

La réduction des consommations énergétiques dans les transports urbains exige une politique foncière active

L'utilisation du modèle TRANUS-SETU pour l'aide à la décision

Benoît Lefevre
Pierre-Noël Giraud

Les consommations énergétiques liées aux transports urbains sont particulièrement préoccupantes. Elles représentent déjà une part importante des bilans énergétiques urbains, généralement équivalente à celle du résidentiel, soit entre 20% et 50% des consommations énergétiques urbaines totales (hors industries). Il s'agit des consommations dont on prévoit que la croissance sera la plus rapide dans les scénarios tendanciels¹.

Les experts s'accordent sur le fait que dans un scénario au fil de l'eau la mobilité urbaine au moyen de modes de transport motorisés et individuels va exploser². Les facteurs déterminant les consommations énergétiques des transports urbains sont beaucoup plus complexes à analyser, et plus difficiles à influencer par des politiques publiques que dans le secteur résidentiel ou dans l'industrie. Les structures spatiales urbaines, qui influencent fortement la demande de déplacement et donc les consommations énergétiques des transports, ont une durée de vie et une résilience bien supérieure à celle des bâtiments. Les actions dans ce domaine sont donc à la fois urgentes et engagent l'avenir pour le bien plus long terme.

La diversité des villes dans la consommation énergétique des transports urbains

Une étude de Kenworthy (2003), portant sur 84 « villes globales » montre l'extrême diversité des villes actuelles. Ainsi, les émissions de CO₂ dues aux transports urbains varient d'un facteur supérieur à 100, entre des extrêmes de 2033 kgeC par habitant et par an pour Atlanta et 19 kgeC pour Ho Chi Minh-Ville. Quant à la part des transports en commun (*versus* individuel) dans ces émissions, elle va de plus de 70 % à Manille ou à Dakar à moins de 1 % à Atlanta, ou à Riyad.

La richesse, mesurée par le PIB annuel par habitant, n'est pas un facteur fortement corrélé avec le taux de motorisation individuelle. De plus, à taux de motorisation similaire, l'utilisation effective de l'automobile peut varier considérablement

d'une ville à l'autre. Il en résulte que les consommations énergétiques liées au transport privé rapportées à la richesse, mesurées en mégajoules pour mille dollars de PIB, n'augmentent pas systématiquement avec le PIB par habitant.

Les niveaux les plus élevés sont atteints par trois groupes de villes : les villes africaines (2 200 MJ/\$1000 de PIB) et les villes des Etats-Unis et du Moyen-Orient (1900 MJ/\$1000 de PIB). Les villes d'Europe de l'Ouest et de l'Asie riche sont les plus performantes avec seulement 489 et 303 MJ/\$1000 de PIB respectivement. Les autres régions se situent entre ces extrêmes, avec une moyenne de 1 364 MJ/\$1000 de PIB.

S'agissant des infrastructures, l'offre d'autoroute urbaine par habitant est particulièrement importante aux Etats-Unis (156 m/1000 hab), en Australie et en Nouvelle-Zélande (83% du niveau américain), et au Canada (78% du niveau américain).

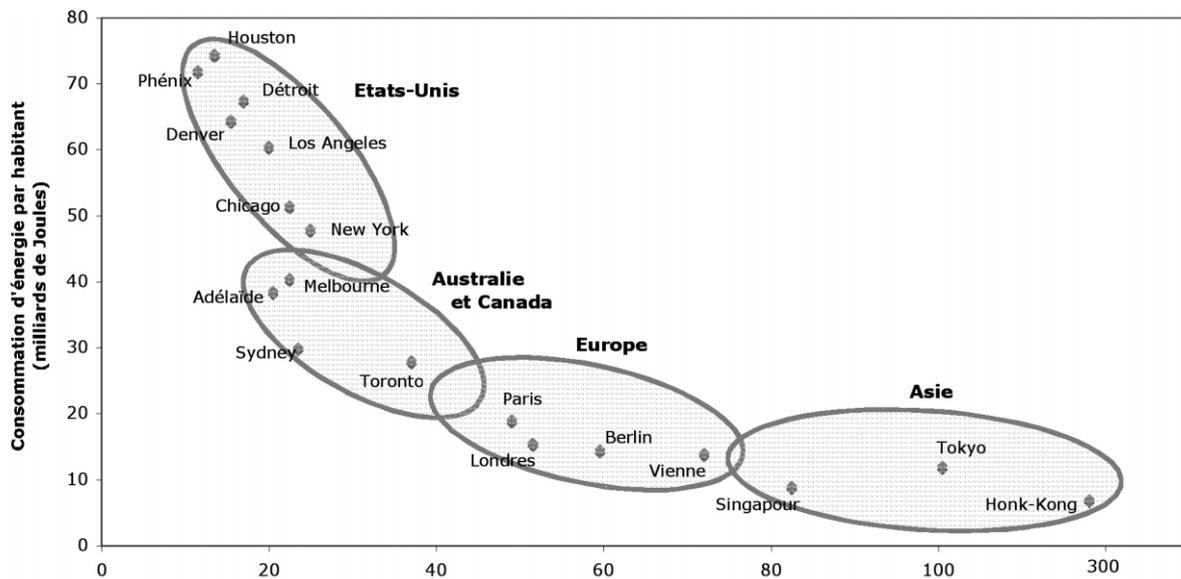
Dans les autres régions, le réseau autoroutier urbain est faible, particulièrement en Amérique Latine et en Chine (2% du niveau américain). Si l'on rapporte cette offre d'autoroute urbaine à la richesse (et non au nombre d'habitants), les résultats s'inversent : les villes pauvres offrent un peu plus d'autoroute urbaine que les villes riches : 4.5 km contre 4.1 km/\$1000 de PIB.

En fait, les villes africaines, d'Europe de l'Est et du Moyen Orient offrent déjà plus de kilomètres d'autoroutes par \$1000 de PIB que les villes américaines.

L'offre de transport public, évaluée en siège-km par

1. Les émissions de CO₂ liées aux transports connaissent un taux de croissance annuelle de 2,4% entre 1990 et 1995, soit un taux largement supérieur à ceux des secteurs de l'industrie (0,4%), de l'agriculture (0,8%), des bâtiments (1%) ou des déchets (1%) (Wright, 2004).

2. Au niveau mondial, le nombre de voitures passera de 1 milliard en 2007 à 2,6 milliards en 2030. (Wright, 2004).



L'hyperbole de Newman et Kenworthy : le rapport densité/consommation énergétique dans les transports.

habitant et par an est en moyenne peu différente entre villes riches et villes pauvres : 3 336 pour les régions riches et 3 203 pour les régions pauvres.

Par contre, relativement à la richesse, les villes pauvres fournissent une quantité de transport en commun bien supérieure : 831 sièges-km/\$1000 PIB à celle offerte par les villes riches : 126 sièges-km/\$1000 PIB.

Ces constats mettent en évidence l'importance des facteurs urbanistiques et de l'existence d'alternatives à l'usage de l'automobile dans la consommation énergétique des transports d'une ville. Ils confirment l'assertion de Litman et Laube (2002) selon qui : « Beaucoup de régions riches ont des systèmes de transports urbains équilibrés, alors que certaines régions pauvres sont très dépendantes de l'automobile. La différence vient des politiques publiques qui influencent les choix de transports et l'usage des sols ».

La corrélation entre la densité urbaine moyenne et les consommations énergétiques des transports urbains

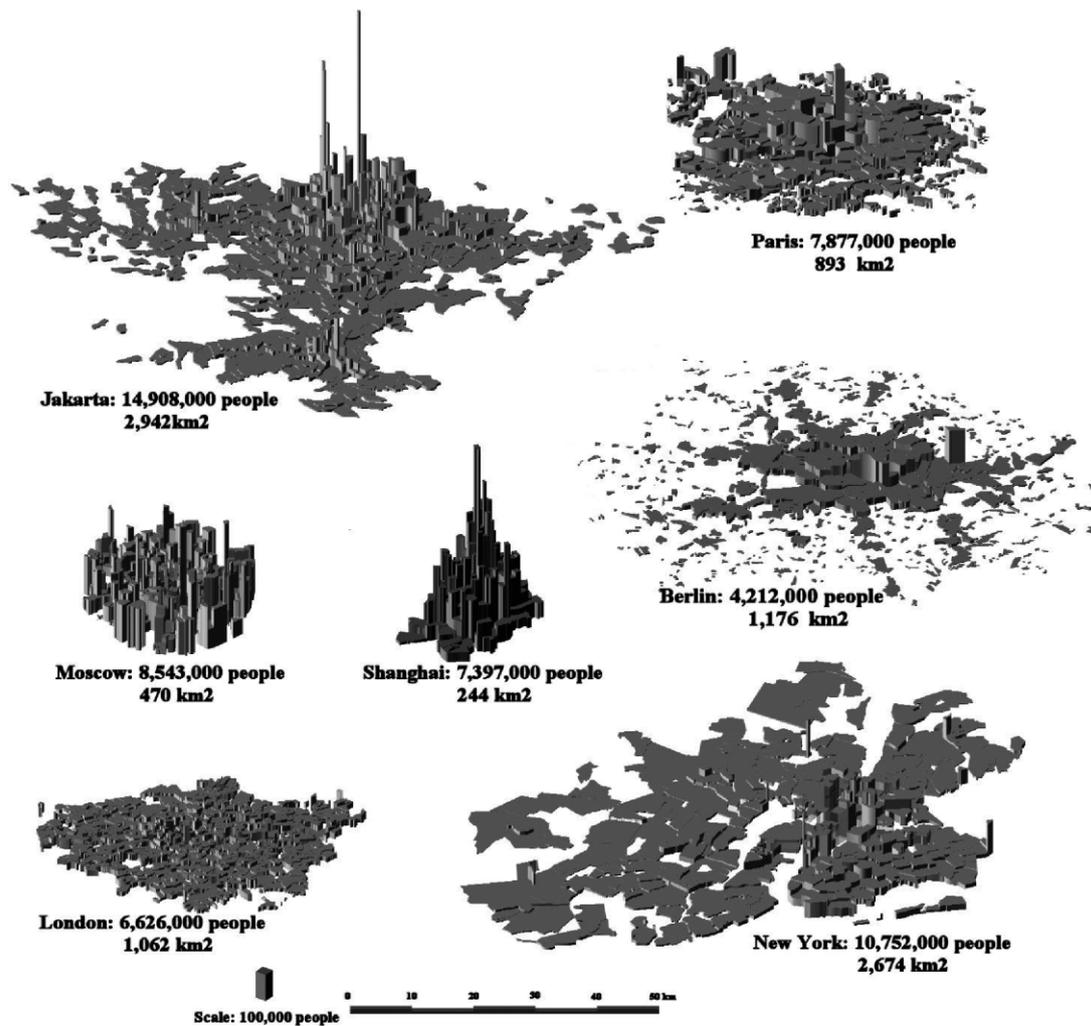
Conduites depuis une quinzaine d'années, les recherches de Newman et Kenworthy sur la dépendance automobile et sur le développement urbain durable mettent en avant la forte interaction entre densités urbaines et consommation d'énergie dans les transports.

Newman et Kenworthy ont construit une célèbre hyperbole « consommations énergétiques des transports – densité ». La corrélation entre la densité d'urbanisation moyenne en habitants par hectare et la consommation d'énergie par personne est forte : $R^2 = 0,86$.

Ces résultats sont dus à ce que la densité est fortement corrélée aux répartitions modales et à l'intensité d'usage de

Évolution de la densité urbaine et de l'usage des transports

| Métropoles | américaines | australiennes | européennes | asiatiques |
|---|-------------|---------------|-------------|------------|
| Densités urbaines globales (habitants+emplois / ha) | | | | |
| 1970 | 25 | 22 | 102 | 260 |
| 1990 | 23 | 18 | 82 | 235 |
| Évolution 70-90 | -8 % | -18 % | -20 % | -3 % |
| Distance domicile travail (km) | | | | |
| 1980 | 13 | 12 | 8,1 | |
| 1990 | 15 | 12,6 | 10 | |
| Évolution 80-90 | +15 % | +5 % | +23 % | |
| Usage de l'automobile (km/an/pers) | | | | |
| 1980 | 8.800 | 5.800 | 3.500 | 900 |
| 1990 | 10.900 | 6.500 | 4.500 | 1.500 |
| Évolution 80-90 | +24 % | +12 % | +29 % | +67 % |



Profils de quelques grandes métropoles mondiales. Source : Alain Bertaud

l'automobile. Les aires métropolitaines à faible densité connaissent une prédominance quasi-absolue de l'automobile et la consommation totale d'énergie dans les transports est considérable (souvent plus de 65.000 MJ/personne/an). Les métropoles à forte densité ont une répartition tri modale nettement plus équilibrée avec un avantage marqué pour le transport public (entre 40 et 60 % des déplacements). La consommation totale d'énergie dans les transports est quatre à sept fois moins importante que dans les métropoles à faible densité. Les métropoles européennes occupent une position intermédiaire en terme de densité urbaine : entre 40 et 120 (habitants+emplois) par hectare net. La répartition modale est plus équilibrée mais laisse un avantage marqué à l'automobile qui connaît un développement soutenu dans les couronnes extérieures à faible densité urbaine. La consommation totale d'énergie dans les transports est deux à quatre fois moins importante que dans les métropoles à faible densité.

Si les conclusions générales de Newman et Kenworthy ne sont pas remises en cause, ils ont été critiqués, en particulier

parce que la distribution spatiale des activités et des ménages n'est pas analysée. La structure spatiale d'une ville, en particulier la localisation relative des résidences, des emplois et des aménités, détermine aussi le nombre et la longueur des déplacements. On ne peut pas se contenter de l'analyse de la densité moyenne pour expliquer les consommations énergétiques des transports. Cette « superficialité » dans l'analyse conduit à ce que Breheny (1991) appelle « l'obsession de la densité ». C'est à ce genre d'objection que s'attachent à répondre les travaux d'A. Bertaud.

Le rôle des formes urbaines dans les déplacements : la structure urbaine selon Bertaud

L'approche des dynamiques urbaines proposée par Bertaud éclaire le rôle des formes urbaines dans les déplacements, et complète donc utilement les approches fondées sur la densité

moyenne. Pour cet auteur, la façon dont sont spatialement distribuées les densités de population et d'emploi, et les déplacements au sein de l'aire urbaine sont bien plus importants que la densité moyenne pour expliquer le nombre, la longueur et les consommations énergétiques des déplacements.

Bertaud définit la structure spatiale urbaine par deux éléments complémentaires : 1) la distribution spatiale de la population 2) la distribution spatiale des déplacements (« pattern trips ») effectués par les personnes quand elles vont de leur domicile vers les lieux où elles vont avoir une activité productive ou sociale.

Il représente graphiquement la distribution spatiale des populations sous forme d'un objet en 3 dimensions : l'aire urbaine construite est représentée dans le plan XY et les densités de population au sein de cette aire dans la dimension Z. (Figure page précédente)

Les structures spatiales présentées dans la figure ci-dessus apparaissent complexes et très différentes. Pour mieux comprendre l'influence de ces structures spatiales urbaines sur les consommations énergétiques des transports, il faut donc analyser les propriétés géométriques de ces objets en trois dimensions, et non la simple densité moyenne. Parmi ces propriétés : le gradient de densité, c'est-à-dire le sens et la rapidité avec laquelle la densité évolue en allant du centre à la périphérie. Généralement la densité décroît, mais pas toujours (Cf. Moscou, figure page précédente), mais de manière plus ou moins rapide. Selon Bertaud, ce gradient résulte pour l'essentiel du fonctionnement du marché foncier, toujours partiellement réglementé, mais à des degrés très variables selon les pays.

La forme urbaine qui a le plus inspiré les travaux de modélisation économique des dynamiques urbaines est la ville monocentrique dotée d'un « Central Business District (CDB) ». Les travaux pionniers de Alonso (1964), Muth (1969) et Mills (1972) sur les gradients de densité dans les aires urbaines sont ainsi basés sur l'hypothèse d'une ville monocentrique. Mais au cours du temps, il est devenu évident que la structure de beaucoup de villes diffère du modèle monocentrique et que les activités génératrices de déplacements sont réparties en agglomérats (« clusters ») dans l'ensemble de l'aire urbaine, en dehors du CBD. Bertaud identifie quatre cas de figure pour décrire la distribution spatiale des déplacements d'une ville.

La ville monocentrique. Elle peut maintenir un marché du travail unifié en fournissant la possibilité de se déplacer aisément de la périphérie vers le centre le long des routes radiales ou avec le rail. Si les marchés fonciers et immobiliers sont libres ou faiblement régulés, les densités tendent à suivre le prix du foncier et le gradient de densité présente donc une pente négative du centre vers la périphérie (Londres et New York, et curieusement aussi Shanghai, qui illustre donc que le même résultat s'obtient par une planification qui se représente la ville telle qu'elle est formée par le marché).

La ville polycentrique, version « villages urbains ». Certains urbanistes idéalisent ce genre de villes où une

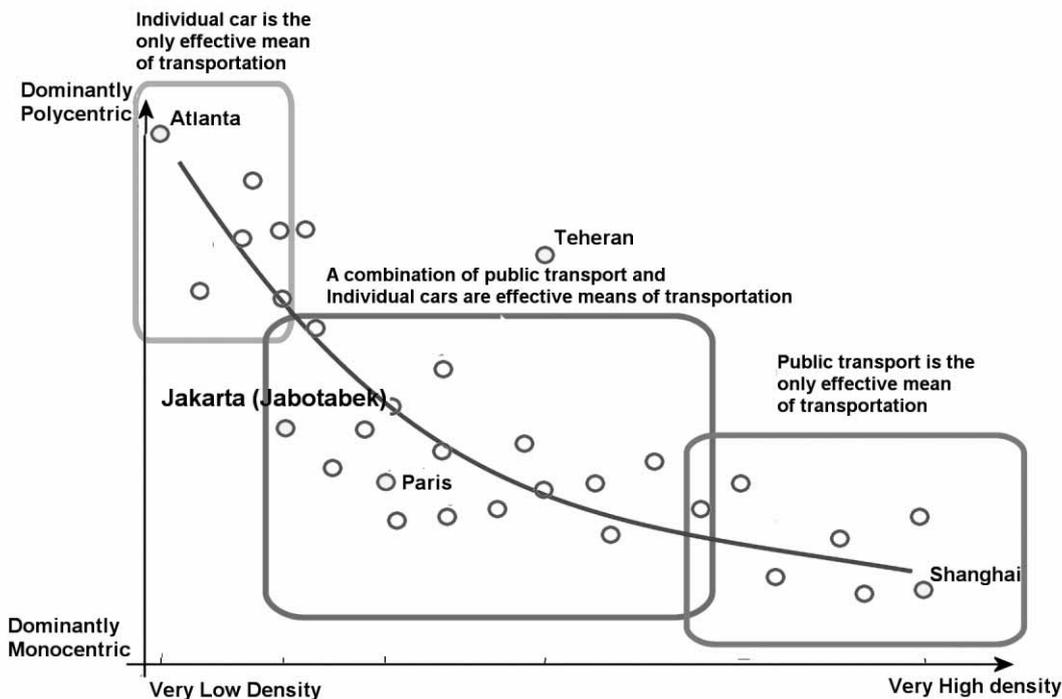
communauté émerge autour d'un centre d'emploi (*cluster*). Ces « villages urbains » autosuffisants vont s'agréger pour former une ville polycentrique étendue et dont la densité moyenne peut être faible. Malgré cela, dans une telle ville, les déplacements se font sur de très courtes distances. Idéalement tout le monde pourrait se déplacer en vélo ou à pied pour aller travailler. Selon Bertaud, ce phénomène n'a hélas jamais été observé dans aucune ville. Il correspond à une fragmentation extrême du marché du travail. Cette vision de « villages urbains » autosuffisants contredit donc ce qui est pour beaucoup la raison d'être des mégapoles : les économies d'échelles obtenues par un large marché du travail intégré.

Pourtant cette utopie persiste dans l'esprit de nombre d'urbanistes. Stockholm, Séoul, Shanghai depuis 20 ans en fournissent des exemples intéressants : alors que les constructions de logement sont directement liées dans les villes satellites à l'existence d'emplois locaux, on constate que la majorité des habitants des ces villes satellites commutent pour travailler en ville et que les emplois des villes satellites sont occupés par des habitants du centre. Cela donne le troisième type de ville : **la ville polycentrique avec déplacements quasi « browniens »**.

Le quatrième type résulte de l'évolution des grandes villes initialement monocentriques dont les structures se dissolvent progressivement en une structure polycentrique. Le CBD perd sa primauté, et des *clusters* d'activités générant des déplacements se répartissent dans l'aire urbaine bâtie. Les mégapoles ne sont pas nées polycentriques, elles ont évolué dans cette direction (cf. Jakarta, où le polycentrisme naissant est bien visible). Certaines circonstances tendent à accélérer la mutation vers la polycentricité : un centre historique avec un faible niveau d'aménités, un taux de motorisation élevé, un bas prix de la terre, une topographie plate, un réseau viaire en grille. D'autres tendent à freiner cette mutation : un centre historique avec un haut niveau d'aménités, un transport public basé sur le rail, un réseau viaire originellement radial, et une topographie rendant difficile la communication entre banlieues.

Dans une ville polycentrique, chaque centre secondaire génère des déplacements depuis l'ensemble de l'aire urbaine. Ces déplacements montrent une grande dispersion des origines et destinations, presque aléatoires. Ils tendent donc à être plus long que dans une ville monocentrique, toutes choses égales par ailleurs. Bertaud considère que l'on peut aussi s'attendre à ce que les villes polycentriques aient un gradient de densité avec une pente négative centré sur le « centre de gravité » de l'aire urbaine, qui peut être différent du CBD. Mais la pente doit être plus faible que pour une ville monocentrique, étant donné que la proximité au centre de gravité offre des avantages en terme d'accessibilité moins important que dans le cas d'une ville monocentrique. Ces hypothèses sont vérifiées dans des villes comme Los Angeles ou Atlanta.

Les transports en commun sont incompatibles avec des densités faibles et des structures urbaines à dominantes polycentriques. Les stations de bus et de rail doivent être



Relation entre la structure spatiale et l'efficacité des transports urbains. Source : Bertaud A. et Malpezzi S.

facilement accessibles depuis les lieux de résidence et de travail et la vitesse de marche à pied est au plus de 4,5 km/h. Le temps de marche acceptable varie en fonction des cultures et des revenus mais différentes enquêtes montrent que les citoyens cherchent à éviter d'avoir à marcher plus de 10 minutes. Aussi les stations de transports en commun ont un rayon d'action (« catchment area ») de 800 mètres. Ce rayon d'action peut toutefois être élargi par des systèmes d'alimentation, généralement par mini bus ou taxi collectif. Cette solution pose les problèmes classiques d'intermodalité : perte de temps, augmentation du coût direct en l'absence d'intégration tarifaire, besoin d'infrastructures de commutation adaptées et donc renchérissement des investissements nécessaires.

Quoi qu'il en soit, l'investissement dans une infrastructure de transport en commun n'est économiquement justifié que si les densités de résidence et d'emplois sont suffisantes dans le rayon d'action des stations. Si bien qu'un consensus émerge entre les chercheurs et les planificateurs urbains sur un seuil de pertinence pour les transports en commun autour d'une densité de 30 habitants/ha. Bertaud (2003) en conclut qu'il existe, à la croisée des densités et du degré de mono/polycentricité, des domaines d'efficacité pour les différents modes de transport.

L'approche de Bertaud permet de définir en termes encore très généraux ce que devrait être l'objectif des villes si l'on se soucie de l'effet de serre : rester compatibles avec les transports en commun, donc rester denses et modérément polycentriques, ou le redevenir, ce qui est certainement plus difficile.

La critique principale qui peut être faite aux travaux de Bertaud est qu'ils ne prennent pas en compte les interactions

structurantes des technologies de transports avec les formes urbaines. Pour lui ces dernières sont une donnée particulièrement résiliente à laquelle les technologies de transport doivent s'adapter. Il renonce à aborder la complexité systémique du couple « transport - urbanisation ». C'est pourtant là que les politiques publiques peuvent agir.

Des tendances dangereuses pour l'effet de serre mais évitables

La densité urbaine a tendance à baisser dans l'ensemble des métropoles et tout particulièrement dans celles d'Europe occidentale (-20 % en vingt années). Malgré les gains d'usage du transport public (sauf en Australie), l'usage de l'automobile croît de façon marquée, notamment en raison de l'allongement des déplacements domicile travail. Ces évolutions inquiétantes devraient se prolonger. Etant données la résilience et les dépendances de sentier des structures urbaines, il est plus facile de diminuer la densité que de l'augmenter, et plus facile pour une ville monocentrique de devenir polycentrique que l'inverse. A. Bertaud en conclut qu'il existe une tendance globale dans l'évolution des structures urbaines : d'une part les villes s'agrandissent, les CBD aussi. En s'élargissant, les centres perdent la compacité et donc la proximité qui faisait leur attrait. Il est alors inévitable que des centres secondaires émergent et que le degré de monocentricité diminue avec l'augmentation de la taille. D'autre part les revenus et la mobilité augmentant dans les plupart des

mégapoles, les densités tendent à diminuer, et avec elles le rôle des transports en commun. De telles évolutions ne sont évidemment pas souhaitables du point de vue de la soutenabilité environnementale. Le pessimisme des experts qui les considèrent inévitables, tels Bertaud, n'est il cependant pas excessif ?

La comparaison de deux villes, Atlanta et Barcelone, avec des populations et des PIB par habitant du même ordre de grandeur schématise le spectre des possibles. A Atlanta la plus longue distance entre deux points de l'aire urbaine est 137 km, à Barcelone 37 km. Les faibles distances des déplacements à Barcelone dues à la forte densité permettent aux habitants d'en effectuer 20% à pied. A Atlanta, les déplacements à pied ne sont même pas recensés. Si bien que les émissions de CO₂ liées au transport urbain sont 11 fois plus faibles à Barcelone qu'à Atlanta.

La diversité des villes actuelles est certes le résultat de puissantes forces de marché, mais avec Litman et Laube, nous pensons qu'elles résultent aussi des politiques urbaines passées. Aujourd'hui comme hier, des politiques coordonnées d'offre de transport et d'usage des sols peuvent infléchir significativement les croissances urbaines vers des trajectoires soutenables

Les besoins de déplacements naissent des besoins d'échanges des individus dans la ville et de la dispersion des lieux d'activités à travers la ville. Si la structure urbaine change, la demande de déplacement est modifiée. Réciproquement, toute modification de l'offre de transport entraîne des transformations multiples : elles ne portent pas seulement sur les choix d'itinéraires et sur le chaînage des déplacements ou de modes, elles influencent le choix de la destination du déplacement, le nombre de déplacements et des choix plus fondamentaux tels que la décision d'achat d'un véhicule, ou encore les localisations d'emplois et d'activités ou de logements. Ainsi par exemple, le bénéfice à long terme le plus important d'un transport rapide de masse (TRM), bus ou rail, est sans doute son effet de concentration du développement urbain dans des corridors d'accessibilité. Il offre les conditions pour résister à un étalement urbain diffus. Mais cette opportunité ne devient réalité que si la mise en place d'un TRM s'accompagne de politiques d'usage des sols et de transport adéquates. En effet, la construction d'un TRM augmente la mobilité ce qui, étant donnée la constante de Zahavi³, se traduit généralement par une augmentation de l'aire urbaine. Il est donc nécessaire d'encadrer la construction d'un TRM par une politique d'usage des sols.

La maîtrise des émissions liées au transport réside donc dans une « tenaille » de politiques complémentaires visant simultanément à accroître l'offre de transport soutenable et à réduire la demande de mobilité. Même s'il reste beaucoup à faire pour comprendre les interactions entre ces politiques, il est possible de tracer les grandes lignes des combinaisons politiques de transport - politique d'usage des sols qui sont requises pour infléchir significativement les tendances inquiétantes des évolutions en cours.

Cela plaide en faveur d'une planification intégrant explicitement les effets de localisation et relocalisation dus aux infrastructures de transport, c'est-à-dire intégrant l'interaction entre le transport et l'utilisation des sols. Parce que ces interactions sont extrêmement complexes, une façon d'évaluer les impacts des politiques intégrées transports – usage des sols est d'utiliser des modèles de simulation des dynamiques urbaines, basés sur une compréhension approfondie des mécanismes de choix de localisations et de transports. Ces modèles sont complexes mais permettent de mieux articuler, à partir de scénarios quantifiés, les deux grands domaines d'action publique susceptibles d'infléchir la croissance urbaine vers des trajectoires soutenables : l'urbanisme et la politique de transport.

La ville de Bangalore (Inde) à l'aune du modèle TRANUS-SETU

Nous avons sélectionné le modèle TRANUS comme étant le plus adapté pour répondre à notre question initiale : disposons nous des technologies et des outils d'aide à la décision pour mettre en place des stratégies de réduction des consommations énergétiques dans les transports urbains ? Nous avons complété TRANUS par un module, la Signature Énergétique des Transports Urbains (SETU), qui permet de traduire les politiques urbaines en termes de consommations énergétiques et d'émissions de CO₂ liées. Car chaque ville est une singularité, nous avons expérimenté TRANUS – SETU à Bangalore (Inde).⁴

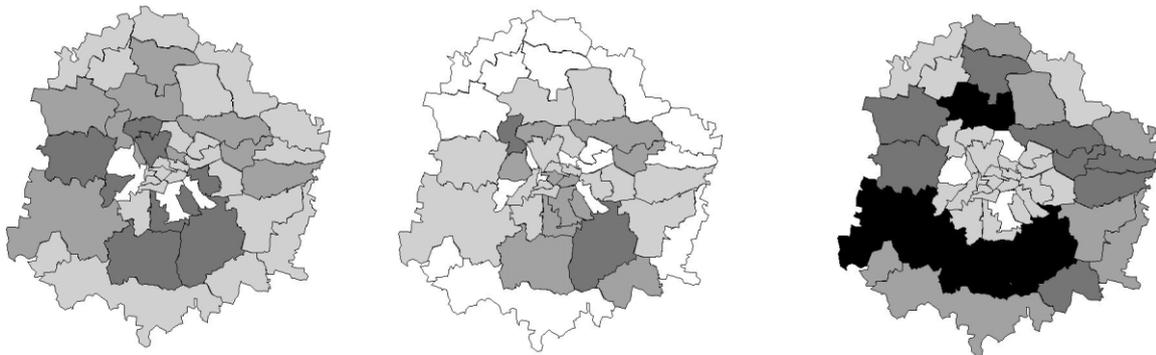
TRANUS est un modèle intégré « transport – usages des sols », développé⁵ par de la Barra et Perez depuis 1982. TRANUS modélise les interactions entre le système des transports et le système d'usage des sols. C'est un modèle de prévision, c'est-à-dire qu'il simule les évolutions du système urbain sous différents scénarios d'action sur ces deux sous-systèmes. TRANUS repose sur les principes de l'interaction spatiale et de la dualité entre les décisions de localisation et la demande de transport. L'interaction des activités dans l'espace induit la demande de transport ; en retour, l'accessibilité qui résulte de l'équilibre entre la demande et l'offre de transport conditionne la localisation des résidents et des

3. Zahavi (1980) considère que le temps quotidien de déplacement et le budget de déplacement sont bornés supérieurement pour chaque individu (en fonction par exemple de son revenu). Si un TRM plus rapide et meilleur marché que ce qu'il remplace est mis en place, les gens vont l'utiliser pour se déplacer plus et plus loin.

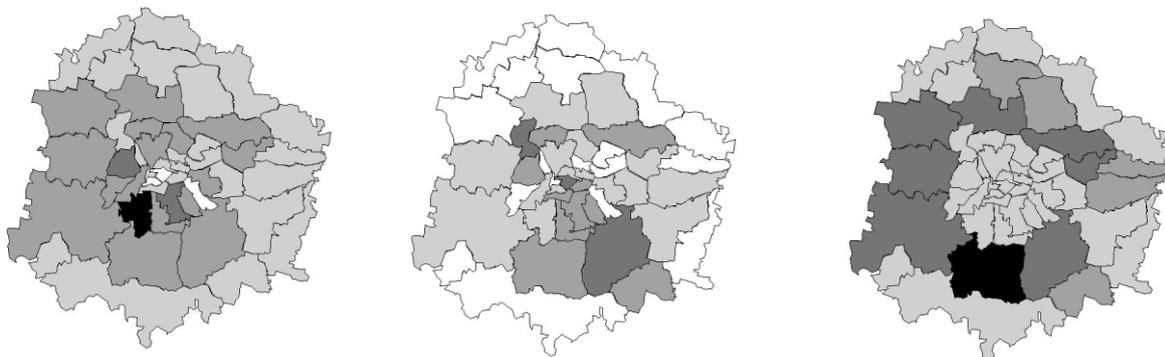
4. Cette étude a été menée dans le cadre du programme « Politiques Territoriales et Développement Durable » du D2RT-MEDD/PUCA (Giraud P.N., Lefevre B., 2006, *Signature Énergétique des Transports Urbains (SETU), un outil de suivi-évaluation de la durabilité des dynamiques urbaines*, Rapport Final pour le programme D2RT-MEDD/PUCA, Politiques Territoriales et Développement Durable.)

5. Le logiciel et le code source sont en accès libre.

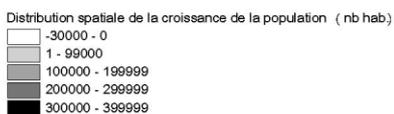
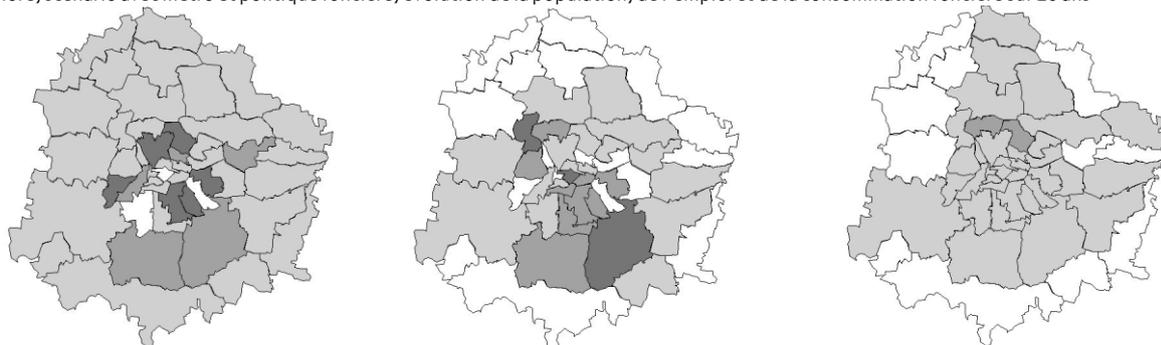
Bangalore, scénario au fil de l'eau, évolution de la population, de l'emploi et de la consommation foncière sur 20 ans



Bangalore, scénario avec métro, évolution de la population, de l'emploi et de la consommation foncière sur 20 ans



Bangalore, scénario avec métro et politique foncière, évolution de la population, de l'emploi et de la consommation foncière sur 20 ans



activités. TRANUS comporte trois modules: 1) un module « développement urbain » qui calcule les niveaux de production des différents secteurs (activités et populations) à partir des données exogènes sur les activités exportatrices; 2) un module « utilisation des sols » qui équilibre selon les propriétés du marché foncier la localisation des activités et des résidences dans les différentes zones. Une matrice des flux fonctionnels est générée par les interactions entre les différents secteurs socio-économiques. 3) un module « transport » qui

transforme les matrices des flux fonctionnels en matrices de déplacements (matrice Origine – Destination) et calcule les coûts généralisés de transport, qui sont des composantes de la fonction d'utilité du modèle de localisation des activités. Les coûts de transport sont donc réintroduits dans le modèle de localisation, mais il est supposé que cette rétroaction ne se fasse pas immédiatement. Elle se réalise à la période suivante (t+1). Cela représente l'inertie du système de localisation à s'adapter au changement du système de transport.

TRANUS permet d'évaluer les effets de politiques combinées transport - usage des sols sur : l'organisation spatiale (localisation des activités et résidences, étalement urbain, etc), le trafic (par mode, opérateur, origine-destination, etc), les paramètres économiques (prix fonciers, bien-être des différentes populations, etc) et financiers (taux de recouvrement des coûts d'opération) Il existe une vingtaine de modèles intégrés transport - usage des sols, TRANUS est le modèle le plus appliqué et le plus validé : il a été mis en oeuvre aussi bien dans des villes du Nord (Baltimore, Sacramento, Osaka, Bruxelles, etc) que du Sud (São Paulo, Mexico, Caracas, Bogota, etc); il a reçu l'aval de la Banque Mondiale et de l'Agence Américaine pour l'Environnement; il est déjà employé par des bureaux d'études comme SYSTRA.

TRANUS est un modèle complexe, difficile à prendre en main et nécessitant beaucoup de données exogènes, mais il reste un modèle transparent : l'utilisateur peut suivre la chaîne de causalités conduisant des décisions politiques aux consommations d'énergie et émissions de CO₂ liées.

A partir d'un Système d'Information Géographique (SIG), l'agglomération de Bangalore a été divisée en quarante huit zones. Pour délimiter ces zones, nous avons dû arbitrer entre les frontières administratives, le format de présentation des données et l'homogénéité des territoires. La ville est donc représentée par :

a) sept zones centrales qui constituent le centre historique de Bangalore et accueillent l'essentiel des emplois, des services commerciaux et administratifs, et donc des destinations des déplacements. L'ensemble du réseau de transport converge vers ce centre ce qui provoque une congestion dans les zones péricentrales.

b) dix-neuf zones péricentrales qui présentent des profils différents : certaines sont en cours de valorisation (pépinière spontanée pour les activités liées aux Technologies de l'information), d'autres en voies de dégradation (ancien centre d'artisanat traditionnel).

c) vingt-deux zones périphériques traversées par un périphérique (*Outer Ring Road*). C'est un territoire socialement contrasté où on trouve aussi bien les zones sous-développées que les quartiers de haut standing.

Ensuite nous entrons, pour chaque zone, une série de données pour l'année de base (2003) qui nous serviront à calibrer notre simulation. Les activités ont été séparées en « activités exportatrices » (industries lourdes traditionnelles, technologies de l'information et services administratifs), et « activités induites » (commerces, services éducatifs). Le foncier a été divisé en trois catégories : le foncier à usages mixtes (résidences, activités TI et commerces); le foncier à usage résidentiel; le foncier à usage industriel (industries traditionnelles et activités TI).

La population a été divisée en cinq groupes correspondant aux quintiles de population⁶. Pour chaque quintile de population, nous avons défini deux catégories⁷ de trajet selon que le déplacement est un trajet domicile-travail ou un trajet domicile-école. Puis nous avons défini deux modes de trans-

ports (public et privé) et cinq opérateurs (bus, rickshaw, voiture, moto, marche à pied). Finalement nous avons représenté le réseau viaire : 1547 segments classés en 5 catégories définies par leurs caractéristiques (capacité de charge, vitesse à vide, etc).

Nous avons alors comparé un scénario *BAU*, *business as usual*, au fil de l'eau, avec d'une part un scénario *Métro* - s'articulant autour du projet métro qui est en cours de construction à Bangalore, et d'autre part avec un scénario *Métro +* complétant le scénario précédent par un urbanisme adapté. Ce n'est pas de l'urbanisme fiction : les politiques envisagées sont appliquées ou en projet à Bangalore ou dans d'autres villes en développement.

Le scénario *BAU* suppose la continuité dans les tendances observées depuis une quinzaine d'années à Bangalore : la construction de deux périphériques déjà votée : un central à (3-5 Km) du centre et un plus éloigné du centre ville (18-20 Km); des interventions sur les points critiques du réseau routier; l'absence de contrôle de l'urbanisation; le développement du réseau de bus. Le scénario *Métro* - simule la construction de deux lignes de métro se croisant au cœur de la ville. Sur les autres aspects de politique urbaine, il reprend les pratiques actuellement observables et présentées dans le scénario *BAU*. Le scénario *Métro +* est construit autour des deux lignes de métro complété d'une part par une politique volontariste de densification, d'endiguement de l'étalement urbain, de diversification fonctionnelle du centre et de la première couronne, et d'autre part par une politique de prix qui désincite l'usage de la voiture⁸.

Dans ces trois scénarios, la contrainte financière est plafonnée par le budget aujourd'hui mobilisé pour construire les deux lignes de métro⁹. D'autre part nous travaillons « toutes choses égales par ailleurs »¹⁰. Seuls les déplacements inter-zones sont pris en compte. Les déplacements intra-zones ne sont pas comptabilisés dans les calculs de mobilité, temps moyen et distance moyenne.

6. Division de la population en fonction du revenu par tranche de 20%.

7. Ces deux catégories de déplacement représentent respectivement 60% et 20% des déplacements totaux dans l'agglomération. Etant donné que les déplacements n'ayant pas le domicile comme origine ou destination en représentent 1,3% et que Bangalore se caractérise par une grande mixité fonctionnelle, on peut penser que les déplacements non compris dans ces deux catégories sont négligeables en termes de distance parcourue.

8. Taxe sur les carburants et parking payant.

9. 1089 milliards US\$ sur 20 ans.

10. C'est-à-dire que nous faisons l'hypothèse que la structure économique et sociale de la ville n'est pas modifiée : la croissance démographique est identique (10 millions d'habitants en 2020); le rapport entre la population active et la population totale reste constant; la croissance économique est identique; les rapports input/output des différentes activités restent constants; les inégalités de revenus restent stables par rapport à la situation actuelle; la répartition des travailleurs entre les différents secteurs reste constante.

Résultats des différentes combinaisons de politiques urbaines simulées dans TRANUS sur Bangalore (Inde)

| Scénario | Mobilité (nombre de déplacements) | Distance moyenne (km) | Temps moyen (H décimale) | Part modal transport privé motorisé | Consommation énergétique (L) | Emission CO ₂ (kg) |
|---------------|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|---|---------------------------------|----------------------------------|
| Année de base | 664.553 | 12,66 | 1,13 | 45% | 853.151 | 2.120.598 |
| BAU | +65% | 13,66 | 1,27 | 43% | +70% | +70% |
| METRO- | +61% | 13,08 | 1,63 | 36% | +51% | +51% |
| METRO+ | +59% | 12,19 | 1,23 | 23% | +4% | +4% |

Sur vingt ans, le scénario *BAU* au fil de l'eau, reproduisant ce qui se fait actuellement à Bangalore, verrait les consommations énergétiques et les émissions de CO₂ augmenter de 70% par rapport à l'année 2003. Au contraire si l'option politique retenue est d'investir dans un système de transport de masse, deux lignes de métro, et de combiner cet investissement avec une réglementation des usages de sols adaptée, les consommations énergétiques et les émissions des GES n'augmenteraient que de 4% par rapport à 2003. D'autre part ces résultats montrent que l'intégration des politiques de transport et des politiques d'usages des sols est essentielle pour atteindre des objectifs exigeants de lutte contre l'effet de serre. En effet si les investissements dans un système de transport de masse permettent d'infléchir les courbes d'évolution des consommations énergétiques, passant d'une croissance de +70% sur vingt ans dans le cas du scénario *BAU*, à +51% dans le cas *Métro -*, seule l'intégration de ces investissements avec une réglementation des usages des sols adaptée permet d'inverser réellement la tendance et de stabiliser les consommations énergétiques au niveau de 2003, dans le scénario *Metro +*. Avec des politiques réalistes (faire un réseau de métro, favoriser un urbanisme densificateur et mettre en place quelques instruments économiques) des inflexions significatives des consommations énergétiques et des émissions de CO₂ sont envisageables.

A titre d'illustration des chaînes de causalité conduisant des décisions politiques aux consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées, nous avons analysé avec le modèle TRANUS-SETU : 1) l'évolution de la structure urbaine caractérisée par la localisation spatiale des résidences et des emplois ainsi que par la croissance de la consommation foncière, et 2) l'impact de cette structuration urbaine sur la mobilité inter-zone caractérisée par la distance et le temps moyen ainsi que la répartition modales des déplacements.

En 20 ans, le nombre de déplacements entre les zones augmente de +65% dans le scénario *BAU*, la distance moyenne des déplacements passe de 12,66 km à 13,66 km et le temps moyen passe de 1,13 à 1,27 h. Cette évolution de la mobilité inter-zone s'explique par une tendance à la périphérisation et dé-densification du centre ville dans la localisation résidentielle alors que la localisation des nouveaux emplois est relativement homogène sur le territoire urbain. La périphérisation des résidences et des emplois et la dé-densification du

centre ville induisent une consommation foncière importante en périphérie et un abandon de terrain dans certains espaces urbains centraux. Du fait de cette évolution de la matrice origine – destination et de la congestion engendrée, la part modale des transports privés motorisés recule légèrement de 45% à 43%.

Nous observons dans le scénario *METRO -* d'une part que la périphérisation des résidences est bien moindre que dans le scénario « *BAU* » et d'autre part qu'elle est concentrée dans les zones de la première couronne périphérique. La localisation des nouveaux emplois est relativement homogène, même si plus concentrée sur les zones desservies par le métro – au sud et au nord-ouest notamment. Nous notons le regain d'attractivité du centre ville – au croisement des lignes de métro. Ces éléments se traduisent par une moindre consommation foncière en périphérie que dans le scénario « *BAU* ». Le métro a pour effet de limiter la périphérisation et l'étalement urbain et de renforcer le centre ville. Ceci se traduit par une croissance plus faible de la mobilité inter-zone (+61%) et de la distance moyenne (13,08 km), une diminution de la part modale des transports privés motorisés (36%). Par contre, point noir de ce scénario, le temps moyen des trajets augmente fortement (1,63h); cela s'explique par la congestion du trafic due au manque d'investissement dans l'infrastructure routière.

Le scénario *METRO +* simule des investissements importants dans un système de métro lourd identique à celui du scénario *METRO -* mais intégrés à une réglementation des usages des sols et une politique des prix. La distribution spatiale des résidences et des emplois se concentre dans la première couronne et au Sud de la deuxième. Le centre ville – au croisement des deux lignes de métro – perd toujours des résidences mais cette fois clairement parce que la population est chassée par les emplois. La tendance à la concentration des emplois en centre ville augmente la rente foncière et la population qui ne peut payer quitte le centre pour se loger dans des zones plus périphériques mais desservies par le métro. Ces éléments se traduisent par un abandon de terrain urbain dans les zones extérieures de la troisième couronne. La consommation foncière se concentre dans les zones centrales et de première et deuxième couronne desservies par le métro. Nous observons que cette consommation foncière est relativement faible, ce qui traduit une densification de ces mêmes zones. Ainsi le métro intégré à un urbanisme adapté canalise

le développement urbain sur certaines zones. Ces tendances nouvelles dans la structuration urbaine de Bangalore se traduisent par une mobilité inter-zone plus faible que dans les scénarii analysés précédemment (+59%), une diminution de la distance moyenne (12,19 km), une faible croissance du temps moyen des trajets (1,23H) et une très faible part des transports privés motorisés dans la répartition modale des déplacements (23%).

Pour une politique intégrant transport et urbanisme

Les tendances actuelles des dynamiques urbaines sont inquiétantes pour le changement climatique, car elles donnent une place croissante à l'automobile au détriment des transports en commun et non motorisés. C'est vrai au nord comme au sud, mais l'enjeu essentiel est au sud : vers quel modèle vont tendre les villes du sud ?

Schématiquement en effet, quatre types de structure urbaine s'offrent aux villes du Sud : la ville étalée et polycentrique, la ville dense et monocentrique, la ville constituée d'un centre relativement dense entouré de villes satellites, et

la ville duale formée d'un pôle moderne aux standards internationaux plus ou moins relié à une ville traditionnelle. La première question à laquelle doivent répondre les pouvoirs publics est : « quelle ville veut-on ? ». Étant donné que la contrainte environnementale impose la limitation de l'usage croissant de la voiture, même si l'efficacité environnementale de celle-ci est améliorée, la première alternative, la ville étalée, est à proscrire.

Dans le cadre des trois autres types de structure, construire un avenir urbain énergétiquement durable n'est en théorie pas hors d'atteinte. Cela exige de prendre les consommations énergétiques urbaines dans une tenaille entre politiques de transport et politiques d'usage des sols : rendre les véhicules motorisés moins polluants, décourager l'usage des véhicules particuliers, promouvoir des transports en commun efficaces, en particulier des systèmes Bus Rapid Transit (BRT), adapter les règles d'urbanisme, les plans d'occupation des sols et les coefficients d'occupation des sols pour faciliter la concentration des investissements privés dans les zones de forte accessibilité engendrées par la construction d'un Transport Rapide de Masse (TRM), pour diminuer le besoin de mobilité grâce à une densité et une mixité des fonctions plus forte, favoriser les déplacements non motorisés par un « design » urbain approprié et l'articulation des divers modes de transport.

Références bibliographiques

Alonso W., (1964), *Location and Land use*, Harvard University Press, Cambridge Press.

Assmann D., Sieber N., (2005), « Transport in Developing Countries : Renewable Energy versus Energy Reduction? », *Transport Reviews* vol. 25 n°6

Bertaud A., (2001), *Metropolis : A Measure of the Spatial Organization of 7 Large Cities*, <http://alain-bertaud.com>

Bertaud A., Malpezzi S., (2003), *The Spatial Distribution of Population in 48 World Cities: Implications for Economies in Transition*, University of Wisconsin.

Bertaud A., (2004), *The Spatial Organization of Cities: Deliberate Outcome or Unforeseen Consequence ?*, <http://alain-bertaud.com>

Breheny M., (1991), « Contradictions of the Compact City », *Town & Country Planning* 60.

Cervero R., (1998), *The Transit Metropolis : A Global Enquiry*, Island Press

De la Barra T., (1989), « Integrated land use and transport modelling - Decision chains and Hierarchies », *Cambridge Urban and Architectural Studies*, Cambridge University Press, UK, 167 p.

Giraud P.N., Lefèvre B., (2006), « Les défis énergétiques de la croissance urbaine au Sud - Le couple "transport-urbanisme" au coeur des dynamiques urbaines », in AFD-IDDDRI, Dr., *Regards sur la Terre*, Presses de la Fondation Nationale des Sciences Politiques.

Giraud P.-N., Maria A., Lefèvre, B. Ruet, J., (2006), « Le financement des services essentiels dans les villes pauvres », *Revue d'économie financière*, Septembre 09/ 2006.

Giraud P.N., Lefèvre B., (2006), *Signature Énergétique des Transports Urbains (SETU), un outil de suivi-évaluation de la durabilité des dynamiques urbaines*, Rapport Final pour le programme D2RT- MEDD/PUCA, Politiques Territoriales et Développement Durable.

Kenworthy, J., (2003), *Transport Energy Use and Greenhouse Gases in Urban Passenger Transport Systems : A Study of 84 Global Cities*, Perth: Murdoch University

Lefèvre, B., (2006), « La ville de Bangalore (Inde) face à ses ambitions mondialistes », *EurOrient*, n° 23.

Lefèvre, B., « Vision a largo plazo e interacciones "transporte - urbanismo" », los excluidos en el éxito del BRT TransMilenio de Bogota », *Ciudad y Territorio*, à paraître en 2008.

Lefèvre B., (2007), « Transports urbains: intégrer la complexité », *Urbanisme*, n°355

Lefèvre B., (2006), « Les transports urbains, défi environnemental de la croissance des villes indiennes », *Villes en Développement*, n°71, ISTD.

Litman T., Laube, F., (2002), *Automobile Dependence and Economic Development*, Victoria Transport Policy Institute.

Mills E. (1967), « An aggregative model of resource allocation in metropolitan areas », *American Economic Review*, Papers and Proceedings, vol. 57, pp. 197-210.

Muth R., (1969), *Cities and housing*, University of Chicago Press, 355 p.

Newman P.W.G., Kenworthy J.R., (1988), « The transport energy trade-off: fuel-efficient traffic versus fuel-efficient cities », *Transportation Research* 22A (3): 163-174.

Newman P.W.G., Kenworthy J.R., (1989), *Cities and automobile dependence: an international sourcebook*. Aldershot: Gower.

Newman P.W.G., Kenworthy J.R., (1999), *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*, Washington DC: Island Press.

PNUH, (2004), *State of the World's Cities*, Report 2004/5.

Schipper, L., (2002), *Sustainable Urban Transport in the 21st Century*, Refereed paper presented at the January, 2002 Meeting of the US National Resource Council's Transportation Research Board in Washington DC.

Wright L., Fjellstrom K., (2003), *Sustainable Transport : a sourcebook for Policy-Makers in Developing Cities*, GTZ Transport and Mobility Group.

Wright L., (2004), *The limits of technology : Achieving transport efficiency in developing nations*. University College London, Mai 2004.

Wright L., Fjellstrom, K., (2003), *Bus Rapid Transit*, GTZ Transport and Mobility Group.

Zahavi Y., Talavitie A., (1980), « Regularities in Travel Time and Money Expenditures », *Transportation Research Record*, n° 750 pp13-19.

Biographies

BENOIT LEFEVRE est attaché de recherche, doctorant en économie de l'environnement urbain au Centre d'économie industrielle de l'École nationale supérieure des mines de Paris. Son travail porte sur la soutenabilité environnementale des dynamiques de croissance des mégapoles pauvres sur la capacité des technologies, accessibles financièrement aux villes pauvres, à infléchir significativement les trajectoires de consommations énergétiques liées aux transports urbains. Analysant les relations entre le système de transport et les usages des sols, il a étudié les effets du BRT TransMilenio sur les marchés foncier et immobilier, et par là sur l'évolution de la structure urbaine de Bogota (Colombie).

lefevre@ensmp.fr
<http://www.cerna.ensmp.fr>

PIERRE-NOEL GIRAUD, professeur à l'École nationale supérieure des Mines de Paris, polytechnicien de formation, est ingénieur général des Mines. En 1978, il crée et prend la direction du CERNA (Centre de recherche en économie industrielle) de l'École des Mines de Paris/ParisTech. De 1984 à 2004, il est également professeur associé à l'Université de Paris IX-Dauphine. Ses travaux de recherche ont d'abord porté sur l'économie des commodities, en particulier énergétiques, et de l'environnement, puis sur l'économie industrielle. Depuis une dizaine d'années, il travaille aussi sur la globalisation des entreprises et ses conséquences macroéconomiques et politiques, ainsi que sur l'industrialisation et la croissance durable des pays émergents. Il est l'auteur de sept ouvrages et de nombreux articles. Parmi ses derniers livres : *Le Commerce des Promesses. Petit Traité sur la Finance Moderne* (Seuil, 2001) et *L'Inégalité du Monde. Économie du monde contemporain* (Gallimard, 1996).

giraud@ensmp.fr