



HAL
open science

Les actions locales dans la transition postcarbone: Une simulation des effets macroéconomiques

P. C. Allio, H. Waisman, Jean Charles Hourcade

► **To cite this version:**

P. C. Allio, H. Waisman, Jean Charles Hourcade. Les actions locales dans la transition postcarbone: Une simulation des effets macroéconomiques. *Futuribles*, 2013, 392, pp.61-76. hal-00799222

HAL Id: hal-00799222

<https://enpc.hal.science/hal-00799222v1>

Submitted on 11 Mar 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Actions locales et mesures globales dans la transition post-carbone

Cédric ALLIO^a, Henri WAISMAN^{a,+} et Jean-Charles HOURCADE^a

^a *Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement*

(CIRED, umr ParisTech/ENPC & CNRS/EHESS),

45bis avenue de la Belle Gabrielle, 94736 Nogent sur Marne CEDEX, France

⁺ *Auteur pour correspondance: Tel: +33 1 43 94 73 78; Fax: +33 1 43 94 73 70; E-mail: waisman@centre-cired.fr. Remerciements : les auteurs remercient l'ensemble des participants au programme « Repenser les villes dans une société post-carbone », copiloté par la mission prospective du CGDD – MEEDDM et le Service Économie et Prospective de l'ADEME.*

Actions locales et mesures globales dans la transition post-carbone

Cédric Allio, Henri Waisman, Jean-Charles Hourcade

Résumé

Ce papier analyse le rôle de politiques menées à l'échelle locale pour accompagner la transition post-carbone en complément des mesures globales conventionnellement envisagées. De telles mesures sont particulièrement justifiées pour contrôler les émissions liées au transport en permettant un contrôle des besoins de mobilité et du report modal. L'analyse de ces effets est menée *via* un cadre de modélisation innovant permettant de représenter de façon cohérente les trajectoires économiques de long terme et les dynamiques urbaines sous-jacentes. Cet outil est utilisé sur la France pour quantifier les scénarios prospectifs définis dans le cadre du programme « Repenser les villes dans une société post-carbone », copiloté par la mission prospective du CGDD – MEEDDM et le Service Économie et Prospective de l'ADEME. Ils permettent de démontrer l'importance de la distribution des investissements à l'échelle locale sur la nature de la transition post-carbone, que ce soit en termes de dynamiques locales (forme des villes, coûts urbains) ou des tendances nationales (PIB, émissions de carbone). Cette étude permet de mettre en avant trois dimensions cruciales à l'échelle locale pour la transition post-carbone : les effets d'agglomération et les liens entre productivité et densité ; l'articulation entre différents niveaux de gouvernance pour combiner mesures locales et globales ; l'hétérogénéité du tempo de l'action qui force à penser le tuilage temporel des mesures à court-terme et long-terme.

Si l'objectif de limiter à 2°C la hausse de température moyenne causée par les émissions de gaz à effet de serre peut aujourd'hui sembler inatteignable en raison des délais dans la mise en œuvre de mesures contraignantes d'ampleur, le maintien d'un objectif climat ambitieux – autour de 2.5-3°C d'augmentation de température – et la transition vers une société bas-carbone associée ne peuvent dépendre du seul déploiement de technologies « vertes » (IPCC, 2007). Le temps du pivotement du système énergétique est en effet trop lent et les controverses sur la disponibilité et les réelles performances des technologies sans carbone sont trop vives pour s'en tenir aux seules réponses offertes par l'offre.

Un des principaux points de résistance à la substitution par des énergies non carbonées concerne les carburants nécessaires pour satisfaire les besoins de mobilité en constante augmentation. Ainsi, le transport constitue depuis plusieurs décennies le facteur le plus dynamique de croissance des besoins énergétiques, avec la double particularité de constituer un usage essentiellement captif du pétrole et d'être peu sensible aux signaux-prix. Ce constat fait apparaître la faiblesse de tout dispositif reposant uniquement sur des instruments globaux pour internaliser la contrainte carbone (taxe carbone, marchés de permis d'émissions négociables).

Une littérature importante s'est développée pour cerner les déterminants des besoins de carburants à différentes échelles d'analyse, du global au local.¹ Toutes ces études partagent la conclusion que les innovations technologiques jouent un rôle important dans la transition post-carbone, mais que des changements d'ampleur de la structure modale et des besoins de mobilité seront aussi nécessaires. Pour cela, il s'agit de mobiliser les leviers disponibles à l'échelle locale en internalisant les liens entre les contraintes de la transition post-carbone et l'aménagement des pôles urbains en termes d'infrastructure et d'organisation spatiale.

La présente étude, menée dans le cadre du programme « Repenser les villes dans une société post-carbone », co-piloté par la mission prospective du CGDD – MEEDDM et le Service Économie et Prospective de l'ADEME, vise à analyser les contraintes et leviers de l'échelon urbain dans le cadre de la transition bas carbone (section 1). L'interaction entre échelle globale et locale est analysée *via* une architecture de modélisation permettant de représenter les trajectoires techniques, sociales et économiques compatibles avec la limitation des émissions anthropiques de carbone (section 2). On comparera, du point de vue local et global, deux chemins de transition définis par les ateliers pluridisciplinaires du programme

¹ Voir par exemple : à l'échelle globale (IEA, 2009; Schäfer et al., 2009; Johansson, 2009), à l'échelle régionale (Banister, 2000 pour l'Europe), à l'échelle nationale (Bristow et al., 2008, pour le Royaume-Uni; Akerman and Hojer, 2006, pour la Suède; Mc Collum et Yang, 2009 et Greene et Plotkin, 2011 pour les USA) et à l'échelle urbaine (Hickman et al., 2010 pour Londres; Hickman et al., 2011 pour Londres et Delhi)

« Repenser les villes dans une société post-carbone » et qui reflètent deux visions de la localisation des investissements pour le même objectif de réduction des émissions de carbone (Section 3). Cette étude permet de mettre en évidence l'importance de l'intégration de politiques à différentes échelles spatiales pour articuler mesures locales et incitations globales, et différentes échelles temporelles pour assurer le tuilage progressif de mesures entrant progressivement en scène pour accompagner la transition en tenant compte des inerties socio-économiques (Section 4).

1. Organisation spatiale, action locale et transition post-carbone

Si l'organisation spatiale de l'économie joue un rôle mineur dans le développement d'une offre d'énergie peu carbonée², elle a un fort impact sur la demande en énergie notamment dans le secteur des transports. Celui-ci représente aujourd'hui 34,2% des émissions de CO₂ françaises (dont 93% est dû au transport routier) et a suivi une croissance de 14,4% entre 1990 et 2007. Les perspectives d'évolutions techniques et comportementales laissent penser que, en l'absence d'action spécifique, les émissions du secteur transport vont continuer à croître dans les prochaines décennies et ce pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, l'intensité énergétique de la mobilité (c'est-à-dire la quantité d'énergie nécessaire pour parcourir un kilomètre) dépend des caractéristiques techniques des véhicules utilisés. Des potentiels d'efficacité énergétique sont certes disponibles mais le rythme d'amélioration est limité par les asymptotes techniques sur les moteurs, par l'inertie sur le renouvellement d'un parc automobile mature, et par les nombreux paramètres autres que la consommation de carburants qui entrent dans le processus de choix d'un véhicule (sécurité, performance, taille...). De plus, le potentiel de marché pour les véhicules efficaces est inférieur à son potentiel économique parce que les acteurs du secteur et les consommateurs en sous-estiment ou même en ignorent les bénéfices, notamment parce qu'ils anticipent imparfaitement les coûts énergétiques.

L'intensité carbone de la mobilité (c'est-à-dire, la quantité de carbone émise par un volume de carburant) dépend, elle, de la source primaire d'énergie utilisée pour élaborer le carburant final. La décarbonisation du transport est conditionnée par la diffusion, en remplacement des dérivés pétroliers, de procédés bas-carbone pour la production de

² La dimension spatiale pourrait intervenir sur la question de l'offre énergétique quand on envisage des réseaux distribués où chaque consommateur est producteur et doit échanger de l'énergie sur les réseaux locaux. Nous ne considérerons pas explicitement cette question ici.

carburants liquides (biocarburants) ou la pénétration de vecteurs énergétiques différents (électricité, hydrogène). Mais les potentiels de production de biocarburants sont limités par la compétition avec l'agriculture pour l'usage des sols et l'électrification du parc automobile n'est bénéfique que si l'électricité est produite à partir de procédés bas-carbone (nucléaire, renouvelables) et si l'autonomie des véhicules est sensiblement améliorée.

Enfin, la structure modale entre modes intensifs en carbone (transport aérien, voitures, camions) et modes bas-carbone (transport public, rail, canaux, vélo...) dépend du réseau d'infrastructures qui définit l'accessibilité, la vitesse, la fiabilité et la flexibilité des différents modes. Au vu des inerties sur le renouvellement d'infrastructures à longue durée de vie et sur les préférences des agents, un risque important perdure que les modes routiers et aériens, aujourd'hui dominants, restent les plus importants en l'absence de mesures volontaristes de réorientation des investissements vers les modes alternatifs.

Les mesures le plus immédiates pour réorienter les usages du transport face aux contraintes post-carbone sont celles destinées à favoriser la diffusion de véhicules bas-carbone : imposition de normes de consommation énergétique, investissements dédiés à la recherche ou déploiement d'infrastructures (stations de recharge pour les véhicules électriques). Ces mesures ont prouvé leur efficacité pour accélérer le renouvellement du parc automobile vers des véhicules plus efficaces et moins émetteurs mais leurs potentiels ultimes restent limités et incertains et les bénéfiques sont en partie annulés par « l'effet-rebond » suivant lequel la baisse des coûts du kilomètre parcouru permise par l'efficacité des moteurs s'accompagne d'une hausse de la demande de mobilité.

Pour aller plus loin que cette dimension technologique, des mesures affectant les choix de mobilité doivent être envisagées. A l'échelle globale, la tarification du carbone se trouve être relativement peu efficace dans le secteur des transports car seul un prix du carbone très élevé affecte notablement le prix final du carburant³. De plus, l'influence de ce signal-prix de l'énergie sur les comportements de transport est brouillée par d'autres signaux et mécanismes, qui déterminent tout autant les dynamiques de mobilité, comme le jeu des prix de l'immobilier et les effets d'induction de la mobilité par les infrastructures installées. La distance parcourue et la consommation d'énergie du secteur des transports sont ainsi peu sensibles à court terme aux variations de prix de l'énergie, et, à long terme, il faut une très

³ pour donner un ordre de grandeur, un prix du carbone de 40-100 \$/CO₂ – dans la gamme haute de ce qui est considéré comme réaliste à large échelle – se traduirait par une hausse modeste du coût du carburant de 0.1-0.3 \$/l.

forte hausse des prix pour compenser la croissance des besoins de mobilité induits par l'effet richesse au fur et à mesure de l'accroissement des revenus.

Face à ces constats, il apparaît nécessaire d'envisager des politiques plus spécifiques au secteur des transports que la tarification globale du carbone afin d'atteindre des objectifs significatifs de réduction des émissions. Pour cela, il s'agit d'introduire dans l'analyse les déterminants « hors prix de l'énergie » des activités de transport et notamment le rôle de l'organisation spatiale de l'activité économique et des lieux de résidence, qui s'articule autour de grandes métropoles où se concentrent à la fois la population, la production et les investissements et où vit environ la moitié de la population mondiale (80% en France).

Cette organisation de l'économie en pôles urbains est un déterminant essentiel de la demande de transport, à la fois entre les villes et à l'intérieur des villes. Les grandes métropoles s'organisent autour de zones très denses dans lesquelles les entreprises se concentrent. Ces zones engendrent des flux de marchandises et de passagers, entre les lieux de production et de consommation d'une part, et entre les domiciles et les zones d'emploi d'autre part. Les trajets domicile-travail sont subis par les ménages comme un coût obligé pour aller travailler et l'organisation de l'économie en pôles urbains engendre des rentes foncières qui conditionnent les arbitrages logement-transport. Ce diagnostic montre l'importance de la dimension spatiale à l'échelle locale (zones urbaines) et régionale (systèmes de pôles en interaction), en lien avec les contraintes et les leviers qu'elle recèle pour la transition post-carbone.

C'est l'intégration de ces paramètres qui motive le développement d'une architecture de modélisation qui permet de représenter de façon cohérente les trajectoires énergétiques et économiques agrégées et l'organisation spatiale à différentes échelles, et ainsi de penser l'articulation de mesures à différentes échelles spatiales dans le cadre de la transition post-carbone.

2. Un modèle pour cerner les enjeux locaux de la transition post-carbone

Les trajectoires économiques de long-terme sont analysées à l'aide du modèle IMACLIM-R⁴, développé au Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED), qui permet la représentation cohérente des dimensions techniques et structurelles des trajectoires macroéconomiques (Encadré 1). Dans cette approche, les politiques

⁴ Le lecteur pourra trouver une description détaillée de l'architecture de modélisation IMACLIM-R dans (Waisman et al, 2012)

climatiques sont introduites *via* des mesures globales de tarification du carbone (taxes ou marchés de quotas) dont le niveau est calculé pour respecter la limite sur les émissions de carbone imposée par le scénario considéré. Ces mesures globales seront possiblement complétées par des mesures spécifiques dans les principaux secteurs responsables des émissions de carbone (bâtiment, transport, électricité, industrie) visant à promouvoir de nouvelles formes technologiques et organisationnelles (normes, promotion de l'efficacité énergétique, pénétration de nouvelles technologies...).

Encadré 1 : Le modèle IMACLIM-R

Le modèle IMACLIM-R fournit des projections des agrégats macroéconomiques et du monde énergétique, par pas de un an sur la période 2004-2050, via la succession d'un équilibre statique annuel et de modules dynamiques (Figure 1) :

- *Un module d'équilibre statique annuel*, dans lequel les équipements, technologies et capacités de production sont fixes pour rendre compte des inerties de court terme, et où la seule flexibilité est le taux d'utilisation des facteurs de production. Cet équilibre fournit un « cliché » de l'économie à chaque date t : prix relatifs, production, flux physiques, emploi, salaires, taux de profit et allocation des investissements sectoriels;
- *des modules dynamiques*, incluant démographie, accumulation du capital, ainsi que des formes réduites de modèles sectoriels détaillés qui représentent les choix technologiques. Ces formes réduites calculent la réaction des systèmes techniques sous anticipations imparfaites et fixité des équipements installés ; cette information est renvoyée au module statique sous la forme de nouveaux coefficients techniques pour calculer l'équilibre à la date $t+1$.

[Insérer Figure 1 environ ici]

Le dialogue entre les différentes échelles spatiales d'interaction, qui permet l'analyse du rôle de l'organisation urbaine et des politiques locales menées au cours de la transition bas-carbone, est opéré *via* l'introduction d'un module représentant les systèmes de villes en interaction au cœur de l'architecture IMACLIM-R (Encadré 2). Ce dialogue permet de représenter explicitement les interactions entre l'économie globale telle que représentée dans le module d'équilibre statique annuel et les dynamiques locales et régionales au sein d'un système de pôles urbains en interaction (Encadré 3).

Encadré 2 : Module de systèmes de villes en interaction

Le module spatial est un cadre analytique permettant de désagréger une économie nationale en un réseau de pôles urbains (ci-après désignés indifféremment par « villes » ou « agglomérations urbaines ») dont les interactions s'opèrent *via* les échanges commerciaux et les migrations de firmes, ces dernières déterminant la distribution régionale de l'activité économique.

Les villes sont représentées sous la forme d'espaces circulaires dont le centre est le lieu de regroupement des firmes autour duquel les ménages/travailleurs se distribuent. Bien que stylisée, cette représentation, conforme aux hypothèses standards de l'Economie Urbaine, permet de rendre explicite l'arbitrage entre coût du transport et coût du logement qui détermine l'organisation spatiale locale. Chaque « ville » est définie par les valeurs de ses principaux déterminants socio-économiques (population, production, productivité du travail, salaire, infrastructures de transport, prix de la terre et des logements) dont les valeurs sont calibrées sur des données empiriques.

Encadré 3 : Dialogue entre modèles et intégration d'échelles spatiales

Le dialogue entre le module de système de villes en interaction et l'équilibre général est assuré *via* un échange constant d'information.

D'une part, chaque année, IMACLIM-R calcule un équilibre macroéconomique donnant une valeur nationale aux principales variables macroéconomiques (prix, production, population, salaire...) qui est ensuite désagrégré par le modèle spatial entre un ensemble de pôles urbains pour imposer la cohérence entre les deux échelles de représentation.

D'autre part, la désagrégation en plusieurs équilibres urbains permet de suivre les dynamiques locales et notamment leurs effets en retour sur les dynamiques macroéconomiques au travers des besoins élémentaires de transport (trajet domicile-travail contraint par la localisation du ménage), des besoins d'investissements urbains, des capacités de transport et de la productivité du travail influencée par les effets d'agglomération.

Pour les besoins de cette étude centrée sur la France, le modèle spatial distingue les 12 « aires métropolitaines » accueillant chacune plus de 500 000 habitants: Paris, Lyon, Marseille, Lille, Toulouse, Bordeaux, Nice, Nantes, Strasbourg, Rennes, Grenoble et Montpellier. Cet ensemble d'agglomérations représente au total 42% du PIB national et les données utilisées à l'année de référence (2004), dérivées des travaux de l'INSEE, permettent de caractériser explicitement chaque pôle urbain en fonction de ses caractéristiques économiques, sociales et démographiques (Tableau 1). Le reste de l'économie (c'est-à-dire l'ensemble des activités ayant lieu hors des 12 aires métropolitaines ci-dessus) est représenté de façon agrégée, sans distinguer les dynamiques

spatiales sous-jacentes à ce sous-ensemble, de sorte que les évolutions des villes petites et moyennes ne sont pas explicitement distinguées des espaces ruraux.⁵

[Insérer Tableau 1 environ ici]

Dans le cadre du projet Ville Post Carbone, le modèle est utilisé pour fournir un cadrage macroéconomique des six cheminements prospectifs vers une société post-carbone tels que définis par l'Atelier de construction de scénarios. Ces scénarios se distinguent suivant un double jeu d'opposition entre le contexte global et les marges de manœuvre et leviers mobilisés à l'échelle locale (Tableau 2).

[Insérer Tableau 2 environ ici]

Nous nous concentrerons ci-après sur les scénarios 3 et 4 qui représentent une vision similaire en termes de décarbonisation de l'économie puisque, dans les deux cas, les émissions nationales sont réduites d'environ 50% en 2050 par rapport à leur niveau à l'année de référence. Si ce niveau est insuffisant pour atteindre l'objectif Facteur 4 (qui nécessiterait d'atteindre une diminution de 75%), il s'agit tout de même d'une réduction très importante, en rupture notable avec les tendances observées. La comparaison de ces scénarios va nous permettre d'analyser les marges de manœuvre permises par les politiques d'infrastructure au niveau local puisqu'ils se distinguent par la philosophie de ces politiques, menées au travers d'investissements massifs dans les grands pôles (scénario 3) ou de façon décentralisée sur l'ensemble du territoire pour réduire l'attraction des grands pôles (scénario 4). Une des contraintes imposées par la démarche collective dans laquelle s'insèrent ces exercices est que ces deux options sont simulées dans deux contextes macroéconomiques et technologiques différents représentés par les trajectoires de prix de l'énergie et du carbone. Dans les deux cas, on assiste à une montée des prix de l'énergie mais, dans le scénario 4, le contexte géopolitique est supposé plus favorable au travers d'une gouvernance internationale du climat qui permet une taxe carbone moins élevée que dans le scénario 3 où la taxe est imposée de façon unilatérale en France.

⁵ Cette remarque prend toute son importance pour l'interprétation de scénarios dans lesquelles la population des 12 agglomérations diminue (comme ce sera par exemple le cas dans le scénario 4 analysé en section 3). En effet, une telle situation ne correspond pas nécessairement à un exode rural massif, mais peut aussi correspondre au développement de pôles urbains de taille moyenne.

[Insérer Figure 2 environ ici]

3. La transition post-carbone, entre dynamiques locales et enjeux globaux

L'influence des trajectoires de prix des énergies et du carbone sur l'organisation spatiale de l'économie opère notamment *via* le prix des carburants et donc le coût du transport. A l'intérieur des villes tout d'abord, les ménages décident de leur localisation en fonction d'un arbitrage entre les deux principales sources de coût urbain, à savoir le transport et le logement. Une hausse globale des coûts du transport va inciter les ménages à se relocaliser pour limiter leurs besoins en transport quitte à payer plus cher leur logement dans un centre-ville dense, tandis qu'une modification de la structure des coûts entre différents modes (en faveur des transports publics dans le cas d'une taxe carbone, par exemple) va induire une évolution de la répartition modale de la mobilité. Ainsi, l'organisation spatiale au niveau local dépend de la disponibilité en infrastructures, aussi bien en termes de bâtiments résidentiels qui déterminent de l'offre disponible pour les ménages sur les marchés immobiliers qu'en termes de transport qui conditionnent la disponibilité des modes et leur attractivité en termes de services de mobilité (accessibilité, fiabilité, régularité). A cet égard, les scénarios 3 et 4 proposent deux visions opposés en termes de développement urbain.

Pour interpréter correctement les résultats quantifiés discutés ci-après, il convient de garder à l'esprit que le mode de représentation des villes n'est pas neutre pour l'interprétation des résultats. En effet, supposer un format monocentrique imposant des déplacements quotidiens du domicile vers le centre d'activités revient à identifier un pôle urbain avec l'ensemble des activités gravitant autour d'un centre donné d'attraction des activités. Ainsi, la population de Paris représente ici l'ensemble des ménages dont l'emploi est situé dans la zone centrale de la région parisienne (la ville de Paris et sa proche banlieue); en particulier, l'apparition éventuelle de centres secondaires d'importance en Ile-de-France se traduit dans le modèle par une diminution de la population de Paris, puisqu'une partie des ménages franciliens sortent de la zone d'influence centrale de Paris pour graviter autour d'un nouveau centre.

Dans le scénario 3, l'investissement local se fait majoritairement dans les grands pôles qui sont repensés pour pouvoir limiter la dépendance à la voiture privée avec notamment une forte densification des centres-villes (Figure 3). Ce processus s'accompagne d'une concentration des populations dans les grandes agglomérations, les douze plus grandes aires

urbaines françaises voyant leur population augmenter globalement de 23 à 36 millions et, notamment, l'agglomération parisienne atteindre la barre symbolique des 20 millions d'habitants (Figure 4). Ce scénario correspond à une vision où les effets d'agglomération dominant et conduisent à une concentration des activités productives, tandis que les économies dues aux coûts urbains (notamment dus à la congestion) restent limités grâce aux investissements ciblés dans les grands pôles. Ainsi, malgré la concentration de population dans les grands pôles urbains, la hausse continue des prix de l'immobilier reste modérée autour de 0.7% par an sur l'ensemble de la période 2004-2050 (Figure 5).

Au contraire, dans le scénario 4, les investissements sont concentrés dans les petites et moyennes villes de sorte que la population des douze principales aires urbaines passe de 23 millions en 2004 à 13 millions en 2050. Rappelant que ces chiffres sont à interpréter dans le contexte de la représentation monocentrique des pôles urbains, cette diminution sensible signifie un redéploiement de la population vers des centres secondaires qui émergent au cours de la dynamique grâce aux investissements spécifiques qui y sont consentis. Ainsi, par exemple, l'agglomération parisienne ne compte plus que 7 millions d'habitants mais la population n'a pas pour autant fui l'Ile-de-France, s'étant plutôt restructurée autour de pôles secondaires d'envergure suffisante pour attirer une fraction importante des travailleurs précédemment contraints de se déplacer jusqu'au centre de l'agglomération (ici, Paris intra-muros) (Figure 4). Ce scénario correspond à une vision où les coûts urbains associés aux effets de congestion dominant les dynamiques urbaines et favorisent l'apparition de centres locaux multiples en lieu et place de mégalo-poles. Dans ce cadre, les modes de développement passent par une diminution de la densité des habitats qui décroît de 1.5% par an sur l'ensemble des grandes aires urbaines (Figure 3) et par une stabilisation des coûts du logement (Figure 5).

[Insérer Figures 3, 4, 5 environ ici]

Ces deux visions contrastées de l'organisation spatiale de l'économie vont de pair avec des dynamiques de mobilité ayant un impact très différent sur la transition post-carbone. En particulier, les modes d'occupation de l'espace conditionnent les choix de technologies et notamment l'adoption de véhicules bas-carbone (Figure 6). Les deux scénarios sont marqués par des hausses tendancielle des prix du pétrole et l'introduction d'une taxe carbone et sont donc très défavorables au moteur thermique, dont la part décroît rapidement.

Le scénario 3 est marqué par la diffusion massive et rapide des véhicules hybrides en réaction à l'augmentation tendancielle des prix des énergies fossiles et de l'introduction de la taxe

carbone. Les véhicules électriques sont pénalisés car ils restent tributaires d'une refonte très importante du système de distribution d'énergie vers des infrastructures décentralisées tout au long du parcours, une vision peu compatible avec la philosophie centralisatrice de ce scénario. Les véhicules électriques se développent peu, n'atteignant que 5% du parc en 2050, en raison d'investissements localisés trop limités.

Le scénario 4 offre au contraire des opportunités plus importantes dans ce domaine car il repose sur une décentralisation de l'offre énergétique facilitant l'accès à l'électricité tout au long des trajets quotidiens et des investissements de rupture permettant de développer les infrastructures nécessaires (par exemple bornes de recharge). Ces évolutions sont compatibles avec des centres urbains moins denses qui laissent de l'espace au développement d'infrastructures dédiées à de nouveaux véhicules et rendent la mobilité particulièrement dépendante des trajets quotidiens (inférieurs à 150 km) pour lesquels le véhicule électrique est adapté. Ces effets permettent que la part du véhicule électrique atteigne 40% du parc automobile en fin de période .

[Insérer Figure 6 environ ici]

Cependant, malgré des véhicules globalement moins intensifs en carbone, le secteur du transport connaît au total un niveau d'émissions plus élevé dans le scénario 4 (Figure 7). En effet, une part plus importante de la population se retrouve en zone peu dense et, même en zone urbaine, les densités des agglomérations sont sensiblement plus faibles. Ces deux effets conduisent à un maintien d'une dépendance élevée à la mobilité, du point de vue des passagers à cause de l'étalement du résidentiel, et du point de vue du fret à cause de la difficulté des firmes à implanter des unités de production proches de lieux de consommation dispersés. De plus, une telle situation est défavorable au développement des transports en commun, qui sont peu rentables quand la densité de l'habitat est faible. Ces effets se combinent pour augmenter la dépendance à la mobilité en voiture particulière, dont on a vu qu'elle restait partiellement dépendante des carburants fossiles au vu de l'importance des véhicules hybrides. Au contraire, dans le scénario 3, la politique d'infrastructure menée par l'Etat permet de réduire considérablement l'utilisation du véhicule privé en favorisant la diminution des distances de transport et le développement des transports en commun dans les agglomérations denses.

[Insérer Figure 7 environ ici]

Enfin, la croissance économique est plus élevée dans le scénario 3 tout au long de la période (Figure 8) en raison de l'organisation concentrée de l'économie en pôles urbains denses qui permet de bénéficier d'effets d'agglomération (partage de connaissances, large marché permettant un accès à la main d'œuvre spécialisée, accès facilité aux marchés).

Néanmoins, cette étude est insuffisante pour trancher sur la désirabilité d'un scénario de fortes concentrations urbaines comme le scénario 3 car certaines dimensions politiquement centrales ne sont pas prises en compte. Ainsi, dans cet exercice comme très généralement dans la littérature, les effets d'agglomération sont admis au même titre que, par exemple, les économies d'échelle mais la littérature empirique peine à quantifier et qualifier les effets en jeu. De plus les contreparties de la densité sont mal prises en compte en raison du manque d'informations numériques sur les externalités environnementales induites bien sûr (qualité de l'air, stress) mais aussi les coûts sociaux de l'éclatement urbain et de la déshérence des zones rurales. De même certains aspects liés au bien-être sont par nature ignorés par la mesure du PIB, comme les effets positifs ressentis par les agents dans les modes de vie plus dispersés du scénario 4 offrant des aménités positives.

[Insérer Figure 8 environ ici]

4. Conclusion

L'exercice présenté ici a une portée essentiellement heuristique en mettant en évidence, dans une approche prospective, les mécanismes liant outils globaux et locaux de politiques publiques pour la transition post-carbone. Les premiers relèvent d'outils d'incitations économiques de type taxe carbone ou permis d'émissions négociables, les autres relèvent des actions menées au niveau local et déterminent le degré de concentration des activités urbaines et les besoins de mobilité.

Cette question de l'articulation local/global est illustrée *via* la comparaison de deux chemins de transition vers une société post-carbone, qui sont comparables en termes d'effet global sur les émissions de carbone mais se distinguent par l'affectation des investissements consentis au niveau urbain avec des conséquences sur les trajectoires suivies, notamment pour le transport. Dans le premier sentier, une décentralisation des activités économiques conduit à une multiplicité de trajets dans des zones peu denses, compatible avec la diffusion de véhicules électriques. Dans le deuxième, la concentration dans des centres urbains denses permet de

réduire les besoins de mobilité dans des centres villes mais néglige la mobilité des zones moins peuplées qui restent très dépendantes du véhicule privé.

La première leçon de cette étude est que la transition ne peut s'organiser autour d'un unique instrument de type taxe carbone dont l'impact sur la demande de mobilité est faible, mais doit mettre en œuvre des mesures agissant sur l'organisation spatiale de l'économie, qui contraint la mobilité. Il s'agit de réorienter les choix de localisation des firmes et des ménages, notamment en investissant dans les infrastructures de transport et de logement. Ces politiques doivent tenir compte des spécificités locales et relèvent donc naturellement des régions, des départements ou des municipalités. Ce constat renvoie à la capacité des pouvoirs publics locaux de mener à bien de telles actions, et des formes de gouvernance permettant une concertation entre échelles spatiales au cœur de l'action publique. Ces enjeux de l'articulation des enjeux de gouvernance sont discutés dans d'autres articles de ce numéro spécial. Pour aller plus loin sur cette question à travers un exercice de modélisation, il s'agira de faire évoluer l'outil de prospective pour intégrer l'hétérogénéité des revenus au sein d'une aire urbaine, et des comportements qui sont liés à chaque classe de revenus dans une position géographique donnée.

Un deuxième enseignement est que, le tempo de l'action est une variable cruciale pour articuler les mesures au cours du temps et assurer un tuilage temporel qui facilite la transition post-carbone. On entend beaucoup parler du recours à de nouvelles technologies « propres », mais nous avons montré ici l'importance du développement des infrastructures et de l'évolution des préférences, des processus inertiels pour lesquels les mesures incitatives doivent être anticipées afin de faire leur effet en temps voulu.

Enfin, l'évaluation complète des avantages et des coûts des deux sentiers de transition montre l'importance de l'hypothèse faite sur l'effet productivité de la polarisation urbaine qui est une hypothèse communément admise et retenue ici mais il faut rappeler qu'elle pose des questions aujourd'hui mal documentées en termes de découplage des zones rurales et urbaines ou de risque de fragmentation sociale. Il s'agit d'intégrer l'ensemble des enjeux affectant les circuits de productivité, y compris les coûts indirects de la densité (économiques, environnementaux, sociaux et politiques) et les interactions d'échelle liant activités 'nomades' et activités 'sédentaires' dans le contexte actuel de globalisation économique (Giraud, 1996). L'exercice présenté ici est un pas dans cette direction mais une telle vision exhaustive des avantages/inconvénients de la polarisation spatiale des investissements requerra des

développements de l'architecture de modélisation pour prendre en compte explicitement les effets d'agglomération et de congestion à l'échelle locale.

D'un point de vue méthodologique, cette étude confirme enfin la nécessité de renforcer l'émergence d'outils de prospective permettant d'assurer le dialogue entre différents types d'expertise qui sont souvent conduites de façon disjointes et cloisonnée. Nous avons en effet illustré au travers de cet exercice l'importance, pour l'analyse des politiques bas-carbone de long-terme, d'une convergence entre prospective énergétique et prospective urbaine, mais aussi entre prospective sectorielle, spatiale et modèles macroéconomiques de croissance.

Références

- Åkerman, J., and M. Höjer. 2006. « How much transport can the climate stand?—Sweden on a sustainable path in 2050 ». *Energy policy* 34 (14): 1944-1957.
- Banister, David. 2000. *European Transport Policy and Sustainable Mobility*. Taylor & Francis.
- Bristow, Abigail L., Miles Tight, Alison Pridmore, and Anthony D. May. 2008. « Developing pathways to low carbon land-based passenger transport in Great Britain by 2050 ». *Energy Policy* 36 (9) (septembre): 3427-3435. doi:10.1016/j.enpol.2008.04.029.
- Giraud, PN, 1996. « L'inégalité du Monde- Economie du Monde Contemporain ». Gallimard.
- Greene, D. L., S. E. Plotkin, and Pew Center on Global Climate Change. 2011. *Reducing greenhouse gas emissions from US transportation*. Pew Center on Global Climate Change Washington, DC.
- Hickman, R., O. Ashiru, and D. Banister. 2011. « Transitions to low carbon transport futures: strategic conversations from London and Delhi ». *Journal of Transport Geography*.
- Hickman, Robin, OluAshiru, and David Banister. 2010. « Transport and climate change: Simulating the options for carbon reduction in London ». *Transport Policy* 17 (2) (mars): 110-125. doi:10.1016/j.tranpol.2009.12.002.
- IEA. 2009. « Transport, Energy and CO2: Moving Toward Sustainability ». OECD/IEA.
- IPCC (2007).Summary for Policymakers. In: B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds) ,
- Johansson, Bengt. 2009. « Will restrictions on CO2 emissions require reductions in transport demand? » *Energy Policy* 37 (8) (août): 3212-3220. doi:10.1016/j.enpol.2009.04.013.
- McCollum, David, and Christopher Yang. 2009. « Achieving deep reductions in US transport greenhouse gas emissions: Scenario analysis and policy implications ». *Energy Policy* 37 (12) (décembre): 5580-5596. doi:10.1016/j.enpol.2009.08.038.
- Schäfer, A, Heywood, J.B., Jacoby, H.D,Waitz, I.A, 2009. *Transportation in a Climate-Constrained World: The MIT Press*.
- Waisman H, Guivarch C, Grazi F etHourcade JC (2012). “The Imaclim-R model: infrastructures, technical inertia and the costs of low carbon futures under imperfect foresight”, *Climatic Change* 114 (1): 101-120.

Figures

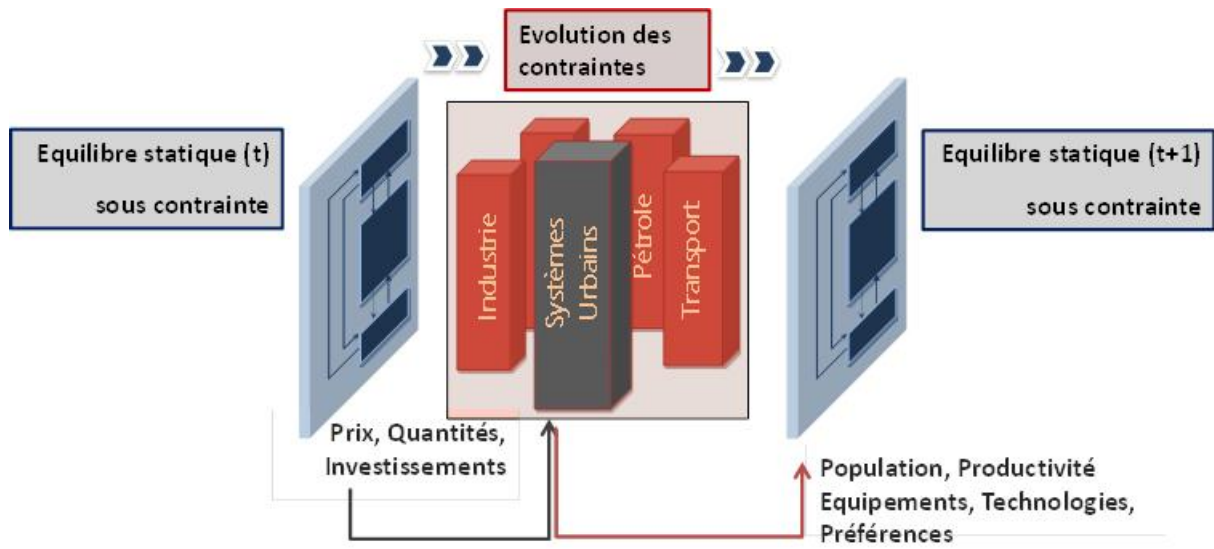


Figure 1 : l'architecture récursive et modulaire d'IMACLIM-R

Figure 29: Prix mondial du baril de pétrole (gauche) et valeur de la taxe carbone en France (droite)

Figure 2 : Prix du pétrole en euros/bl (gauche) et du carbone en euros/tCO₂ (droite)

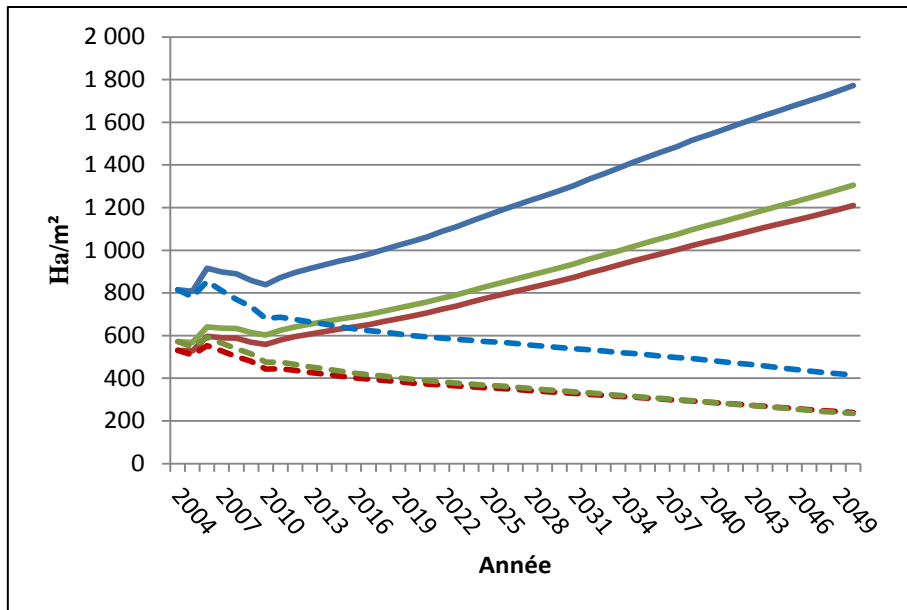


Figure 3 : Densités trois plus grandes villes françaises (bleu=Paris, vert=Marseille, rouge=Lyon) pour le scénario 3 (en traits pleins) et pour le scénario 4 (en pointillé)



Figure 4 : Population des trois plus grandes villes françaises (bleu=Paris, vert=Marseille, rouge=Lyon) pour le scénario 3 (en traits pleins) et pour le scénario 4 (en pointillé)

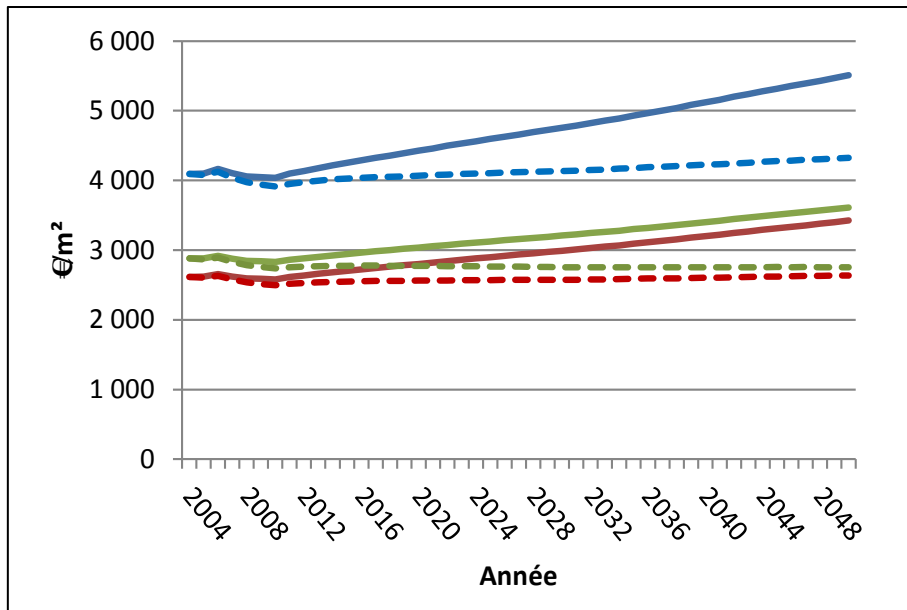


Figure 5 : Prix de l'immobilier des trois plus grandes villes françaises (bleu=Paris, vert=Marseille, rouge=Lyon) pour le scénario 3 (en traits pleins) et pour le scénario 4 (en pointillé)

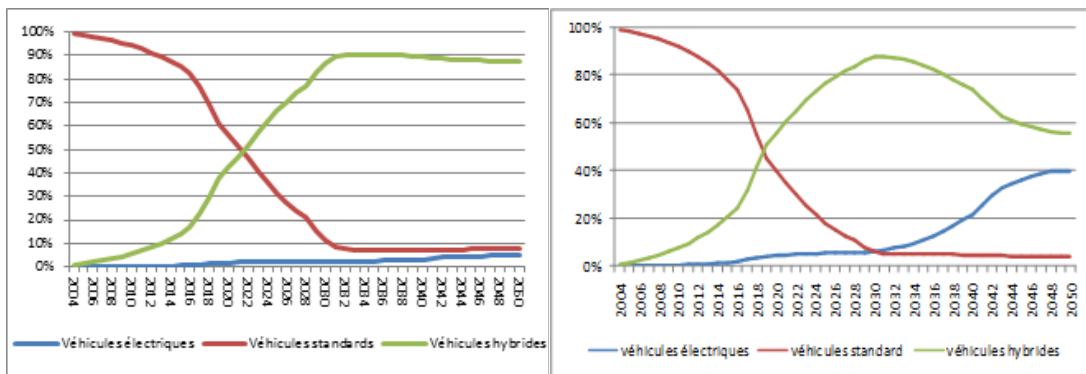


Figure 6: Evolution du parc automobile pour le scénario 3 (gauche) et 4 (droite)

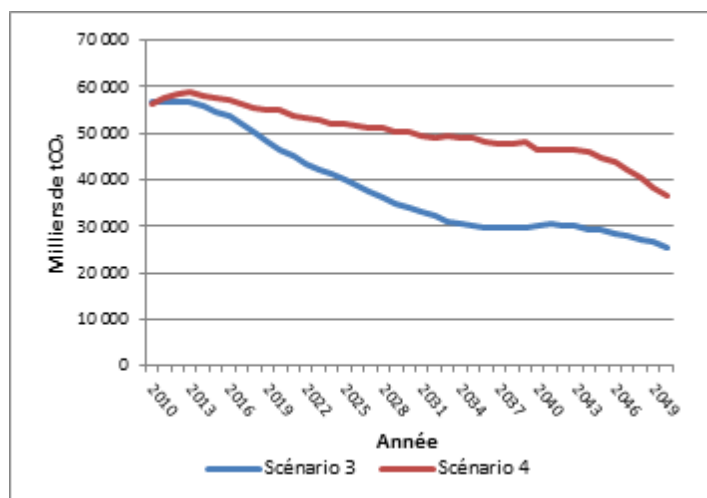


Figure 7: Emissions nationales de CO2 dans le secteur des transports

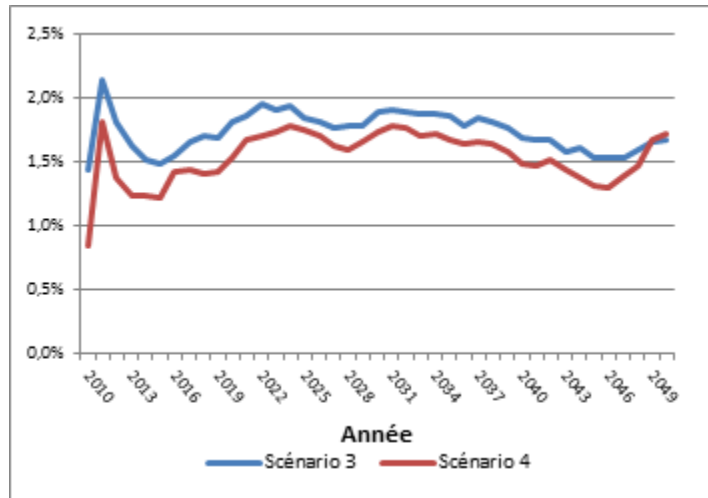


Figure 8: Taux de croissance du PIB

Tableaux

	Population (Milliers)	Travailleurs (Milliers)	Part de la production dans le PIB national (%)	Salaire (Index I=Paris)	Firmes (Milliers)	Temps moyen de transport	Taille de la ville
Paris	11 837	8 866	24.25	1.00	1 015	34.90	68.00
Lyon	1 757	1 265	3.00	0.85	138	30.50	32.45
Marseille	1 618	1 083	2.48	0.82	134	23.30	30.02
Lille	1 164	798	1.69	0.80	70	20.90	17.62
Toulouse	1 118	809	1.85	0.84	88	23.90	35.76
Bordeaux	1 009	717	1.62	0.80	79	19.70	35.13
Nice	999	709	1.82	0.80	112	21.40	26.87
Nantes	768	555	1.23	0.82	52	22.40	26.72
Strasbourg	642	458	1.03	0.80	46	24.20	20.75
Rennes	578	414	0.90	0.80	40	19.70	28.42
Grenoble	533	375	0.90	0.81	38	20.70	22.35
Montpellier	514	342	0.80	0.81	48	23.00	21.50

Tableau 1 : Valeurs des variables socio-économiques pour chaque agglomération à l'année de base

MARGE DE MANOEUVRE			
	Rôle majeur du contexte (Technologies et signaux prix)	Possibilité d'actions sur les investissements et les infrastructures	Possibilité d'actions sur les formes urbaines et les modes de vie
CONTEXTE Tendanciel	Scénario 1 Attentisme intelligent	Scénario 3 Nice Nouvelles infrastructures climatiques et énergétiques	Scénario 5 La ville contenue « à portée de main »
CONTEXTE En rupture favorable à l'innovation	Scénario 2 Créativité carbone	Scénario 4 Biopolis	Scénario 6 Urbanité sobre

Tableau 2 : Les six sentiers de transition