



*Groupement de
Recherches
Economiques et
Sociales*

<http://www.gres-so.org>

Cahiers du GRES

**Existe-t-il une courbe environnementale de kuznets
urbaine ?
Emissions polluantes dues aux déplacements
dans 37 villes**

*André MEUNIE
Guillaume POUYANNE*

GREThA-GRES

Université Montesquieu-Bordeaux IV
Avenue Léon Duguit
33608 PESSAC

andre.meunie@u-bordeaux4.fr
guillaume.pouyanne@u-bordeaux4.fr

Cahier n° 2007 – 10

Avril 2007

Existe-t-il une courbe environnementale de kuznets urbaine ?
Emissions polluantes dues aux déplacements dans 37 villes

Résumé

La Courbe Environnementale de Kuznets est une relation en forme de cloche entre le revenu et les émissions polluantes : à partir d'un certain niveau de richesse, la pollution a tendance à décroître. Si la justification théorique et la discussion de cette hypothèse ont donné naissance à une littérature abondante, on constate avec surprise que cette question a rarement été appliquée à la ville. Cet article teste l'hypothèse de la Courbe Environnementale de Kuznets Urbaine (CEKU) pour 37 villes dans le monde.

Une revue critique des rares études sur la CEKU nous permet de dégager un positionnement méthodologique original. Nous utilisons des variables d'émissions par tête afin de contrôler l'effet-taille. De plus, nous ne prenons en compte que les polluants dus à une source unique, la mobilité quotidienne. Ainsi l'explication d'une éventuelle relation entre revenu et pollution est-elle facilitée, puisque nous nous appuyons sur un champ scientifique déjà bien constitué.

Nous détaillons les mécanismes théoriques à l'origine de la CEKU due à la mobilité quotidienne. L'impact du revenu sur les émissions polluantes est triple : comportemental, d'abord, à dissocier entre un effet indirect et un effet direct ; technique, ensuite (accroissement de l'efficacité environnementale des véhicules avec le revenu) ; politique, enfin (l'évolution vers « mobilité soutenable » est facilitée par un surcroît de ressources). La partie empirique vise à tester l'hypothèse de CEKU pour 37 villes dans le monde. Nous présentons trois résultats importants. D'abord, l'estimation de relations quadratiques donne bien des courbes en forme de cloche et ne nous permet donc pas d'infirmer l'hypothèse de CEKU pour notre échantillon. Ensuite, nous montrons que les courbes s'expliquent par deux ensembles de facteurs : les comportements individuels (par ex., le choix modal), et les choix collectifs (par ex., l'offre de transports en commun). Enfin, nous discutons de la validité de l'hypothèse de CEKU, en cherchant à expliquer de manière plus générale le niveau des émissions polluantes. A l'aide d'une ACP, nous établissons que l'influence du revenu pourrait recouvrir l'influence, tant de la forme urbaine que des modes de consommation de la mobilité, sur les émissions polluantes.

Mots-clés : Courbe Environnementale de Kuznets, mobilité quotidienne, urbain, émissions polluantes.

Is there an Environmental Urban Kuznets Curve? The case of polluting emissions due to daily mobility in 37 cities.

Abstract

The Environmental Kuznets Curve (EKC) has given rise to a flourishing literature since the beginning of the 90's. The EKC postulates an inverted U-shaped relationship between income and polluting emissions: there would be a level of wealth beyond which polluting emissions would decrease. Surprisingly, this issue has rarely been applied to the cities. Yet we consider such a question as a pertinent one. This article aims at analyzing the Urban EKC (UEKC) hypothesis. It tests it with a sample of 37 cities in the world.

Previous studies on the UEKC hypothesis are very scarce. They are the ground for us, to define a specific methodological posture. First, we use polluting emissions per capita instead of pollutants concentrations: thus we control for the influence of urban size. Second, we only take in account pollutants due to a unique source, which is daily mobility. This makes the explanation of the income-polluting emissions relation easier, as our comments are based on a specific, well constituted literature about factors of daily mobility.

We expose the theoretical mechanisms by which the UEKC due to daily mobility could be validated. The impact of income on polluting emissions is threefold : behavioural, with a direct effect and an indirect one ; technical (the environmental efficiency of the vehicles increases) ; political (planning authorities wish to evolve towards a « sustainable mobility »).

The empirical part of the paper is a test of the UEKC on a sample of 37 cities in the world. We present three important results. First, the estimation of quadratic regressions gives an inverted U-shaped relationship for most of the pollutants, which doesn't permit to invalidate the UEKC hypothesis. Second, we show that the explanation of such curves is linked to two sets of factors: individual behaviours (e.g. modal choice) and collective choices (e.g. transit supply). Third, we discuss the validity of the UEKC hypothesis, that is we seek to explain the level of polluting emissions. As many factors are entangled, we use a principal components analysis to show that the influence of income may in fact reflect the influence of both urban form and consumers' habits on polluting emissions due to daily mobility.

Key words: Environmental Kuznets Curve, daily mobility, urban, polluting emissions

JEL : Q53, Q56, R12, R14, R41

« Le monde meurt de l'envie de naître. Notre société s'est épuisée à réaliser les rêves du passé. Quand les américains sont allés sur la lune, on a gueulé que c'est une nouvelle époque qui commence. Mais non : c'était une époque qui finissait. On a œuvré à réaliser Jules Verne : le dix-neuvième siècle... Le vingtième siècle n'a pas préparé le vingt et unième : il s'est épuisé à satisfaire le dix-neuvième. Le pétrole comme sine qua non d'une civilisation : tu te rends compte ? Toutes nos sources d'énergie sont chez les autres... C'est l'épuisement... »

Romain GARY, *Au-delà de cette limite, votre ticket n'est plus valable*, 1975, pp. 85-86.

Introduction

On peut lire dans le récent manuel de M. Polese et R. Shearmur (2005) la phrase suivante : « [La relation entre] le niveau de pollution urbaine [et le revenu réel par habitant] épouse, en gros, la forme d'une courbe en cloche. » (p. 94). Le retournement de la relation croissante entre niveau de pollution et de richesse à partir d'un certain niveau de développement s'explique par l'accroissement de la demande de qualité environnementale et la capacité, à partir d'un certain niveau de richesse, à mettre en place ce « bien de luxe » qu'est une politique environnementale : « en somme, le développement fait croître la pollution, mais apporte aussi les éléments nécessaires à sa réduction » (*Ibid.*) ; il est « both a foe and a friend of the urban environment » (Kahn, 2006, p. 30).

Cette petite phrase, relevée au détour d'un manuel d'économie urbaine, constitue peut-être les premiers échos d'une controverse dont les enjeux pour la recherche comme pour la planification urbaine peuvent se révéler importants. Elle suggère en effet l'existence d'une « Courbe Environnementale de Kuznets Urbaine » (CEKU), dont la présentation nécessite d'abord de retracer le débat sur la Courbe Environnementale de Kuznets (CKE).

Depuis le rapport de la Banque Mondiale (1992), une controverse scientifique est née autour de l'idée qu'il existerait un seuil de PIB par tête au-delà duquel la relation entre l'accumulation de richesses et les pollutions engendrées par les activités humaines devient décroissante. L'enjeu de cette controverse est essentiel car elle permet d'évaluer le degré d'intensité que la contrainte environnementale fait peser sur les sociétés. La CEK donne ainsi une idée de l'ampleur des mutations systémiques à envisager pour respecter l'impératif d'un développement soutenable¹.

La dynamique de la CEK est obtenue par l'action simultanée et *indirecte* de trois grands effets structurels² :

¹ Si l'hypothèse d'une CEK est retenue empiriquement alors l'hypothèse de la soutenabilité d'une accumulation infinie de richesses est renforcée. Cette vision dynamique des rapports entre l'économie et l'environnement offre donc une conclusion fondamentalement optimiste sur l'avenir des sociétés humaines vis-à-vis du défi que représente la multiplication des dégradations écologiques insoutenables.

² Formellement, cette dynamique peut être décrite à parti d'un modèle de forme réduite où une seule équation est censée capter les résultats d'un modèle structurel. Les variations du PIB par tête agissent indirectement sur le niveau de pollution grâce au jeu combiné des trois effets. L'équation testée a une forme polynomiale de degré deux ou trois (selon les auteurs) :

$$Y_{it} = \alpha + \beta_1 X_{it} + \beta_2 (X_{it})^2 + \beta_3 (X_{it})^3 + \sum_j \gamma_j Z_{it} + \mu_{it}$$

avec Y_{it} , l'indicateur de pollution, X_{it} , le PIB par tête et Z_{it} un ensemble de j variables de contrôle.

- L'effet d'échelle évalue l'impact de l'accroissement de l'activité économique³. Plus de production nécessite plus d'inputs et crée plus de déchets et d'émissions polluantes.
- L'effet de composition isole les conséquences des mutations sectorielles au fur et à mesure du processus de développement. Dans un premier temps, le passage d'une économie rurale à une société urbaine et industrielle aggrave les rejets polluants. Par la suite, d'une part, le déclin de la part des industries lourdes intensives en énergie et d'autre part, l'émergence des secteurs de services intensifs en technologie et en capital humain, desserrent la contrainte écologique en exerçant une action baissière sur l'intensité en émissions du PIB. La tertiarisation de l'économie atténue le rythme de croissance de l'effet d'échelle.
- L'effet technologique retrace l'influence décisive qu'exercent les progrès scientifiques et organisationnels dans la recherche de la soutenabilité de la croissance économique. A partir d'un certain niveau de richesses, Etat et entreprises ont les moyens financiers et humains d'engager des dépenses conséquentes en R&D ce qui promeut les innovations pour une meilleure efficacité écologique des processus de fabrication. La révolution technologique du laser, l'informatique et la miniaturisation des objets sont des exemples parmi d'autres du renforcement de l'innocuité écologique par unité de produits⁴.

L'existence d'une CEK suppose donc, qu'au-delà d'un seuil de revenu par tête, l'effet d'échelle est plus que compensé par les deux autres.

Dans cette dynamique, l'évolution des caractéristiques de la demande joue un rôle moteur. Les préférences des consommateurs intègrent une composante environnementale, ce qui les conduit, lorsque leur revenu augmente, à orienter leurs dépenses vers des produits et des modes de vie respectueux de l'environnement. De plus, l'accroissement de la richesse permet d'améliorer l'éducation des individus et de leur donner les outils nécessaires à l'appréhension des problèmes environnementaux. Ils incitent et valident ainsi les dépenses en R&D « *écologique* », condition nécessaire pour stimuler les innovations dans le secteur privé.

Par ailleurs, il convient d'insister sur le rôle des politiques publiques destinées à construire un cadre institutionnel favorable à la réalisation du développement soutenable. La marche de l'économie vers le respect de la contrainte environnementale n'a en effet aucune raison d'être spontanément assurée par les mécanismes de marché étant donné l'importance des externalités (Arrow *et al.*, 1995).

L'hypothèse de CEK est critiquable sur plusieurs points. D'abord, il faut éviter la généralisation abusive à l'ensemble des pollutions sous prétexte qu'une CEK est détectée pour un polluant particulier. Par exemple, la dynamique des émissions de CO₂ semble linéairement croissante⁵ (Grimes et Robert, 1997). Ensuite, la phase de relation décroissante entre le niveau de PIB par tête et les émissions peut n'être que transitoire. Si le terme cubique de l'équation a un coefficient significatif et positif, la courbe prend une forme en « *N* ». Ainsi, au-delà d'un second seuil de richesses individuelles moyennes, la croissance économique est

³ La méthode de décomposition mesure quantitativement les trois effets décrits ici (Meunié, 2005).

⁴ Il faut néanmoins une volonté forte des pouvoirs publics, l'exemple du succès des *SUV* montre que la dynamique bénéfique du progrès est loin de se réaliser de façon automatique.

⁵ Quand il existe un seuil de retournement, celui-ci est très largement hors des niveaux de PIB par tête de l'échantillon (Holtz-Eakin et Selden, 1995).

de nouveau couplée à une aggravation des dégradations écologiques. En somme, après une période de modernisation des processus productifs, les opportunités d'efficacité s'épuisent et l'effet d'échelle redevient prépondérant.

Ce rapide tour d'horizon de la controverse montre que la prudence est de mise dans l'étude de la pertinence de la CEK, et qu'il faut prendre garde aux généralisations abusives : « *Bien que [certaines études empiriques] indiquent que la croissance économique peut être associée à l'amélioration de quelques indicateurs environnementaux, elles n'impliquent pas que la croissance économique suffit à améliorer l'état de l'environnement en général* » (Arrow *et al.*, 1995). J. Baghwati (2004, p. 145) lance le même avertissement : « *The only value of these examples [of EKC] is in their refutation of the simplistic notion that pollution will rise with income. They should not be used to argue that growth will automatically take care of pollution regardless of environmental policy.* »

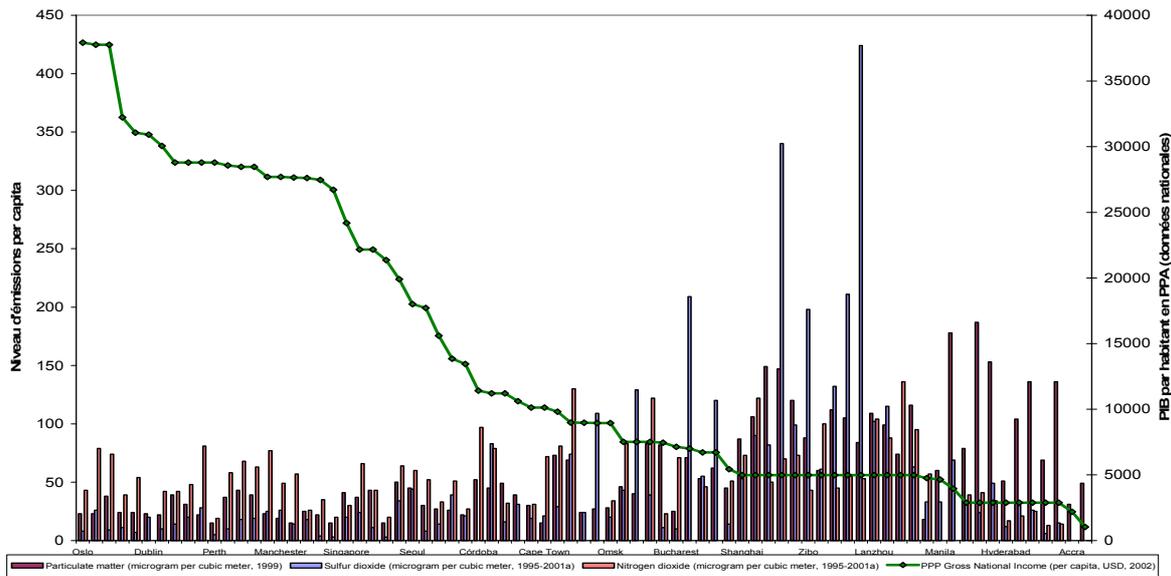
Si la dimension urbaine est souvent présente dans les études sur la CEK, elle n'est évoquée la plupart du temps qu'implicitement. Ainsi, le degré d'urbanisation est simplement considéré comme un indice de développement économique⁶ et, partant, facteur possible de dégradation environnementale : « *urbanized, open, high-income and high-energy use economies are clearly associated with a high degree of environmental degradation* » (Jha *et al.*, 2004, p. 18).

Pourtant, une application directe du principe de la CEK à la ville semble pertinente. La question de l'existence d'une CEKU se pose pour deux raisons :

- D'abord, d'un point de vue **théorique**, les mécanismes à la source de la CEK peuvent être facilement extrapolés au fonctionnement urbain (nous développons cette argumentation *infra*). La seule phrase de M. Polèse et R. Shearmur dans un manuel d'économie urbaine (cf. *supra*), sans aucune référence bibliographique à l'appui, eut d'ailleurs suffi pour que l'on se posât la question ;
- Ensuite, d'un point de vue **empirique**, une mise en correspondance rapide du niveau de PIB par habitant (données nationales) et des concentrations de divers polluants pour 77 villes dans le monde (Banque Mondiale, 2006) tend à suggérer, effectivement, la présence d'une relation croissante puis décroissante entre le niveau de richesse et le niveau de pollutions (cf. Figure 1). Une lecture de gauche à droite de la Figure 1 suggère que, à mesure que le PIB par habitant décroît, les concentrations de pollution augmentent puis diminuent, ce qui est tout à fait conforme à l'hypothèse de CEKU.

⁶ Pour une présentation claire et pédagogique des mécanismes reliant urbanisation et développement économique, voir le manuel de M. Polèse et R. Shearmur (2005).

Figure 1. Concentration de polluants et PIB par habitant dans 77 villes du monde



Source : Banque Mondiale, 2006, *World Development Indicators 2005*, <http://www.worldbank.org>

1. Etudes antérieures sur l'hypothèse de CEKU

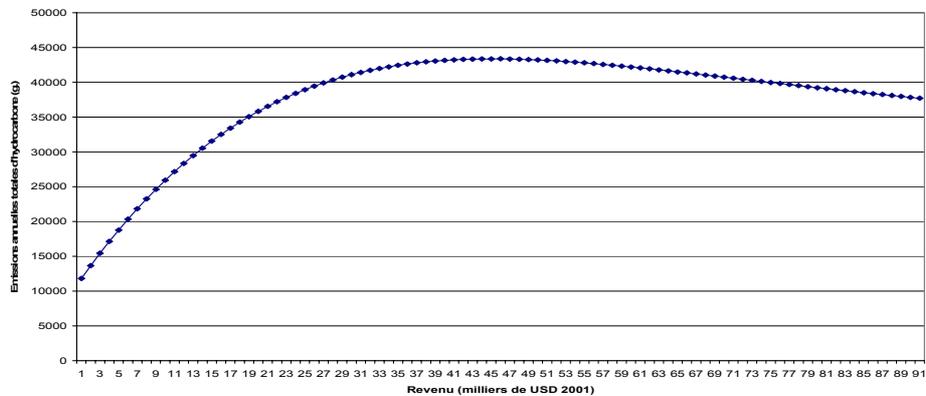
Les études portant explicitement sur l'hypothèse de CEKU sont extrêmement rares, à la fois en raison de la relative nouveauté du sujet et de la faible disponibilité de données sur les émissions de polluants en milieu urbain. On peut toutefois citer les travaux de M. E. Kahn (1998), de L. Peters et F. Murray (2004) et de F. G. Hank Hilton et A. Levinson (1998).

Dans un très court article de 1998, **M. E. Kahn** obtient une CEK urbaine pour les émissions d'hydrocarbures par les automobiles à partir de données individuelles dans l'Etat de Californie. Ce résultat est pourtant critiquable. D'abord en ce qui concerne les données : il est forcé de croiser des données d'émissions *par véhicule* et des données de revenu médian *par quartier (zip code)*, sans même mentionner les biais qui peuvent en résulter. Ensuite sur la méthode : sa démonstration repose sur le calcul d'un *mileage ratio*, qui exprime la distance que doivent parcourir les individus d'une classe donnée de revenu pour émettre autant d'hydrocarbures que la classe au revenu le plus bas, prise comme classe de référence. Un tel indicateur interdit de tenir compte de la diversité des comportements de mobilité et ne prend en compte que l'effet de la technologie.

In fine, cette relation résulte de deux effets contradictoires : si d'un côté les ménages riches possèdent des véhicules plus récents, mieux entretenus, et donc moins polluants, de l'autre leurs véhicules sont généralement plus puissants et davantage consommateurs d'énergie. M. E. Kahn suppose, pour expliquer la CEKU qu'il obtient, qu'à partir d'un certain niveau de revenu, le premier effet l'emporte sur le second. Cet apport reste toutefois limité, car la diversité des comportements (choix du mode de transport, distances parcourues, nombre de déplacements, etc.) est complètement obérée alors qu'elle constitue un déterminant essentiel des émissions de polluants.

M. E. Kahn réactualise ce travail dans un ouvrage presque exclusivement consacré à la CEKU (Kahn, 2006). En analysant les émissions d'hydrocarbures des ménage par tranche de revenu aux Etats-Unis (2001), il obtient « la forme familière de la CEKU » (cf. Figure 2).

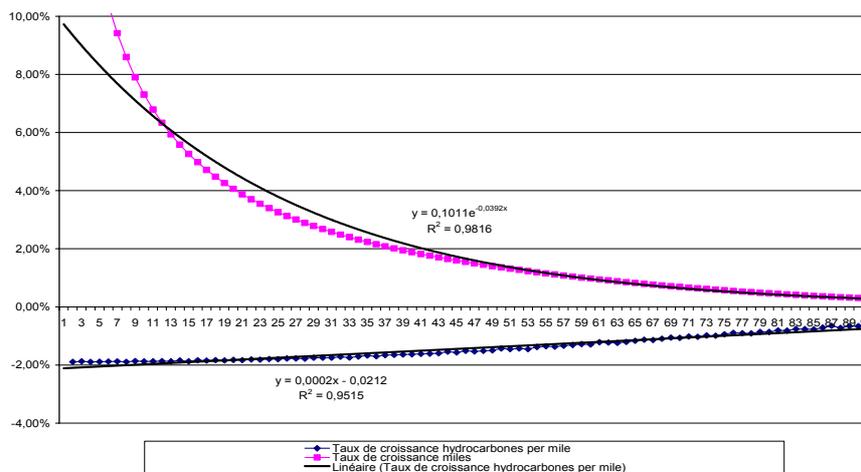
Figure 2. CEKU pour les émissions d'hydrocarbure aux Etats-Unis



Source : Kahn, 2006, p. 56

Pourtant, un doute subsiste : cette CEKU ne serait-elle pas trop belle pour être honnête ? Nous avons voulu pousser nos investigations : en décomposant les émissions totales de HC en émissions moyennes (par *mile*) et en kilométrage moyen par ménage, on constate que l'évolution de ces variables paraît bien régulière : un ajustement linéaire sur le taux de variation des émissions par tranche de revenu donne un R^2 de 0,95, tandis qu'un ajustement exponentiel sur le taux de variation du kilométrage donne un R^2 de 0,98 (cf. Figure 3). Ces rythmes de variation sont particulièrement adaptés à l'obtention d'une CEKU et jettent un doute sur la solidité du résultat de la Figure 2.

Figure 3. Décomposition des émissions totales de HC en HC émis par unité de distance et en distance parcourue, en taux de croissance par tranche de revenu



Source : Kahn, 2006, pp. 54-55

L. Peters et F. Murray (2004) infirment l'hypothèse d'une CEKU pour 17 grandes villes d'Asie. Au lieu de la forme en cloche traditionnelle, ils obtiennent une forme en « L » pour les 5 types de polluants testés. Curieusement, ces résultats ne les conduit pas à remettre en cause l'hypothèse de CEKU. La forme en « L » se justifie, selon eux, par la mise en place de politiques d'*Air Quality Management* dans les villes les plus riches, qui diminueraient le seuil de retournement de la CEKU : « *This paper does not challenge the existence of EKCs for urban air pollution – instead it proposes a radical change in EKC shape in the modern era of environmental regulation in developed and developing countries* » (p. 13).

L'importance des régulations est également posée comme facteur explicatif principal de l'existence d'une CEK par **F. G. Hank Hilton et A. Levinson (1998)**. A partir de données très complètes (48 pays sur 20 ans), ils montrent empiriquement l'existence d'une CEK pour les émissions de plomb dues à l'usage de l'automobile. En supposant que les émissions de polluants peuvent être décomposées en deux éléments, l'intensité polluante (*pollution intensity*), c'est-à-dire la quantité de polluant rejetée par litre de carburant, et l'activité polluante (*pollution activity*), c'est-à-dire la consommation de carburant, ils montrent que la partie déclinante de la courbe est principalement due à une forte réduction de l'intensité polluante avec le revenu, alors que l'activité polluante, elle, ne diminue pas : « *Despite increases in polluting activity, the curve declines at high incomes due to decreasing polluting intensity* » (p. 138). Ils attribuent cette réduction à l'action gouvernementale ce qui, selon eux, remet en cause l'influence directe du niveau de revenu sur les niveaux de pollution : « *Some government action such as taxes or bans on leaded gasoline appears to be behind much of the decline in automotive lead pollution. This undermines the claim that income growth is itself a panacea for environmental problems.* » (p. 140).

Ces trois premiers jalons posés par les pionniers de la CEKU nous laissent insatisfaits pour deux raisons majeures, qui viennent justifier notre positionnement méthodologique :

- D'abord, du point de vue de la **méthode**, les variables étudiées sont généralement des *concentrations* de polluants. Dans un cadre urbain, il nous apparaît que ces variables ne sont pas pertinentes, car elles sont sensibles à la taille urbaine (en nombre d'habitants) : mécaniquement, plus la population de la ville est grande, plus les concentrations seront fortes, sans que le revenu ait ici la moindre influence⁷.
- Ensuite, d'un point de vue **heuristique**, la valeur explicative de nombreux travaux sur la CEKU, par exemple l'étude de L. Peters et F. Murray (2004) citée *supra*, nous paraît relativement faible. En effet les variables utilisées étant des quantités globales de polluants, la source des polluants n'est pas clairement identifiée : industrie, transport, résidentiel... Il nous semble davantage pertinent d'étudier des polluants ayant une source unique, afin de fournir un cadre explicatif plus solide aux évolutions observées.

Notre étude vise à éviter ces deux écueils à partir de choix méthodologiques déterminés. D'abord, l'utilisation d'une variable d'émissions *par personne* nous donne le potentiel polluant individuel moyen pour une ville donnée. L'influence de la taille urbaine est alors évacuée. Ensuite, afin de pouvoir expliquer nos résultats autrement que par une série de questions et d'hypothèses pas toujours assurées, nous nous concentrons sur une source unique

⁷ Les données de la Banque Mondiale dont la **Figure 1** est tirée n'échappent d'ailleurs pas à cette critique.

de pollution : n'est prise en compte que la pollution due aux déplacements quotidiens des individus⁸.

L'article s'organise de la façon suivante : dans un premier temps, nous détaillons, pour la première fois à notre connaissance dans la littérature, les mécanismes pouvant être à l'origine d'une CEKU due à la mobilité quotidienne (2). Ensuite, nous présentons les données utilisées ainsi que la méthode retenue (3). Enfin, nous détaillons les résultats obtenus (4) : l'hypothèse de CEKU ne pouvant être infirmée, nous l'expliquons par l'analyse empirique des comportements de mobilité et des conditions de mobilité, pour ensuite proposer une mise en perspective de ces résultats : nous discutons le fait que les CEKU puissent simplement découler de différences dans les modes de vie et la forme urbaine.

2. Mécanismes théoriques à l'origine d'une CEKU due à la mobilité quotidienne

a) Les déterminants des émissions polluantes dues à la mobilité quotidienne

Avant d'examiner la relation entre revenu par tête et émissions de polluants, il est nécessaire de préciser les déterminants des quantités de pollutions émises par les individus pour leurs déplacements (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Elles dépendent principalement des comportements de mobilité, et plus précisément :

- (1)⁹ Du choix modal. Si l'individu utilise un mode non-motorisé, la pollution est nulle. Le cas des transports en commun est particulier, parce que les quantités de polluants émis dépendent davantage des conditions de l'offre de transports en commun (nombre de lignes, fréquence, type de véhicule) que de la fréquentation *stricto sensu*. Finalement, la principale cause de variabilité de la pollution urbaine est l'utilisation de la voiture particulière.
- (2) Des distances de déplacement et de la vitesse : la consommation d'énergie et la quantité de pollution dépendent bien entendu de la distance parcourue, mais aussi de la vitesse : les consommations d'énergie diffèrent en milieu urbain et sur route.

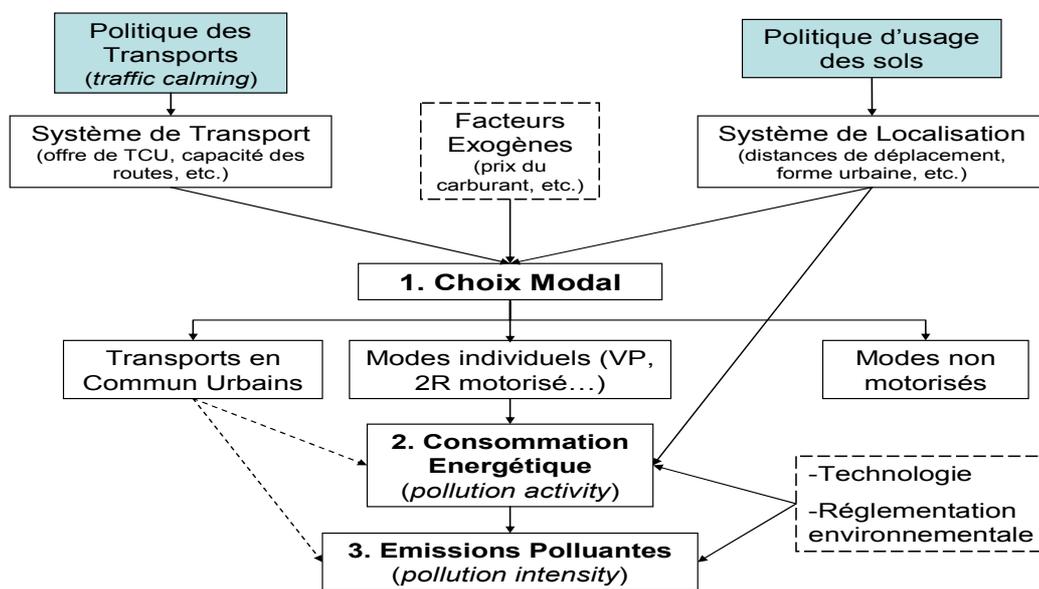
⁸ Ce choix méthodologique permet d'éviter le problème du « déplacement » (*displacement*). Les phénomènes de délocalisation des industries « sales » des pays riches vers les pays pauvres pourraient expliquer une partie de la forme de la CEK, notamment dans sa phase descendante (Dinda, 2004). Le phénomène serait dû principalement au durcissement des réglementations environnementales à mesure que le pays s'enrichit, qui incite les industries polluantes à chercher des « havres de pollutions » (*pollution havens*), des pays où la réglementation environnementale est soit peu développée soit peu respectée. Même si, à l'échelle intra-urbaine, plusieurs auteurs ont mentionné un phénomène un peu comparable à celui du déplacement, c'est-à-dire le décalage entre pollutions émises et pollutions subies par les habitants de la périphérie et du centre-ville (e.g. Fouchier, 1997 ; Nicolas *et al.*, 2002), le problème ne se pose pas pour nous qui adoptons d'emblée l'échelle inter-urbaine (comparaison de plusieurs villes). Dans le cas de la mobilité quotidienne, l'activité de production (de polluants) ne peut être séparée de l'activité de consommation (de mobilité) et ne peut donc être exportée vers d'autres villes (Hank Hilton et Levinson, 1998, p. 140).

⁹ Les numéros dans cette partie du texte correspondent aux numéros de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**.

- (3) De l'état du parc. Les automobiles les plus anciennes et/ou les plus mal entretenues consomment davantage que les automobiles les plus récentes. Les différences de puissance et de poids jouent également, ainsi que le type de motorisation, certains polluants comme le SO₂ n'étant rejetés que par les moteurs diesel.

Il est possible de faire une analogie avec les déterminants de la CEK traditionnelle, en posant que les deux premiers facteurs correspondent aux effets de composition et d'échelle, tandis que le dernier résume l'effet technologique (cf. *infra*).

Figure 4. Décomposition des émissions totales de HC en HC émis par unité de distance et en distance parcourue, en taux de croissance par tranche de revenu



b) Une dissection de la relation entre revenu par tête et émissions polluantes dues à la mobilité

L'existence d'une CEKU supposerait l'atténuation de l'effet d'échelle à partir d'un certain niveau de revenu, alors que les effets de composition et technologique joueraient de plus en plus à la baisse. Il nous faut donc examiner en détail l'influence du revenu sur les émissions polluantes dues aux déplacements, qui est de trois sortes :

(1) Comportementale d'abord, que l'on peut décomposer en :

- Un **effet direct** du revenu sur la mobilité (« *people buy more mobility as income rises* » - Newman, Kenworthy et Vintila, 1995) :

Le revenu a une influence positive directe sur la possession comme sur l'utilisation de l'automobile (e.g. Pouyanne, 2004 ; Paulo, 2006), l'agent étant plus à même de subir les coûts liés à l'usage d'une automobile (Froud *et alii.*, 2000 ; Jullien, 2002). Selon certains, l'augmentation du revenu des agents est la cause principale ou première (*root cause*) d'un accroissement de l'usage de l'automobile (Gomez-Ibanez, 1991, p. 377).

On notera toutefois que cette dernière formulation correspond à un raccourci logique : elle suppose que la mobilité est un bien normal (dont la consommation augmente avec le revenu). Une approche alternative considère la mobilité comme un simple moyen, un investissement permettant de réaliser l'activité en bout de déplacement : le déplacement n'est donc pas forcément un besoin qui augmente mécaniquement avec le revenu (Wiel, 2001, pp. 34-35).

- Un **effet indirect** du revenu sur la mobilité qui passe par la **décision de localisation** (« *people buy more space as income rises* » - Newman, Kenworthy et Vintila, 1995) :

Un revenu élevé permet d'accéder à la propriété d'une maison individuelle, qui sont plus nombreuses et meilleur marché en périphérie des villes. Les classes aux revenus élevés auront donc tendance à se localiser dans les zones périphériques, de faible densité, où l'usage de l'automobile est très répandu. On a même pu parler à ce sujet de « dépendance automobile », au sens où dans ces *car-dependent land use patterns*, l'usage de l'automobile pour ses déplacements quotidiens est devenu « *une nécessité, et non plus un choix* » (Newman et Kenworthy, 1998, p. 31).

On notera toutefois que cet effet indirect est sans doute davantage valable dans les villes américaines, où en effet la périurbanisation a été impulsée par les classes riches¹⁰, que dans les villes européennes. De plus, il pourrait être contrebalancé par un effet contraire : l'hypothèse de localisation conjointe (*co-location*), développée notamment par K. Krizek (2003). Il est souvent supposé que les agents sont prêts à payer une prime pour habiter à proximité des lieux qu'ils fréquentent habituellement, notamment le lieu de travail, prime qu'il faut comparer à l'économie réalisée sur les coûts de transport (Gordon et al, 1991 ; Levinson et Kumar, 1994, 1997 ; Gordon et Richardson, 1997)¹¹. En France, le phénomène de *sectorisation* relève de la même logique : avec l'agrandissement considérable de la superficie urbanisée, les agents cherchent à localiser leur résidence dans le même *secteur* (au sens géométrique du terme) que leur lieu d'emploi (Wiel, 2001). Or les individus les plus riches, de par leur pouvoir d'enchère supérieur qui accroît les possibilités de localisation, sont les plus à même de se localiser conjointement.

(2) Technique ensuite :

Si d'un côté l'accroissement du revenu permet de mieux entretenir son véhicule, ou d'en posséder un plus récent et donc de profiter des dernières innovations environnementales (filtre à particule, pot catalytique, moteur hybride, etc. – on retrouve ici l'effet de la demande environnementale vu plus haut dans le cadre général de la CEK), de l'autre l'hypothèse de l'automobile comme marqueur social (e.g. Kaufmann, 2003) oblige à considérer qu'un revenu élevé s'accompagne bien souvent de la possession d'une automobile plus puissante, plus

¹⁰ Les ouvrages fondateurs de cette thèse sont ceux de J. R. Stilgoe (*Borderland. Origins of the American Suburb, 1820-1939*, New Haven, Yale University Press, 1988), R. Fischman (*Bourgeois Utopia. The rise and fall of Suburbia*, New York, Basic Books, 1987) et Kenneth T. Jackson (*Crabgrass Frontier. The suburbanization of the United States*, New York, Oxford University Press, 1985). Pour un contrepoint à ce *suburban cliché*, on pourra consulter l'article de J. L. Wunsch, paru en 1995 dans le *Journal of Social History*, 28 (3).

¹¹ Cette hypothèse d'un rapprochement spontané des lieux de résidence et d'emploi est critiquée sur une base empirique (Cervero et Wu, 1998 ; Aguilera, 2004) autant que théorique (Newman *et al.*, 1995, p. 59 ; Bourne, 1992, p. 510 ; Ross et Dunning, 1997)

lourde, donc plus gourmande en énergie¹². L'influence technique du revenu sur les émissions polluantes semble donc indéterminée, comme le souligne justement M. Kahn (1998, 2006).

Il ne faut pas oublier ici l'influence des prix. L'accroissement des prix de l'énergie occasionne non seulement un effet-prix (une diminution de la consommation de mobilité), mais aussi, selon l'hypothèse de la « technologie induite », constitue une incitation forte pour les industriels à concevoir et à commercialiser des véhicules économisant l'énergie.

(3) Politique enfin :

Si la croissance de la demande environnementale peut amener les constructeurs à développer des technologies réductrices de pollution, le rôle des Pouvoirs Publics sur la diffusion des « technologies propres » est incontournable – ne serait-ce que parce que les consommateurs n'ont pas forcément les moyens de savoir quels sont les produits qui respectent l'environnement. La régulation environnementale passe par la coercition (obligation du pot catalytique sur les voitures neuves depuis 1995 en Europe, par exemple) comme par l'incitation (pastille verte). Or ces politiques seront d'autant plus aisées à mettre en œuvre que le revenu national est élevé et que les ressources permettent de financer leur mise en place : « *a nation is more likely to enact environmental regulation when its economy is growing and income inequality is falling. Under these conditions voters are more likely to agree on policy priorities, and the government has the resources necessary to pursue environmental goals* » (Kahn, 2006, p. 39).

De manière moins directe, les Pouvoirs Publics peuvent également agir soit sur les infrastructures de transport soit sur l'organisation urbaine. Dans une optique de développement durable, ils ont maintes fois affirmé leur volonté de réduire l'usage de l'automobile en milieu urbain¹³. Cet objectif peut être atteint soit à travers des actions sur le système de transport, en privilégiant le *traffic calming* (sorte d'éventail hétéroclite de mesures visant au report modal de l'automobile vers les autres modes), soit en intervenant sur l'organisation urbaine, qui détermine *de facto* les déplacements : certains modèles, dits *low transportation energy cities* (Newman et Kenworthy, 1998), comme la Ville Compacte (Jenks *et al.*, 1996) ou la Ville Cohérente (Korsu et Massot, 2004), inspirent explicitement la planification urbaine de manière à réduire la part de l'automobile dans les déplacements¹⁴.

Enfin, l'accroissement de la qualité de l'information sur les problèmes environnementaux joue un rôle accélérateur sur l'action des Pouvoirs Publics. Des événements tels que le *Great Smog* de 1952 à Londres, le désastre industriel de Bhopal en 1984, ou le naufrage de l'Exxon-Valdez en 1989 ont, on le sait, fait évoluer la législation. Plus généralement, la prolifération d'articles consacrés à l'environnement, ou la mise en place de dispositifs de veille sur la pollution urbaine comme celui prévu par la LAURE (Loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie) du 30/12/1996 améliorent l'information et participent au développement de la « conscience écologique » de l'électeur médian.

¹² Même si la possession d'un véhicule hybride pourrait également devenir un symbole du statut social.

¹³ Un simple coup d'œil sur les P.L.U. de quelques villes françaises suffira à s'en convaincre.

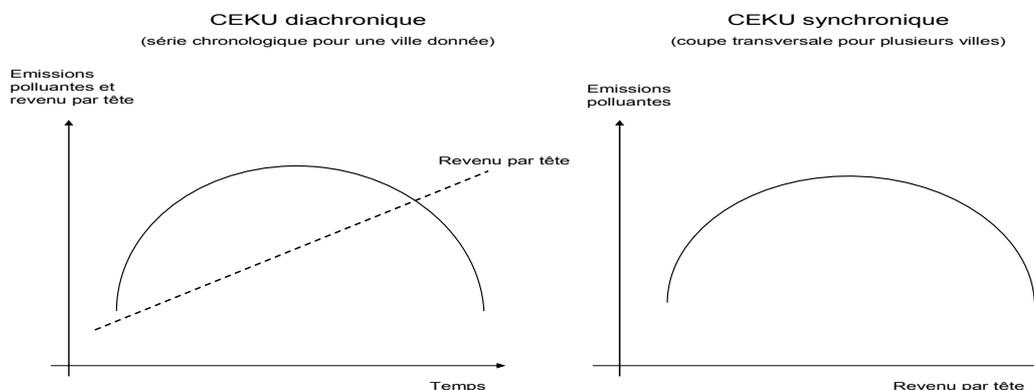
¹⁴ Une présentation de ces modèles de « villes soutenables » du point de vue de la mobilité quotidienne pourra être trouvée chez G. Pouyanne (2005b).

3. Données et méthode

L'influence du revenu sur les émissions polluantes dues au transport est une relation extrêmement complexe : plusieurs effets jouent en sens contraire et il est impossible *a priori* de préjuger le sens de cette influence. Par conséquent, rien n'interdit de poser l'hypothèse de l'existence d'une CEKU pour les déplacements.

On trouve dans la littérature deux types de CEK, dont la spécification dépend des données utilisées (cf. *Figure 5*). D'un côté, la CEK « traditionnelle » ou diachronique, qui met en relation l'évolution dynamique des émissions polluantes et du revenu à partir de séries chronologiques ; de l'autre, une CEK synchronique qui compare en statique les niveaux de revenu et d'émissions polluantes à partir d'une coupe transversale.

Figure 5. Deux types de données, deux types de CEKU



Pour des raisons de disponibilité de données, nous ne testons ici qu'une CEKU synchronique. Cette limitation imposée ne pose pas de problème logique particulier, puisque la CEK porte sur la relation entre revenu et pollution, seule sa justification faisant appel à une évolution temporelle à travers différents stades de développement ; d'ailleurs, l'examen de la littérature montre que c'est une pratique aujourd'hui répandue (e.g. Lucinda et Peters, 2004 ; Rupasingha *et al.*, 2004). Un avantage supplémentaire de la CEKU synchronique est qu'elle permet une comparaison *directe* de différents niveaux de richesse et de pollution, éliminant ainsi l'influence du temps, en maîtrisant notamment la tendance historique d'augmentation des revenus réels.

La base de données utilisée dans cet article est issue du considérable travail de recueil effectué par P. Newman et J. Kenworthy (1998)¹⁵, synthèse de la colligation de près de 750 variables. Elle renseigne, pour 37 villes dans le monde (cf. *Tableau 1*), les niveaux d'émissions pour divers polluants (CO₂, SO₂, CO, Nox, particules et COV ou VHC) dus aux déplacements quotidiens, ainsi que le niveau de richesse produite par la ville et sa région métropolitaine (données 1990). Cette dernière variable présente l'avantage de ne pas avoir à croiser, comme certains sont obligés de faire, des données d'émissions *locales* avec des données de richesse *nationale* (e.g. Selden et Song, 1995 ; Grossman et Krueger, 1994).

¹⁵ Voir leur Annexe 1 (pp. 343-359) pour les détails des calculs.

Notons la bonne qualité de ces données, pourtant difficiles à obtenir, résultat de la réactualisation d'un travail déjà effectué en 1989 et sur lequel J. A. Gomez-Ibanez (1991) apportait ce jugement définitif : « la plus grande contribution [du livre de P. Newman et J. Kenworthy (1989)] est la base de données. »

Tableau 1. Statistiques descriptives pour les 37 villes de l'échantillon

	Densité Humaine Métropolitaine (empl.+hab.)/ha)	PIB par habitant (USD 1990)	Distance moyenne domicile- travail (km)	Temps de trajet domicile- travail (min.)	Mobilité annuelle, véhicule particulier (passagers- km par personne)	Mobilité annuelle, transports publics (passagers- km par personne)
Zurich	82,3	44845	10,9	20,4	7692	2459
Tokyo	144,1	36953			3175	5501
Munich	90,8	36255	9,6	25	5925	2463
Washington	23,2	35882	14,2	29,2	16214	774
Francfort	89,9	35126	12,3	27,7	8309	1149
Stockholm	92,4	33235	8,6	32,2	6261	2351
San Francisco	24,5	31143	15,4	26,6	16229	899
Hambourg	63,4	30421	10,2	30,8	7592	1375
Bruxelles	121,7	30087	5,6	22,1	6809	1428
Copenhague	44,6	29900	13,9	28,8	7749	1607
New York	30,2	28703	13,6	30,6	11062	1334
Vienne	105,7	28021	7,8	28	5272	2430
Boston	19,1	27783	10,1	24,5	17373	627
Houston	15,2	26155	19,1	26,2	19004	215
Chicago	25,3	26038	15,1	28,5	14096	805
Amsterdam	71,0	25211	9,2	27,9	6522	1061
Los Angeles	36,3	24894	17,8	26,5	16686	352
Denver	21,5	24533	13,8	22,3	13515	199
Paris	68,2	22609	12,2	35	4842	2121
Toronto	64,7	22572	11,2	25,3	7027	2173
Detroit	18,9	22538	13,6	23,4	15846	171
Londres	65,9	22215	9,2	32	5644	2405
Sydney	24	21520	11,5	30,3	9417	1769
Melbourne	20,8	21088			9782	844
Phoenix	15,6	20555	17,4	23	15903	124
Adelaide	16,9	19761			11173	572
Brisbane	13,8	18737			11188	900
Perth	15,0	17697	13,7	22,5	12029	544
Hong Kong	440,5	14101	10,9	44	813	3784
Singapour	136,1	12939	9	33,1	3169	2775
Seoul	346,4	5942	11,2	41,2	2464	2890
Kuala Lumpur	81,1	4066	9	27,2	6299	1577
Bangkok	211,7	3826	5,5	31,7	4634	2313
Jakarta	229,6	1508	8,3	39,8	1546	1323
Pékin		1323	6,2	28,9		
Manille	265,7	1099	6,1	40	1281	2568
Surabaya	254,8	726	5,2	20,5	1568	555

Source : Newman et Kenworthy, 1998, pp. 94, 112, 346.

Les émissions et le revenu sont des montants *per capita*, ce qui revient à disposer de valeurs individuelles moyennes. Utiliser ce type de variables à la place des traditionnelles concentrations de polluants permet de contrôler l'influence de la taille urbaine, à l'instar par exemple de A. Rupasingha *et al.* (2004) dans leur étude sur 3029 *counties* américains.

4. Résultats du test de l'hypothèse de CEKU pour 37 villes dans le monde

Les résultats que nous obtenons peuvent être déclinés en trois points. D'abord, les régressions menées ne permettent pas d'infirmer l'hypothèse de la CEKU : l'ajustement quadratique des nuages de points pour la plupart des polluants donne une courbe en forme de cloche, avec une qualité d'ajustement généralement assez bonne. Nous testons ensuite un certain nombre de facteurs explicatifs de cette CEKU, qui tiennent à l'individu (choix modal) et à son environnement (niveau de service et offre d'infrastructures). Enfin, nous discutons de la validité des résultats obtenus.

a) Premiers résultats : la CEKU

L'ajustement du nuage de points par une fonction quadratique est la méthode généralement utilisée pour révéler une CEK (e.g. Selden et Song, 1994), même si des techniques plus élaborées existent : estimation de fonctions *spline* cubiques (Schmalensee *et al.*, 1998), d'équations simultanées (Hung et Shaw, 2004), etc. Nous l'avons adoptée pour ses avantages de simplicité et de robustesse, écartant les *spline* en raison du faible nombre d'observations de la base.

Les fonctions quadratiques estimées (cf. **Figure 6** et **Tableau 2**) **n'infirmement pas l'hypothèse d'une CEKU**. On retrouve la forme en cloche caractéristique pour le lien entre le PIB par habitant et l'utilisation de l'automobile, la consommation d'énergie et les émissions par personne de CO₂, NO_x et CO, avec des régressions d'assez bonne qualité ($0,25 < R^2 < 0,35$). De même forme, mais de qualité moindre est la relation entre le PIB par personne et les émissions de VHC ($R^2 = 0,16$) et de SO₂ ($R^2 = 0,03$). Précisons que ce dernier polluant est un peu particulier, puisqu'il n'est rejeté que par la combustion du gazole : l'influence de la composition du parc serait décisive ici. Enfin, la forme en cloche n'est pas vérifiée pour les particules, puisqu'on obtient une courbe décroissante, en forme de L, à l'instar de L. Peters et F. Murray (2004). Ici, deux effets peuvent se conjuguer : l'effet de composition du parc, les particules étant surtout rejetées par les moteurs diesel, et l'effet technologique, le filtre à particules tendant à se diffuser rapidement dans les pays développés. On notera que ce dernier est dû à l'intervention de l'Etat, qui édicte des normes environnementales à la source d'une réduction des émissions *a priori* indépendante du revenu.

L'analyse des seuils de retournement de la courbe pour chaque variable indépendante (cf. **Tableau 2**) montre une certaine homogénéité de ceux-ci, entre 21 000 et 27 000 dollars environ. Le niveau du seuil montre que ce n'est pas tant le niveau de développement qui discrimine les villes sur la partie croissante et la partie décroissante de la courbe : beaucoup de villes de pays développés sont encore en-dessous de 21 000 USD (cf. **Tableau 2**)¹⁶. Ceci suggère l'importance de facteurs culturels dans l'explication des quantités de pollution émises, hypothèse que nous détaillons *supra*¹⁷.

¹⁶ Cependant, dans le calcul des seuils de retournement, un biais peut provenir de la sur-représentation des villes des pays développés. La composition du panel a son importance, comme le montrent M. Common et D. Stern (2001) : lorsque l'échantillon est rééquilibré en faveur des PED, le seuil de retournement de la tendance passe de 9 200 US\$ par tête à plus de 100 000 US\$.

¹⁷ On pourrait de plus penser que la forme en cloche dérive de la position extrême de la dernière observation : (Zurich). Cependant, le fait de l'enlever ne change quasiment rien à la qualité des régressions.

Figure 6. Ajustement quadratique de la relation entre PIB par habitant et émissions de divers polluants

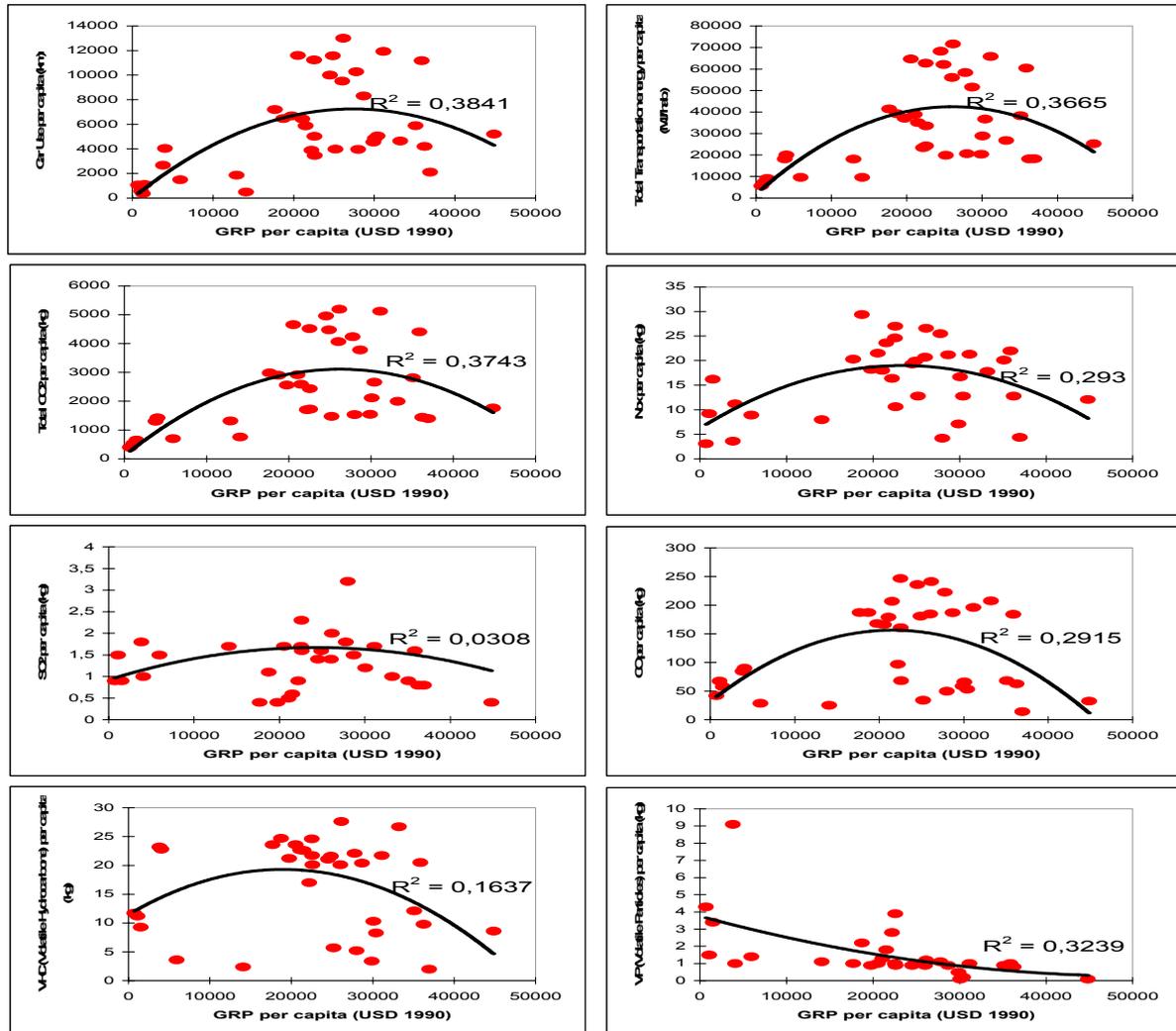


Tableau 2. Régressions quadratiques pour la consommation d'énergie et les émissions polluantes

	Car Use per capita (km)	Total Transportation energy per capita (MJ/hab.)	CO2 per capita (kg)	Nox per capita (kg)	SO2 per capita (kg)	CO per capita (kg)	VHC (Volatile Hydrocarbone) per capita (kg)	VP (Volatile Particles) per capita (kg)
Constante	-19,227	1774,759	109,056	6,239	0,926	31,971	11,481	3,757
	-0,014	0,222	0,188	2,013	1,404	0,988	3,095	5,192
GRP per capita	5,316E-01	3,124E+00	2,287E-01	1,092E-03	6,152E-05	1,154E-02	8,266E-04	-1,365E-04
	3,862	3,946	3,987	3,580	0,940	3,624	2,264	-1,885
(GRP per capita) au carré	-9,711E-06	-5,989E-05	-4,354E-06	-2,334E-08	-1,268E-09	-2,673E-07	-2,182E-08	1,334E-09
	-2,875	-3,157	-3,169	-3,182	-0,808	-3,491	-2,485	0,756
R2 ajusté	0,348	0,328	0,336	0,249	0,031	0,247	0,111	0,276
N	37	36	36	35	32	35	35	31
Seuil de retournement (USD)	27 371	26 081	26 263	23 393		21 586	18 941	

Note : les coefficients significatifs à 5% sont en gras ; nous appliquons à ces résultats la Correction de White, qui permet de pallier l'hétéroscédasticité en obtenant une estimation robuste de la matrice des variances-covariances (Greene, 2000, pp. 506-507).

b) Éléments d'explication : comportements et conditions de mobilité

La focalisation de cette étude sur les émissions polluantes dues à la mobilité quotidienne vise à apporter des éléments d'explication plus précis que ce que l'on trouve habituellement dans la littérature sur la CEK, puisque la source de la pollution est unique. Pour justifier l'existence d'une CEKU, nous distinguons deux catégories de facteurs explicatifs : ceux qui tiennent à l'individu lui-même – le comportement de mobilité – et ceux qui tiennent à son environnement - les conditions de mobilité. Par conditions de mobilité nous entendons le niveau de service des transports en commun (régularité, fréquence, état des véhicules, etc.) et l'offre d'infrastructures (disponibilité de parking, emprise du réseau viaire, etc.)¹⁸.

1. Une première explication des différences dans les émissions polluantes peut être trouvée dans les **comportements de mobilité**, notamment le choix modal effectué par les individus. L'existence d'une CEKU pour la relation entre le PIB par tête et le choix du mode de transport est en effet plausible :

- Dans un premier temps, l'augmentation du revenu s'accompagne d'un usage accru de l'automobile, évolution qu'ont connue la plupart des pays industrialisés et que connaissent aujourd'hui les pays en voie de développement, déjà développée *supra*. Cet argument justifie la partie croissante de la CEKU.
- Dans un deuxième temps, on peut supposer que l'augmentation du revenu s'accompagne (1) d'un effet de saturation de l'équipement automobile : le nombre d'automobiles par ménage n'est pas une relation linéaire croissante du revenu ; (2) d'une amélioration de l'efficacité environnementale des automobiles (effet technologique) ; enfin, (3) d'un transfert progressif de l'automobile vers les autres modes, en raison du développement des politiques dites de « mobilité durable » qui visent à la fois à freiner l'usage de l'automobile en milieu urbain (zones 30, réorganisation de la circulation, piétonnisation, etc.) et à favoriser l'usage des modes alternatifs, en les rendant compétitifs en temps par rapport à l'automobile (développement des TCSP, pistes cyclables, etc.)¹⁹. On assisterait alors à une diminution de l'usage de l'automobile au profit des autres modes : on se situe dans la phase descendante de la CEKU.

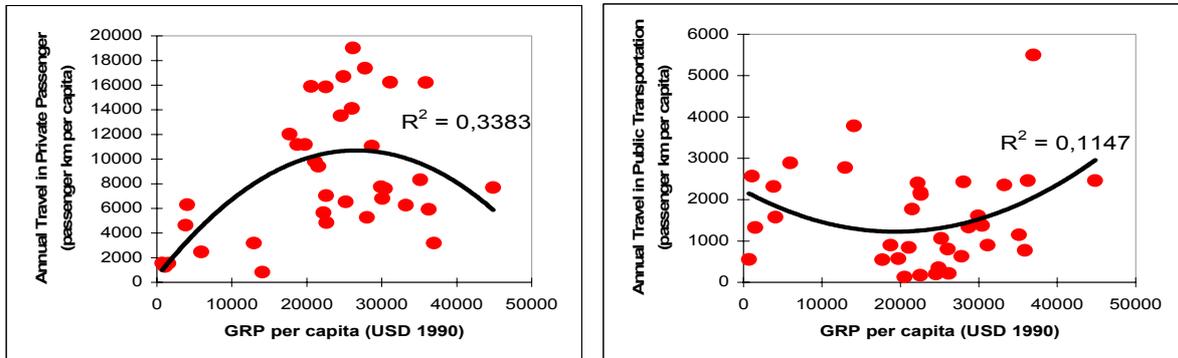
Nos résultats ne semblent pas infirmer cette hypothèse, sans pour autant apporter une preuve qui emporte la conviction. On observe ainsi que la relation entre le PIB par habitant et le montant total des déplacements en automobile (en passagers-kilomètres) adopte bien une forme en cloche, tandis que la même relation mais avec les déplacements effectués en

¹⁸ Pour une présentation détaillée des facteurs explicatifs de la consommation énergétique due aux déplacements en milieu urbain, voir G. Pouyane (2005a, pp. 195-199).

¹⁹ A l'origine de ce transfert modal, le développement d'une « sensibilité environnementale » chez les individus qui les pousserait à utiliser davantage les modes « doux ». Cet argument correspond à une explication traditionnelle de la CEK : l'intégration, à partir d'un certain niveau de richesse, de la qualité environnementale dans la fonction d'utilité des agents, qui pousse les consommateurs à formuler une demande de biens « respectueux de l'environnement » et les producteurs à y répondre, notamment en accroissant leurs dépenses en R&D. Cependant, dans le cas de la mobilité quotidienne, ce transfert modal spontané n'a à notre connaissance jamais été observé.

transport en commun est en forme de « U » (cf. Figure 7 et Tableau 3). On notera cependant, pour cette dernière, la faiblesse du R^2 ajusté (0,06).

Figure 7. Répartition modale des déplacements et PIB par habitant



2. Un deuxième grand ensemble d'explication des différences inter-urbaines d'émissions polluantes concerne le **niveau de service en transports en commun** et la **disponibilité des infrastructures** (offre de routes, dépenses de construction/entretien des routes, et nombre de places de parking en centre-ville). On peut en effet supposer que l'accroissement de la richesse s'accompagne dans un premier temps d'un développement des infrastructures dédiées à l'automobile (routes, places de parking) en lien avec le développement de la motorisation, puis, sous l'influence de politiques de « mobilité durable », à une restriction des infrastructures automobiles au profit des infrastructures dédiées aux modes alternatifs²⁰. Nos résultats semblent là aussi confirmer l'hypothèse d'une CEKU en ce qui concerne le niveau de service et d'infrastructures par personne (cf. Figure 8 et Tableau 3).

L'analyse des seuils de retournement (dernière ligne, Tableau 2 et Tableau 3), même si leur calcul est fragile (Stern, 2003), permet tout d'abord de vérifier leur cohérence avec les seuils des différents polluants pour la quantité de déplacements en automobile (cf. Tableau 2, 1^o col) ; ensuite, en comparant les seuils du niveau de service offert par les Transports en Commun et de l'offre de parking, de noter leur relative similitude : ceci pourrait signifier la possibilité d'un arbitrage entre offre d'infrastructures pour les Transports en Commun et pour les automobiles, reflet d'une concurrence entre ces deux modes dans l'espace urbain.

²⁰ C'est en tous cas le schéma qu'a suivi la France : à « l'adaptation de la ville à l'automobile » des années 1960 à 1980 est substituée dans les années 1990 l'objectif de réduction de la place de l'automobile en ville, avec des mesures telles que la « renaissance » du tramway dans les grandes villes françaises, la piétonnisation de nombreux quartiers centraux, les opérations « en ville sans ma voiture », etc. Une présentation historique est donnée par M. Flonneau (2005).

Figure 8. Niveaux de services et PIB par habitant

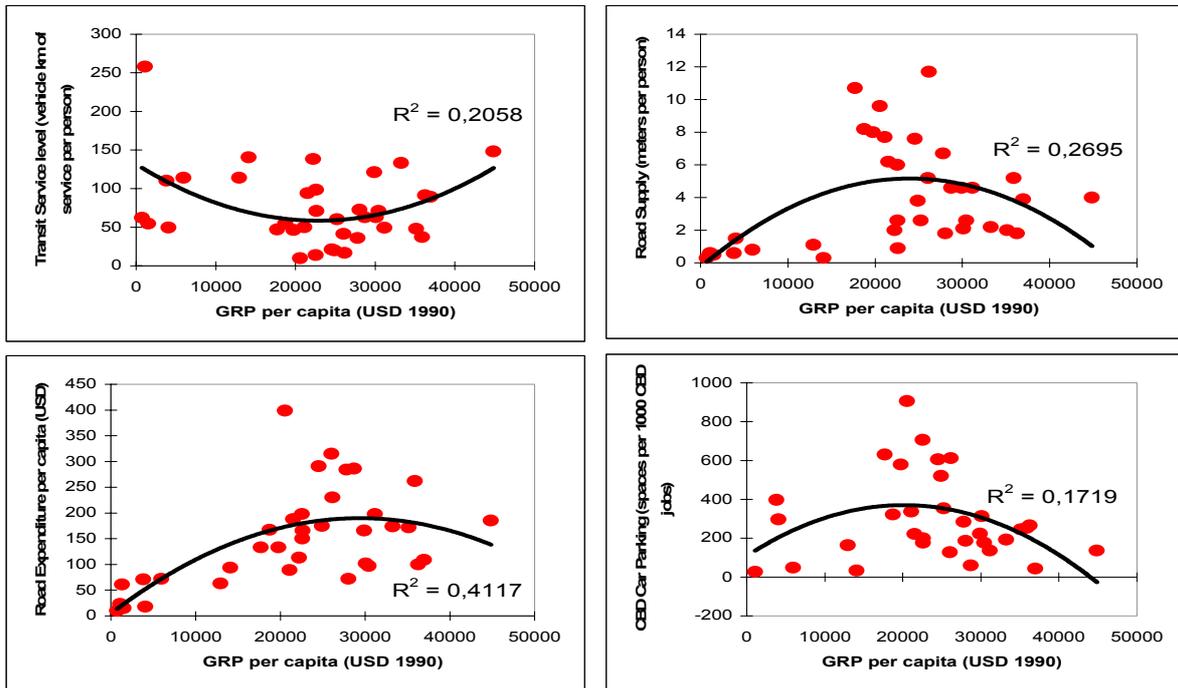


Tableau 3. Régressions quadratiques pour le choix modal et les niveaux de service

	Déplacements en Automobile (passagers-km/hab.)	Déplacements en Transports en Commun (passagers-km/hab.)	Niveau de service des Transports en Commun (véhicules-km/hab.)	Offre de routes (km/hab.)	Dépenses de construction/entretien des routes (USD/hab.)	Places de parking au centre (places/1000 emplois)
Constante	447,027	2222,479	131,554	-0,265	4,532	108,522
GRP per capita	0,209	4,077	5,906	-0,196	0,138	0,841
(GRP per capita) au carré	0,771	-0,103	-0,006	4,54E-04	0,013	0,026
	3,638	-1,914	-2,907	3,386	3,727	2,212
	-1,45E-05	2,66E-06	1,40E-07	-9,47E-09	-2,15E-07	-6,48E-07
	-2,854	2,063	2,658	-2,951	-2,589	-2,456
R2 ajusté	0,298	0,061	0,158	0,225	0,376	0,117
N	35	35	35	35	35	35
Seuil de retournement (USD)	26 586	19 360	21 428	23 970	30 232	20 061

Note : les coefficients significatifs à 5% sont en gras

c) Discussion

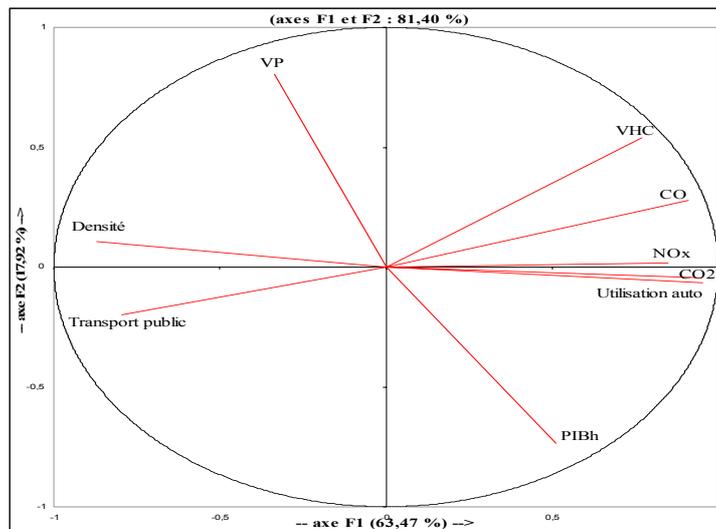
Il semble bien que les courbes en cloche soient la forme la plus répandue lorsque l'on relie le PIB par habitant et les émissions de polluants dues aux déplacements. Ces résultats sont de plus confirmés par l'analyse des facteurs explicatifs des émissions polluantes : choix modal et niveau de service et offre d'infrastructures. Ces résultats ne permettent donc pas d'infirmer l'hypothèse de la CEKU pour les déplacements.

Nous voudrions maintenant dépasser l'analyse statistique ou économétrique pure. Il était tentant d'arrêter là notre analyse et de conclure à une forte présomption quant à l'existence de la CEKU pour les déplacements, mais nous avons voulu dépasser ce résultat, en raison de sa fragilité due au faible nombre d'observations et à l'absence d'analyse dynamique.

Plus particulièrement, on est en droit de se demander si, au-delà du revenu, certains facteurs tels que les modes de vie ou la forme urbaine n'auraient pas une influence plus forte sur les émissions polluantes. On connaît notamment la différence traditionnelle entre villes européennes et américaines en termes de répartition des densités. Si les secondes ont une forte densité centrale, très vite le gradient s'aplatit et les densités périphériques deviennent faibles. Au contraire, la ville européenne est moins dense au centre, tandis que les densités restent relativement élevées en périphérie (Neshyba et Walsh, 2004).

Pour préciser cette idée, l'analyse en composantes principales fournit un cadre méthodologique captant les influences respectives des différentes variables (cf. *Figure 9*).

Figure 9. Projection des variables sur le plan (F1, F2)



i. L'axe F1 : l'impact de la densité à la baisse sur les émissions

Toutes les variables ont une représentation satisfaisante, se situant proche du cercle des corrélations. Le premier facteur capte presque les deux tiers de l'information totale. Il oppose très clairement deux groupes de variables²¹ : d'un côté, la densité et l'usage des transports publics ; de l'autre, les émissions de monoxyde de carbone, d'oxydes d'azote et de dioxyde de carbone *per capita*, ainsi que l'utilisation de l'automobile. Le premier facteur est donc essentiel dans l'analyse des déterminants de la pollution issue des transports sans que le PIB par habitant ne contribue de façon significative à l'inertie traduite dans cet axe. Ce résultat confirme la *non linéarité* d'une éventuelle relation entre richesse individuelle et pollution urbaine²².

L'influence de la densité sur les conditions de mobilité est double :

²¹ Les variables que nous retenons pour expliquer la formation des axes du plan ont une contribution supérieure à 11% [100/9 (nombre total de variables)] (cf. Annexe 1). Il n'existe pas de règles strictes et nous suivons la méthode de sélection la plus courante.

²² La matrice des corrélations (cf. Annexe 1) montre en effet le lien ambigu entre PIBh et les émissions polluantes. Ainsi, la corrélation est soit positive (CO₂ et NO_x), soit négative (Particules), soit non significative (CO et VHC). Le niveau de richesses individuelles moyennes entretient donc une relation complexe avec la pollution automobile ce qui peut être une indication de la fragilité de l'hypothèse de CEK.

- Des distances de déplacement plus faible. A travers les effets de la concentration, la densité et l'accessibilité sont liées : toutes choses égales par ailleurs, plus la ville est dense, plus les origines et les destinations sont proches les unes des autres (Fouchier, 1997). Cependant, le rapprochement physique n'implique pas forcément un rapprochement temporel²³, et de fortes densités ne sont pas forcément à l'origine d'une diminution des temps de trajet ;
- Un niveau de congestion élevé. L'association entre densités élevées et niveau de congestion, à capacité viaire et niveau de motorisation donnés, est assez triviale. Cependant, la conjecture de Mogridge établit que ce lien n'est pas aussi simple (Mogridge, 1980) : l'augmentation de la densité amplifie la congestion, donc diminue la vitesse moyenne et accroît les temps de déplacement en automobile. Par rapport aux TCSP (Transports en Commun en Site Propre)²⁴, dont la vitesse n'est par définition pas affectée par la congestion, la compétitivité-temps de l'automobile se dégrade. Si, comme il est généralement postulé, le temps de déplacement est la variable principale dans la détermination des comportements de mobilité (Wiel, 2001), les individus vont arbitrer en faveur d'un report modal de l'automobile vers les TCSP²⁵.

Ainsi, en diminuant les distances de déplacement et en dégradant la compétitivité-temps de l'automobile, les fortes densités incitent à l'utilisation des Transports en Commun, et plus généralement des modes « doux » : vélo et marche à pied, un phénomène révélé par plusieurs études empiriques (Fouchier, 1997 ; Newman et Kenworthy, 1989, 1998 ; Pouyanne, 2005a). On retrouve ici une partie de l'argumentation en faveur de la Ville Compacte (Jenks *et al.*, 1996) Les deux mécanismes que l'on a présentés ci-dessus sont illustrés par l'estimation du degré de corrélation entre la densité et la longueur du trajet domicile-travail pour les 37 villes de notre échantillon (cf. *Tableau 4*) : ainsi constate-t-on une relation négative entre la densité et la distance du déplacement (premier effet de la densité), et une relation positive entre la densité et le temps de déplacement (deuxième effet de la densité). L'absence de corrélation significative entre distance et temps de déplacement (3^o colonne du tableau) sert à vérifier qu'il ne s'agit pas d'un simple effet statistique.

Tableau 4. Densité et longueur du trajet domicile-travail : les coefficients de corrélation de Pearson

Variables	Densité-Trajet (km)	Densité-Trajet (min.)	Trajet km-Trajet min
Corrélation (Pearson)	-0,536	0,670	-0,211

²³ Problème connu dans la littérature sous le nom de *commuting paradox* (Gordon *et al.*, 1991), et qui trouve son origine dans la dissociation entre proximité et connexité.

²⁴ La plupart des villes de notre échantillon disposent d'un réseau de transport de ce type : métro, tramway, etc.

²⁵ En toute rigueur, le raisonnement présenté ici est en fait la *réciproque* de la conjecture de Mogridge (Pouyanne, 2004, pp. 65-66).

ii. L'axe F2 : le rôle déterminant des pouvoirs publics

L'analyse du second facteur, même si elle ne concerne que 18% de l'inertie totale, conduit à souligner le rôle central des autorités publiques. Cette idée se retrouve en effet dans l'opposition entre les trois variables qui contribuent significativement à l'information traduite dans F2 : d'un côté, les émissions de particules (et, dans une moindre mesure, de fumées) ; de l'autre, le PIB par habitant. Les rejets de particules sont les seuls qui soient corrélés négativement avec le niveau de richesses individuelles moyennes (cf. Annexe 1). Or, cette pollution est justement celle qui a fait l'objet d'une action régulatrice ciblée sur la base de normes d'émission très surveillées. Plusieurs gouvernements ont en effet imposé la généralisation des pots catalytiques. La chute spectaculaire des rejets de particules expliquerait alors l'anti-corrélation puisque le PIB par tête continue à croître. L'intervention exogène des régulateurs interfère ainsi dans la dynamique endogène de la croissance économique.

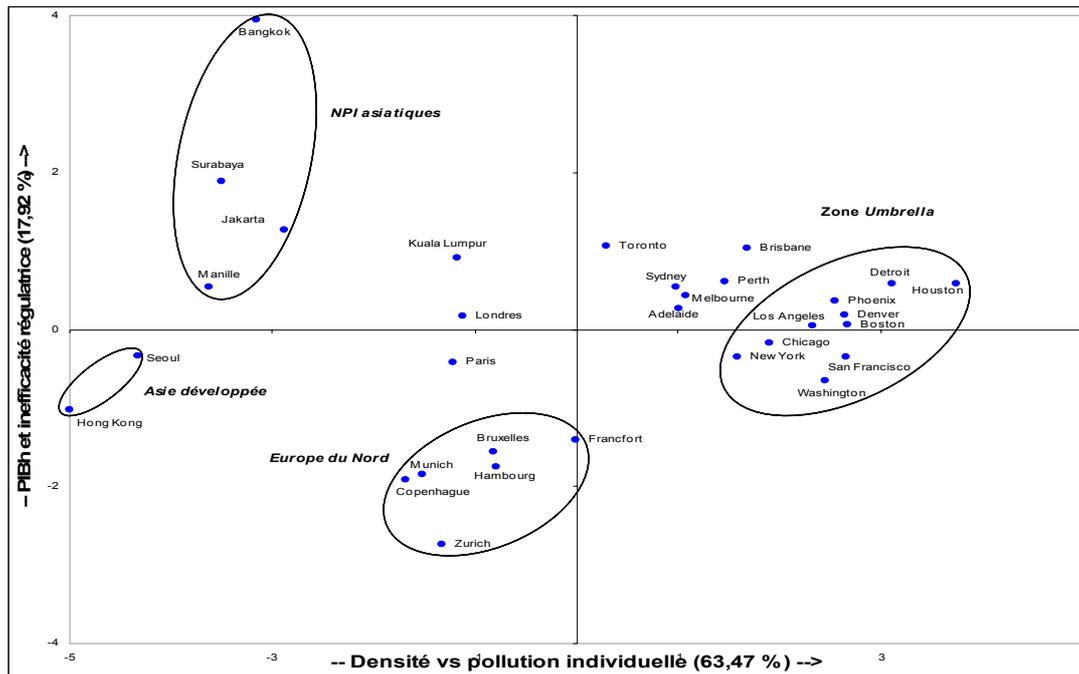
Les différences de fiscalité illustrent le rôle central des autorités publiques. Les taxes sur le carburant (TIPP en France) sont d'amplitude variable selon les pays. Il est d'usage notamment de distinguer deux systèmes juridiques différents : les pays de norme coutumière (*common laws*) ont des niveaux de taxes bien plus faibles que les pays de norme légale (*civil laws*). A en croire E. L. Glaeser et M. Kahn (2004), l'impact de cette différence sur la motorisation, l'usage de l'automobile et la consommation d'énergie est extrêmement significatif. D'après eux, il peut s'agir soit d'un simple effet-prix (un niveau élevé de taxes réduit la possession et/ou l'utilisation de l'automobile) soit du niveau d'équipement automobile qui influence le comportement de l'électeur médian et détermine pour partie le niveau de taxes.

iii. Des groupes homogènes : le rôle des contingences culturelles, géographiques ou historiques

L'influence de la forme urbaine et des politiques publiques nous amène à formuler l'hypothèse de l'existence de groupes homogènes fondés sur des particularités locales. La projection des villes sur le plan factoriel (cf. **Figure 10**) fait apparaître quatre sous-ensembles continentaux (cf. Annexe 2).

Les pays d'Europe occidentale sont ainsi caractérisés par un PIB individuel élevé et un faible niveau relatif d'émissions polluantes. Ces pays ont été les premiers à généraliser l'obligation du pot catalytique sur les véhicules neufs. De plus, les densités urbaines sont les plus élevées des pays occidentaux. Les deux caractéristiques centrales évoquées plus haut (densité et implication de l'Etat) jouent donc pleinement dans cette zone.

Figure 10. Projection des individus sur le plan (F1, F2)



Les pays de la zone *Umbrella*²⁶ sont à droite sur F1 en raison de l'influence simultanée de leur PIB par habitant élevé et du manque d'actions régulatrices efficaces en termes d'émissions polluantes. En revanche, ce dernier élément les place sur F1 dans une zone associée aux rejets polluants les plus importants. L'effet d'échelle des transports sur la pollution n'est donc pas compensé par la régulation. L'organisation extensive de l'espace et le laissez-faire des autorités vis-à-vis du comportement des consommateurs de transports individuels (conduisant à une proportion importante de voitures puissantes et consommatrices d'énergie) sont sans doute à la source de ces performances environnementales médiocres.

Plus généralement, on peut soulever l'hypothèse qu'il y a deux façons d'utiliser la richesse : dans les pays anglo-saxons, la croissance du revenu sert à accroître la consommation de sol (étalement) et de mobilité (usage de l'automobile) : la croissance se fait plutôt de manière extensive. Dans les autres pays, de loi civile, une part plus importante du revenu est utilisée pour des objectifs dits « de bien commun », parmi lesquels l'utilisation plus économe des ressources due à une croissance plus intensive.

Les villes des Nouveaux Pays Industrialisés de l'Asie du Sud-Est tiennent une position particulière, avec un faible PIBh et une utilisation limitée de l'automobile. Ainsi, même si elles sont très inefficaces en termes d'intensité énergétique de leur système de transport (cf. Annexe 2), la faiblesse de l'effet d'échelle les positionne dans le cadran des pays moins polluants en termes d'émissions par tête.

A terme cependant, l'essor d'un marché de l'automobile consécutif à la croissance rapide du niveau de richesses individuelles moyennes risque de conduire à un net déplacement de ces villes vers la droite du plan (F1, F2). Mais l'exemple des deux villes de

²⁶ La zone *Umbrella* est constituée des nations qui ont suivi le gouvernement américain lors de son refus de ratifier le Protocole de Kyoto.

l'Asie développée, Hong-Kong et Séoul, montre aussi que cette évolution est loin d'être inéluctable.

En résumé, cette ACP va dans le sens d'une relativisation du rôle du PIB par habitant comme déterminant des trajectoires urbaines des pollutions dues aux modes de transport. Il semble que les deux déterminants majeurs des dynamiques environnementales qui nous intéressent se trouvent plutôt du côté des politiques publiques de régulation et des contingences culturelles, géographiques et historiques qui ont conditionné la forme de ces villes. Certains considèrent la CEK comme un « artefact » statistique (Dinda, 2004), mais nous n'irons pas aussi loin et préférons conclure avec M. Kahn (2006, p. 37) : « *Kuznets Curve is not a law of physics* ».

Conclusion

Cet article, qui s'engageait sur le terrain encore peu exploré de l'hypothèse de la CEK urbaine, a nécessité de notre part des choix méthodologiques liés tant à une exigence de rigueur qu'à la nature des données utilisées : nous avons ainsi testé une CEKU synchronique pour les émissions polluantes dues aux déplacements quotidiens pour 37 villes dans le monde.

Nos résultats sont en demi-teinte, et nous les exposons avec toutes les précautions que nécessite la démarche scientifique. D'un côté, ils ne permettent pas d'infirmer l'existence d'une CEKU. D'abord parce que la relation entre le PIB par habitant et les quantités de polluants émises adopte le plus souvent une forme en cloche, ensuite parce que cette forme trouve une explication dans le comportement des individus (le choix modal) et dans les conditions de mobilité : niveau de service des transports en commun et offre d'infrastructures. Mais de l'autre, nous soulevons l'hypothèse que la consommation d'énergie due aux déplacements et les émissions polluantes qui en sont le produit, pourraient être davantage dues à des différences continentales dans les modes de vie et la forme urbaine.

Finalement, l'idée qui découle de ces résultats est que nous sommes face à des relations extrêmement complexes, qu'il est sans doute difficile de systématiser à une simple relation en cloche entre revenu et pollution comme le fait l'hypothèse de la CEKU. Le manque de recherches sur le sujet de la CEKU se fait sentir. Nous sommes conscients de ne faire que poser des jalons pour la recherche future, et que nos questions sont plus nombreuses que nos réponses. Il s'agit donc ici d'une question relativement ouverte, et nous souhaitons que la recherche urbaine s'oriente dans cette direction pour apporter des compléments d'information sur l'hypothèse de CEKU.

Bibliographie

- AGUILERA A., 2004, La proximité à l'emploi dans la ville polycentrique, IV^o Journées de la Proximité « Proximité, réseaux et coordination », Marseille, 17-18 juin 2004.
- ARROW K. J. et alii, 1995, Economic growth, carrying capacity and the environment, *Science*, 268, pp. 570-571.
- BANQUE MONDIALE, 1992, Rapport sur le développement dans le monde, Washington D.C.
- Banque Mondiale, 2006, World Development Indicators 2005, <http://www.worldbank.org>
- BHAGWATI J., 2004, In defense of Globalization, Oxford, Oxford University Press.
- BOURNE L. S., 1992, Self-fulfilling prophecies ? Decentralization, inner city decline, and the quality of urban life, *Journal of the American Planning Association*, 58 (4), pp. 509-513.
- CERVERO R., WU K.-L., 1998, Sub-centring and commuting : evidence from the San Francisco Bay Area, 1980-1990, *Urban Studies*, 35 (7), pp. 1059-1076.
- COMMON M., STERN D., 2001, Is there an EKC for sulphur ?, *Journal of Environmental Economics and Management*, 41, pp. 162-178.
- DINDA S., 2004, Environmental Kuznets Curve Hypothesis : a Survey, *Ecological Economics*, 49, 2004, pp. 431-455.
- EWING R., 1997, Is Los Angeles-Style sprawl desirable ?, *Journal of the American Planning Association*, 63 (1), pp. 107-126.
- FLONNEAU M., 2005, Paris : la fin de l'automobile ?, *L'Histoire*, 297 (avril), pp. 62-67.
- FOUCHIER V., 1997, Des fortes densités urbaines. Les villes nouvelles dans l'espace métropolitain, Thèse d'Etat en Urbanisme réalisée sous la direction du Pr. Pierre Merlin, Université de Paris VIII.
- FROUD J., HASLAM C., JOHAL S., JULLIEN B., WILLIAMS K., 2000, Les dépenses de motorisation comme facteur d'accentuation des inégalités et comme frein au développement des entreprises automobiles, in G. DUPUY, F. BOST, *L'automobile et son monde*, Paris, Editions de l'Aube, pp. 75-96.
- GLAESER E. L., KAHN M. E., 2004, Sprawl and urban growth, in HENDERSON J. V., THISSE J.-F., *Handbook of urban and regional economics*, Amsterdam, Elsevier-North Holland.
- GOMEZ-IBANEZ J. A., 1991, A global view of automobile dependence, *Journal of the American Planning Association*, 57 (3), pp. 376-379.
- GORDON P., RICHARDSON H. W., 1997, Are compact cities a desirable planning goal ?, *Journal of the American Planning Association*, 63 (1), pp. 95-106.
- GORDON P., RICHARDSON H. W., JUN M.-J., 1991, The commuting paradox. Evidence from thre Top Twenty, *Journal of the American Planning Association*, 57 (4), pp. 416-420.
- GREENE W. H., 2000, *Econometric Analysis*, Upper Saddle River, Prentice Hall, 1040 pp. (4^o éd.)
- GRIMES R., ROBERTS J., 1997, Carbon intensity and economic development 1962-1991. A brief exploration in the EKC, *World Development*, 25 (2), pp. 191-198.

- GROSSMAN G., KRUEGER A., 1994, Economic growth and the environment, NBER Working Paper, 4634.
- HANK HILTON F. G., LEVINSON A., 1998, Factoring the Environmental Kuznets Curve : Evidence from Automotive Lead Emissions, *Journal of Environmental Economics and Management*, 35 (1998), pp. 126-141.
- HOLTZ-EKIN T., SELDEN T., 1995, Stoking the fires ? CO2 emissions and economic growth, *Journal of Public Economics*, 57, pp. 85-101.
- Hung M., Shaw d., 2004, Economic Growth and Environmental Kuznets Curve in Taiwan: A Simultaneity Model Analysis, in M. Boldrin, B. L. Chen and P. Wang, ed., *Human Capital, Trade and Public Policy in Rapidly Growing Economies: From Theory to Empirics*. Aldershot, UK: Edward Elgar.
- JENKS M., BURTON E., WILLIAMS K., (éd.), 1996, *The Compact City : a sustainable urban form ?*, Oxford, E & FN Spon.
- JHA R., BHANU MURTY K. V., 2004, A consumption-based Human Development Index and the global EKC, *Working Papers in Trade and Development*, Australian National University, 2004-3.
- JULLIEN, B., 2002, Consumer vs. manufacturer or consumer vs. consumer? The implication of a usage analysis of automobile systems, *Competition and Change*, 6 (1), 113-125.
- KAHN M. E., 1998, A Household level Environmental Kuznets Curve, *Economic Letters*, 59 (1998), pp. 269-273.
- KAHN M. E., 2006, *Green Cities. Urban Growth and the Environment*, Washington D. C., Brookings Institution Press.
- KAUFMANN V., 2003, Pratiques modales des déplacements de personnes en milieu urbain : des rationalités d'usage à la cohérence de l'action publique, *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, 2003-1, pp. 39-58.
- KORSU E., MASSOT M.-H., 2004, Mise en cohérence des bassins d'habitat et des bassins d'emploi en Ile-de-France : les enjeux pour la régulation de l'usage de la voiture, XL^e Colloque de l'ASRDLF, Bruxelles, 1, 2 et 3 septembre 2004.
- KRIZEK K. J., 2003, Residential relocation and changes in urban travel. Does Neighborhood-scale urban form matter ?, *Journal of the American Planning Association*, 69 (3), pp. 265-281.
- KUZNETS S., 1955, Economic growth and income inequality, *American Economic Review*, 445, pp. 1-18.
- LEVINSON D. M., KUMAR A., 1994, The rational locator. Why travel times have remained stable, *Journal of the American Planning Association*, 60 (3), pp. 319-332.
- LEVINSON D. M., KUMAR A., 1997, Density and the journey to work, *Growth and Change*, vol. 28 (spring), pp. 147-172.
- MEUNIE A., 2004, Controverses autour de la Courbe Environnementale de Kuznets, Document de Travail du C.E.D., 107, 18 p.
- MEUNIE A., 2005, *La soutenabilité de la croissance économique : le cas de la Chine*, Thèse de doctorat ès Sciences Economiques réalisée sous la direction de J.-M. Harribey, Université Montesquieu-Bordeaux IV.
- MOGRIDGE M. J. H., 1980, *Travel in towns : jam yesterday, jam today, jam tomorrow ?*, Londres, McMillan, 308 pp.

- NESHYBA T. J., WALSH R., 2004, Urban sprawl, *Journal of Economic Perspectives*, 18 (4), pp. 177-200.
- NICOLAS J.-P., POCHET P., POIMBOEUF H., 2002, Mobilité urbaine et développement durable. Quels outils de mesure pour quels enjeux ?, *Cahiers Scientifiques du Transport*, 41-2002, pp. 53-76.
- NEWMAN P. W. G., KENWORTHY J. R., 1989, *Cities and automobile dependence. An international sourcebook*, Brookfield, Gower Technicals.
- NEWMAN P. W. G., KENWORTHY J. R., VINTILA P., 1995, Can we overcome automobile dependence ?, *Cities*, 12 (1), pp. 53-65.
- NEWMAN P. W. G., KENWORTHY J. R., 1998, *Sustainability and cities. Overcoming automobile dependence*, Washington D. C., Island Press.
- PAULO C., 2006, L'impact du revenu sur les mobilités : une mesure à différentes échelles spatiales et temporelles, XLII^e Colloque de l'A.S.R.D.L.F., « Développement local, attractivité, compétitivité des territoires », Sfax (Tunisie), 4, 5, 6 sept. 2006.
- PETERS L., MURRAY F., 2004, Economic development, urban air pollution and the EKC in Asia, *Better Air Quality Conference*, Agra (Inde), 6-8/12/2004.
- POLESE M., SHEARMUR R., 2005, *Economie Urbaine et Régionale. Introduction à la Géographie Economique*, Economica, Paris, 2^e éd.
- POUYANNE G., 2004, *Forme Urbaine et Mobilité Quotidienne*, Thèse d'Etat ès Sciences Economiques réalisée sous la direction du Pr. Claude Lacour, Université Montesquieu-Bordeaux IV, 301 pp.
- POUYANNE G., 2005a, L'interaction entre usage du sol et comportements de mobilité. Méthodologie et application à l'aire urbaine de Bordeaux, *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, 2005-5.
- POUYANNE G., 2005b, Etalement et mobilité quotidienne. A la recherche d'une forme urbaine « soutenable », in C. LACOUR, E. PERRIN, N. ROUSIER (éd.), *Les Nouvelles Frontières de l'Economie Urbaine*, Paris, Editions de l'Aube.
- ROSS C. L., DUNNING A. E., 1997, Land use transportation interaction : an examination of the 1995 NPTS data, U. S. Department of Transportation, 50 pp.
- RUPASINGHA A., GOETZ S. J., DEBERTIN D. L., PAGOULATOS A., 2004, The Environmental Kuznets Curve for US counties : a spatial econometric analysis with extensions, *Papers in Regional Science*, 83 (2), pp. 407-424.
- SCHMALENSEE R., STOKER T. M., JUDSON R.A., 1998. World carbon dioxide emissions : 1950–2050, *Review of Economics and Statistics* LXXX, pp. 15– 27.
- SELDEN T.M., SONG D., 1994. Environmental quality and development : is there a Kuznets curve for air pollution emissions ?, *Journal of Environmental Economics and Management*, 27, pp. 147– 162.
- STERN D. I., 2003, The Environmental Kuznets Curve, in *Internet Encyclopedia of Ecological Economics*.
- WIEL M., 2001, *Ville et automobile*, Paris, Descartes & Cie.

Annexe 1 : Tableaux de l'ACP

Matrice des corrélations

	Densité	PIBh	Utilisation auto	CO2	NOx	CO	Fumée	Particules	Transport public
Densité	1								
PIBh	-0,591	1							
Utilisation auto	-0,757	0,539	1						
CO2	-0,728	0,519	0,982	1					
NOx	-0,677	0,410	0,733	0,755	1				
CO	-0,705	0,230	0,841	0,859	0,817	1			
Fumée	-0,677	0,027	0,666	0,668	0,649	0,840	1		
Particules	0,321	-0,557	-0,348	-0,329	-0,280	-0,125	0,160	1	
Transport public	0,677	-0,164	-0,757	-0,740	-0,556	-0,712	-0,622	0,181	1

Les valeurs en gras sont significatives au seuil de 5%.

La matrice des corrélations montre que la densité urbaine apparaît comme un facteur décisif des émissions polluantes. Globalement, elle permet de contenir l'intensification des dégradations écologiques provoquées par les transports. En revanche, le PIB par habitant semble exercer un effet plus ambigu. Enfin, les transports publics ont bien un impact clair à la baisse des émissions (sauf pour les particules). Leur rôle stratégique pour un développement urbain soutenable est confirmé. Pourtant, leur corrélation avec le PIB par tête n'est pas significative, résultat qui accentue le faible pouvoir explicatif de l'ajustement linéaire décrit plus haut dans la figure 5. Ainsi, la dynamique de ce facteur déterminant pour la soutenabilité dépend d'autres sources, telles que la densité et, plus directement, la politique des pouvoirs publics locaux. La nécessité ou la volonté des régulateurs de promouvoir des choix modaux alternatifs à la voiture individuelle semble donc dépendre avant tout de caractéristiques plus *objectives* que le revenu par habitant.

Valeurs propres

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Valeur propre	5,71	1,61	0,55	0,44	0,34	0,21	0,07	0,04	0,02
% variance	63,47	17,92	6,08	4,92	3,83	2,36	0,81	0,43	0,17
% cumulé	63,47	81,40	87,48	92,40	96,22	98,59	99,40	99,83	100,00

Coordonnées des variables

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Densité	-0,870	0,106	-0,174	0,261	0,348	0,018	-0,055	0,099	-0,007
PIBh	0,512	-0,735	0,378	-0,178	0,100	0,058	0,004	0,096	-0,001
Utilisation auto	0,952	-0,066	-0,060	-0,059	0,250	-0,079	-0,050	-0,060	-0,087
CO2	0,949	-0,045	-0,050	0,000	0,283	-0,066	-0,028	-0,051	0,089
NOx	0,847	0,016	0,149	0,414	-0,087	0,276	-0,064	-0,021	-0,004
CO	0,911	0,279	-0,008	0,191	0,041	-0,072	0,214	0,049	-0,009
Fumées (VHC)	0,770	0,541	0,143	0,014	-0,159	-0,216	-0,127	0,079	0,003
Particules (VP)	-0,335	0,803	0,373	-0,214	0,187	0,151	0,022	-0,018	-0,002
Transport public	-0,797	-0,200	0,431	0,293	0,042	-0,218	0,013	-0,062	-0,002

Cosinus carré des variables

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Densité	0,756	0,011	0,030	0,068	0,121	0,000	0,003	0,010	0,000
PIBh	0,263	0,540	0,143	0,032	0,010	0,003	0,000	0,009	0,000
Utilisation auto	0,906	0,004	0,004	0,003	0,062	0,006	0,003	0,004	0,008
CO2	0,900	0,002	0,003	0,000	0,080	0,004	0,001	0,003	0,008
NOx	0,718	0,000	0,022	0,171	0,008	0,076	0,004	0,000	0,000
CO	0,830	0,078	0,000	0,037	0,002	0,005	0,046	0,002	0,000
Fumées (VHC)	0,593	0,293	0,020	0,000	0,025	0,047	0,016	0,006	0,000
Particules (VP)	0,112	0,644	0,139	0,046	0,035	0,023	0,000	0,000	0,000
Transport public	0,634	0,040	0,186	0,086	0,002	0,048	0,000	0,004	0,000

Contribution des variables (%)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Densité	13,2	0,7	5,5	15,4	35,1	0,2	4,1	25,5	0,3
PIBh	4,6	33,5	26,1	7,2	2,9	1,6	0,0	24,1	0,0
Utilisation auto	15,9	0,3	0,7	0,8	18,1	3,0	3,5	9,5	48,4
CO2	15,8	0,1	0,5	0,0	23,3	2,0	1,1	6,7	50,6
NOx	12,6	0,0	4,1	38,7	2,2	35,7	5,6	1,1	0,1
CO	14,5	4,8	0,0	8,3	0,5	2,5	62,6	6,3	0,6
Fumées (VHC)	10,4	18,1	3,7	0,0	7,3	22,0	22,3	16,1	0,1
Particules (VP)	2,0	39,9	25,4	10,3	10,1	10,8	0,6	0,8	0,0
Transport public	11,1	2,5	34,0	19,4	0,5	22,4	0,2	9,8	0,0

NB : Sont affichés en gras les variables qui contribuent significativement à la formation du facteur.

Cosinus carré des individus

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Brisbane	0,472	0,180	0,036	0,111	0,108	0,089	0,005	0,000	0,000
Perth	0,648	0,112	0,072	0,001	0,154	0,003	0,003	0,007	0,000
Houston	0,939	0,022	0,003	0,007	0,023	0,001	0,004	0,000	0,001
Phoenix	0,832	0,017	0,074	0,011	0,012	0,001	0,038	0,014	0,000
Adelaide	0,496	0,036	0,122	0,023	0,285	0,000	0,013	0,019	0,006
Detroit	0,921	0,032	0,026	0,009	0,006	0,000	0,004	0,001	0,001
Boston	0,961	0,001	0,000	0,020	0,007	0,006	0,004	0,001	0,001
Melbourne	0,613	0,098	0,010	0,011	0,181	0,028	0,024	0,032	0,005
Denver	0,847	0,004	0,058	0,005	0,032	0,005	0,033	0,001	0,014
Washington	0,858	0,061	0,012	0,006	0,057	0,000	0,001	0,002	0,002
San Francisco	0,867	0,015	0,001	0,000	0,094	0,016	0,001	0,005	0,001
Chicago	0,963	0,008	0,008	0,000	0,013	0,002	0,002	0,003	0,000
New York	0,856	0,042	0,039	0,028	0,002	0,018	0,011	0,000	0,004
Los Angeles	0,868	0,000	0,049	0,015	0,052	0,003	0,006	0,002	0,003
Toronto	0,016	0,203	0,554	0,145	0,009	0,070	0,000	0,003	0,000
Sydney	0,296	0,090	0,198	0,216	0,132	0,004	0,063	0,001	0,000
Copenhague	0,322	0,417	0,007	0,171	0,006	0,002	0,054	0,019	0,002
Hambourg	0,138	0,676	0,016	0,118	0,001	0,015	0,000	0,016	0,020
Zurich	0,161	0,693	0,100	0,036	0,000	0,001	0,003	0,003	0,003
Francfort	0,000	0,627	0,019	0,025	0,004	0,241	0,067	0,008	0,009
Munich	0,343	0,502	0,127	0,013	0,005	0,001	0,003	0,002	0,004
Bruxelles	0,193	0,698	0,013	0,001	0,005	0,064	0,017	0,010	0,000
Londres	0,428	0,010	0,474	0,000	0,064	0,001	0,000	0,023	0,000
Paris	0,400	0,047	0,038	0,036	0,199	0,223	0,040	0,007	0,009
Kuala Lumpur	0,255	0,154	0,099	0,000	0,273	0,177	0,034	0,007	0,001
Bangkok	0,316	0,496	0,089	0,062	0,033	0,004	0,000	0,000	0,000
Jakarta	0,679	0,132	0,044	0,011	0,004	0,126	0,000	0,004	0,000
Surabaya	0,618	0,178	0,092	0,086	0,000	0,017	0,000	0,008	0,000
Manille	0,869	0,019	0,037	0,052	0,006	0,015	0,001	0,000	0,000
Seoul	0,895	0,005	0,028	0,049	0,019	0,000	0,000	0,003	0,000
Hong Kong	0,824	0,034	0,001	0,081	0,052	0,006	0,000	0,002	0,000

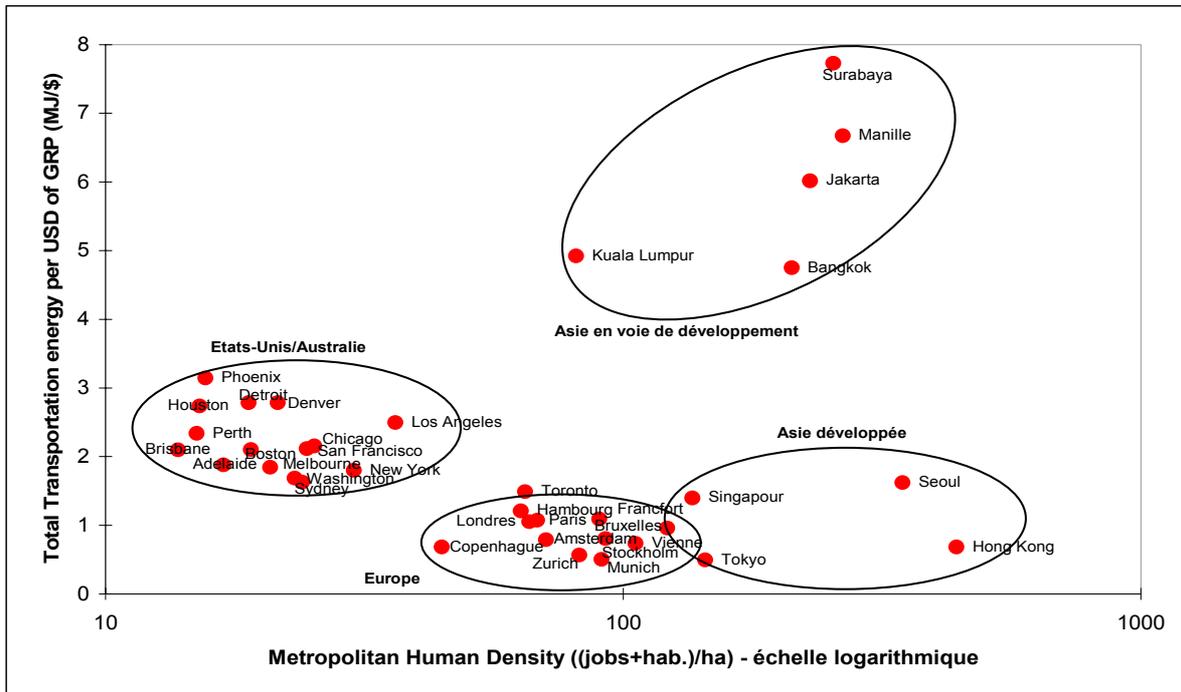
Contribution des individus (%)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Houston	7,94	0,67	0,22	0,72	3,26	0,18	2,55	0,39	3,46
Phoenix	3,67	0,27	3,41	0,64	0,91	0,06	13,02	9,16	0,17
Detroit	5,48	0,67	1,63	0,68	0,58	0,00	1,79	0,85	3,11
Boston	4,02	0,01	0,01	1,06	0,52	0,64	1,37	0,35	1,21
Melbourne	0,65	0,37	0,11	0,15	3,20	0,81	1,98	5,00	1,84
Denver	3,94	0,07	2,84	0,30	2,50	0,66	12,04	0,41	24,15
Washington	3,39	0,85	0,50	0,31	3,74	0,01	0,25	1,25	3,42
San Francisco	4,02	0,24	0,07	0,02	7,24	1,95	0,34	3,13	1,03
Chicago	2,04	0,06	0,18	0,00	0,44	0,13	0,35	1,03	0,25
New York	1,42	0,24	0,67	0,60	0,05	0,81	1,49	0,03	2,34
Los Angeles	3,08	0,00	1,82	0,68	3,08	0,32	1,73	1,24	4,33
Toronto	0,05	2,25	18,10	5,85	0,46	5,89	0,01	1,47	0,33
Sydney	0,54	0,59	3,78	5,12	4,01	0,20	9,00	0,17	0,26
Brisbane	1,59	2,15	1,27	4,82	6,02	8,03	1,24	0,00	0,16
Perth	1,21	0,75	1,40	0,02	4,78	0,13	0,39	1,96	0,10
Adelaide	0,58	0,15	1,48	0,34	5,52	0,01	1,21	3,25	2,42
Copenhague	1,61	7,38	0,37	11,05	0,48	0,26	21,32	13,91	3,76
Hambourg	0,35	6,15	0,42	3,91	0,06	1,01	0,09	6,08	19,00
Zurich	0,99	15,05	6,42	2,82	0,00	0,16	1,44	3,13	5,80
Francfort	0,00	3,97	0,35	0,57	0,12	11,56	9,43	2,10	5,88
Munich	1,30	6,76	5,06	0,66	0,32	0,08	0,77	1,15	5,82
Bruxelles	0,38	4,85	0,26	0,02	0,15	3,38	2,55	2,88	0,15
Londres	0,71	0,06	8,25	0,01	1,76	0,06	0,02	5,75	0,00
Paris	0,84	0,35	0,83	0,98	6,91	12,51	6,61	2,18	6,55
Kuala Lumpur	0,79	1,68	3,19	0,00	13,98	14,67	8,16	3,21	1,11
Bangkok	5,61	31,21	16,57	14,20	9,85	1,79	0,00	0,04	0,10
Jakarta	4,70	3,24	3,19	0,95	0,49	23,34	0,10	3,99	0,05
Surabaya	6,94	7,07	10,76	12,44	0,09	5,04	0,08	13,98	0,54
Manille	7,42	0,58	3,28	5,72	0,91	3,47	0,64	0,46	0,17
Seoul	10,59	0,22	3,41	7,44	3,76	0,10	0,01	5,18	1,86
Hong Kong	14,14	2,09	0,13	17,90	14,79	2,74	0,00	6,25	0,65

NB : Sont affichés en gras les individus qui contribuent significativement à la formation du facteur avec comme règle une contribution supérieure ou égale à $100/31 = 3,22$. Pour l'intérêt de la discussion, nous retenons Los Angeles dont la contribution est très proche du seuil (3,08%).

Annexe 2

Densité métropolitaine et consommation d'énergie par USD de PIB : la mise en évidence de 4 sous-ensembles continentaux



On voit bien se dégager quatre sous-ensembles continentaux^{27, 28}. En lisant de droite à gauche, le premier groupe, Etats-Unis et Australie (*Umbrella*), se caractérise par des villes plutôt récentes, de densité faible. Malgré une certaine richesse, la consommation d'énergie de ces villes est très élevée. Le deuxième groupe, les villes européennes, relativement plus denses et à niveau de PIB comparable, ont de bien meilleures performances en termes de consommation d'énergie (on remarquera la position de Toronto, qui se rapproche davantage des villes européennes en termes de consommation énergétique comme de densité). Troisième sous-ensemble continental, l'Asie, que l'on peut partager en villes de pays développés (Séoul, Singapour, Tokyo, Hong-Kong) et sous-développés. Pour les premières, les densités sont plus élevées encore qu'en Europe, alors que les performances en termes de consommation d'énergie sont comparables (entre 0,5 et 1,5 environ). Les villes asiatiques de pays sous-développés, avec des densités assez proches, ont en revanche une consommation d'énergie pour les transports par USD de PIB très élevée. La faiblesse de leur PIB explique sans doute un tel résultat.

²⁷ Nous nous contentons d'une lecture graphique. L'idéal eût été d'abord de réaliser des régressions séparées par sous-groupe continental et de vérifier la validité du modèle, ensuite de tester l'égalité des coefficients (la similitude des effets) à partir d'un test de stabilité structurelle (dit « de Chow »). Le faible nombre des observations ne nous l'a pas permis.

²⁸ Il s'agit ici de la densité humaine, somme des densités résidentielle et d'emploi, meilleur indicateur de l'intensité de l'usage du sol que la simple densité résidentielle, selon V. Fouchier (1997).

Cahiers du GRES

Le **GRES (Groupement de Recherche Economiques et Sociales)** est un Groupement d'Intérêt Scientifique entre l'Université Montesquieu-Bordeaux IV et l'Université des Sciences Sociales Toulouse I.

Il regroupe des chercheurs appartenant à plusieurs laboratoires :

- **GREThA - UMR CNRS 5113** (Groupe de Recherche en Economie Théorique et Appliquée), **Université Montesquieu-Bordeaux IV** ;
- **LEREPS - EA 790** (Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur l'Economie, les Politiques et les Systèmes Sociaux), **Université des Sciences Sociales Toulouse 1** ;
- **L'UR 023** "Développement local urbain. Dynamiques et régulations", **IRD** (Institut de Recherches pour le Développement) ;
- Le laboratoire **EGERIE** (Economie et de Gestion des Espaces Ruraux, de l'Information et de l'Entreprise), **ENITAB** (Ecole Nationale des Ingénieurs des Travaux Agricoles de Bordeaux).

www.gres-so.org

Cahiers du GRES (derniers numéros)

- 2006-28 : NICET-CHENAF Dalila, *L'UE, ses dix nouveaux membres et les pays d'Afrique du Nord : polarisation et absence d'effet moyeu-rayon dans les échanges commerciaux*
- 2006-29 : CARRINCAZEAUX Christophe, GASCHET Frédéric, *Knowledge and the diversity of innovation systems: a comparative analysis of European regions*
- 2006-30 : GERVAIS Marie-Martine, *Prospective analysis: residential choice and territorial attractiveness*
- 2007-01 : HATTAB-CHRISTMANN Malika, *Accords de libre-échange et Investissements Directs Etrangers : de la proximité institutionnelle comme facteur d'attractivité, Le cas des banques et des Télécommunications au Maroc*
- 2007-02 : MAZAUD Frédéric, LAGASSE Marie, *Vertical sub-contracting relationships strategy, the Airbus First-tier suppliers'coordination*
- 2007-03 : COLLETIS Gabriel, *Intelligence économique : vers un nouveau concept en analyse économique ?*
- 2007-04 : GONDARD-DELCROIX Claire, *Entre faiblesse d'opportunités et persistance de la pauvreté : la pluriactivité en milieu rural malgache*
- 2007-05 : NICET-CHENAF Dalila, ROUGIER Eric, *Attractivité comparée des territoires Marocains et tunisiens au regard des IDE*
- 2007-06 : MINDA Alexandre, *The entry of multinational banks into Latin America: a source of stability or financial fragility?*
- 2007-07 : FRIGANT Vincent, *Vers une régionalisation de la politique industrielle : l'exemple de l'industrie aérospatiale en Aquitaine*
- 2007-08 : BROSSARD Olivier DUCROZET Frédéric ROCHE Adrian, *An Early Warning Model for EU banks with Detection of the Adverse Selection Effect*
- 2007-09 : COLLETIS Gabriel (Coord.), *La financiarisation des stratégies : transferts de risque, liquidité, propriété et contrôle*
- 2007-10 : MEUNIE André, POUYANNE Guillaume, *Existe-t-il une courbe environnementale de kuznets urbaine ? Emissions polluantes dues aux déplacements dans 37 villes*

La coordination scientifique des Cahiers du GRES est assurée par Alexandre MINDA (LEREPS) et Vincent FRIGANT (GREThA). La mise en page est assurée par Dominique REBOLLO.