amendement du modèle de base

L'expression [17] est établie d'un point de vue théorique or nous avons pu observer à partir d'un échantillon de données que les vitesses centrales n'étaient jamais entièrement nulles. Du point de vue de la modélisation, il convient donc de préférer un modèle logistique plus général de la forme :

$$V_i = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{1 + e^{-\mu x_i + p}} + V_{\min} \quad [18]$$

V_{\min} est alors la vitesse minimale observée au centre de l'agglomération.

L'amendement portant sur le BPR nous conduit à reconsidérer alors le lien vitesse-densité soit :

$$g_i = g_o e^{\beta \ln \left(\frac{V_{\max} - V_i}{V_i - V_{\min}} \right)} \quad [19]$$

On peut exprimer [18] sous forme différentielle en dérivant V_i par x_i .

Pour cela, on pose

$$K = \mu \frac{V_{\max} + V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}}, \quad N = V_{\max} + V_{\min} \text{ et } H = \mu \frac{V_{\max} V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}}$$

On parvient à la relation équivalente à [17] :

$$\frac{dV_i}{dx_i} = KV_i \left(1 - \frac{V_i}{N} \right) + H \quad [19]$$

2.3.4) Validation empirique du modèle vitesse-densité amendé.

Le modèle [19] serait donc la relation théorique qui lierait la vitesse routière à la densité de population. Il reste, à présent, à la valider empiriquement.

Nous proposons pour cela de constituer une base statistique par analyse spatiale permettant de comparer les vitesses agrégées par commune avec les densités de population pour les mêmes unités spatiales.

On retiendra ensuite les moyennes des densités de population par pas de 5 km/h.

Pour valider cette relation, il conviendra alors de linéariser l'expression [19] soit :

$$\log(g_i) = \log(g_o) + \beta \log\left(\frac{V_{\max} - V_i}{V_i - V_{\min}}\right) \quad [20]$$

Statistiquement, cela revient d'abord à calculer pour toute valeur de vitesse par commune V_i , un équivalent $E(V_i)$ noté :

$$E(V_i) = \log\left(\frac{V_{\max} - V_i}{V_i - V_{\min}}\right) \quad [21]$$

La relation est ainsi une simple corrélation linéaire entre $E(V_i)$ et $\log(g_i)$.

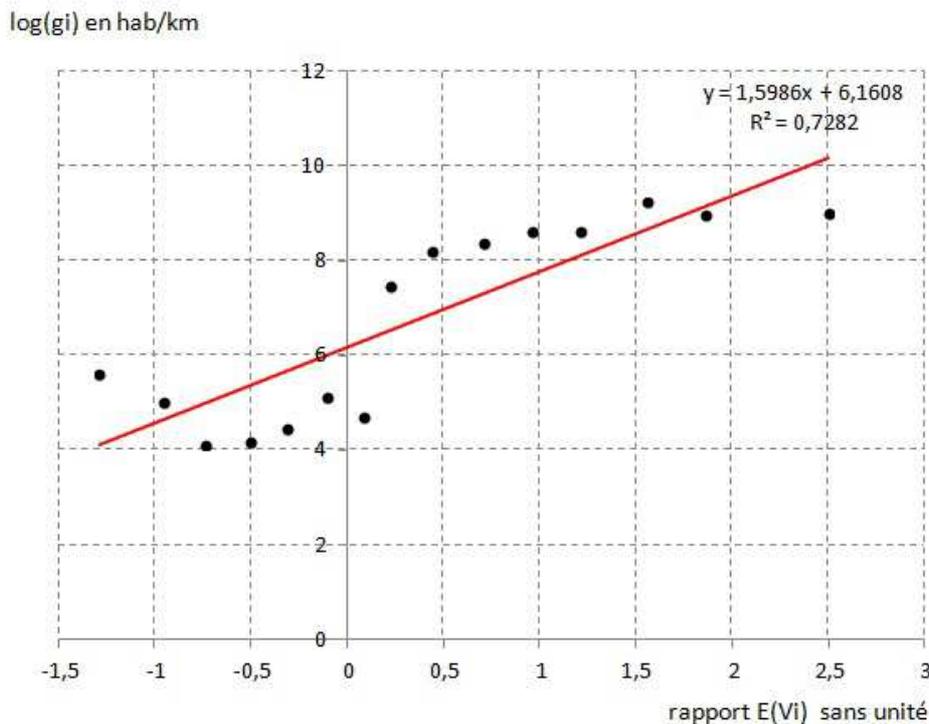


Figure 5. Relation entre la vitesse et la densité (expression linéarisée)

Le coefficient de corrélation vient confirmer la validité de notre expression [19]. Nous parvenons ainsi au résultat que nous avons recherché au début de notre papier.

Conclusion

La question de la vitesse routière est devenue une problématique forte depuis quelques années dans les organismes gestionnaires de la voirie et plus généralement pour les politiques d'aménagement. Employé couramment pour le diagnostic des stratégies de régulation ou d'encadrement des circulations, elle se présente essentiellement comme un indicateur de fluidité ou de congestion.

Dans un contexte d'optimisation des déplacements et de ce que l'on qualifie aujourd'hui de « ville intelligente », la vitesse peut aussi intervenir directement dans les algorithmes de réglage des équipements routiers. Pour l'utilisateur, elle est aussi un élément de guidage pour une conduite plus rapide et plus facile.

On comprend ainsi tous les investissements engagés à la fois par les acteurs publics et privés pour l'obtention et le recueil de ce type de données.

Sur ce point, les techniques évoluent rapidement. Alors que les collectivités poursuivent leurs efforts de mesure de vitesse instantanés (capteurs de la voirie, station de mesure), les opérateurs privés mettent toute leur puissance à construire des entrepôts de données à partir des remontées des GPS et de la téléphonie mobile (améliorant sans cesse les systèmes de collecte et de traitement par des algorithmes spécifiques). Il s'agit encore actuellement du moyen le plus simple pour acquérir de la donnée terrain à des niveaux agrégés (tronçon et dans le temps). Mais cette technologie présente un coût encore trop lourd pour bon nombre de collectivités d'où le développement d'indicateurs de vitesse.

Des méthodes multiples ont été proposées mais nous ne retiendrons que les plus importantes : le calcul de la vitesse instantanée à partir de la concentration et du débit, le BPR et son concurrent français le BRP.

Naturellement, il y a cet aspect gestionnaire de la vitesse mais il existe aussi la partie plus théorique et abstraite qui vise à rechercher le lien entre la morphologie urbaine et la congestion routière.

C'est finalement un domaine assez récent mais qui a suscité rapidement depuis les années 1990 un intérêt, et cela certainement en raison des politiques de réduction des vitesses dans les villes. Aussi, la littérature sur la question est abondante mais se limite trop souvent à des études générales empiriques (sans doute par manque de données à des échelles infra-urbaines).

Disposant d'un jeu de données de vitesse à l'échelle d'une aire urbaine, nous avons justement l'opportunité non seulement de tester certaines hypothèses sur la congestion urbaine mais également d'en proposer des explications théoriques.

Certes, la réalité laisse apparaître une image des vitesses diversifiée et même parfois anarchique sur certains points mais cela ne doit pas masquer toutes les régularités de l'espace sur cette question.

En partant de l'hypothèse de la ville monocentrique, nous avons ainsi conduit toute une démarche théorique visant à mieux comprendre pourquoi on observait de telles régularités pour les vitesses. Il en est ressorti un lien unissant vitesse, densité de population et espace.

C'est un résultat intéressant car cet hypothèse de lien sous ce type de forme avait été avancée depuis de nombreuses années sans toutefois que l'on parvienne à en déterminer précisément la nature.

L'existence même de ce type de modèle, d'un point de vue théorique, confirme que l'espace urbain n'est pas homogène dans son fonctionnement. Cela suppose donc que pour en étudier les formes, il serait sans doute utile d'envisager la notion de vitesse au lieu de la notion de distance. Introduire ce paramètre dans les métriques semble alors relativement aisé et pourrait apporter des réponses éclairantes sur des questions aussi importantes que les limites urbaines, les dynamiques de la ville ou même les perceptions de l'espace.

Références

ALONSO W. (1964) *Localisation and land use*, Harvard University Press

ANAS A., ARNOTT R., SMALL K.A. (1998) « Urban Spatial Structure », *Journal of Economics Literature*, n°36, pp.1426-1464

BADDOE D.A., MILLER E.J., (2004), « Transportation Land-use interaction : empirical findings in North America and their implications for modelling », *Transportation Research Part D*, n°5, p. 235-263

- BATTEN D.F., BOYCE D.E.,(1987), « Spatial Interaction, Transportation, and Interregional Commodity Flow Models », in *Handbook of Regional and Urban Economics*, P. Nijkamp, vol. 1, Chapter 9, 357-406,
- BATTY M., LONGLEY P. (1986), « The fractal simulation of urban structure », *Environment and Planning A*, 18, pp 1143-1179
- BEAUCIRE F., (2002), *Sur la relation transports/urbanisme*, rapport PREDIT
- BONNAFOUS A., TABOURIN E. (1998) « Modélisation de l'évolution des densités urbaines », *Données urbaines II* dirigé par PUMAIN D. et MATTEI M.F., Paris, Anthropos, collection Villes, pp. 273-285.
- BUSSIERE R. (1975) *Interaction urbaines. Le modèle de la CRU*, Annales 1975, Paris, Centre de recherche d'urbanisme
- CARROTHERS G.A.P. (1956), « An historical Review of the Gravity and Potential Concepts of Human Interaction », *Journal of The American Institute of Planners*, 22, pp. 94-102.
- CLARK C. (1951) « Urban population densities », *Journal of the royal Statistical Society serie A*, n°114, p. 490-496
- D'AUBIGNY G., CALZADA C., GRASLAND C., ROBERT D., VIHO G. et VINCENT J. M. (2007), « Approche poissonnienne des modèles d'interaction spatiale », *Cybergeo : European Journal of Geography*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques
- DUPUY G. (1995a) *Les territoires de l'automobile*, Anthropos, Economica Paris
- DUPUY G. (1995b) *La ville et l'automobile*, Paris, Flammarion
- ENAULT C. (2004) « La dilution, note méthodologique pour l'analyse de l'étalement
- ENAULT C., (2005), « Les vitesses dans l'aire urbaine dijonnaise : un modèle fondé sur la fonction logistique et la courbe de congestion routière débit-vitesse », *Cybergeo : European Journal of Geography*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques
- ENAULT C. (2012) « Simulation de l'étalement urbain de Dijon en 2030 : approche systémique de la dynamique gravitaire ville-transport », *cybergeo*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques
- FRANKHAUSER P. (1994) – *Les fractalités des structures urbaines*, Anthropos, Paris
- FRANKHAUSER P. (1997) – « L'approche fractale : un nouvel outil de réflexion dans l'analyse spatiale des agglomérations urbaines », *Population*, n°4, p. 1005-1040
- GREENSHIELDS B.D. (1935) « A study of traffic capacity », *Highway Research Board Proceedings*, Vol 14, pp 448-477.
- GUEROIS M. (2003), *Les formes des villes européennes vues du ciel. Une contribution de l'image Corine à la comparaison des grandes villes d'Europe occidentale*, thèse de doctorat en géographie, université de Paris I Panthéon Sorbonne
- ISARD W., BRAMHALL D.F. (1960), « Gravity, Potential and Spatial Interaction models », in *Methods of Regional Analysis*, W. Isard, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 493-568.
- KENWORTHY J.R., LAUBE F.B. (1999) « Patterns of automobile dependence in cities : an international overview of key physical and economic dimensions with some implications for urban policy », *Transportation Research Part A*, n°33, p. 691-723
- KENWORTHY J.R., LAUBE F.B., (1996), « Automobile dependence : an international comparison of urban transport and land use patterns with implications for sustainability », *Impact Assers Review*, n°16, p.279-308
- L'HOSTIS, A., 1997, *Images de synthèse pour l'Aménagement du territoire : la déformation de l'espace par les réseaux de transport rapide*, thèse de doctorat en Aménagement de l'espace et Urbanisme, Tours, 7 janvier 1997
- LEBACQUE J.P.(1993), « Les modèles macroscopiques du trafic », *Annales des Ponts et chaussées*, Vol 67, pp. 28 45.

- LEBACQUE J.P., LESORT J.B. (1999), « Macroscopic Traffic Flow Models : A question of Order », *Proceedings of the 14th International Symposium and Traffic Theory*, Jerusalem, pp. 3-25
- LECLERCQ L. (2002) « Modélisation du trafic et estimation des nuisances sonores », *Modélisation du trafic* dirigé par ARON M., BOILLOT F. et LEBACQUE J.P., Actes du groupe de travail 1999, les collections de l'INRETS n°83, pp. 37-54
- LEROY S.F., SONSTELIE J. (1983) « Paradise lost and regained : transportation innovation, income and residential location », *Journal of Urban Economics*, n°13, p. 301- 310
- LEROY S.F., SONSTELIE J. (1983) « Paradise lost and regained : transportation innovation, income and residential location », *Journal of Urban Economics*, n°13, pp. 301-310
- LIGHTHILL M.J., WHITHAM G.B. (1955) « On kinematic waves : a theory of traffic flow on long crowded roads », *Proceedings of Royal Society*, n°1178, pp. 145-317
- MILLS E. S., 1970, « Urban density function », *Urban Studies*, n°7, p. 5-20
- MILLS E.S., Tan J.P., (1980), « A comparison of urban density function in developed and developing countries », *Urban Studies*, n°17, p. 313-321
- MULLER P.O., (1995), « Transportation and urban Form : stages in the spatial Evolution of the American metropolis », in Hanson S. (dir.) *The geography of urban transportation*, The Guilford Press New York
- NEWMAN P., KENWORTHY J.R. (1989), *Cities and automobile dependence, an international Sourcebook*, Brookfield.
- NEWMAN P., KENWORTHY J.R. (1991) « Transport and urban form in thirty two of the world's principal cities », *Transport Review*, n°3, pp. 249-272
- NEWMAN P.W.G, KENWORTHY J.R., (1996), « The Land use – transport connection And overview », *Land Use Policy*, vol. 13, n°1, p. 1-22
- PAYNE H.J. (1971) « Models of the freeway traffic and Control » *Proceedings of the Mathematics Modes and Public Systems San Diego Simulation Councils Inc*, pp. 51-61
- POUYANNE G. (2004), *Forme urbaine et mobilité quotidienne*, thèse de doctorat en Sciences Economiques, Université Montesquieu Bordeaux IV
- RAVENSTEIN E., (1885), « The law of Migration », *Journal of the Royal Statistic Society*, pp. 167-235
- RICHARDS P.I. (1956), « Shockwaves on the highway », *Operations Research*, Vol 4, pp. 42-51
- RICHARDS P.I. (1956), « Shockwaves on the highway », *Operations Research*, Vol 4, pp. 42-51
- ROSS P. (1988), « Traffic Dynamics » *Transportation Research part B*, Vol 32, n°7, pp 421 435
- TABOURIN E., (2001), *L'étalement urbain : un défi pour les transports - Localisations des Activités et des Résidences sur les Territoires et Inductions Spatialisées des Trafics en 2020 : le modèle LARTIST appliqué à la région lyonnaise*, Habilitation à Diriger les Recherches, Université Lumière Lyon 2
- urbain », *Espace Géographique*, n°3
- WEBER C., HIRSCH J. (2000) « Processus de croissance et limites urbaines », revue européenne de géographie, *Cybergeo*, n°158
- WIEL M. (2002) – *Ville et automobile*, Descartes & Cie, Paris
- WIEL M. (2003) « L'automobile et la ville : le rôle clé des vitesses automobiles », communication au XXXIX^{ème} colloque de l'ASRDLF concentration et ségrégation, Lyon, LET, ENTPE
- WILSON A.G. (1970) *Entropy in urban and regional modelling*, Pion, London, Great Britain
- ZHANG H.M. (1998), « A theory of none equilibrium traffic flow », *Transportation Research part B*, Vol 32, n°7, pp 485-498