

Une taxe carbone peut-elle rendre l'agglomération parisienne plus dense ?

Vincent Viguié¹, Stéphane Hallegatte^{1,2}

RESUME

L'agglomération parisienne peut être bien décrite par un modèle monocentrique. A partir de ce modèle, nous étudions l'impact d'une taxe carbone de 100€/tonne de CO₂, intégralement redistribuée aux ménages.

La pression immobilière et la variation des loyers incitent les promoteurs immobiliers à augmenter la densité de l'agglomération, en construisant plus en centre-ville. La densification obtenue est cependant limitée, avec une réduction finale de la distance moyenne des ménages au centre de Paris d'au maximum 10 % (soit environ 1700m) par rapport à la situation initiale, et ce dans le cas extrême où l'on néglige de nombreux phénomènes comme le transfert modal ou le progrès technologique, qui limitent en pratique l'effet de la taxe. Ceci suggère qu'une taxe carbone seule n'aura pas grand effet sur cette distance moyenne : en vue d'agir sur cette dernière, la taxe ne doit pas être substituée aux autres mesures possibles, comme la taxe foncière différenciée, des investissements publics dans les transports et le bâti, ou la régulation et l'usage de plans d'occupation des sols par exemple.

¹ Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement, (CIRED, UMR 8568 CNRS, ENPC, EHESS, AgroParisTech, CIRAD)

² Ecole Nationale de la Météorologie, Météo-France

INTRODUCTION

Face au phénomène de l'étalement et de la fragmentation urbaine, de nombreuses voix s'élèvent pour prôner une densification des villes. Celle-ci aurait en effet de nombreux effets bénéfiques en permettant de réduire les consommations d'énergie³ et en améliorant la qualité de vie⁴. Sans entrer dans le débat entourant cette question⁵, il est intéressant de s'interroger sur la cause du phénomène de l'étalement urbain, et sur nos possibilités d'agir sur celui-ci et de densifier les villes, ainsi que sur les conséquences socio-économiques positives et négatives de différents choix d'urbanisme. Il a été mis en évidence que différents outils économiques peuvent a priori influencer sur la densité urbaine, et notamment une taxe sur les transports⁶. Dans quelle mesure une taxe carbone, option fréquemment soulevée à l'heure actuelle dans le débat politique, notamment pour son impact sur le prix des carburants, va-t-elle jouer ce rôle ? C'est une des questions qui a guidé notre présent travail.

Nous avons cherché ici à comprendre et à modéliser la structure de l'agglomération parisienne, c'est-à-dire la répartition de la population, des loyers et des hauteurs de bâtiments à travers l'agglomération. Notre modélisation s'appuie sur les outils classiques d'économie urbaine⁷, et des données socio-

³ par exemple P. Newman et J. R Kenworthy, *Cities and automobile dependence: a sourcebook* (Gower Publishing Company, Limited, 1989).

⁴ par exemple R. Ewing et al., "Relationship between urban sprawl and physical activity, obesity, and morbidity," *American Journal of Health Promotion* 18, n° 1 (2003): 47-57.

⁵ P. Gordon et H. W Richardson, "Are compact cities a desirable planning goal?," *Journal of the American Planning Association* 63, n° 1 (1997): 95-106; R. Ewing, "Is Los Angeles-style sprawl desirable?," *Journal of the American Planning Association* 63, n° 1 (1997): 107-126.

⁶ voir par exemple William C. Wheaton, "A comparative static analysis of urban spatial structure," *Journal of Economic Theory* 9, n° 2 (Octobre 1974): 223-237; Masahisa Fujita, *Urban Economic Theory: Land Use and City Size* (Cambridge [Cambridgeshire]: Cambridge University Press, 1989); J. K. Brueckner, "Urban sprawl: diagnosis and remedies," *International Regional Science Review* 23, n° 2 (2000): 160; et, plus récemment F. Gusdorf et S. Hallegatte, "Compact or spread-out cities: Urban planning, taxation, and the vulnerability to transportation shocks," *Energy Policy* 35, n° 10 (2007): 4826-4838; F. Gusdorf et S. Hallegatte, "Behaviors and housing inertia are key factors in determining the consequences of a shock in transportation costs," *Energy Policy* 35, n° 6 (2007): 3483-3495; F. Gusdorf, S. Hallegatte, et A. Lahellec, "Time and space matter: How urban transitions create inequality," *Global Environmental Change* 18, n° 4 (2008): 708-719.

⁷ W. Alonso, *Location and land use: toward a general theory of land rent* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1964); Richard F Muth, *Cities and Housing: the Spatial Pattern of Urban Residential Land Use* (Chicago: University of Chicago Press, 1969); Edwin S. Mills, "An Aggregative Model of Resource Allocation in a Metropolitan Area," *The American Economic Review* 57, n° 2 (Mai 1967): 197-210.

économiques variées⁸. Elle semble reproduire assez fidèlement les données dont nous disposons. Nous avons ensuite utilisé notre modèle pour évaluer l'impact d'une taxe carbone sur la possible densification de l'agglomération parisienne. La taxe carbone que nous appliquons présente un taux de 100 € par tonne de CO₂, qui correspond à la valeur tutélaire du carbone préconisée pour 2030 par le rapport Quinet⁹. Nous trouvons qu'une telle taxe n'a qu'un effet limité sur la densification de l'agglomération, mesurée par la réduction de la distance moyenne des ménages par rapport au centre de Paris. Pour densifier efficacement l'agglomération, d'autres instruments comme par exemple des politiques foncières, doivent donc être utilisées en plus de cette taxe carbone.

Ce chapitre comporte quatre parties. Dans la première, nous rappelons ce qu'est le modèle mono-centrique, et détaillons les équations de notre modèle. Dans la deuxième, nous décrivons les données que nous avons utilisées, avant de présenter les résultats de la calibration du modèle et d'effectuer une étude de sensibilité dans la troisième partie. Enfin, dans la quatrième partie, nous utilisons notre modèle pour étudier l'impact de la taxe carbone sur la densification de l'agglomération parisienne.

LE MODELE MONO-CENTRIQUE

Le modèle mono-centrique est un modèle économique développé à la fin des années 1960¹⁰. Il cherche à expliquer la variation du coût du foncier en ville, et par là la variation du niveau des prix immobiliers, de la taille des logements, de la densité d'habitants et de la densité de bâti.

Le mécanisme fondamental sur lequel il repose est le suivant : les ménages, lorsqu'ils choisissent leur lieu d'habitation, font un arbitrage entre la proximité au centre-ville et le niveau du prix immobilier à payer (ou, de manière équivalente, entre la proximité au centre-ville et la taille du logement à occuper). Il est possible d'enrichir ce modèle en faisant intervenir les promoteurs immobiliers, et

⁸ une modélisation utilisant un formalisme similaire au notre, mais des données et des hypothèses différentes a été effectuée par D. Rouchaud et A. Sauvant, "*Prix des logements et coûts de transports: un modèle global d'équilibre en Ile-de-France,*" Notes de synthèses du SES. Ministère de l'Équipement. Août 2004

⁹ Alain Quinet, *La valeur tutélaire du carbone*, La Documentation Française, 2009.

¹⁰ Alonso, W. *Location and land use: toward a general theory of land rent*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1964 ; Mills, Edwin S. "An Aggregative Model of Resource Allocation in a Metropolitan Area." *The American Economic Review* 57, no. 2 (May 1967): 197-210 ; Muth, Richard F. *Cities and Housing; the Spatial Pattern of Urban Residential Land Use*. Chicago: University of Chicago Press, 1969.

en supposant que ceux-ci choisissent de construire plus ou moins de logements à un endroit donné, suivant le niveau du prix de l'immobilier à cet endroit.

Équations

Nous modélisons l'arbitrage des ménages par la fonction d'utilité suivante :

$$U = Z^\alpha h^\beta \quad [1]$$

où α et β sont des coefficients ($\alpha + \beta = 1$), h représente la surface du logement des ménages et Z l'argent qu'il reste aux ménages après qu'ils ont payé leur loyer et un aller-retour par jour de leur commune au centre-ville de Paris. Une telle forme fonctionnelle permet de retranscrire le fait que la part du revenu des ménages consacrée aux dépenses en logement est relativement constante à travers l'agglomération¹¹. La contrainte de revenu des ménages s'écrit :

$$Y = Z + hR + t_r \quad [2]$$

où Y est le revenu du ménage, R le loyer et t_r le coût du transport (le coût du transport est la somme du coût monétaire de transport et du coût associé au temps passé dans les transports, que l'on assimile à une perte réelle de revenu).

La fonction de production des logements s'écrit, de manière classique¹²:

$$H = A L^a K^b \quad [3]$$

où A , a et b sont des coefficients ($a + b = 1$), H est la surface habitable de logements construite, L la surface au sol occupée et K le capital utilisé pour la construction. Le profit des promoteurs s'écrit :

$$\Pi = (R - R_0)H - (\rho + \delta)K \quad [4]$$

où Π est le profit, ρ représente l'effet conjoint de l'amortissement annuel du capital immobilier et des impôts annuels payés par les propriétaires sur ce capital immobilier, et δ le taux d'intérêt. Les promoteurs construisent de manière à

11 M. A Davis et F. Ortalo-Magné, "Household expenditures, wages, rents," *Review of Economic Dynamics* (2010).

12 Muth, *Cities and Housing; the Spatial Pattern of Urban Residential Land Use*; Paul Thorsnes, "Consistent Estimates of the Elasticity of Substitution between Land and Non-Land Inputs in the Production of Housing," *Journal of Urban Economics* 42, n° 1 (Juillet 1997): 98-108.

maximiser leur profit : en chaque point de l'agglomération ils construisent, c'est-à-dire choisissent K , de manière à ce que :

$$d\pi/dK=0 \quad [5]$$

La seule exception à cette règle provient de la contrainte d'urbanisme que nous avons introduite, et qui limite le ratio surface habitable sur surface au sol H/L dans l'agglomération.

La frontière de l'agglomération est définie par un seuil de loyer R_0 , en dessous duquel on considère qu'il n'est plus rentable de construire. Cette valeur correspond à l'influence d'autres possibilités d'usage des sols comme l'agriculture, et à des coûts de transaction dans la construction et la location.

Hypothèses du modèle

Appliquer un tel modèle suppose de faire plusieurs hypothèses, et ce paragraphe examine leur validité dans le cas de l'agglomération parisienne.

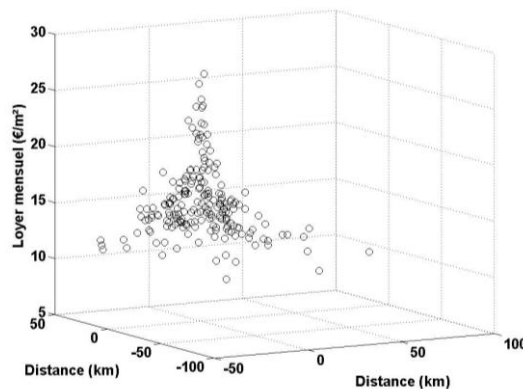


Figure 1 : Loyers en Île de France (source : Clameur)

Tout d'abord, il doit exister un centre-ville concentrant tous les emplois, et celui-ci doit être unique. De plus, tous les ménages doivent effectuer un aller-retour par jour vers ce centre. Si, en toute rigueur les tendances récentes dans l'évolution de l'agglomération parisienne semblent contredire cette hypothèse, il est encore raisonnable de l'accepter, au moins en première approximation, ainsi que l'on peut le voir sur les figures 1 et 2 : les loyers et la densité de population atteignent un pic en un point qui correspond au centre de Paris, et décroissent dans toutes les directions de manière régulière lorsque l'on s'en éloigne. Le système de transport d'Île de France, centré sur Paris, contribue également à la pertinence de cette approche.

Deuxièmement, la loi du marché doit s'appliquer. Il existe en pratique des contraintes d'urbanisme qui font que la structure de l'agglomération parisienne

ne correspond pas directement à l'équilibre résultant du libre jeu du marché. Nous avons introduit explicitement des contraintes de ce type dans le modèle, et limité la hauteur des constructions dans Paris (le modèle nous dit en effet dans le cas contraire qu'en raison du niveau des loyers dans Paris, les promoteurs immobiliers construisent des immeubles beaucoup plus hauts que ceux qui sont observés). Nous avons également exclu de notre champ d'étude le logement social, car celui-ci fonctionne de manière régulée et non suivant le jeu du marché. La possibilité d'accéder à un logement social étant en pratique très contrainte et l'offre très inférieure à la demande¹³, nous avons supposé que

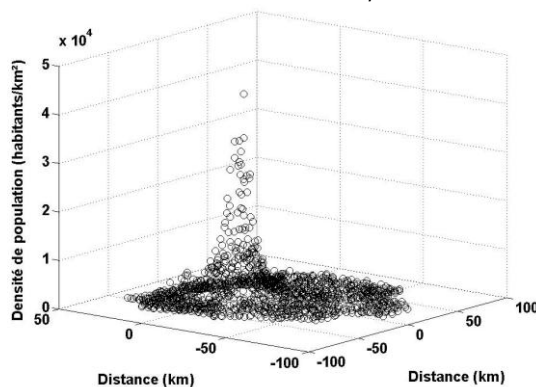


Figure 2 : densité de population en Île de France (source : INSEE)

l'existence des logements sociaux n'influe pas sur le marché privé que nous examinons ici. De manière plus précise, cela signifie que nous avons supposé que les ménages ne pouvaient pas mettre en concurrence les logements sociaux et les logements privés, concurrence qui aurait entraîné une diminution du prix de l'immobilier privé jusqu'à ce qu'il devienne comparable au prix de l'immobilier social.

Troisièmement, l'arbitrage transport/taille des logements doit être déterminant dans la formation du niveau des prix immobiliers. De nombreux autres paramètres (attrait historique du lieu, revenu moyen de la population alentour...) interviennent en pratique dans la formation de ces prix, mais notre modèle étant une description unidimensionnelle (on calcule ce qu'il se passe en moyenne à une distance donnée du centre de Paris, et non quartier par quartier), il revient à faire des moyennes sur l'ensemble des quartiers situés à

¹³ Voir par exemple G. Lacoste « *Qui sont les ménages entrant ou sortant du parc HLM ?* », actes du colloque « Les enjeux du logement social en Ile-de-France », Observatoire du logement social en Île de France, 2004

une distance donnée du centre. La moyenne que l'on effectue porte donc sur un grand nombre de quartiers aux caractéristiques différentes. A l'exception de l'effet de l'éloignement au centre, il est ainsi raisonnable de supposer que la plupart des effets sont fortement atténués.

Dans un souci de simplification, nous avons également supposé que l'ensemble des ménages avait le même revenu. Ainsi que l'on peut le voir sur la figure ci-dessous, et en raison ici encore d'un effet de moyenne, le revenu médian des ménages (en dehors de la ville de Paris) ne varie en effet que de moins de 16% lorsque l'on s'éloigne de Paris, dans les 30 premiers kilomètres au moins. Cette simplification semble donc raisonnable, au moins au premier ordre.

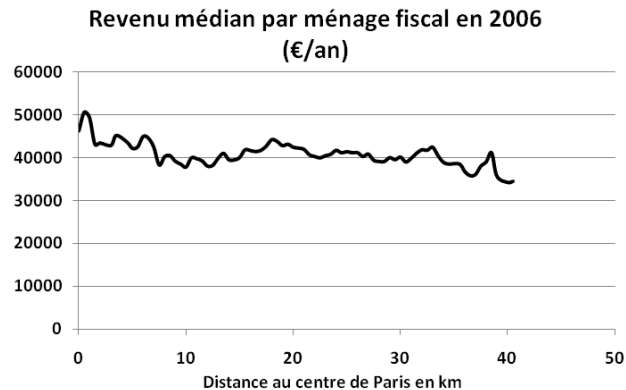


Figure 3 : Revenu médian par ménage fiscal (Source INSEE)

DONNEES

En ce qui concerne les données démographiques, nous avons utilisé la somme des populations des communes de l'aire urbaine de Paris, établie par l'INSEE suite au recensement de la population pour l'année 2005, soit 11 768 725 habitants. Nous avons de même utilisé la taille des ménages en 2005 pour l'aire urbaine de Paris, soit 2.3 personne par ménage. Nous avons utilisé le revenu disponible des ménages, déterminé par l'INSEE au niveau régional pour 2006, soit 56 098 € par an par ménage.

Dans une ville, la surface au sol ne sert pas uniquement à installer des habitations : il faut également installer des axes de transports, des places, des parcs etc. La surface destinée à ces infrastructures étant loin d'être négligeable, nous avons dû en tenir compte dans notre modèle, et introduire une contrainte sur le ratio maximal de surface au sol sur laquelle des habitations peuvent être construites. Nous nous sommes pour cela appuyés sur des données rassemblées par l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Île de France à partir de son

étude sur le mode d'occupation des sols et de données de l'INSEE¹⁴. Les ratios de surfaces dédiées à l'habitat¹⁵ par rapport à la surface totale ne variant pas beaucoup suivant la zone géographique, nous avons utilisé leur moyenne, soit 0.45 sur toute l'agglomération.

Différentes bases de données recensant les prix immobiliers en Île de France existent. Dans notre étude, nous avons utilisé la base de données de CLAMEUR, qui regroupe les loyers observés (hors HLM) pour de nombreuses communes d'Île de France. D'après cette base, les loyers décroissent lorsque l'on s'éloigne de Paris, et semblent se stabiliser autour de 11 €/mètre carré : c'est ce seuil que nous avons choisi comme frontière de l'agglomération.

Une détermination précise du taux d'intérêt n'est pas de très grande importance dans notre étude. En effet, celui-ci ne fait qu'influer sur les coûts de construction obtenus lors de la calibration du modèle, et il est difficile de vérifier la compatibilité de ceux-ci avec la réalité. Nous n'avons donc cherché qu'à obtenir un ordre de grandeur raisonnable du taux d'intérêt, et, nous avons utilisé un taux d'intérêt de 5% pour l'année 2008. Il en va de même pour le taux de dépréciation des bâtiments, pour lequel nous avons choisi une valeur de 0.5%¹⁶.

En ce qui concerne les temps de transport¹⁷, nous nous sommes appuyés sur le travail de D. Rouchaud et A. Sauvart¹⁸. Ceux-ci ont construit une base de données rassemblant les temps de transport pour rejoindre le centre de Paris depuis les différentes communes d'Île de France, en transport en commun et en véhicule individuel, aux heures de pointe du matin et du soir. En ce qui concerne les coûts de transport, nous avons utilisé pour l'année 2008 un coût du carburant de 1.1 euro par litre, et une consommation moyenne des véhicules de 7 litres pour 100km. Nous ne prenons ici en compte que les coûts de transport ressentis, et non les coûts réels, et nous n'avons donc considéré que les coûts de carburant, omettant tous les coûts liés par exemple à l'usure des véhicules. Les

14 IAURIF, "Les derniers résultats du MOS 2003" Note rapide Mode d'occupation du sol, n°. 387 (juin 2005)

15 La surface d'habitation comprend la surface au sol des logements, les cours, les jardins privés d'une superficie de moins de 1000m² et les voies d'une emprise de moins de 25m traversant les surfaces habitées.

16 En cohérence avec les données de l'Observatoire des charges de copropriété 2008

17 Le coût associé au temps passé dans les transports a été déterminé lors de la calibration du modèle (cf partie suivante)

18 Rouchaud et Sauvart, "Prix des logements et coûts de transports: un modèle global d'équilibre en Ile-de-France." Notes de synthèses du SES. Ministère de l'Équipement, juillet 2004

coûts associés aux transports en commun ont été estimés d'après les tarifs de la carte orange mensuelle en 2008.

D'après les données précédentes, il est apparu que le temps et le coût pour rejoindre Paris, lorsque l'on moyenne sur l'ensemble des quartiers situés à une distance donnée de Paris, sont approximativement les mêmes que l'on soit en transport en commun ou en véhicule individuel : pour un quartier donné, les coûts et les temps sont en général très différents d'un mode de transport à l'autre, mais la moyenne effectuée gomme ces écarts. Ne travaillant qu'avec de telles moyennes dans cette étude, nous n'avons pas fait de distinction entre les modes de transport et utilisé uniquement les coûts des véhicules personnels.

CALIBRATION

Structure de la ville

Ainsi que l'on peut le voir sur les figures 4 et 5, le modèle décrit de manière satisfaisante l'évolution des loyers et de la densité de population à travers la ville. Chaque point y représente une commune ou un arrondissement de Paris, la taille du point étant proportionnelle à la population de celle ou de celui-ci¹⁹.

La Figure 6 montre que le modèle décrit également de manière assez correcte la répartition de la taille des logements. Les données dont nous disposons sur la taille des logements et auxquelles nous comparons les sorties du modèle dans cette figure sont cependant assez parcellaires : la courbe représentant « l'interpolation des données de l'INSEE » doit donc être considérée avec précaution.

La Figure 7 compare la courbe représentant la densité de bâti (m^2 habités par rapport à la surface au sol dédiée à l'habitat) issue du modèle à la densité de bâti calculée à partir de nos données sur la densité de population et sur la taille des appartements. La courbe issue du modèle croît lorsque l'on se rapproche du centre de Paris, mais ne dépasse jamais la valeur 2 : il s'agit de la valeur limite que nous lui avons imposée pour traduire la contrainte d'urbanisme existant à Paris. Cette valeur peut paraître faible étant donné que la plupart des immeubles à Paris ont de l'ordre de 6 étages, ce qui laisserait supposer un ratio de l'ordre de 6 au centre de Paris. La différence provient d'une part du fait que le déno-

¹⁹ La grande variance des points de donnée dans les premiers 5 km de la figure 5 provient notamment de la présence d'entreprises, qui, suivant les arrondissements, sont en compétition ou non avec les ménages pour l'occupation de la surface construite.

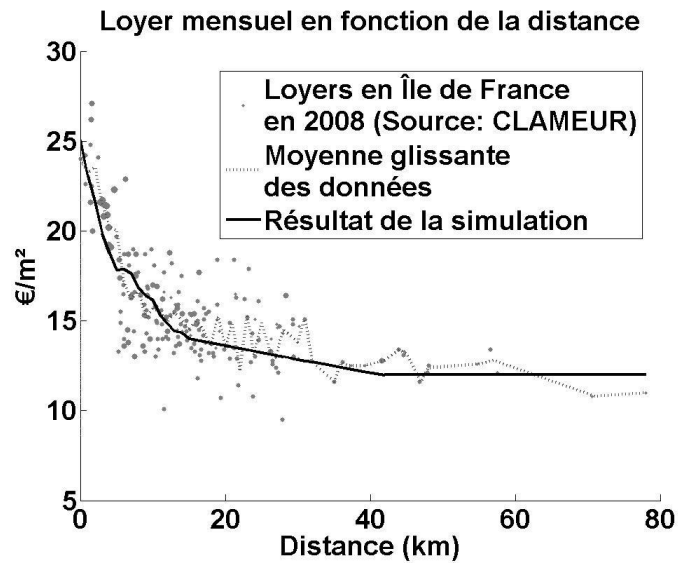


Figure 4 : Loyers calculés par le modèle (chaque point représente une commune, la taille du point étant proportionnelle à sa population)

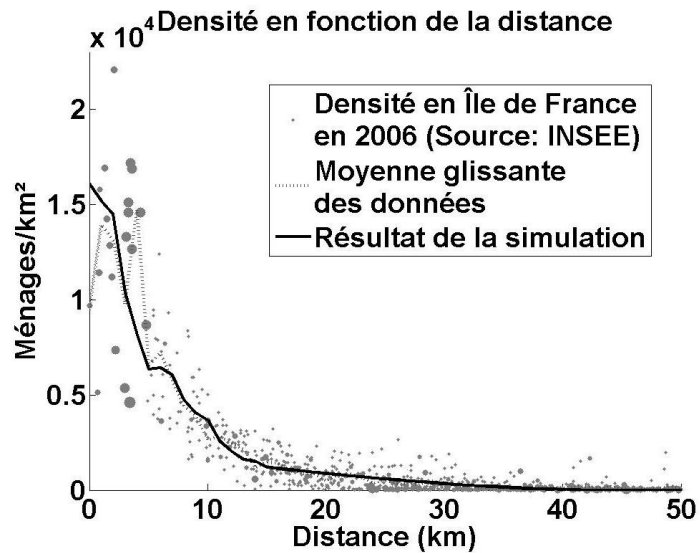


Figure 5 : Densité de population calculée par le modèle (chaque point représente une commune, la taille du point étant proportionnelle à sa population)

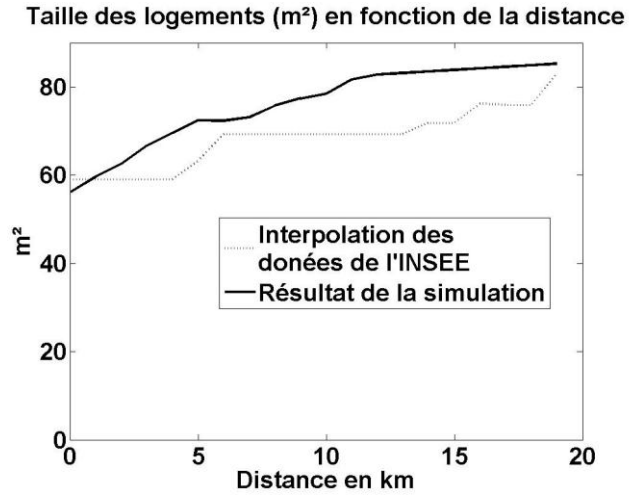


Figure 6 : Taille des logements

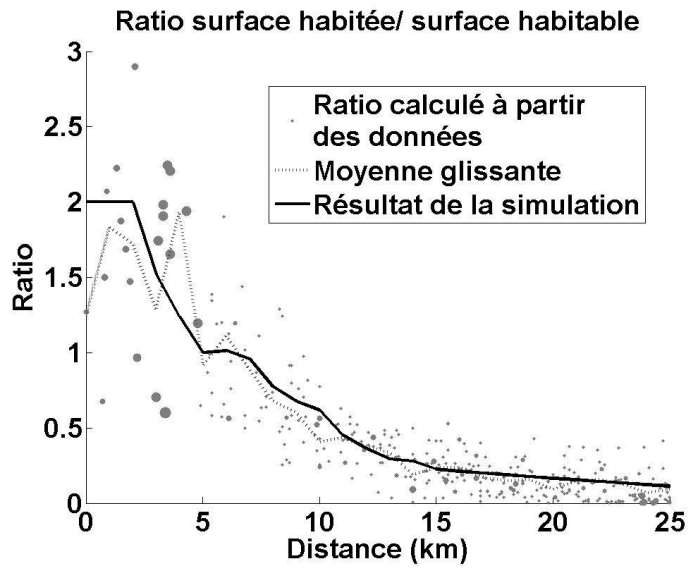


Figure 7 : Ratio surface habitée/surface habitable (chaque point représente une commune, la taille du point étant proportionnelle à sa population)

minateur de notre ratio n'inclue pas que la surface au sol des bâtiments²⁰, ainsi que du fait que le numérateur ne prend en compte que la surface habitée, et non la surface construite totale²¹. Les données que nous avons utilisées pour tracer la courbe de densité du bâti « issue des données » étant assez parcellaires, il faut considérer cette courbe comme un ordre de grandeur plus que comme une cible précise. L'accord entre le modèle et les données semble donc ici tout à fait satisfaisant.

Coût de construction

Le modèle nous donne des coûts de construction par m² habitable variant entre 1039€/m² pour des immeubles de 2 étages à un prix quasi-nul lorsque l'habitat est très peu dense. Nous comparons dans le graphique suivant les coûts de construction calibrés par le modèle aux coûts de construction réels estimés d'après des données fournies par le CSTB²². La tendance qui se dégage de ces données est un coût de construction moyen de 1200 €/m² hors taxes, soit environ 1400 €/m² TTC, qui augmente légèrement à mesure que l'immeuble devient plus haut. Ces estimations sont cependant assez incertaines : à cause de la diversité des types d'immeubles qu'il est possible de bâtir, il est difficile d'obtenir un coût que l'on puisse qualifier de référence.

L'ordre de grandeur des données calibrées semble être relativement en accord avec ces données « réelles ». On peut noter toutefois que les données « réelles » présentent un profil moins convexe que les données calibrées. La convexité des coûts de construction est indispensable dans notre modèle car elle permet l'existence d'une solution au problème de maximisation de profit des promoteurs : la plus ou moins grande convexité des coûts de construction détermine la plus ou moins grande sensibilité de la hauteur des immeubles construits au niveau de loyer. Une explication peut provenir du fait que les coûts dits « réels » dans la Figure 8 sont les coûts de construction proprement dits,

²⁰ Il inclue également les cours d'immeubles, les petits jardins privatifs (d'une surface inférieure à 1000m²) et les voies d'emprise inférieure à 25m (cf note 15)

²¹ la différence provenant des surfaces destinées à d'autres usages que le logement: halls d'immeuble, bureaux, commerces, musées, gares, bâtiments administratifs, établissements d'enseignement etc.

²² Ces données consistent en des prix annoncés par des promoteurs dans plusieurs appels d'offre publics récents ainsi que dans divers devis de construction de bâtiments, ainsi qu'en des documents techniques (CSTB, "Les ratios de quantité et de prix dans la construction," Cahiers du CSTB 1347, no. 164 Novembre 1975.) étudiant l'augmentation du coût des constructions suivant la hauteur des bâtiments.

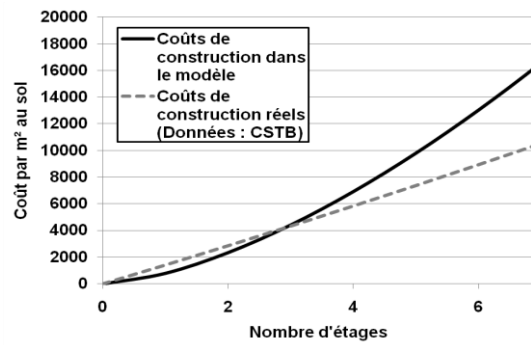


Figure 8 : coûts de construction

tandis que dans la réalité les promoteurs ne tiennent pas seulement compte de ces coûts de construction directs mais aussi de coûts additionnels lorsque la hauteur des bâtiments augmente²³. Ces coûts additionnels englobent par exemple les coûts administratifs (permis de construire etc.), financiers (coûts du risque associé à un investissement de plus en plus gros), et techniques (durée et difficulté technique du chantier), qui peuvent expliquer la convexité de la courbe.

Coût du temps

La valeur du temps que nous avons utilisé a été calibrée à partir des données de décroissance des loyers suivant la distance au centre de Paris, en supposant notre modèle parfaitement exact. Le coût ainsi calculé n'est pas linéaire : le coût marginal du temps diminue avec la durée du trajet, jusqu'à devenir quasiment nul. La manière la plus simple de modéliser cette non-linéarité est d'utiliser plusieurs valeurs de coût marginal du temps suivant la durée des trajets. En ne prenant, pour faire simple, que deux valeurs pour ce coût marginal, une régression nous conduit à utiliser un coût du temps valant 105% du salaire horaire net lorsque le temps de trajet est inférieur à 28min (ou, de manière équivalente, que la distance au centre de Paris est inférieure à 12km), puis un coût très faible (6.6 % du salaire horaire net) pour les portions de trajet au delà de cette limite. La valeur calibrée pour les temps de trajet inférieurs à 28 min est ainsi très proche de la recommandation de la valeur du temps à utiliser en Île-de-France pour les trajets domicile-travail selon le rapport du groupe du Commissariat au plan présidé par Marcel Boiteux en 2001²⁴, à savoir 77% du salaire brut horaire, c'est-à-dire environ le salaire net horaire.

²³ J. C Castel, "Coûts immobiliers et arbitrages des opérateurs: un facteur explicatif de la ville diffuse," *Annales de la recherche urbaine*, no. 102 (Juillet 2007).

²⁴ M. Boiteux and L. Baumstark, "Transports: choix des investissements et coût des nuisances," *Rapports du Commissariat Général du Plan*, juin 2001.

Analyse de sensibilité

Nous sommes bien conscients des limites de notre modèle, vision très simplifiée de la réalité, et des limites de notre calibration. Pour estimer la robustesse de notre modèle nous avons effectué une étude systématique de la sensibilité de différentes grandeurs caractérisant l'équilibre par rapport aux différents paramètres d'entrée du modèle. Mis à part l'élasticité du coût moyen de construction par m² aux coefficients de la fonction décrivant le coût de construction, qui est de l'ordre de 20%, toutes les élasticités des sorties du modèle aux paramètres sont de l'ordre de 0.5% ou de 1%. Ceci signifie que l'incertitude numérique sur la variation de la forme urbaine causée par une variation de nos paramètres est du même ordre que l'incertitude sur la variation de nos paramètres, ce qui est plutôt un bon résultat.

IMPACTS DE LA TAXE CARBONE

Nous présentons maintenant un exemple d'application de ce modèle : la détermination de l'impact d'une taxe carbone sur la structure de l'agglomération parisienne. Notre modèle étant par nature une simplification de la réalité (par exemple, il considère que la ville est mono-centrique et non polycentrique), plusieurs précautions doivent être prises lorsque l'on veut tirer des informations pratiques de ses conclusions. Nous en discutons à la fin de cette partie.

Cadre de l'étude

La taxe carbone impacte les ménages selon différents canaux : par le biais du prix du chauffage, du prix des biens de consommation, du prix du transport... Ce dernier canal se divise lui-même en sous-catégories : action sur les trajets domicile-travail, trajets de loisirs, trajets pour faire les courses etc. Nous nous intéressons ici uniquement à l'impact de la variation des coûts de trajet domicile-travail, que nous assimilons aux trajets vers le centre-ville, pour évaluer les conséquences sur les structures urbaines et les choix de localisation. On suppose en effet que le trajet domicile-travail est déterminant sur les choix de localisation, même quand il représente une fraction minoritaire des trajets totaux (loisirs inclus). Les trajets domicile-travail étant assimilés aux trajets vers le centre-ville, une variation des trajets domicile-travail se traduira par une variation de la distance moyenne au centre ville des ménages habitant l'agglomération parisienne, et à une diminution de ces trajets correspondra à une densification de l'agglomération.

Un des effets de la taxe sera d'entraîner un transfert modal des modes de transport les plus taxés aux moins taxés. Ce transfert modal diminuera l'impact de la taxe sur le coût des trajets domicile-travail, et donc l'impact de la taxe sur

les choix de localisation des ménages. Afin de séparer le problème du transfert modal de l'effet de la taxe sur la structure urbaine, et de ne pas avoir à faire d'hypothèses sur l'impact de la taxe carbone sur le prix des transports en commun, ainsi que sur les préférences des ménages vis-à-vis du mode de transport, nous supposons dans toute la suite que la taxe touche tous les moyens de transport de manière équivalente, ou alors, ce qui revient au même, que tous les ménages se déplacent avec le même moyen de transport, ici la voiture particulière. Nous nous plaçons donc dans un cas idéal où l'effet de la taxe est fortement amplifié. Une discussion des conséquences de cette hypothèse est faite à la fin de cette partie.

Dans toute l'étude qui suit, nous supposons que la taxe carbone est intégralement reversée aux ménages en une somme identique pour chacun des ménages. Nous examinons les effets d'une taxe de 100€ par tonne de CO₂, c'est-à-dire de 23.5 centimes/litre à la pompe, et raisonnons à parc automobile constant : la taxe est équivalente dans nos calculs à une taxe kilométrique d'environ 1.65 centime/km. Une telle taxe crée une inégalité entre les ménages, ceux habitant loin du centre-ville devant payer une taxe plus élevée (385 € par an pour un ménage habitant à 25 km du centre) que ceux habitant près du centre-ville (qui ne payent à la limite pas de taxe s'ils habitent exactement au centre). Cette taxe provoque une augmentation moyenne de la dépense annuelle de transport des ménages de 220 €, c'est-à-dire de 0,4% du revenu, et c'est cette somme qui est reversée à chaque ménage, indépendamment de sa localisation.

Pour simplifier, nous supposons également dans toute l'étude qui suit que tous les ménages habitant la ville sont locataires, et que les propriétaires des immeubles vivent en dehors de la ville. Ne pas faire cette hypothèse impliquerait de prendre en compte les effets sur l'économie de l'enrichissement des ménages propriétaires lorsque le loyer des appartements qu'ils ont mis en location augmente. Dans tout ce qui suit, ces effets peuvent être considérés comme des effets de deuxième ordre, ce que nous vérifions a posteriori en constatant à la suite de nos calculs que la variation du revenu des ménages propriétaires lorsque le niveau des loyers varie est faible par rapport à leur revenu global.

Nous supposons également que les propriétaires sont également promoteurs immobiliers, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de conflit d'intérêt entre les promoteurs immobiliers qui déterminent la quantité de surface habitable disponible, et les propriétaires qui déterminent le niveau des loyers. Un examen approfondi des conséquences de cette hypothèse est effectué à la fin de cette partie, lorsque l'on examine les inégalités créées au sein de l'ensemble des propriétaires et promoteurs lors de l'ajustement suivant l'instauration de la taxe carbone.

L'inégalité créée par l'application de la taxe va provoquer une réaction des différents acteurs de la ville (ménages, propriétaires et promoteurs immobiliers), chacun cherchant à améliorer sa condition : les ménages vont déménager, les propriétaires ajuster les loyers, et les promoteurs immobiliers modifier la cadre bâti jusqu'à ce que la ville atteigne un nouvel état d'équilibre, en supposant que le nouveau prix du transport reste ensuite constant. Les réponses des différents acteurs ne se font cependant pas toutes à la même vitesse²⁵, et il est en particulier possible de différencier d'un côté les déménagements des ménages, la modification du niveau des loyers, et les modifications des tailles des appartements au sein d'un même immeuble, qui se font sur une échelle de temps de quelques années, et de l'autre des modifications du cadre bâti qui se font sur une échelle de temps beaucoup plus longue²⁶. Nous analysons donc successivement l'état d'équilibre atteint lorsque seuls les ménages et les propriétaires ont pu agir, mais que le cadre bâti est resté identique (le « moyen terme »), de l'état d'équilibre atteint lorsque la modification du cadre bâti a eu lieu (le « long terme »).

Ajustement à moyen terme

Les ménages de lointaine banlieue, plus durement touchés par l'augmentation des prix du carburant que les habitants de banlieue proche, vont chercher à se rapprocher du centre-ville. La pression causée par leur demande va tirer les loyers du centre-ville vers le haut. Les loyers augmentant, les ménages proches du centre-ville vont avoir tendance en moyenne à habiter dans des logements plus petits, ce qui va libérer de la place pour quelques habitants issus de banlieue. A l'inverse, pour enrayer la fuite de leurs locataires, les propriétaires de banlieue vont avoir intérêt à baisser leurs loyers, jusqu'à ce que les loyers soient suffisamment faibles pour qu'il redevienne avantageux d'habiter en banlieue (il est possible de montrer que cette baisse fait plus que compenser l'augmentation des coûts de transport, et que la taille des appartements augmente en banlieue). A l'équilibre, les loyers ainsi que la densité, ont donc augmenté au centre et baissé en banlieue. Les logements sont devenus plus petits au centre, et ont légèrement augmenté en taille en banlieue.

²⁵ nous suivons ici l'approche de GUSDORF and HALLEGATTE, "Compact or spread-out cities: Urban planning, taxation, and the vulnerability to transportation shocks", *Energy Policy* 35, n°. 10 (2007): 4826-4838; GUSDORF and HALLEGATTE, "Behaviors and housing inertia are key factors in determining the consequences of a shock in transportation costs." *Energy Policy* 35, n°. 6 (2007): 3483-3495.

²⁶ C. J. MAYER and C.T. SOMERVILLE, "Residential Construction: Using the Urban Growth Model to Estimate Housing Supply," *Journal of Urban Economics* 48, no. 1 (July 2000): 85-109.

Quantitativement, on observe que la distance moyenne des habitants au centre-ville diminue de 1.5 %, soit 250m. Si le revenu disponible des ménages après avoir payé le logement, le transport, et reçu la compensation de la taxe ne varie presque pas, la taille moyenne des appartements diminue de 0.5% (soit 40cm²) du fait de la densification, et l'utilité des ménages baisse de 0.12% soit 57 € en termes monétaires.

Cet ajustement conduit à effacer les inégalités entre ménages locataires que l'instauration de la taxe carbone avait entraînée. En revanche, elle crée des inégalités parmi les propriétaires : tandis que les propriétaires de centre-ville augmentent leurs revenus (les loyers au centre-ville augmentent par exemple de 2%), les propriétaires de banlieue diminuent le leur (les loyers à 25 km du centre diminuent par exemple de 0.5%). L'augmentation de la taille des logements en banlieue ne compense en effet pas cette baisse : elle ne fait que refléter la baisse de densité de population en banlieue, car à l'équilibre il n'y a pas de logement vacant dans notre modèle.

Ces ajustements sont en valeur absolue extrêmement faibles, et, d'un point de vue pratique, dans cet équilibre de moyen terme presque rien n'a bougé.

Ajustement à long terme

Dans un second temps, le bâti s'ajuste : en raison des changements de loyers et des déménagements, il devient rentable de construire plus ou plus haut au centre de l'agglomération, tandis que certains logements de banlieue ne sont plus rentables. On s'attend donc à de nouvelles constructions denses et hautes en proche banlieue, là où des constructions supplémentaires sont autorisées (dans notre modèle, du fait de la contrainte sur la hauteur des bâtiments dans Paris, l'ajustement du bâti ne peut se faire qu'en dehors de Paris intra-muros). En lointaine banlieue, des bâtiments en fin de vie ne sont pas remplacés en raison de loyers insuffisants.

On observe alors que la ville se concentre bien plus qu'auparavant : la distance moyenne des habitants par rapport au centre-ville se retrouve réduite de 10 % (soit 1700m) par rapport à l'état initial sans taxe, en passant d'environ 17km à 15.3 km. On observe une augmentation de 7.7 % (soit en moyenne 290 € par ménage) des revenus provenant de la location du parc immobilier par rapport à l'état initial (si l'on suppose que l'ensemble du parc immobilier est en location, ce qui correspond à assimiler un habitant propriétaire de son logement à un locataire qui se reverserait à lui-même son loyer). Par rapport à l'état initial, les loyers ont augmenté en moyenne de 2.7 %, soit 0.4 €/m²/mois, la surface moyenne des logements occupés a diminué de 2 % (soit 1.7 m²), ce qui, même contrebalancé par une augmentation du revenu disponible des ménages après

dépenses de logement et de transport de 0.3 % du revenu (170 € par an), diminue l'utilité de 0.3% (soit 140 € en termes monétaires).

Il faut noter que cet ajustement correspond au total à un gain de profit pour les promoteurs/propriétaires pris dans leur ensemble, c'est-à-dire à un transfert des locataires aux promoteurs/propriétaires. En effet, une des manières de comprendre l'ajustement du bâti consiste à voir que, tandis qu'avant l'imposition de la taxe, le cadre bâti était optimal vis-à-vis des loyers, celui-ci ne l'était plus suite aux variations des loyers dus à l'imposition de la taxe. L'ajustement du cadre bâti peut donc se lire comme le passage d'une situation sous-optimale pour les promoteurs/propriétaires, à une situation qui leur est optimale.

Une approche telle que celle que nous venons d'employer permet ainsi d'examiner les liens entre densification et augmentation des prix immobiliers. Cette augmentation peut être ressentie durement par les ménages, et doit donc être prise en compte lorsque l'on étudie les conséquences positives et négatives de la densification et, de manière plus générale, de toute modification de la structure urbaine.

Conclusions pratiques

Que déduire de ces résultats ? Tout d'abord, il est possible de s'interroger sur la faisabilité pratique du passage de l'état actuel au « long terme ». En effet, si ce passage est optimal et engendre un profit pour les promoteurs immobiliers/propriétaires dans leur ensemble, le profit réalisé dépend en fait fortement du bien possédé. Par exemple, les revenus par mètre carré loué des propriétaires du foncier au centre-ville augmentent pour atteindre 104 % de leur valeur initiale, contre 97% (c'est-à-dire une perte de 3%) pour les propriétaires de terrains situés à 25km du centre. L'ajustement optimal voudrait que les propriétaires de banlieue réduisent la surface de logement qu'ils mettent en location, ce qui leur fait perdre de l'argent, et il n'est donc pas évident que ceux-ci acceptent de réduire cette surface. Cette difficulté peut être levée dans le cas d'une ville en croissance : en effet dans ce cas il est possible de voir la diminution de la surface bâtie non comme une diminution absolue, mais comme une diminution relative par rapport au reste de la ville, ce qui pose moins de problèmes d'acceptation.

Deuxièmement, le calcul présenté ici n'a pas pris en compte les transports en commun : en pratique, la taxe carbone augmentera le coût des trajets effectués en véhicule particuliers, mais pas en RER. Les ménages utilisant le RER quotidiennement n'auront a priori aucune raison de se rapprocher du centre de Paris, et la densification ne sera que partielle. Cet effet sera vraisemblablement d'autant plus marqué que la taxe carbone peut engendrer du transfert modal, et inciter les ménages à utiliser davantage les transports en commun au lieu de

déménager. Ceci pousse donc également dans le sens d'une diminution de diamètre moyen inférieure aux 10 %.

De la même manière, nous avons raisonné à parc automobile constant, et, en pratique, les changements technologiques (induits ou non par la taxe), comme l'augmentation de la part de marché des véhicules électriques ou le développement et l'achat de voitures plus économes, vont également limiter la sensibilité des ménages à l'augmentation du prix du carburant.

Enfin, une dernière critique à faire à notre modèle est qu'il décrit l'agglomération parisienne comme une agglomération mono-centrique, alors que de plus en plus d'études utilisent maintenant un cadre polycentrique pour décrire les villes. Cependant, à moins de supposer que la taxe va provoquer un changement massif de structure de l'agglomération, avec apparition ou disparition de centres secondaires, et une réorientation importante des flux de transport d'un centre à l'autre, une approche polycentrique dans notre cas reviendrait à supposer que, sous l'effet de la taxe, les ménages ne vont pas se rapprocher du centre de Paris, mais plutôt du centre secondaire de l'agglomération près duquel ils se trouvent. Une partie des ménages de l'agglomération irait donc se concentrer vers Paris, et le reste vers plusieurs centres secondaires. Pour chacun de ces centres, que ce soit le centre de Paris ou les centres secondaires, le cadre de l'étude précédente reste cependant valable, si on restreint l'analyse aux ménages dépendant du centre en question. Il est donc possible de prendre en compte la possibilité d'une évolution polycentrique de l'agglomération en réutilisant le modèle, mais en l'appliquant plusieurs fois sur des villes distinctes dont la population est une fraction de la population totale de l'agglomération parisienne, au lieu de l'appliquer directement à l'ensemble de cette agglomération. Or dans notre modèle, le pourcentage de diminution du diamètre de la ville causée par la taxe carbone décroît lorsque la population décroît. Une réaction polycentrique de l'agglomération aurait donc pour conséquence un ensemble de densifications toutes bien inférieures aux 10% du cas mono-centrique, entraînant une densification moyenne totale encore plus faible.

Au-delà des remarques précédentes, il ne faut pas oublier non plus que, mis à part l'application de la taxe carbone, nous avons raisonné à prix du carburant constant. Or il est vraisemblable que dans la réalité le prix du carburant variera considérablement pendant la durée nécessaire aux ajustements de l'agglomération, entraînant des modifications allant dans le même sens que ce que nous venons de décrire si le prix du carburant augmente, ou dans le sens inverse si le prix diminue. Ces autres effets s'ajouteront à l'effet de la taxe carbone, et pourront masquer celui-ci s'ils sont d'ampleur trop importante.

Au final, il est ainsi possible d'estimer que le calcul que nous avons fait dans cette partie s'est placé dans un cas idéal, qui serait très favorable à la diminution du diamètre de l'agglomération. Notre calcul semble donc indiquer qu'en pratique, une taxe carbone de 100 €/tonne n'aura qu'un effet très limité sur la densification de l'agglomération. Une taxe de 100€ semblant déjà assez difficile à faire accepter, nos calculs nous incitent donc à penser qu'une taxe sur les transports n'est pas suffisante pour densifier l'agglomération parisienne, et doit, si on veut atteindre cet objectif, être couplée avec d'autres mesures comme la taxe foncière différenciée, des investissements publics dans les transports et le bâti, ou la régulation et l'usage de plans d'occupation des sols par exemple.

CONCLUSION

En conclusion, l'agglomération parisienne semble pouvoir être relativement bien décrite par notre modèle. En utilisant celui-ci pour étudier l'impact d'une taxe carbone de 100€/tonne sur la structure de l'agglomération parisienne, nous observons que la densification associée à l'application de cette taxe qui augmente le coût des transports reste relativement limitée. Comme notre calcul suppose de faire plusieurs simplifications qui poussent toutes à augmenter la sensibilité de la variation du diamètre de l'agglomération à l'application de la taxe, nous sommes fortement incités à croire qu'en pratique, une telle taxe carbone n'aura qu'un effet très faible sur la densification de l'agglomération parisienne. Cette conclusion reste valide si on se place dans un cadre polycentrique pour étudier l'effet de la taxe.

Dans un objectif de densification, nous pensons donc qu'un prix du carbone n'est pas une solution suffisante, et qu'il faudra la mise en place d'un ensemble de politique (policy mix), qui inclut éventuellement une taxe carbone mais ne s'y réduit pas. En particulier, il faudrait coupler cette approche avec d'autres dispositifs complémentaires, incluant des politiques de fiscalité foncière, des modifications des plans d'urbanisme, et des investissements directs dans les transports et la provision de service (école, santé, sport, loisir, etc.).

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du financement de l'ANR à travers le projet VURCA (Vulnérabilité URbaine aux épisodes Caniculaires et stratégies d'Adaptation, ANR-08-VULN-013) de l'appel d'offre Vulnérabilité-Milieu-Climats-Sociétés 2008, et le projet MUSCADE (Modélisation Urbaine et Stratégies d'adaptation au Changement climatique pour Anticiper la Demande et la production Energétique, ANR-09-VILL-0003-01) de l'appel d'offre Ville Durable 2009.

Annex 3: Delegate List

Nous tenons également à remercier Didier Rouchaud et Alain Sauvart pour leurs données sur les temps de transport en Île de France qui nous ont été fort précieuses, Jean-Luc Salagnac pour son aide et ses conseils sur l'évaluation des coûts de construction, et Nicolas Coulombel pour ses conseils sur les bases de données de prix immobiliers.