



HAL
open science

Économie et développement urbain durable: émissions urbaines. Inventaires et politiques publiques & transport et usage du sol

Bruno Duplessis, Charles Raux, Paolo Avner, Thierry Aw, Ian Cochran, Yves Crozet, Stéphane Hallegatte, Haitham Joumni, Mathieu Labarre, Jean Laterrasse, et al.

► To cite this version:

Bruno Duplessis, Charles Raux, Paolo Avner, Thierry Aw, Ian Cochran, et al.. Économie et développement urbain durable: émissions urbaines. Inventaires et politiques publiques & transport et usage du sol: 2ème rencontre du réseau "Économie et développement urbain durable". Presses des Mines, pp.156, 2011, Coll. Développement durable, 978-2-9112256-44-8. hal-00748624

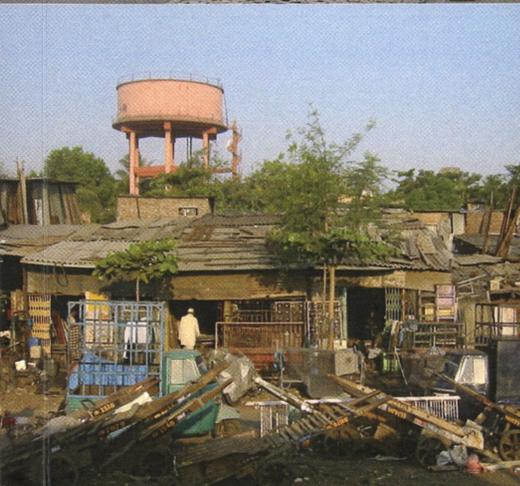
HAL Id: hal-00748624

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00748624>

Submitted on 19 Apr 2018

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.



Ouvrage coordonné
par Bruno Duplessis
et Charles Raux

Économie et développement urbain durable

Émissions urbaines :
inventaires
et politiques publiques
& Transport
et usage du sol



COLLECTION DÉVELOPPEMENT DURABLE

Presses des Mines

ÉCONOMIE ET DÉVELOPPEMENT URBAIN DURABLE

2^{ème} rencontre du réseau « Économie et Développement Urbain Durable »

© TRANSVALOR - Presses des MINES, 2011

© Photos de couverture : © Gilles Guerassimoff, © Mastère OSE,

60, boulevard Saint-Michel - 75272 Paris Cedex 06 - France

email : presses@ensmp.fr

<http://www.ensmp.fr/Presses>

ISBN : 978-2-911256-44-8

Dépôt légal : 2011

Achévé d'imprimer en 2011 (Paris)

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et d'exécution réservés pour tous les pays.

Ouvrage coordonné par Bruno DUPLESSIS et Charles RAUX

ÉCONOMIE ET DÉVELOPPEMENT URBAIN DURABLE

Emissions urbaines : inventaires et politiques publiques

& Transport et usage du sol



COLLECTION DÉVELOPPEMENT DURABLE

Dans la même collection

Association Événement OSE

Mastère Optimisation des Systèmes Energétiques, Mines ParisTech

Eau et Énergie : Quelles interactions ? Quelles synergies ?

Actes du Colloque

Gilles Guerassimoff, Nadia Maïzi

Eau et Énergie

Christophe Gobin

Réussir une construction en éco-conception

Ouvrage coordonné par Jean Carassus et Bruno Duplessis

Économie et développement urbain durable

Modèles économiques appliqués à la ville

Financement et coût de l'investissement durable

Nadia Maïzi, Jean-Charles Hourcade, coordination Sandrine Selosse

Carbone et prospective

*Colloque international organisé conjointement par la Chaire Modélisation
prospective et l'ETSAP*

Gilles Guerassimoff, Nadia Maïzi

Îles et Énergie

Avant-propos

Les enjeux du développement durable sont maintenant partagés, tant au niveau national qu'international. Leurs expressions aux différentes échelles spatiales, suivant les différents champs scientifiques, économiques et sociologiques, supposent des approches fondamentalement systémiques, notamment pour ce qui relève de la ville et de son environnement urbain. Autant la compréhension des phénomènes physiques qui s'y rattachent, s'appuie sur des allers-retours inter échelles du nano au macro, autant les approches économiques souffrent d'une discontinuité entre les échelles globales et les échelles micro. A ce titre, l'économie du développement urbain durable, peine à mobiliser les équipes de recherche, à l'échelle spécifique de l'urbain, au niveau de complexité que renvoie l'interdépendance de la mobilité, de la construction, de la gestion des espaces publics et privés et des problématiques du développement durable.

Aussi, le Département Economie et Sciences Humaines du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), conscient de cette lacune inter échelles bâtiment-ville, a-t-il initié dans le cadre de ses activités de recherche appliquée, une démarche partenariale visant à mettre en relation des équipes de recherche académiques et appliquées autour de la question de l'économie et du développement urbain durable.

Plusieurs équipes scientifiques ont répondu à cette initiative qui a abouti à la création du Réseau EDUD (Economie et Développement Urbain Durable) qui regroupe aujourd'hui le Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED), le laboratoire d'Economie de la Production et de l'Intégration Internationale (LEPII), le Laboratoire d'Economie des Transports (LET), le Laboratoire Ville, Mobilité, Transports (LVMT), l'Ecole des Mines ParisTech, le Département Economie et Sciences Humaines du CSTB et CDC Climat Recherche. Ces équipes se sont fixées pour objectifs d'aborder en commun le champ de l'économie et du développement urbain durable sur la base d'échanges scientifiques et de la confrontation de leurs travaux respectifs. Leur finalité est d'aboutir à une meilleure articulation et complémentarité des problématiques et axes de recherche

relevant du développement urbain durable, et de promouvoir par les publications, tant la recherche académique qu'appliquée, que l'information et le transfert à l'ensemble des acteurs socio-économiques des résultats de leurs projets communs.

Cette initiative, supportée par la Direction de la Recherche et du Développement du CSTB, bénéficie de financements de l'Institut Carnot CSTB, dans le cadre du ressourcement amont afin d'articuler recherche académique et appliquée autour des préoccupations des acteurs socio-économiques.

Cet ouvrage regroupe les travaux présentés lors de la deuxième rencontre annuelle du réseau EDUD, qui a eu lieu à Lyon le 21 janvier 2010.

Hervé Charrue,
Directeur de la Recherche et du Développement, CSTB

Les laboratoires et organismes membres du réseau « Economie et Développement Urbain Durable »

Le **Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED)** est une unité mixte de recherche dépendant de l'EHESS, du CNRS, de l'École des Ponts ParisTech, d'AgroParisTech-ENGREF et du CIRAD. Dirigées par Jean-Charles Hourcade, les recherches qui y sont menées étudient les tensions entre environnement, gestion à long terme des ressources naturelles et développement économique.

Le **Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)** est un établissement public à caractère industriel et commercial de 800 personnes, spécialisé dans la Recherche Développement dans le bâtiment et dans l'évaluation technologique et environnementale des produits et des ouvrages. Son **département Economie et Sciences Humaines** rassemble économistes, sociologues, psychologues, urbanistes et ingénieurs, dans deux équipes dédiées à l'innovation dans l'immobilier et à la socio-économie urbaine.

Le **Laboratoire d'Economie de la Production et de l'Intégration Internationale (LEPII)** est une Unité Mixte de Recherche du CNRS et de l'Université Pierre Mendès-France de Grenoble qui rassemble une cinquantaine de personnes (chercheurs, enseignants-chercheurs et personnels administratifs). Les recherches conduites au LEPII sont structurées selon deux axes principaux dont un sur les ressources naturelles, l'énergie et l'environnement qui vise notamment à l'analyse économique des politiques climatiques. Ces recherches couvrent en particulier les questions relatives à la mise en œuvre des instruments de marché, au contenu des politiques technologiques pour le développement durable et enfin à la négociation internationale sur le climat.

Le **Laboratoire d'Economie des Transports (LET)** est rattaché au CNRS (UMR n°5593), à l'Université Lyon 2 et à l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat. Ses travaux de recherche se situent au cœur des relations entre transports, territoires et société. Ils combinent analyse, modélisation et évaluation des politiques publiques de transport et d'aménagement du territoire.

Le **Laboratoire Ville Mobilité Transport (LVMT)** est le fruit d'un partenariat entre trois établissements de recherche et d'enseignement supérieur reconnus pour leurs compétences dans le secteur de l'aménagement et des transports : Ponts ParisTech l'INRETS et l'UPEMLV. Ces 3 établissements sont membres de l'Université Paris Est (UPE). Le LVMT analyse, dans une perspective de développement durable, deux objets en interaction forte, la ville et les transports. Les travaux des membres du laboratoire s'inscrivent dans trois thématiques : Mobilité et métropolisation, Agencement des espaces et politiques de mobilité et Économie des réseaux et modélisation offre-demande.

Le **Centre Énergétique et Procédés de Paris (CEP)** et le **Centre d'Economie Industrielle (CERNA)** sont des centres de recherche de **Mines ParisTech**. Le CEP développe des compétences dans de nombreux domaines utiles à l'étude de la transformation de la matière et de l'énergie. Il s'intéresse aux systèmes énergétiques complexes, notamment en régimes variés et à la maîtrise de leurs émissions. Les travaux de recherche du CERNA se sont développés autour des domaines de l'économie, de la finance quantitative et de l'analyse de la globalisation, et en particulier de l'économie de la réglementation et de l'économie de l'environnement.

CDC Climat Recherche, équipe de recherche de CDC Climat, filiale de la Caisse des Dépôts, est un centre d'analyse et de recherche sur l'économie du changement climatique. Elle a pour objectif de comprendre, anticiper et faciliter la mise en place d'instruments économiques pour agir face au changement climatique. Elle est spécialisée dans trois domaines : l'économie des quotas d'émissions de gaz à effet de serre, l'économie des projets de réduction des émissions et l'économie de l'adaptation des territoires au changement climatique. Son expertise est diffusée au travers de nombreuses publications disponibles en ligne sur le site : <http://www.cdclimat.com/Les-publications-de-CDC-Climat.html>

Présentation des auteurs

Paolo Avner (Ingénieur d'étude CNRS) est diplômé de ParisTech-Nanterre et de l'Université Paris1. Jeune économiste, il a acquis une certaine expérience sur les mécanismes de flexibilité du protocole de Kyoto ainsi que sur les instruments permettant de concilier politiques climatiques ambitieuses et compétitivité internationale. Au LEPII, il travaille sur les questions de développement urbain durable, et sur l'intégration de cette dimension spatiale dans le modèle énergétique POLES.

Thierry Aw a réalisé sa thèse de doctorat au Laboratoire Ville Mobilité Transport (Ecole des Ponts ParisTech, IFSTTAR et UPE-MLV). Il s'intéresse plus à la prise en compte des interactions entre l'occupation des sols et les systèmes de déplacements, en mobilisant des approches géographiques, économiques, et la capacité de simulation des modèles. Ses recherches portent sur la proposition d'éco-indicateurs intégrant les conséquences réciproques de l'agencement des lieux de résidence et de production et la performance territoriale des réseaux de transports. Il est actuellement ingénieur au département Etudes Générales et Economiques de Transports de SETEC international.

Ian Cochran est chargé d'étude à CDC Climat Recherche (ancienne Mission Climat de la Caisse des Dépôts) et doctorant au sein du laboratoire de recherche CERNA - Mines ParisTech. Ses recherches portent principalement sur la gestion du changement climatique à l'échelle locale. Ian est titulaire d'un master of Public Affairs (MPA) obtenu à Sciences-Po Paris.

Yves Crozet est professeur d'économie à l'Institut d'études politiques à l'université de Lyon et membre du laboratoire d'économie des transports (LET, UMR CNRS n° 5593). Ses principaux thèmes de recherche sont le calcul économique et l'évaluation, les politiques publiques et la mobilité durable.

Bruno Duplessis, professeur agrégé de Génie Civil et docteur en Energétique de l'Ecole des Mines de Paris est actuellement maître assistant associé au Centre Energétique et Procédés de Mines ParisTech. En collaboration avec des partenaires industriels ou institutionnels, ses activités de recherche se développent principalement dans le domaine de la maîtrise de la demande en énergie (MDE) et en particulier autour du développement de méthodes et d'outils pour la caractérisation et l'évaluation des actions de MDE.

Stéphane Hallegatte est chercheur en économie de l'environnement et en science du climat à l'Ecole Nationale de la Météorologie, Météo-France, et au Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED). Il a fait partie des auteurs des rapports des groupes de travail I et II du quatrième rapport du GIEC en 2007, et est aujourd'hui un auteur principal du rapport spécial sur l'adaptation au changement climatique et la gestion des risques. Ses recherches couvrent principalement trois thèmes : les crises économiques et l'étude des conséquences économiques des catastrophes naturelles, l'évaluation des impacts socio-économiques du changement climatique, et la conception de stratégies publiques ou privées d'adaptation au changement climatique.

Haitham Joumni est docteur ès sciences économiques. Il est chercheur au département Economie et Sciences Humaines du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) où il participe à différentes études et coordonne plusieurs projets de recherche dans le domaine de l'économie de l'environnement, de la construction et de l'énergie.

Mathieu Labarre est titulaire d'un Master 2 Physique et Environnement de l'université d'Orsay. Il a collaboré en tant qu'ingénieur de recherche aux activités de recherche du Centre Energétique et Procédés de Mines ParisTech portant sur l'analyse des mécanismes de décision de rénovation chez les particuliers dans le cadre d'une convention de recherche financée par l'institut Carnot du CSTB.

Jean Laterrasse, Directeur du Laboratoire Ville Mobilité Transport, est Professeur à l'Université Paris Est. Ancien élève de l'Ecole normale supérieure de Cachan, il a alterné au cours de sa carrière des périodes de recherche et des missions de caractère opérationnel au sein du ministère en charge des transports et de l'aménagement du territoire, a été de 1990 à 2000 directeur de recherche au CNRS, puis a exercé entre 2000 et 2004 la fonction de directeur scientifique de l'INRETS. Spécialiste de l'analyse des systèmes, auteur d'une quarantaine d'articles scientifiques, il s'intéresse tout particulièrement à la formalisation des interactions entre transports et aménagement de l'espace.

Fabien Laurent, ingénieur en chef des ponts, des eaux et des forêts, HDR en Informatique-Recherche opérationnelle, est directeur-adjoint du Laboratoire Ville Mobilité Transport, unité mixte de recherche entre l'Ecole des Ponts ParisTech, l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) et l'Université Paris-Est Marne la Vallée. Ses recherches concernent la modélisation offre-demande pour les réseaux de transport (routiers, collectifs, intermédiaires) et les systèmes spatiaux (foncier, immobilier), ainsi que leur analyse économique.

Philippe Menanteau (Ingénieur de Recherche CNRS) est diplômé de l'Ecole Spéciale des Travaux Publics (Paris) et titulaire d'une thèse de docteur-ingénieur de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires. Avant d'entrer au CNRS, il a travaillé plusieurs années au développement de coopérations entre les collectivités locales européennes sur la thématique énergie-environnement. Au LEPII, il est impliqué dans les programmes de recherche sur la prospective technologique et la modélisation du système énergétique. Ses recherches portent sur l'analyse du progrès technique dans le secteur de l'énergie et en particulier sur les politiques de soutien au développement des énergies renouvelables.

Aurélie Mercier est maître de conférences à la l'UT Lumière, à l'Université de Lyon 2, depuis 2010 et chercheure au Laboratoire d'Economie des Transports (LET). Elle a réalisé sa thèse sur la mesure de l'accessibilité en milieu urbain dans une optique d'évaluation des politiques de transport. Ses travaux de recherche s'articulent autour de deux thématiques principales que sont l'évaluation des politiques publiques et les dynamiques spatio-temporelles. Dans le cadre de ses activités de recherche, Aurélie Mercier travaille sur différents projets (projets européens, projet ANR, projets financés par le PREDIT).

Nicolas Ovtracht est ingénieur d'études CNRS au Laboratoire d'Economie des Transports (LET, UMR CNRS n° 5593). Il est spécialisé dans le traitement et l'analyse de l'information spatiale (SIG, cartographie). Il travaille dans le domaine de l'aménagement du territoire et plus particulièrement sur les analyses sur l'accessibilité sur les réseaux véhicules particuliers et les transports en commun.

Charles Raux est ingénieur de recherche au CNRS et directeur du LET. Ses travaux de recherche portent pour l'essentiel sur la modélisation de l'interaction entre transports urbains et usages du sol, ainsi que l'utilisation des permis négociables dans les transports, plus particulièrement pour répondre à la problématique des émissions de gaz à effet de serre.

Vincent Viguié est ingénieur du corps des Ponts et chaussées et doctorant au Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED), sous la direction de Stéphane Hallegatte et Jean-Charles Hourcade, sur les stratégies intégrées d'adaptation et de mitigation dans les zones urbaines. Il coordonne les travaux du CIRED sur ce thème et développe le modèle NEDUM, qui vise à produire des scénarios d'évolution urbaine à très long terme et à évaluer les politiques urbaines de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de réduction de la vulnérabilité aux risques naturels.

Introduction

Le réseau Economie et Développement Urbain Durable est une structure informelle rassemblant six laboratoires de recherche et CDC Climat Recherche. Il s'est fixé quatre orientations.

La première est de contribuer à créer une synergie nationale de recherche dans le champ Economie et Développement Urbain Durable. Cette synergie porte sur le contenu de la recherche dans ce champ et sa cohérence, en particulier avec une meilleure articulation entre modèles systémiques et questions issue du développement urbain durable. Les échanges permettront de rapprocher les problématiques, de définir des axes partagés en valorisant les complémentarités entre équipes, de participer à des projets communs. La synergie a aussi une dimension logistique pour l'organisation des échanges, la diffusion des informations et les comptes-rendus des travaux.

La deuxième orientation est de favoriser l'utilisation des résultats de la recherche par les acteurs socio-économiques. Le réseau privilégie les rapports avec les élus locaux et les entreprises, privées et publiques, actives dans le développement urbain durable. Une finalité est de faire en sorte que ces acteurs puissent utiliser les résultats de la recherche pour éclairer leurs décisions et mieux appréhender les conséquences de celles-ci.

La troisième orientation est de mettre en avant l'importance de la recherche appliquée dans le champ du développement urbain durable notamment vis-à-vis d'institutions de recherche et d'évaluation de la recherche.

Enfin la quatrième orientation est d'attirer de jeunes chercheurs et de pérenniser leur engagement. La difficulté d'accroître les travaux de recherche dans le champ Economie et Développement Urbain Durable provient moins d'un manque de financement que d'une insuffisance de ressources humaines. Le réseau se fixe comme objectif d'attirer de jeunes chercheurs et de favoriser, par des contrats et un partenariat avec des entreprises, la pérennité de leur engagement au-delà des périodes de doctorat et de post-doctorat.

Le principe d'une rencontre annuelle de présentation de travaux et d'échanges a été arrêté. La deuxième rencontre du réseau a donc eu lieu le 21 janvier 2010 à Lyon. Cet ouvrage rend compte des travaux présentés à cette occasion.

La première partie de la journée a été consacrée à l'inventaire et à la prospective des émissions urbaines. Puis dans un deuxième temps, les travaux présentés ont concerné des éléments de politique publique pour la maîtrise des émissions dans le bâtiment. Enfin, les échanges de l'après-midi ont abordé les transports et en particulier la problématique de l'usage des sols dans le cadre de la mise en œuvre des politiques publiques.

Analyse des inventaires locaux d'émissions de gaz à effet de serre : quel inventaire pour quelle utilisation ?¹

Ian Cochran

RESUME

La territorialisation de l'action contre le changement climatique, prévue par le Grenelle II notamment, a mis en avant le rôle croissant des autorités locales dans les politiques d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, les inventaires des émissions de gaz à effet de serre (GES) doivent être en mesure, en tant qu'outils d'aide à la décision, de s'adapter aux besoins spécifiques des autorités locales. L'échelle à laquelle les inventaires GES sont employés, le caractère interne ou non de leur utilisation par ces mêmes autorités, et le rôle des choix politiques normatifs, ont de fortes incidences sur la structure technique des inventaires.

Afin d'être considérées comme des acteurs crédibles de la politique d'atténuation, les autorités locales doivent être en mesure de démontrer que la somme de leurs actions conduit à une réduction réelle et significative des GES. Autrement dit, il est nécessaire pour elles de pouvoir produire des inventaires transparents qui puissent répondre aux exigences posées par leur échelle de déploiement et par leur type d'utilisation. Il apparaît également clair que les autorités et organisations nationales et internationales doivent parvenir à un consensus sur ces éléments normatifs et fournir les incitations nécessaires pour amener les autorités locales à adopter ces standards.

¹ Cet article est un extrait de : Cochran, Ian (2010) « *A Use-Based Analysis of Local-Scale GHG Inventories* », Working Paper N°2010-7, CDC Climat Recherche.

INTRODUCTION

Un inventaire de gaz à effet de serre sert principalement d'outil « informationnel » pour établir un profil des sources anthropogéniques des gaz à effet de serre à travers leur quantification. Ces informations peuvent être utilisées par l'entité concernée par le bilan, par exemple une installation ou une collectivité locale. Une entité d'un niveau supérieur (une entreprise, une région, etc.) peut également les utiliser. La gamme diverse des acteurs et sources d'émissions retrouvée à l'échelle locale est large, souvent avec des périmètres géographiques et administratifs divers. Ainsi, les objectifs des différents acteurs, politiques et instruments de financement pourraient demander des informations diverses à propos des émissions de GES. Ces demandes ont des implications importantes et structurantes pour l'inventaire, suivant qu'il s'agisse d'établir un scénario de référence, de planifier des actions, de calculer des tendances futures ou bien de suivre le progrès des actions déjà mises en place.

Etant donné la complexité à l'échelle locale, avec un chevauchement de politiques et d'acteurs, peu d'études ont essayé de détailler les exigences liées aux différentes utilisations d'inventaires et leurs impacts sur la structure technique et les aspects normatifs des inventaires. En effet, la littérature traitant du sujet des inventaires de GES à l'échelle locale se limite souvent à une documentation fortement technique qui présente soit une approche spécifique soit les difficultés méthodologiques retrouvées en passant d'un système national à un système local (Kennedy *et al.*, 2009²; Parashall *et al.*, 2009³; Ramaswami *et al.*, 2008⁴; Steinberger & Weisz *et al.*, 2009⁵). D'autres auteurs ont regardé les enjeux autour de l'attribution de la responsabilité

² Kennedy, Christopher, Julia Steinberger, Barrie Gasson, Yvonne Hansen, Timothy Hillman, Miroslav Havránek, Diane Pataki, Aumnad Phdungsilp, Anuradha Ramaswami and Gara Villalba Mendez, (2009). "Methodology for inventorying greenhouse gas emissions from global cities." Paper submitted to *Energy Policy*.

³ Parshall, Lily, Kevin Gurney, Stephen A. Hammer, Daniel Mendoza, Yuyu Zhou and Sarath Geethakumar (2009). "Modelling Energy Consumption and CO2 Emissions at the Urban Scale: Methodological Challenges and Insights from the United States. Paper presented at the World Bank Urban Research Symposium, June 2009, Marseille.

⁴ Ramaswami, Anu, Tim Hillman, Bruce Janson, Mark Reiner and Gregg Thomas (2008). "A Demand-Centered, Hybrid Life-Cycle Methodology for City-Scale Greenhouse Gas Inventories." *Environmental Science & Technology*, 42(17): 6455-6461.

⁵ Steinberger, Julia K. and Helga Weisz (2009). *Measuring low carbon cities*. Presentation to Towards Low Carbon Cities, Nagoya, Feb. 2009.

pour les émissions (Dodman, 2009⁶; Bastianoni *et al.*, 2004⁷), mais ils ne développent pas comment ces différentes méthodes d'attribution au sein d'une collectivité ou d'un périmètre impactent la structure et les résultats d'un bilan donné. Peu d'analyses détaillées et/ou comparatives des différentes approches sont disponibles (pour un état de l'art, cf. Bader & Bleischwitz, 2009⁸; Corfee-Morlot *et al.*, 2009⁹; Energie-Cités's 2003¹⁰).

Ainsi, cet article apporte une analyse exploratoire sur la façon dont l'utilisation souhaitée détermine la structure d'un inventaire. La première partie de cet article décrit les concepts clés pour comprendre les enjeux autour des inventaires, au travers de trois facteurs : périmètre, secteur et scope. La deuxième partie présente un cadre analytique pour classifier les utilisations des inventaires, en les divisant entre des utilisations « interne » ou « externe », et leurs conséquences en termes de structure d'inventaire.

CONCEPTS CLES POUR COMPRENDRE LES ENJEUX AUTOUR DES INVENTAIRES

Divers facteurs peuvent influencer considérablement les résultats d'un inventaire de GES, et ce à plusieurs échelles. Les différences de périmètre, de secteurs et de « scopes », et notamment la question cruciale des gaz qu'il convient d'inclure, peuvent fausser les résultats et venir compliquer, voire rendre impossible, l'homogénéité. Cette section a pour but de décrire les composantes structurelles, les frontières et les cadrages fondamentaux des inventaires de gaz à effet de serre utilisés à toutes les échelles de gouvernance.

⁶ Dodman, D. (2009). "Blaming Cities for Climate Change? An analysis of urban greenhouse gas emissions inventories." *Environment and Urbanization* (21).

⁷ Bastianoni, Simone, Federico Maria Pulselli and Enzo Tiezzi (2004). "The Problem of assigning responsibility for greenhouse gas emissions." *Ecological Economics*, 49:253-257.

⁸ Bader, Nikolas & Raimund Bleischwitz (2009). *Study Report: Comparative Analysis of Local GHG Inventory Tools*. Produced for the College of Europe and Institut Veolia Environnement.

⁹ Corfee-Morlot, Jan, Lamia Kamal-Chaoui, Michael G. Donovan, Ian Cochran, Alexis Robert and Pierre-Jonathan Teasdale (2009). *Cities, Climate Change and Multilevel Governance*. OECD Environmental Working Papers N° 14, 2009, OECD publishing.

¹⁰ Energie-Cités (2003). *Quantification des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle territoriale*. Final report.

Quels sont les acteurs dont les émissions sont comptabilisées ?

L'objectif d'un inventaire des gaz à effet de serre est de quantifier les émissions de GES découlant d'une activité ou de l'ensemble des activités économiques et sociales. Les inventaires revêtent trois formes possibles en termes de niveaux d'agrégation et de périmètre couvert :

- **Activité** – ou Projets regroupe les émissions issues des différentes procédures émettrices de GES liées à la fonction d'une activité économique ou sociale;
- **Entité** – regroupe l'ensemble des activités attribuées au fonctionnement et aux opérations d'une entité donnée (privée ou publique) ;

Territoire – regroupe les émissions de l'ensemble des activités et des entités (privées et publiques) situées ou fonctionnant dans une zone géographique donnée. Selon le niveau d'agrégation des données de l'inventaire, les inventaires territoriaux peuvent varier en termes d'échelle (quartier, zone métropolitaine ou pays).

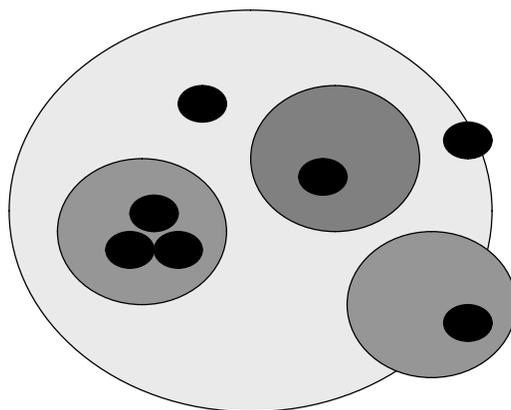


Figure 1 : Chevauchement des différents périmètres d'inventaires de GES

Les différentes sources d'émissions pourraient être regroupées dans un périmètre qui inclut une ou plusieurs activités, les émissions liées au fonctionnement d'une entité ou bien de toutes les émissions d'un territoire. Ceci dit, le chevauchement de périmètres, comme montré en Figure 1, doit être pris en compte pour assurer à la fois son exhaustivité et éviter le double comptage. Par exemple, dans le cas des émissions d'une décharge utilisée par plusieurs communes, il faut prendre soin de bien établir le périmètre et l'attribution des responsabilités pour chaque part des

émissions afin d'éviter des bilans qui reflètent peu la réalité. Dans le cas des sources d'émissions mobiles, comme le transport par exemple, il est d'autant plus difficile d'établir le « bon » périmètre.

Ce qui est inclus dans la comptabilisation des GES

Scopes et secteurs

Le choix de ce qui est inclus dans l'inventaire peut varier de manière considérable. Ce qui est inclus dans un inventaire peut faire référence aux éléments suivants :

- (1) gaz à effet de serre, correspondant souvent aux six principaux gaz mentionnés dans le Protocole de Kyoto.¹¹
- (2) les secteurs, dépendant souvent du cadre uniformisé de présentation nationale du GIEC.¹²
- (3) les scopes d'émissions.

Comme indiqué par le World Resource Institute et le *Greenhouse Gas Protocol* du World Business Council on Sustainable Development (WRI/WBCSD, 2004¹³), il existe trois scopes d'émission principaux :

- le *Scope 1* inclut les émissions directes issues d'un projet, d'une entité ou d'un territoire.
- le *Scope 2* inclut les émissions directes et indirectes produites dans des lieux différents et liées à l'électricité, à la vapeur, à la chaleur et au refroidissement utilisés par le projet, l'entité ou le territoire en question.
- le *Scope 3* correspond aux émissions directes, indirectes, en amont et intégrées de biens et de services qui sont soit consommés dans le cadre du projet, soit par une entité ou au sein d'un territoire.

L'exemple hypothétique d'une mairie est utilisé pour mieux comprendre comment les sources d'émissions peuvent être distinguées en « scopes » d'émissions.

¹¹ Le Protocole de Kyoto inclut les gaz suivants : CO₂, N₂O, CH₄, SF₆ (hexafluorure de soufre), HFC (hydrofluorocarbones) et PFC (hydrocarbures perfluorés).

¹² Les lignes directrices 2006 du GIEC incluent cinq secteurs principaux : Énergie (y compris Transport) ; Procès industriels et utilisation de produits ; Agriculture, foresterie et changement d'affectation des terres ; Déchets ; Autres.

¹³ WRI/WBCSD (2004). The Greenhouse Gas Protocol – A Corporate Accounting and Reporting Standard. World Resources Institute – World Business Council for Sustainable Development.

- **Le Scope 1** correspond à toutes les émissions directement sous le contrôle de l'Hôtel de Ville. Cela inclut des catégories de type stationnaire, sur site, la combustion de carburant dans les chaudières et installations de chauffage, la combustion de carburant pour la flotte de véhicules municipaux, ainsi que les émissions éphémères et liées aux processus s'il y a lieu.
- **Le Scope 2** inclut les émissions directes et indirectes de l'électricité ou de la vapeur achetée soit auprès d'une entité publique soit d'un producteur privé.
- **Le Scope 3** inclut les émissions indirectes de toute autre activité sélectionnée dans l'inventaire. C'est typiquement les émissions en amont et aval générées par différents produits et services consommés ou fournis, les émissions liées aux déplacements quotidiens des employés, les déplacements liés au travail mais non effectués par le biais de la flotte de véhicules officielle ainsi que les activités externalisées, le traitement des déchets, etc.

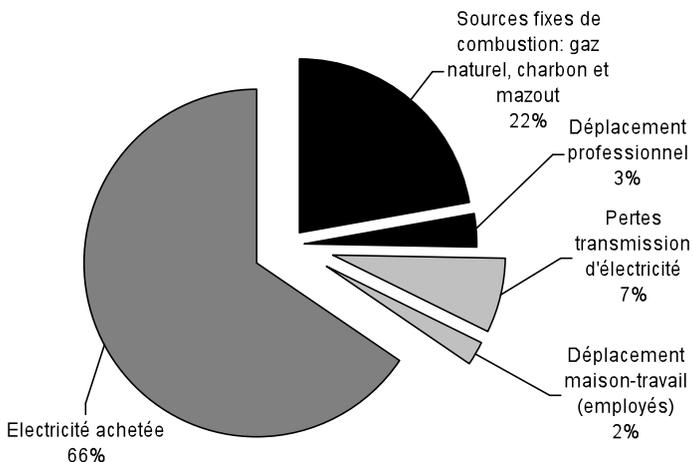


Figure 2 : Émissions théoriques d'une mairie par « scope »

Attribution des émissions de GES et responsabilité

L'attribution sans ambiguïté de la responsabilité des émissions de GES constitue une composante centrale pour la résolution d'un certain nombre de questions méthodologiques comme la double comptabilisation et sert également à produire un bilan qui permette l'identification des leviers d'action d'atténuation. Toutefois, cette attribution de responsabilité prend racine dans bon nombre de questions normatives

complexes, dans la mesure où elle nécessite qu'un verdict soit rendu quant à la responsabilité principale (consommateurs ou producteurs ?) des émissions provenant des biens et des services. Concrètement, on trouve souvent un « juste milieu » qui tient compte de la capacité des différents acteurs à réduire leurs émissions.

Les principales méthodes d'attribution de la responsabilité se fondent sur la responsabilité liée à la production ou sur la responsabilité liée à la consommation. Il faut préciser que l'application de ces deux approches est plus facile pour les sites industriels et des postes d'émissions « fixes » que pour les sources mobiles comme les flux de transports qui émettent une quantité importante de GES en traversant les territoires.

- Une méthode *fondée sur la production* attribue la comptabilisation (responsabilité) des émissions à l'endroit où elles sont produites. Dès lors, seules les émissions générées sur un territoire donné sont attribuées à la ville concernée dans son inventaire. Dans ce cas, les émissions liées à la production et au transport de biens et de services importés (y compris de l'électricité, en cas d'importation) ne sont pas incluses, alors que celles liées aux biens et aux services produits, mais exportés vers d'autres régions, le sont.¹⁴
- À l'inverse, une méthode de comptabilisation et de responsabilité *fondée sur la consommation* attribue les émissions à leur point de consommation. La portée de cette méthode de comptabilisation est variable en termes d'application : elle va en effet d'une partie limitée des émissions produites en amont jusqu'à l'analyse du cycle de vie complet. Dès lors, les émissions liées à la production, au transport et à la consommation de tous les biens importés dans le territoire sont incluses, alors que les biens et les services produits en vue de l'exportation ne le sont pas.

Concrètement, conformément à la méthodologie essentiellement fondée sur les territoires qui a été développée par le GIEC¹⁵ en vue d'une mise en application par les pouvoirs publics nationaux, *la méthode fondée sur la production* domine la plupart des secteurs, à l'exception des émissions Scope 2 (électricité, vapeur, chaleur et refroidissement). Toutefois, comme l'attribution des émissions est *in fine* une question normative, elle relève avant tout d'une décision politique.

¹⁴ Cette méthode se rapproche sous bien des aspects du *principe pollueur-payeur* utilisé dans la législation relative à l'environnement.

¹⁵ IPCC (2006). IPCC Guidelines for national GHG inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Comment les émissions sont-elles quantifiées et vérifiées ?

Il existe de nombreuses méthodes de quantification, mais la plus répandue est celle des *facteurs d'émission*. La *méthode des facteurs d'émission* fait appel à des échantillons de données moyennes concernant des activités spécifiques utilisées pour extrapoler les émissions totales.¹⁶ La quantification des émissions de GES découlant d'une activité donnée est définie par la fonction suivante :

$$E_{g,a,t} = A_{a,t} \times F_{g,a}$$

Où :

E = les émissions d'un gaz (g) découlant d'une activité (a) sur la période (t)

A = la quantité d'une activité (a) sur la période (t)

F = le facteur d'émission (intensité GES) par unité d'activité (a)

Différentes méthodes de quantification de A et de F fondées soit sur des estimations, soit sur des éléments de modélisation ou des données physiques, introduisent divers degrés d'incertitude concernant la précision des résultats. Il est indispensable que cette incertitude soit communiquée dans les résultats définitifs.

La précision de la méthode des facteurs d'émission dépend du calibrage du facteur d'émission employé : comme indiqué ci-dessous, le contrôle précis peut faire intervenir la mise au point de facteurs d'émission *contextuels* pour certaines activités – lesquels tiennent compte du contexte et des technologies spécifiques employées. Par exemple, s'il y a un large renouvellement du parc d'automobiles qui réduit en moyenne l'intensité de GES par kilomètre parcouru, il faudrait recalculer le facteur d'émission utilisé dans l'inventaire afin de tenir compte de l'évolution et identifier des leviers d'action. Ceci dit, le calcul des facteurs d'émissions contextuels est normalement très demandeur de données locales et, donc, aurait potentiellement un coût élevé.

Vérification des inventaires de GES

La vérification de la procédure de mesure et de présentation constitue une composante essentielle de l'identification des erreurs involontaires ainsi que des manipulations intentionnelles. La vérification peut être effectuée en interne par l'entité réalisant l'inventaire ou par un organisme extérieur officiel ou privé. La vérification n'est pas nécessaire pour l'ensemble des utilisateurs potentiels, mais elle peut permettre de déceler les erreurs techniques ainsi que les écarts dus à des

¹⁶ On peut identifier quatre méthodes principales (cf. Bader & Raimund 2009) : la méthode des facteurs d'émission ; la méthode du bilan massique ; le système de contrôle prédictif des émissions (PEMS) ; le système de contrôle continu des émissions (CEMS).

méthodologies proscrites. La vérification prend toute sa place en cas de financement, notamment en cas de transferts financiers (du niveau national vers le niveau local) destinés à accompagner les politiques d'atténuation de GES. Cela est notamment le cas pour les mécanismes fondés sur la finance carbone, dans lesquels des réductions d'émissions sont rémunérées en fonction de leur montant avéré.

UNE ANALYSE BASEE SUR L'UTILISATION

On peut classer les inventaires de gaz à effet de serre à l'échelle locale selon deux caractéristiques principales : entre besoins internes / externes, et selon le périmètre choisi. Ces deux divisions influencent fortement leur structure et les facteurs décrits ci-dessus.

Besoins des Autorités Locales :

On peut distinguer des utilisations internes / externes.

En termes d'utilisation, les inventaires peuvent être regroupés entre, d'une part, les inventaires conçus pour une utilisation interne par l'entité conduisant l'inventaire et, d'autre part, les inventaires conçus pour une utilisation externe, à la fois par l'entité elle-même ou par d'autres acteurs ou institutions. Il convient de noter qu'en pratique, les données d'émissions n'ont pas de but unique mais qu'elles sont souvent utilisées pour plusieurs objectifs à la fois. Le Tableau 1 synthétise les informations relatives à l'utilisation et les impacts des variables décrites ci-dessous sur leur structure.

Le passage d'une utilisation interne à une utilisation externe peut avoir une incidence sur la fréquence à laquelle les inventaires seront réalisés, sur les cadrages de reporting utilisés et également sur les besoins de vérification. De plus, les différentes utilisations peuvent exiger l'implication d'un « coordinateur » externe, que ce soit fait de manière formelle ou informelle, pour la centralisation et l'analyse des résultats.

Utilisation interne : pour les autorités locales, les inventaires des émissions de gaz à effet de serre bien calibrés peuvent constituer de puissants outils pour (1) *planifier des politiques d'atténuation* et (2) *servir d'indicateurs de progrès* par rapport aux objectifs de réduction d'émissions fixés dans des documents de planification et d'orientation.

- Les inventaires établis comme niveau de référence des émissions et outils de planification pour un projet, les opérations publiques locales ou un territoire, sont principalement utilisés pour identifier et évaluer le potentiel de réduction de GES et servir de base aux exercices prospectifs. Ces inventaires fonctionnent comme une image instantanée des émissions désagrégées selon certains critères (correspondant généralement aux

divisions sectorielles établies par le GIEC). Ce diagnostic peut être utilisé pour identifier des actions efficaces en termes de coûts, lorsque le coût marginal de réduction est comparable entre différents secteurs. Il est capital que ces inventaires soient détaillés et exhaustifs afin de pouvoir pleinement prendre en compte l'ensemble du profil des émissions.

- Les inventaires développés en tant qu'indicateurs de suivi du progrès d'une politique visent principalement à suivre le progrès des politiques mises en œuvre. S'il est souvent difficile d'établir des liens directs entre politiques d'atténuation et réduction du volume total d'émissions, un inventaire de suivi peut permettre d'évaluer l'efficacité des investissements et des actions de réduction des émissions.¹⁷ Le périmètre d'un tel inventaire concernerait les données d'émissions provenant de secteurs sur lesquels les autorités locales ont choisi de se concentrer, en tentant d'évaluer les progrès réalisés sur les objectifs d'atténuation spécifiques.

Les utilisations internes des inventaires de GES

Au cours des cinq dernières années en France, des inventaires de GES ont de plus en plus été utilisés dans la planification et le suivi des politiques. Principalement à la base de l'élaboration et du suivi des Plans Climats, ils sont aujourd'hui également utilisés pour d'autres documents de planification et d'orientation comme les schémas de cohérence territoriale (SCoT) et les plans de déplacements urbains (PDU) et dans l'évaluation de projets spécifiques, comme l'implantation d'une ligne de tramway. Bien que ces utilisations restent embryonnaires, elles montrent que les inventaires jouent un rôle important pour intégrer une dimension climatique dans l'ensemble des politiques locales.

¹⁷ Il est difficile de suivre les effets directs des multiples instruments politiques incitant à la réduction des émissions de GES, étant donné qu'ils ne constituent bien souvent qu'un seul des nombreux facteurs influençant l'intensité des GES de certaines activités ainsi que la fréquence de ces activités. S'il est possible de quantifier avec précision les réductions de GES, notamment de la réhabilitation de bâtiments publics en ayant recours à des données physiques, il est plus difficile d'évaluer l'impact des possibilités de financement pour le déploiement de technologies renouvelables sur l'ensemble du territoire.

Utilisation	Interne		Externe	
	Référence & Planification	Indicateur de progrès	Utilisation volontaire	Utilisation obligatoire
Qui				
Echelle	* Projet * Entité * Territoire			
Institutions engagées	* Dépendant du périmètre	* Dépendant du périmètre	* Dépendant du périmètre * Coordinateur externe volontaire	* Dépendant du périmètre * Coordinateur externe officiel
Acteurs engagés	* Dépendant de l'échelle			
Quoi				
Scope (WRI WBCSD)	Dépendant du programme (exogène). Toutefois, les normes internationales imposent bien souvent : * Scope 1 – Emissions directes * Scope 2 – Emissions indirectes (électricité, chaleur, vapeur) * Scope 3 – Autres émissions indirectes			
Secteurs	Dépendant du programme : <i>tous les secteurs du GIEC applicables peuvent être inclus</i>			
Comment				
Données d'activité	* Dépendant du périmètre		* Méthodologie recommandée	* Méthodologie officielle
Fréquence recommandée	* Dépendant du programme Toutefois, fréquence multi-annuelle recommandée	* Dépendant du programme Toutefois, fréquence annuelle recommandée	* Dépendant du programme	* Dépendant du programme
Exigences de données relatives	* Dépendant du programme (exogène) * Partiellement dépendant du périmètre			
Facteur d'émission	Des facteurs d'émissions locales Tier 3 requises pour certains secteurs			
Attribution de responsabilité	* Dépendant du programme * Choix normalement laissés à l'entité réalisant l'inventaire			
Reporting				
Reporting	* Désagrégé en fonction des besoins locaux * Ré-agrégé pour les catégories du GIEC		* Format de reporting commun (conforme GIEC)	* Format de reporting officiel (conforme GIEC)
Vérification	* Interne * Optionnelle		* Volontaire * Interne ou externe	* Vérification officielle externe (tiers)
*Les zones surlignées en gris sont des éléments établis principalement de façon exogène, représentant un choix politique ou normatif.				

Tableau 1 : Structure des inventaires d'échelle locale de GES en fonction du type d'utilisation

Utilisation externe : Les inventaires locaux d'émissions peuvent être utilisés de façon externe à des fins de *comparaison volontaire* ou de *reporting obligatoire* au

niveau régional, national, voire international. S'ils poursuivent des buts différents, les utilisations *volontaires* et *obligatoires* partagent plusieurs exigences méthodologiques communes : ils exigent tous deux un haut niveau d'homogénéité quant aux méthodes de réalisation des inventaires (périmètre, types d'émissions prises en compte - scopes, secteurs, quantification) et au cadrage de reporting des données.

- *Utilisations volontaires* : la comparaison des inventaires de GES au niveau local constitue un outil important de partage des informations qui crée des opportunités de collaboration et d'échange entre les autorités locales. Les inventaires homogènes permettent aux villes d'évaluer collectivement les progrès réalisés et de comparer leurs résultats et l'efficacité des réductions d'émissions en termes de coûts par rapport à d'autres zones urbaines.
- *Utilisations obligatoires* : qu'ils soient utilisés dans l'intérêt de la territorialisation des engagements nationaux en matière de réduction des GES ou bien qu'ils soient utilisés à des fins de financement, les inventaires locaux constituent pour les organismes nationaux et internationaux compétents un outil clé pour suivre les progrès de l'atténuation locale et la soutenir. Largement mis en œuvre, ils peuvent être utilisés pour comprendre dans quelle mesure les différentes politiques nationales influencent les émissions locales de GES, ils peuvent également cibler des actions d'atténuation prometteuses en termes de financement, et suivre les progrès réalisés. Enfin, les inventaires, et plus généralement les données précises sur les niveaux de référence des émissions et le potentiel d'atténuation, peuvent fournir un accès au financement des projets par la finance carbone ou bien par des programmes de subventions basés sur la performance.

Mécanismes de marché et inventaires de GES

Au niveau local, les mécanismes de marché ont un potentiel substantiel pour jouer un rôle clé dans le financement des réductions d'émissions de gaz à effet de serre. Les inventaires d'émissions sont un outil clé dans la mesure où, une fois mis en œuvre, ils sont un moyen d'accès aux mécanismes de la finance carbone.

Mécanisme de développement propre (MDP) & Mise en œuvre conjointe (MOC)

Par le biais des mécanismes de flexibilité basés sur les projets du protocole de Kyoto, les inventaires d'émissions sont des composants clés pour accéder aux financements pour des projets d'atténuation. Comme ce type de projets conduit à la compensation des émissions qui peut être utilisée contre le plafonnement des émissions, les inventaires sont essentiels pour évaluer la réduction des émissions

générée par les projets et s'assurer qu'elles ne nuisent pas à l'efficacité du plafonnement des émissions. La vérification par un tiers indépendant est nécessaire afin d'assurer la précision et la qualité des inventaires de GES utilisés par les mécanismes de projets.

Inventaires locaux pour un système de permis d'émissions : Le cas de Tokyo

Bien que les inventaires soient traditionnellement établis au niveau national ou régional, un mouvement vers un système de permis d'émissions au niveau local ou urbain dans les agglomérations majeures pourrait conduire à des inventaires d'émissions de GES mis en place localement en vue d'un marché de permis d'émissions. En 2009, le gouvernement métropolitain de Tokyo a annoncé des plans pour mettre en place un système de plafonnage des émissions à l'échelle de l'agglomération. Conçu pour identifier les émissions de GES des grands bâtiments commerciaux, secteur dont les émissions sont les plus volumineuses et dont la progression est la plus rapide dans cette zone de 13 millions d'habitants, l'objectif du système est de réduire de 25 % les émissions en 2020 par rapport à 2000. Pour fonctionner, le système devra obtenir, des propriétaires des grands bâtiments commerciaux, des informations sur les émissions passées afin de pouvoir mettre en place un plafonnement inférieur de 6 % par rapport à l'année de référence. Des échanges de permis d'émissions auront lieu entre les propriétaires concernés. Avec une date de démarrage prévue pour le 1^{er} avril 2010, ce programme urbain de marchés de permis d'émissions est le premier du genre.¹⁸

Périmètre des inventaires de GES

Les autorités locales disposent de trois options principales pour atteindre leurs obligations en matière de réduction des émissions : réduire les émissions par la *mise en œuvre de projets et actions spécifiques au sein d'un service* ; réduire les *émissions de toutes les opérations publiques locales* ; ou bien réduire les émissions par des politiques visant *l'ensemble de la région administrative/du territoire* de leur ressort.

Les inventaires de GES sont des outils de comptabilisation utilisés pour mieux comprendre les émissions liées à un ensemble de sources d'émissions, d'activités et de politiques. Pour les autorités locales, ces inventaires peuvent regrouper des sources d'émissions à différents périmètres qui correspondent aux trois types d'action d'atténuation décrites ci-dessus :

¹⁸ Tokyo Metropolitan Government (2009) Présentation au Tokyo Workshop 2009 sur le thème Urban Cap & Trade Towards a Low Carbon Metropolis, 3/9/2009.

- **Projet** – inclut les émissions provenant de projets spécifiques de réduction des émissions ;
- **Entité** – inclut les émissions d’une autorité locale ou régionale, en tant qu’entité publique individuelle, autrement dit, les émissions uniquement liées à ses opérations¹⁹ ;
- **Territoire** – inclut les émissions provenant de l’ensemble des activités et des entités (publiques et privées) situées ou fonctionnant sur un périmètre géographique donné.

Un changement de périmètre peut influencer de façon significative certains éléments structuraux, notamment la série d’acteurs et d’institutions concernés ou encore le mode de quantification des données sur l’activité. Alors que les périmètres sont susceptibles d’avoir une influence sur les éléments inclus (scopes et secteurs), l’attribution de responsabilité et l’exhaustivité, décrites ci-dessous, tiennent davantage à des choix politiques exogènes. Le *tableau 2* décrit comment le périmètre de déploiement d’un inventaire influence sa structure et les méthodes de quantification *associées*.

Passer d’un périmètre à l’autre permet de regrouper progressivement un nombre croissant de sources d’émission. Cela signifie implicitement qu’un plus large éventail d’institutions et d’acteurs sont impliqués dans le processus. Bien que les périmètres couverts par un inventaire soient normalement établis de manière exogène dans le cadre d’un programme spécifique, des tendances générales dans l’inclusion de secteurs peuvent être dues aux compétences des autorités locales. Les inventaires effectués dans les zones urbanisées seront ainsi probablement dominés par des sous-secteurs de l’énergie avec une inclusion variant à plus ou moins l’ensemble des secteurs (procédés industriels et l’utilisation des terres, changement d’affectation des terres et foresterie (LULUCF)) le cas échéant. Peut-être l’impact le plus important de l’évolution du périmètre d’inventaire est la création de contraintes de données dues au regroupement d’un éventail toujours plus large des sources d’émission. Bien que le calcul des émissions de GES doive idéalement s’appuyer sur des données physiques de chaque source, les coûts résultant de cette approche peuvent réduire les avantages compte tenu des contraintes budgétaires et de temps.

¹⁹ Cela peut également inclure les émissions des sous-traitants ou des opérations en concession sous contrôle direct ou financier d’une autorité locale, par exemple les émissions liées au transport public. Toutefois, il convient de parvenir à un consensus quant au mode d’attribution des responsabilités pour ces émissions.

Périmètre	Projet (Activité)	Opérations publiques (Entité)	Territoire
Pourquoi			
Objectif	Quantifier les émissions totales d'un projet d'atténuation donné	Quantifier les émissions totales des opérations publiques	Quantifier les émissions totales d'un territoire donné
Qui			
Institutions publiques engagées	* Autorités locales	* Autorités locales	* Autorités locales * Autorités régionales (le cas échéant) * Autorités nationales (le cas échéant)
Acteurs engagés	* Service engagé dans le projet d'atténuation * Acteurs privés concernés	* Fonctionnaires * Sous-traitants privés	* Fonctionnaires * Sous-traitants privés * Tous les habitants et entreprises
Quoi			
Secteurs	* Dépendant du programme, mais la gamme de secteurs inclus tend à croître avec l'augmentation du périmètre		
Comment			
Exigence de données relatives**	Faibles à modérées	Modérées à intenses	Intenses
Facteurs d'émissions	Facteurs d'émissions locaux Tier 3 requis pour certains secteurs – les facteurs d'émissions adoptent une forme plus agrégée avec l'augmentation du périmètre d'inventaire.		
Données d'activités	* Données physiques	* Données physiques * Données modélisées limitées	* Données physiques * Données modélisées * Données déduites des statistiques nationales
<p>* Les zones surlignées en gris sont des éléments établis principalement de façon exogène, représentant un choix politique ou normatif.</p> <p>** Les exigences de données relatives sont estimées en fonction du nombre de sources incluses dans l'échelle de l'inventaire. Les exigences spécifiques d'un programme peuvent, toutefois, accroître cette estimation de façon substantielle.</p>			

Tableau 2 : Structure de l'inventaire et quantification par périmètre

CONCLUSIONS ET IMPLICATIONS

Pour être considérées comme des acteurs crédibles, les autorités locales doivent pouvoir démontrer qu'elles sont en mesure de prendre et de tenir des engagements crédibles, transparents et mesurables en matière de réduction des émissions de GES. À cet égard, il est nécessaire qu'elles puissent démontrer collectivement que leurs

efforts conjoints conduisent à des réductions de GES réelles et significatives. Il est donc nécessaire de pouvoir conduire des inventaires détaillés, transparents et comparables pour satisfaire aux exigences posées par les périmètres de déploiement ainsi que par les utilisations internes et externes. L'action de réduction de GES unilatérale locale a des avantages, mais offre peu de possibilités d'exploiter le potentiel des villes comme des acteurs politiques puissants, parce que, sans harmonisation des méthodes d'inventaire de leurs actions, celles-ci ont peu de chances d'être jugées crédibles au niveau national ou international. Ainsi, l'utilité des inventaires appliqués uniquement à une utilisation interne se trouve rapidement diminuée.

Dans le cadre du développement d'une architecture d'inventaire unifiée, on distingue deux arbitrages :

- Le premier arbitrage intervient en évoluant sur les *échelles* d'inventaires, sous la forme d'un arbitrage entre coût et exhaustivité. Avec la multiplication des sources d'émission, des institutions et des acteurs, on assiste à une augmentation de l'exigence de la quantité de données et, de fait, dans la plupart des cas, à une augmentation des coûts liés à la collecte et au traitement de ces données.
- Le deuxième arbitrage possible est lié au mode d'utilisation d'un inventaire et confronte action et comparabilité. Ces deux utilisations ne sont pas contradictoires, mais un arbitrage est induit et produit par un cadrage qui les met en conflit. Souvent, le souci de produire des inventaires permettant l'*action* (répondant ainsi aux besoins d'utilisation et de politique spécifiques) est mis en opposition par rapport au besoin d'*homogénéité* des inventaires en vue d'utilisations bien souvent externes. Il conviendra de trouver le moyen de répondre en même temps aux exigences des utilisations internes et externes ainsi qu'à l'action interne et à la comparabilité externe ; cela imposera une analyse précise du mode d'utilisation spécifique des inventaires dans les processus politiques.

Variables normatives exogènes

Attribution de la responsabilité

Scopes

Secteurs + Gaz

Variables techniques

Utilisation interne/externe

Institutions impliquées

Fréquence

« Reporting » Vérification
<i>Périmètre de déploiement</i>
Acteurs
Institutions
Exigences de données
Estimation de données sur l'activité

Tableau 3 : Variables influençant la structure d'un inventaire

Variables Structurantes des Inventaires de GHG

Présentées dans le Tableau 3, les variables qui influencent la structure de l'inventaire pourraient être divisées en deux catégories : celles qui sont dites « normatives » et souvent établies de façon exogène, et celles qui sont dites « techniques » et directement liées à l'échelle de déploiement ou bien à une utilisation soit interne, soit externe.

Les choix en matière de politique normative jouent un rôle capital dans le développement des inventaires, car ils constituent bien souvent des éléments clés pour la définition *d'attribution de responsabilité pour les émissions*, des *secteurs d'émissions* et des *scopes d'émissions* à prendre en considération ainsi que pour les méthodes d'attribution de responsabilité. Les choix normatifs concernant l'échelle et, à terme, l'utilisation des programmes d'inventaires de GES se trouvent au cœur de la structure et de l'architecture de ces programmes.

Au vu de l'importance des facteurs normatifs exogènes qui influencent la structure des inventaires d'émissions à l'échelle locale, il semble clair que les organisations et les gouvernements nationaux et internationaux doivent parvenir à un consensus sur les éléments normatifs. Des messages clairs de ces acteurs concernant les Scopes, l'attribution, les secteurs et les gaz contribueront largement à homogénéiser les approches méthodologiques et à améliorer la compatibilité des applications. Par ailleurs, étant donné le coût et, bien souvent, le bénéfice non immédiat de la production d'inventaires précis et comparables, les gouvernements nationaux doivent fournir les incitations, les aides techniques et éventuellement financières, nécessaires aux autorités locales pour les réaliser.

Quelle contribution du progrès technique à la réduction des émissions du secteur automobile ? L'exemple du petit véhicule urbain

Paolo Avner
Philippe Menanteau

RESUME

Le transport routier de passagers est largement dominé par des véhicules individuels dont on peut faire le constat du surdimensionnement pour la majorité des usages au quotidien. Or, l'ensemble des caractéristiques de poids, de taille et de puissance des automobiles, détermine à la fois le coût et la consommation de carburant des véhicules et contribue à forger une image « type » de la voiture comme objet en soi plutôt que comme mode de déplacement.

Dans ce contexte, se pose la question de l'émergence de nouvelles technologies et de nouveaux services moins émetteurs de Gaz à effet de serre pour répondre à une demande de mobilité privée et motorisée. Le Petit Véhicule Urbain (PVU) peut s'appréhender comme une nouvelle technologie visant à rendre un service bien déterminé, la mobilité urbaine.

Le travail mené, à l'aide en particulier du dispositif de modélisation POLES, vise à quantifier les possibilités de pénétration du PVU comme alternative au Véhicule Multifonction classique sur le marché de la mobilité urbaine jusqu'en 2050 et à estimer les conséquences de son adoption en termes de volume d'émission de gaz à effet de serre.

INTRODUCTION

Dans une perspective de réduction radicale des émissions de gaz à effet de serre, la question des transports est centrale. Sur la période 1990-2007, la hiérarchie des secteurs responsables des principales émissions de GES s'est très peu modifiée, le secteur des transports (terrestres et aérien) restant de loin celui qui présente l'augmentation des émissions la plus forte à la fois en termes absolus et relatifs (EEA, 2009). En 2007, il représentait 24 % de l'ensemble des émissions de GES au niveau européen (EEA, 2009)²⁰ et sa part continue de croître.

Deux paramètres influent directement sur l'évolution des émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports : la mobilité des biens ou des personnes et les niveaux d'émission des moyens de transport utilisés. Le besoin de mobilité pourrait éventuellement, dans certains contextes, être encadré, mais il est encore considéré comme un besoin fondamental qui ne peut être contraint. Les politiques de limitation des émissions dans le secteur des transports se focalisent donc pour l'instant sur d'autres leviers d'action, les transferts modaux et la diminution des émissions unitaires.

Le transport routier de passagers est aujourd'hui largement dominé par des véhicules individuels qui présentent un très net surdimensionnement pour la majorité des usages au quotidien. Ainsi, l'essentiel des trajets journaliers s'effectue sur des distances courtes²¹ avec des taux d'occupation très faibles et mobilise pour cela des véhicules qui peuvent déplacer 4 à 5 personnes et bénéficient d'une autonomie de 800 à 1000 km. Les caractéristiques des véhicules actuels, en termes de taille, de poids, de puissance ne correspondent donc pas à leur utilisation effective mais déterminent pourtant largement à la fois leur coût et leur consommation de carburant.

Le surdimensionnement de l'automobile actuelle pose la question de l'émergence de nouvelles technologies et de nouveaux services pour répondre à une demande de mobilité privée et motorisée. Le Petit Véhicule Urbain (PVU) peut s'appréhender comme une nouvelle technologie visant à rendre un service bien déterminé, la mobilité urbaine. Moins consommatrice d'énergie et moins émettrice de gaz à effet de serre, cette option pourrait apporter une contribution à la lutte contre le changement climatique si elle était massivement adoptée par les citoyens.

²⁰ European Environmental Agency, 2008 "Climate for a transport change. TERM 2008: Indicators tracking transport and environment in the European Union" EEA Report n°03/2009

²¹ 80 % des trajets journaliers en Europe font moins de 60 km - Renault, 2009, Présentation lors d'une journée du Pôle de compétitivité Tenerrdis, le 1^{er} Octobre 2009 à Grenoble.

De manière complémentaire à cette innovation sur la nature des véhicules, il y a probablement beaucoup à attendre de ruptures sur les motorisations des automobiles. Une réflexion prospective a été initiée au sein de l'Ademe sur les évolutions possibles du couple « véhicule-carburant » à l'horizon 2050 et de leur apport à la réalisation du facteur 4 (Ademe-EpE, 2006)²². Cette étude a permis d'identifier les principales innovations technologiques attendues dans le domaine des véhicules individuels.

Le travail mené, par la suite, au LEPII, a consisté à quantifier les possibilités de pénétration de différentes technologies de motorisation et du PVU comme alternative au Véhicule Multi-fonction (VMF) thermique classique sur le marché de la mobilité urbaine jusqu'en 2050 et à estimer les conséquences de son adoption en termes de volume d'émission de gaz à effet de serre.

Dans cet article, la première partie rappelle les objectifs de l'étude menée au LEPII en lien avec la feuille de route de l'Ademe évoquée plus haut sur les couples « véhicules-carburants ». Nous présentons ensuite rapidement les modifications qui ont été apportées au modèle POLES pour lui permettre de simuler la diffusion de ce nouveau type de véhicule. Enfin, nous détaillons les principaux résultats sur la mobilité et les consommations d'énergie pour différentes hypothèses de politique climatique et de progrès technique dans le secteur des transports.

OBJECTIFS DE L'ETUDE

La feuille de route technologique réalisée par l'ADEME en partenariat avec EpE (Entreprise pour l'Environnement) vise à envisager les ruptures technologiques susceptibles de se produire dans le futur afin de construire des visions partagées de l'avenir. Ce souci de dégager une vision commune est d'autant plus nécessaire que les technologies alternatives n'ont pas encore atteint le stade de la maturité et requièrent par conséquent davantage d'investissements lourds dans un contexte où les fonds disponibles pour la recherche-développement sont limités.

La feuille de route technologique de l'Ademe tente de dresser un état des lieux des bifurcations et innovations radicales susceptibles de modifier le transport automobile du futur. Cette cartographie des avenir possibles doit permettre aux décideurs et aux constructeurs automobiles de définir des priorités dans des domaines où la recherche, l'action politique et les investissements demeurent nécessaires.

²² Ademe – EpE, 2006, Feuille de route sur le couple véhicules particuliers-carburants à l'horizon 2050, Paris

Cet exercice a abouti à la définition de deux catégories d'évolutions technologiques (au sens large) susceptibles d'influencer fortement la nature et les performances des véhicules dans le long terme :

- Les innovations technologiques (au sens strict) : type de motorisation, nature des carburants, méthode de conception des véhicules (allègement des véhicules à travers l'intégration de matériaux composites, par exemple). Cette catégorie d'innovation ne suppose pas de modification majeure ni des usages, ni de l'image de l'automobile.
- Les innovations de « produit » ou « organisationnelles »²³ : il s'agit principalement de segmenter le parc de véhicules en fonction de la nature des déplacements (urbains vs non urbains). A partir du constat du surdimensionnement du véhicule multi-fonction pour la majorité des usages, cette deuxième catégorie d'innovation suppose le développement d'un véhicule moins consommateur spécifiquement dédié à la mobilité urbaine.

L'objectif de l'étude complémentaire réalisée au LEPII est de quantifier les potentialités de pénétration des innovations technologiques ou de « produits » identifiées dans la feuille de route sur le marché de la mobilité, puis, d'en évaluer l'impact en termes de consommations énergétiques et d'émissions de GES.

La représentation d'un PVU au sein du modèle POLES requiert cependant des modifications structurelles afin d'être en mesure de désagréger les déplacements suivant la zone de résidence des populations. Cette étape a nécessité l'introduction de la dimension urbaine dans le modèle.

MODELISER LA DIMENSION URBAINE DANS LES TRANSPORTS

Le modèle POLES développé au LEPII fournit des projections détaillées jusqu'en 2050 pour les différentes régions/pays du monde pour lesquelles il simule la demande et l'offre d'énergie, ainsi que les prix des sources d'énergies primaires sur les marchés internationaux.

Ce dispositif fournit un cadre cohérent pour l'étude des dynamiques de l'énergie et de l'environnement. Il prend en compte les contraintes en termes de ressources pour le pétrole et le gaz naturel et permet le calcul des émissions liées à la

²³ Dans la feuille de route « véhicules-carburants », le Petit Véhicule Urbain est considéré comme une innovation « organisationnelle ». Mais la compréhension du PVU des auteurs de ce document va au-delà de la nôtre dans cet article puisqu'elle suppose le développement futur de l'auto-partage et de la multipropriété. Comme le concept du PVU que nous avons retenu est plus restrictif, nous l'appellerons « innovation de produit ».

combustion d'énergies fossiles. Il permet de simuler un certain nombre de scénarios de contraintes d'émissions et d'identifier les conséquences de l'introduction d'une taxe carbone ou d'un marché de permis d'émissions.

Le modèle utilise une base de données détaillée décrivant les technologies de production d'énergie et certaines technologies de demande telles que les véhicules automobiles par exemple. Ce dispositif permet une représentation plus détaillée du système énergétique et la simulation de politiques d'innovation au travers de l'apparition de nouvelles technologies ou de l'amélioration des performances des technologies existantes.

Un modèle énergétique global... mais limité pour la représentation des dynamiques de la mobilité urbaine

Ce dispositif de modélisation possède toutefois un certain nombre de limites dans la représentation du secteur transport pour laquelle il ne peut prétendre à la finesse et au détail d'un modèle spécialisé. La simulation des évolutions du secteur s'appuie ainsi principalement sur des fondamentaux économiques tels que les prix des carburants et la croissance économique. Le modèle n'étant pas spatialisé, des variables telles que la motorisation individuelle ou la demande adressée aux transports collectifs, par exemple, présentent des dynamiques très largement indépendantes de la forme urbaine et de son évolution.

Les transformations apportées au modèle visent donc un double objectif. Il s'agit à la fois d'être en mesure de représenter l'introduction d'un nouveau type de véhicule (le petit véhicule urbain) dont la diffusion est limitée à l'espace urbain et au-delà, de proposer des dynamiques de mobilité individuelle contrastées entre l'urbain centre et la périphérie. Sur le long terme, et pour les zones urbaines en croissance rapide, la prise en compte d'évolutions différenciées des formes urbaines (ville étalée versus ville compacte, par exemple) pourraient conduire à des profils de consommation énergétique très différents dans le domaine des transports. Cette analyse ne fait toutefois pas partie du travail réalisé ici.

L'introduction d'une variable densité urbaine dans POLES

La demande de mobilité urbaine et sa répartition par mode de transport entretiennent des liens forts avec un certain nombre de déterminants parmi lesquels l'étalement urbain est l'un des plus importants.

Toutes choses étant égales par ailleurs, la densité urbaine considérée comme un proxy utile de l'étalement urbain influe sur la demande de mobilité et la

consommation d'énergie des transports²⁴. Ainsi, plus elle est élevée, plus les déplacements sont courts et plus il est aisé de mailler efficacement le territoire par des infrastructures de transports en commun et, inversement, plus elle est faible, plus la motorisation individuelle devient nécessaire.

La variable densité ne peut prétendre à décrire les différentes formes urbaines ou à expliquer complètement les dynamiques de mobilité. D'autres études ont ainsi enrichi la compréhension des liens entre mobilité et forme urbaine : la mixité des usages²⁵ et le réseau de transports en commun²⁶ influencent également les choix modaux, la fréquence des déplacements et leurs distances.

Malgré tout, la densité urbaine présente le double avantage d'entretenir un lien robuste avec la mobilité en ville et d'être quantifiable. Dans le modèle, la démarche est enrichie par l'introduction du gradient de densité qui mesure la rapidité de décroissance de la densité en fonction de la distance au centre-ville. En combinant ces deux variables, il devient possible de rendre compte des disparités de distribution de population au sein d'une ville. On distingue ainsi de façon simple deux zones au sein des agglomérations :

- centre urbain : zone à densité de population élevée qui correspond en général en Europe aux centres-villes « historiques » ;
- péri-urbain : zone de densité moyenne plus faible caractérisée par une alternance de constructions denses (bâtiments collectifs) et diffuses (pavillons et jardins).

Des relations statistiques entre densité d'habitat et mode et volume de déplacement sont établies à partir de la base de données « Millenium Cities for Sustainable Development » (UITP, 2001)²⁷ qui permettent de caractériser les mobilités des individus suivant leur zone de résidence (urbain-centre, urbain périphérique et extra-urbain). La mobilité urbaine – et notamment la mobilité automobile – étant quantifiable, il devient alors possible de simuler l'introduction d'un véhicule exclusivement dédié à cet usage dans le modèle.

²⁴ P. Newman, J. Kenworthy, *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*, Washington DC, Island Press, (1998).

²⁵ Cervero, R., « Mix land-uses and commuting: Evidence from the American housing survey », *Transportation Research Part A.*, vol 30, n°5, (1996), 361-377

²⁶ Clark, C., « Transport: Maker or breaker of cities? », *Town Planning Review*, vol 28, (1957), 237-250

²⁷ Union Internationale du Transport Public – UITP, 2001. "Millenium Cities Database for sustainable transport"

LES EVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES FUTURES

Les innovations qui sont représentées dans cette étude concernent à la fois la nature du véhicule (VMF ou PVU) et le groupe moto-propulseur. Le second type d'innovation sera présenté après avoir décrit de manière générique les caractéristiques d'un Petit Véhicule Urbain.

Nous avons défini un petit véhicule urbain préservant l'essentiel des caractéristiques d'un véhicule conventionnel (motorisé, quatre roues, couvert, etc.) mais plus petit, moins rapide, moins lourd, moins autonome (pour les véhicules électrique ou hydrogène) et donc moins consommateur d'énergie. Cette vision du petit véhicule urbain peut sembler un peu conservatrice par rapport à de nouveaux types de véhicules (trois roues, vélos ou scooters électriques, etc.) mais elle est conditionnée par le fonctionnement du modèle qui opère des choix sur la base des coûts d'usage entre des technologies comparables. De même les conditions d'utilisation des petits véhicules urbains ont été calquées sur celles des véhicules conventionnels mais on pourrait imaginer dans un second exercice modifier les taux d'occupation ou le kilométrage annuel, par exemple, pour refléter des innovations organisationnelles de type auto-partage ou auto-lib.

PVU automobile					
Nb places	Vitesse max	Puissance	Poids	Consommation	Autonomie
4	90 – 100 km/h	20 kW	500 kg	40 % de la consommation d'un VMF	De 150 à 750 km

Tableau 1 : Caractéristiques générales d'un Petit Véhicule Urbain

Les scénarios d'évolution technologique sur les motorisations pour le secteur des transports simulés dans cette étude avec le dispositif de modélisation POLES reprennent deux des trois grandes options décrites dans la feuille de route Ademe-EpE sur la modification du couple véhicules particuliers-carburants. Les principales options technologiques considérées sont les suivantes:

- Une amélioration des performances technico-économiques des dispositifs de stockage électrique, bénéficiant à la fois aux véhicules hybrides rechargeables et aux véhicules électriques
- Une rupture technologique sur les piles à combustible permettant une diffusion rapide et massive de véhicules équipés de piles à combustible et alimentés à l'hydrogène

Dans la feuille de route ADEME-EPE, l'amélioration de l'efficacité énergétiques des moteurs à combustion interne constituait une option technologique majeure. Cette option a été étudiée dans une première phase de notre travail mais n'est pas reprise ici. La raison est qu'une grande partie des gains attendus dans le scénario « efficacité énergétique » proviennent d'un allègement des véhicules multi-fonction classiques ce qui est précisément l'objectif poursuivi par le PVU²⁸.

L'introduction d'un PVU et les évolutions envisageables des performances des propulsions alternatives définissent quatre scénarios contrastés:

- **Référence (REF):** il ne s'agit pas du scénario le plus probable, mais d'un scénario de type baseline qui sert de référence pour évaluer l'importance des transformations associées aux ruptures technologiques envisagées dans les autres scénarios. Dans ce scénario, on fait l'hypothèse d'une progression limitée des performances de la technologie conventionnelle et d'une stagnation des évolutions sur les technologies électriques et hydrogène. Il n'y a pas de pénétration du petit véhicule urbain ;
- **Introduction d'un Petit Véhicule Urbain (PVU):** dans ce scénario, on postule le développement de petits véhicules urbains pour le marché de la mobilité en ville avec des consommations inférieures aux 4l/100 km dès 2010. On suppose que les performances des véhicules électriques et hydrogène progressent peu et donc que la grande majorité des véhicules restent équipés de moteurs à combustion interne ;
- **Electricité et hybrides rechargeables (ELE):** ce scénario de rupture technologique sur les dispositifs de stockage d'électricité se traduit par une baisse des coûts des systèmes embarqués de stockage, entre 2005 et 2050, de 85 %. L'importance de la baisse des coûts attendue doit conduire à une diffusion massive des véhicules électriques et hybrides (objectif de 50 à 60 % de parts de marché à l'horizon 2050) ;
- **Hydrogène et piles à combustibles (PAC) :** ce scénario de rupture technologique se traduit par des baisses de coût très importantes sur les piles à combustible qui atteignent 50 \$/kW en 2050. Le stockage hydrogène bénéficie des mêmes hypothèses très favorables qui permettent d'envisager qu'au-delà de 2025-30 les véhicules PAC deviennent compétitifs.

²⁸ Pour autant, les deux scénarios ne sont pas strictement comparables, les performances du moteur à combustion interne n'évoluant pas dans le scénario PVU de façon aussi favorable que dans le scénario efficacité énergétique.

Le tableau suivant permet d'illustrer les principales caractéristiques et les coûts des différents véhicules en 2010 et 2050 tels que renseignés dans le modèle :

		Consommations (l/100km)		Stockage électrique (€/kWh)		Pile à combustible (€/kW)		Prix de vente (€)	
		2 010	2 050	2 010	2 050	2 010	2 050	2 010	2 050
Conventionnel	VMF	6,6	5,6	-	-	-	-	16 400	16 400
	PVU	3,9	3,4	-	-	-	-	7 300	7 300
Hybride	VMF	3,6	2,5	500	100	-	-	23 000	18 400
Electrique	PVU	1,1	0,9	500	100	-	-	19 000	9 800
Hydrogène	VMF	2,7	1,8	500	500	300	50	54 000	23 000
	PVU	1,6	1,1	500	500	660	110	28 000	11 000

Tableau 2 : Caractéristiques et coûts des différents véhicules²⁹

Les ruptures technologiques rapides ne se produisent pas spontanément mais sous l'effet de contraintes. Dans les scénarios technologiques, nous avons considéré qu'un signal prix crédible sur le carbone, croissant régulièrement dans le temps, était une condition nécessaire au développement des technologies alternatives. La contrainte carbone qui dépasse 500 €/tCO2 en fin de période se traduit par un doublement des prix des carburants. Elle incite les industriels à investir dans le développement de technologies moins émettrices et les acheteurs à se tourner vers des automobiles moins coûteuses au kilomètre.

RESULTATS

Les résultats présentés ci-après sont à considérer comme une première illustration du comportement du modèle POLES modifié pour tenter de quantifier ce que pourrait être l'impact sur les consommations d'énergie et les émissions de CO2 de l'introduction d'un petit véhicule urbain et de la diffusion de motorisations alternatives. Ce travail exploratoire n'a pas la prétention d'aller au bout des possibilités offertes, notamment en ce qui concerne l'impact de la forme urbaine sur les dynamiques de mobilité.

Le scénario de référence

Dans le modèle, la motorisation individuelle progresse en fonction du revenu par habitant selon une courbe logistique. Il s'agit d'un processus de diffusion non linéaire, lent dans un premier temps, puis beaucoup plus rapide, lorsque les besoins

²⁹ La caractérisation des véhicules et de leurs coûts ainsi que de ceux de leurs composants a fait l'objet d'une recherche bibliographique approfondie. Parmi les sources utilisées, on peut citer notamment : a/ JRC, "Well to wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context", Tank to Wheel Report version 3, (2008) ; b/ M.A. Weiss, J.B. Heywood, E.M. Drake et al., "On the road in 2020", Energy Laboratory Report # MIT EL 00-003, (2000) ; c/ A. Schäfer, J.B. Heywood, H.D. Jacoby et al., *Transportation in a climate constrained world*, (2009), MIT Press, Cambridge, Massachusetts

primaires (logement, nourriture...) ont pu être satisfaits. Enfin, lorsqu'on s'approche des niveaux de saturation en véhicules d'une économie, on constate de nouveau un ralentissement marqué.

La figure 1 présente les trajectoires d'évolution de la motorisation individuelle dans plusieurs pays en fonction de la progression de la richesse individuelle telles que calculées par le modèle. On retrouve un résultat déjà observé par A. Grübler de taux de saturation atteints plus tôt mais à des niveaux inférieurs par les pays ayant adopté la technologie (ici l'automobile) plus tardivement (Grübler, 1999)³⁰. Dans cette représentation, la Chine présente un taux de motorisation qui augmente rapidement mais qui sature avant d'atteindre le niveau d'équipement de l'Europe des 27 et *a fortiori* celui des Etats-Unis.

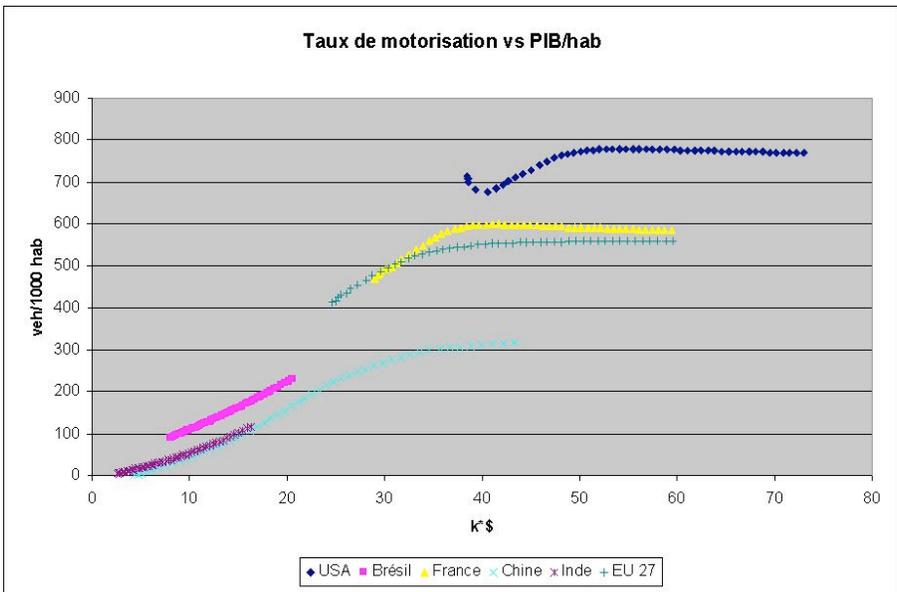


Figure 1 : Evolution des taux de motorisation en fonction du revenu pour diverses économies

Les modifications apportées au modèle permettent de différencier les dynamiques d'évolution du taux de motorisation suivant trois zones : urbain-centre, urbain-périphérie et extra-urbain. La figure 2 illustre l'impact des modifications apportées au modèle avec l'introduction de zones urbaines différenciées. Si la mobilité moyenne en

³⁰ A. Grübler, *The rise and fall of infrastructures, Dynamics of evolution and technological change in transport*, (1999), IIASA, Luxembourg.

EU 27 tend à évoluer comme le taux d'équipement (figure 1) avec un plateau atteint vers 2020-25 puis une décroissance modérée, il en va différemment de la mobilité par zone. Dans l'urbain centre, la mobilité par habitant est plus faible qu'ailleurs et elle progresse peu sur la période ; elle est en revanche plus élevée en périphérie où elle continue à progresser jusqu'en 2025-30. Elle continue à croître également en zone de très faible densité (extra-urbain) mais cette évolution a un faible impact sur la mobilité totale en raison de la faible importance relative des populations extra-urbaines (au moins dans les pays OCDE).

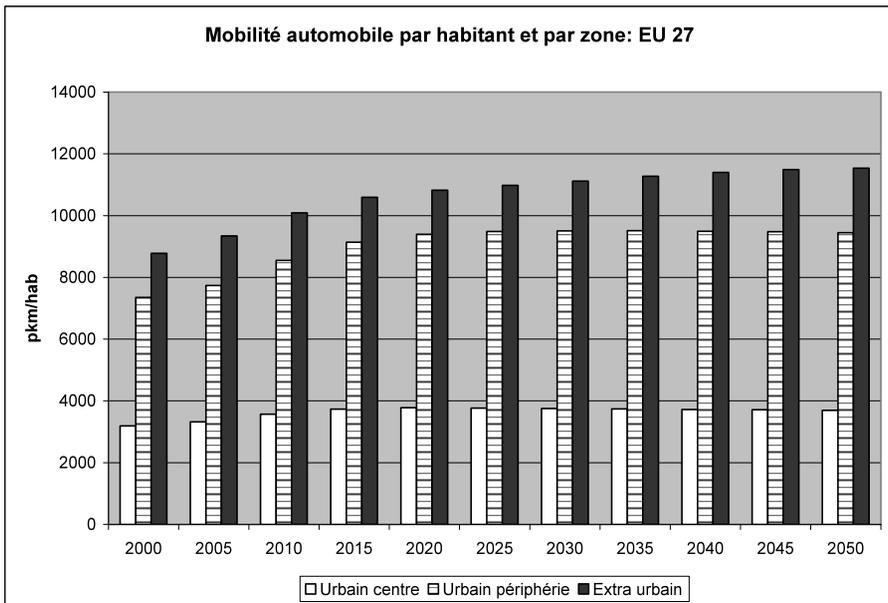


Figure 2 : Mobilité automobile par habitant et par zone infranationale dans l'Europe des 27

La consommation correspondante d'énergie des automobiles est représentée sur la figure 3. Le ralentissement de la croissance économique et la baisse de la population se traduisent par une stabilisation de la demande de mobilité (véhicule.km) qui, conjuguée à une amélioration des performances des véhicules neufs par rapport à la moyenne du parc, induit un recul de la consommation. La consommation d'énergie se stabilise autour de 200 Mtep en 2020 puis diminue lentement mais de façon régulière, pour revenir à un niveau proche de celui de 2000 (environ 165 Mtep).

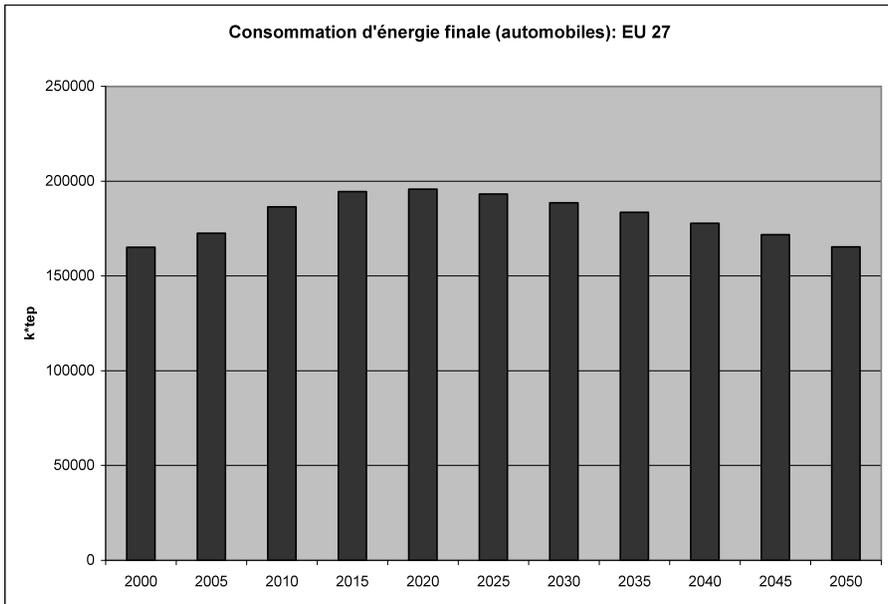


Figure 3 : Consommation d'énergie finale des automobiles (EU 27) dans une situation de référence

Pour les pays de l'OCDE, on observe également un fort ralentissement de la croissance avec une stabilisation de la consommation autour de 2025-30 mais la décroissance est beaucoup moins marquée. Le déclin relatif des consommations d'énergie observé dans les pays OCDE, même en l'absence de politiques climatiques très marquées, pourrait nourrir un certain optimisme. Celui-ci doit être tempéré fortement au regard de la croissance importante des consommations d'énergie finale dans les pays non OCDE (Figure 4).

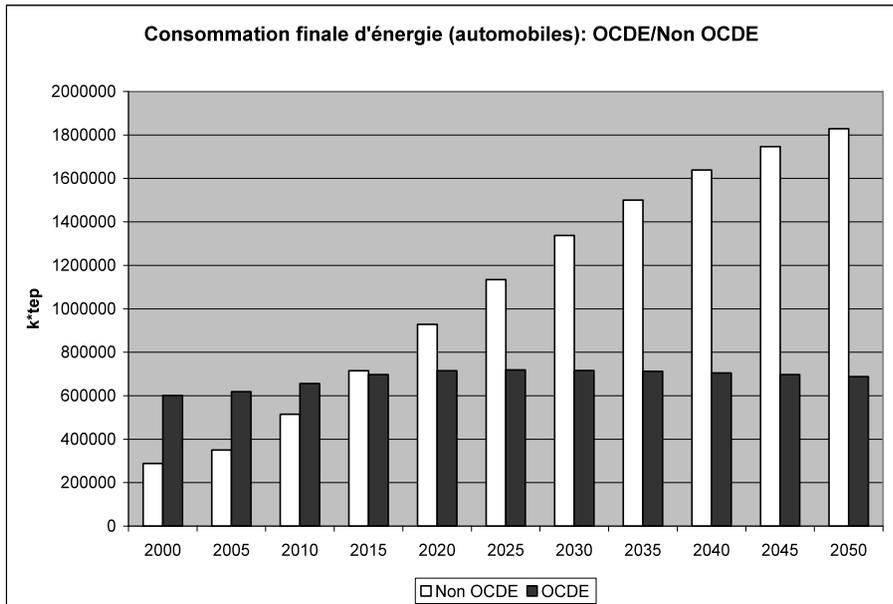


Figure 4 : Comparaison des évolutions de consommations d'énergie finale en OCDE et dans les pays non OCDE dans un scénario de référence

Scénarios technologiques

Nous faisons l'hypothèse que des ruptures technologiques dans le secteur des transports ne peuvent intervenir que dans le cadre de politiques climatiques fortement contraignantes qui contribuent à stimuler la recherche pour des véhicules moins consommateurs ou des alternatives aux carburants fossiles. Ainsi les scénarios technologiques retenus supposent tous une valeur croissante du carbone qui atteint en 2050 un coût supérieur à 500 €/tCO₂.

Pour ne pas alourdir la présentation, nous avons choisi de centrer cet article sur les seuls résultats des scénarios PVU et ELE. Comme le scénario ELE, le scénario PAC conduit à une réduction des consommations finales d'énergie des automobiles mais dans une proportion moindre. Les véhicules PAC restent plus longtemps moins compétitifs que les véhicules conventionnels. La diffusion est donc moins marquée que celle des véhicules électriques et hybrides en fin de période et l'impact sur les consommations d'énergie et les émissions de CO₂ est plus faible.

La figure suivante permet d'illustrer les profils de pénétration d'un Petit Véhicule Urbain thermique sur le marché de la mobilité en zone urbaine centrale. On observe que sa pénétration est rapide puisque ses parts de marché atteignent respectivement 45 et 48 % en EU 27 et dans les pays OCDE en 2050. Sa pénétration est à l'origine plus rapide et plus importante dans les pays non-OCDE (faible stock initial de

véhicules, moindres contraintes au développement du PVU³¹) mais elle ralentit sensiblement à partir de 2035.

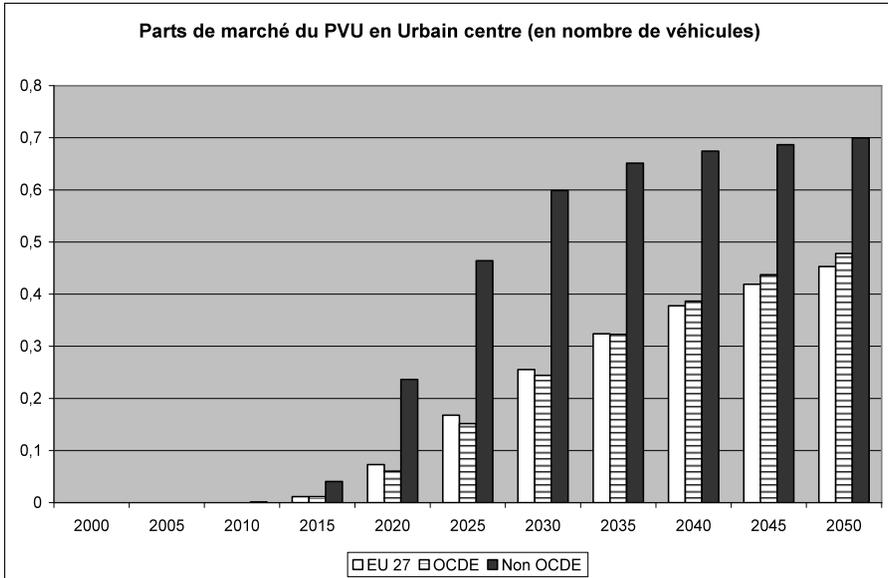


Figure 5 : Evolution des parts de marché du Petit Véhicule Urbain (en nombre de véhicules) en zone Urbain-centre (scénario PVU)

La mise sur le marché de technologies alternatives dans le scénario électrique (PVU électriques et thermiques et VMF hybride), modifie de manière importante la composition du parc de véhicules en 2050. En fin de période, le véhicule thermique classique n'occupe plus que 50 % de parts de marché sur l'ensemble des zones. Le développement s'effectue d'abord sur le véhicule hybride puis progressivement sur le véhicule électrique en zone urbaine. Ils atteignent respectivement 32 et 20 % de parts de marché en 2050. Dans ce scénario électrique, les véhicules hydrogènes n'apparaissent pas car on fait l'hypothèse que le progrès technique est centré sur les seuls véhicules électriques et hybrides.

³¹ Dans les pays OCDE on considère qu'une part de la mobilité urbaine correspond à des déplacements de loisirs plus longs vers l'extérieur des villes. Cette part existe également pour la zone non-OCDE mais elle est plus faible.

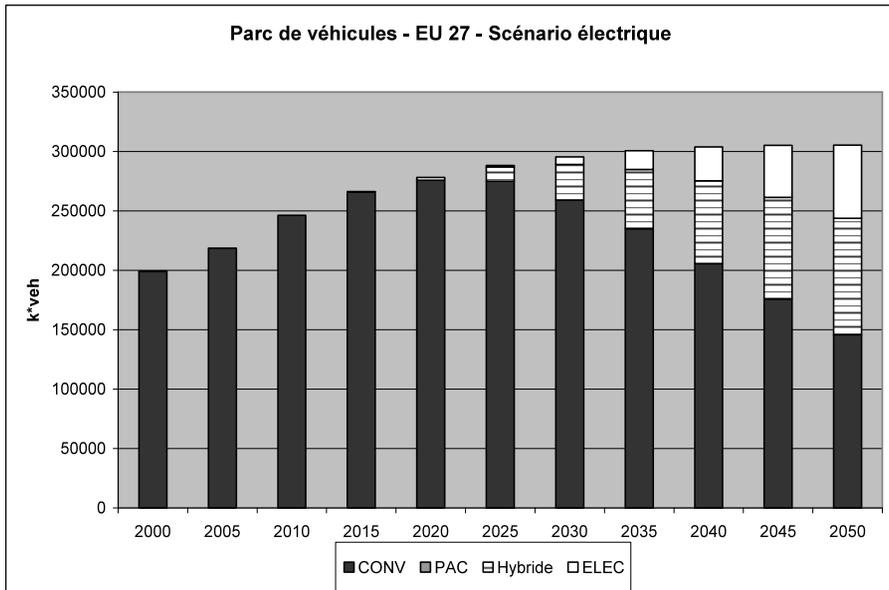


Figure 6 : Evolution du niveau et de la composition du parc automobile dans l'Europe des 27 dans un scénario électrique

La mobilité dans le scénario électrique diminue par rapport au scénario de référence, notamment du fait de l'introduction d'une valeur carbone. Cette diminution reste toutefois très limitée (environ 2 % pour l'Europe des 27) en raison de la prise en compte d'un effet rebond. Bien que le prix moyen des combustibles augmente sous l'effet de l'introduction d'une valeur carbone, la disponibilité de véhicules moins consommateurs d'énergie tend à diminuer l'impact de la taxe en termes de coût par kilomètre parcouru et l'effet résultant sur la mobilité est faible.

A mobilité quasi inchangée, la consommation d'énergie est fortement réduite du fait de la disponibilité d'un VMF hybride d'une part et d'un PVU électrique de l'autre. La consommation finale d'énergie des automobiles dans l'Europe des 27 est ainsi réduite de 43 % par rapport à la consommation en 2000.

Les émissions directes de CO2 des automobiles diminuent dans une proportion plus grande encore puisque les moteurs électriques n'émettent pas de GES au niveau de l'usage final. La réduction des émissions est de 55 % en 2050 comparée à 2000.

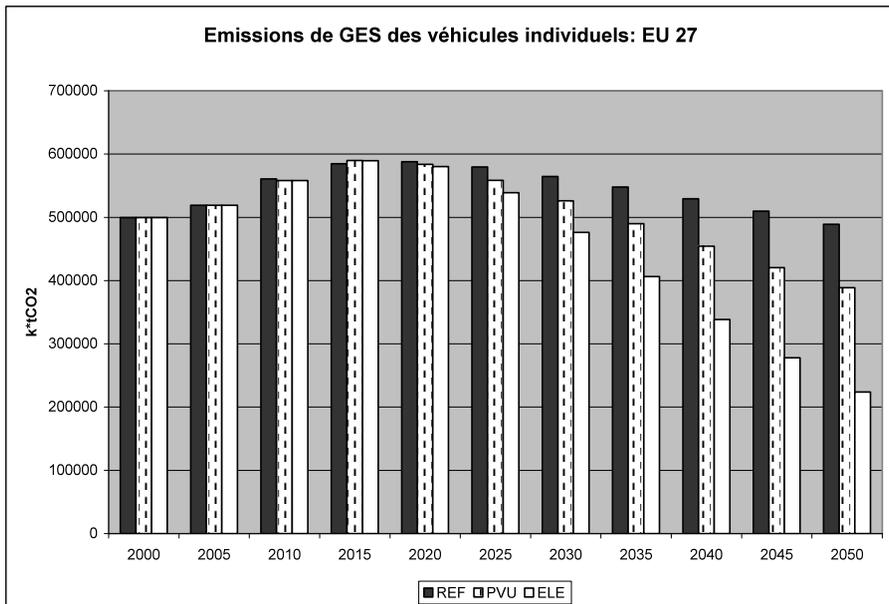


Figure 7 : Emissions de GES des automobiles dans l'Europe des 27 dans les différents scénarios

Au niveau mondial, les émissions de GES dans un scénario de référence sont en progression de plus de 270 % en 2050 par rapport à 2000. Cette croissance s'explique principalement par un quadruplement de la mobilité automobile par habitant, dans les pays non-OCDE, entre 2005 et 2050, sous l'effet de l'augmentation du revenu par habitant (cf Figure 1).

L'introduction d'un PVU thermique en lien avec une valeur carbone permet de limiter l'envolée des émissions en les plafonnant à environ 90 % au dessus de leur niveau initial.

Les gains à attendre d'une pénétration conjointe du PVU et de technologies de propulsion moins émettrices de GES sont très importants comme le montre la figure 8. Ainsi, le scénario électrique permet d'envisager des gains de 73 % par rapport à la situation de référence en 2050.

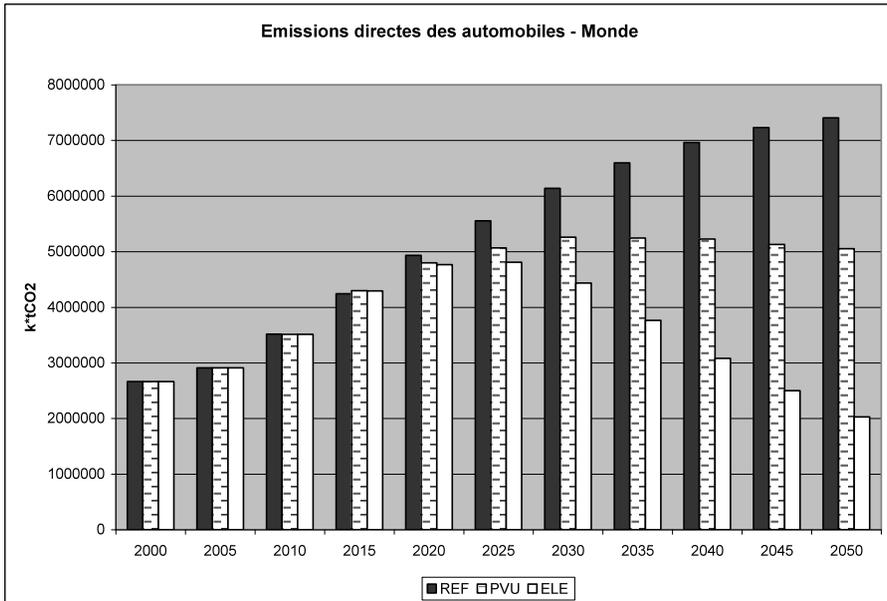


Figure 8 : Emissions directes des automobiles à l'échelle mondiale dans les différents scénarios

Les gains par rapport à 2000 sont également considérables avec 25 % de réduction des émissions. Néanmoins, ils restent en-deçà des 50 % qui seraient nécessaires pour atteindre une division par 2 des émissions en 2050 (par rapport à 2000), la condition selon le GIEC pour tenter de stabiliser les concentrations de GES à 450 ppm et limiter l'augmentation de la température moyenne à 2°C.

CONCLUSIONS

L'exercice de quantification de la feuille de route ADEME-EpE, réalisé au LEPII à l'aide du modèle POLES, fournit un certain nombre de résultats préliminaires et d'informations qu'un examen plus approfondi permettra d'affiner.

Il permet de préciser d'une part l'ampleur du défi pour orienter les différentes économies sur des trajectoires de développement sobres en carbone dans le domaine de la mobilité automobile. D'autre part, il fournit une estimation des bénéfices à attendre des innovations technologiques sur le couple « véhicule-carburant » en termes de consommations énergétiques et d'émissions de GES.

La mise en œuvre de politiques climatiques volontaristes (valeur carbone élevée), l'introduction d'un véhicule plus efficace, mieux adapté à la mobilité urbaine et l'hypothèse de progrès technologiques importants sur les motorisations alternatives permettent d'envisager un infléchissement sensible des émissions de GES à 2050.

La seule option « technologique » au sens large, ne permet toutefois pas d'atteindre les objectifs de long terme préconisés par le GIEC (facteur 2 au niveau mondial par rapport à 2000), au moins dans le domaine des transports routiers de passagers. D'autres options doivent être mobilisées pour cela qui permettraient de limiter aussi la croissance de la mobilité individuelle.

Les marges de manœuvre associées à la reconfiguration des territoires vers des espaces plus économes en transport individuel constituent probablement des pistes intéressantes à explorer. Les modifications apportées au dispositif de modélisation POLES avec l'introduction de la forme urbaine devraient permettre de prendre en compte cette nouvelle dimension et fournir des éléments de comparaison entre des scénarios contrastés d'étalement ou au contraire de densification urbaine.

Les systèmes de prix de rachat garanti pour la production électrique renouvelable : fondements économiques, critères de mise en œuvre et impacts sur le progrès technique des filières

Haitham Joumni

RESUME

Traditionnellement, la théorie économique distingue deux principales catégories d'incitations visant à renforcer les politiques environnementales et énergétiques. Celles agissant directement sur les prix pour modifier les niveaux de l'offre et de la demande et celles ciblant les quantités par la fixation d'objectifs quantifiés à des agents économiques identifiés (Quotas de réduction en CO₂, quotas de production de certificats blancs, quotas de production de certificats verts, etc.).

Après une présentation du fonctionnement théorique de ces mécanismes incitatifs, cet article cherchera à analyser les conditions de leur mise en œuvre et leur degré de développement dans le secteur du Bâtiment.

INTRODUCTION

Introduits dans les politiques publiques énergétiques de plusieurs pays européens, les systèmes de prix de rachat garanti ont connu un grand essor ces dernières années avec des effets disparates en termes de production totale (par filière renouvelable), de développement technologique et de coûts.

La première partie de cet article revient sur les fondements économiques du système de prix de rachat garanti de l'électricité verte (principalement éolien et photovoltaïque). Après une présentation du fonctionnement de ce mécanisme incitatif dans un cadre d'équilibre partiel, nous évaluons ses apports et ses limites par rapport aux effets distributifs pour les producteurs (en termes de rentes) et pour l'ensemble de la communauté (en termes de charge de financement de l'électricité verte). Il sera surtout question d'évaluer les risques productifs (surcapacité ou sous-capacité de production d'électricité verte) ainsi que les risques économiques (en termes de captation de rentes différentielles).

La deuxième partie s'intéresse à l'évaluation de l'impact de ce mécanisme sur les trajectoires technologiques des filières renouvelables. Nous évaluons l'impact des systèmes de prix de rachat garanti sur l'apparition de rentes par un effet incitateur à la baisse des coûts de production. Cet exercice sera mené à la fois sur les prix de rachat fixes et les prix de rachat variables (dégressifs).

LES SYSTEMES DE PRIX D'ACHAT GARANTI : LA TRANSPOSITION DU PRINCIPE DE LA SUBVENTION A LA PRODUCTION ELECTRIQUE D'ORIGINE RENOUVELABLE

Les systèmes de prix d'achat garantis reposent sur le principe de l'application d'une subvention unitaire à la production d'1 kWh d'électricité d'origine renouvelable. L'internalisation de l'effet externe est effectuée par l'attribution d'un prix additionnel au producteur correspondant au bénéfice marginal externe issu de la non émission des GES. Par analogie avec la taxe qui vise à augmenter le coût marginal de production en intégrant les coûts externes, le prix d'achat garanti permet indirectement d'abaisser le coût marginal de production de l'électricité d'origine renouvelable en intégrant le bénéfice externe dans le calcul économique.

Au niveau pratique, le système de prix de rachat garanti est défini dans le cadre de politiques conçues par le régulateur et visant un ensemble d'opérateurs électriques appelés en anglais *TSO* « *Transmission System Operators* » prédéfinis en fonction de leurs implantations géographiques. Ces derniers (opérateurs et distributeurs) ont pour obligation d'acheter les quantités d'électricité produites par les producteurs à un prix déterminé et sur une durée fixée par l'autorité de

régulation. Dans de telles conditions le fonctionnement de l'incitation par les prix est conditionné par la maîtrise de l'information sur deux paramètres : la forme de la courbe de coût marginal de production de l'électricité verte et le taux de profit concédé aux producteurs. Percebois J. précise les critères préalables à la réussite du système « *Ces prix garantis (feed in tariffs) devraient logiquement refléter le coût marginal à long terme de l'électricité verte en y intégrant un taux de profit raisonnable et ils doivent être suffisamment incitatifs pour rendre les investissements dans le secteur attractifs*³² ».

PROCEDURES DE MISE EN ŒUVRE, TARIFICATION ET ELIGIBILITE

Au niveau de la mise en œuvre, l'élaboration et l'application d'un système de prix de rachat garanti sont engagées selon des configurations qui peuvent varier d'un pays à l'autre en raison de l'adoption de critères d'évaluation différents et plus généralement de politiques nationales discordantes.

La définition du prix de rachat de l'électricité renouvelable

Il peut être établi selon un principe de prix total fixe de rachat « *fixed feeds in tariffs* » (cas des systèmes autrichiens, français et allemands) ou selon le principe d'un prix additionnel appelé en anglais « *fixed premium systems* » qui correspond à un prix additionnel au prix de l'électricité conventionnelle comme c'est la pratique au Luxembourg et aux Pays-Bas.

La détermination du niveau de prix d'achat diffère selon les pays et les technologies. Il peut, par exemple, être défini selon le principe du coût évité de l'électricité conventionnelle additionné d'un prix correspondant au bénéfice de l'électricité renouvelable (ou de l'effet externe négatif évité de l'électricité conventionnelle) comme il peut être déterminé indépendamment du coût évité de l'électricité conventionnelle. Dans cette dernière situation, le niveau de prix d'achat est surtout défini dans l'objectif de rendre les technologies renouvelables plus compétitives. Les prix sont alors établis indépendamment de l'évaluation comparative des effets externes entre énergies renouvelables et énergies fossiles.

La prise en considération des spécificités des sites de production

L'existence de potentiels réalisables différents entre les sites d'implantation des unités productives a des impacts sur les coûts marginaux de production. En

³² J. Percebois : « *Les outils de promotion de l'électricité renouvelable* », cahier de recherche du C.R.E.D.EN, 20p.

conséquence, l'établissement des niveaux de prix d'achat intègre (à des degrés différents) les spécificités naturelles et techniques de chaque implantation : les sites dont les potentiels sont importants bénéficient de politiques tarifaires moins avantageuses que les sites dont les potentiels sont plus faibles.

C'est le cas par exemple de la politique tarifaire appliquée au rachat de l'électricité photovoltaïque en France qui a établi un coefficient R défini en fonction du rayonnement annuel moyen de chaque département (kWh/m²). L'objectif étant d'encourager par un prix plus attractif le développement de la production dans des départements à faible potentiel naturel (ensoleillement). Le tarif de rachat P en métropole continentale pour les équipements non intégrés au bâti correspond à : $P = T \times R$ ($T = 27,6$ c€/kWh) et R variable en fonction de la puissance installée et des départements d'accueil :

- Pour les puissances installées inférieures ou égales à 250 kilowatts crêtes $R=1$.
- Pour les puissances installées supérieures à 250 kilowatts crêtes la valeur du coefficient R est comprise entre 1 et 1,2. A titre d'exemple, $R = 1$ pour le département des hautes Alpes (valeur minimale) et $R = 1,2$ (valeur maximale) dans les départements de la Meuse et du Pas-de-Calais.

La détermination des technologies éligibles et les niveaux de prix appliqués

Les catégories de technologies pouvant bénéficier des systèmes d'achat garanti varient en fonction des politiques énergétiques des différents pays. Généralement les prix d'achat prennent en considération à la fois les coûts marginaux de production (dans ce cas les technologies dont les coûts sont élevés bénéficient de prix d'achat élevés) et les priorités stratégiques nationales comme par exemple la nécessité de développer pour des raisons stratégiques une industrie spécifique et/ou de valoriser des potentiels réalisables importants pouvant entraîner la mise en place d'une politique tarifaire préférentielle avec des prix de rachat élevés.

Dans le cadre de la politique tarifaire française de prix de rachat de l'électricité photovoltaïque, quatre grandes catégories de prix ont été redéfinies pour les installations photovoltaïques innovantes dites « intégrées au bâti » (arrêté du 31 août 2010).

- $P = 58$ c€/kWh : pour les installations photovoltaïques d'une puissance crête inférieure ou égale à 3 kWc et bénéficiant de la prime d'intégration au Bâti situé sur un bâtiment à usage principal d'habitation.
- $P = 51$ c€/kWh : pour les installations photovoltaïques d'une puissance crête supérieure à 3 kWc et bénéficiant de la prime d'intégration au Bâti situé sur un bâtiment à usage principal d'habitation.

- $P = 51 \text{ c€/kWh}$: pour les installations photovoltaïques bénéficiant de la prime d'intégration au Bâti situé sur un bâtiment à usage d'enseignement ou de santé.
- $P = 37 \text{ c€/kWh}$: pour les installations photovoltaïques bénéficiant de la prime d'intégration simplifiée au bâti situé sur d'autres bâtiments.

La mise en place de procédures temporelles différentes

Les prix de rachat peuvent intégrer les spécificités temporelles et saisonnières de l'offre et de la demande en électricité renouvelable. La production électrique soumise à ce régime peut être de base ou de pointe ou encore une production saisonnière (été ou hiver qui prennent en considération la disponibilité et le niveau des potentiels naturels).

La durée de la période contractuelle minimale garantissant aux producteurs le rachat de l'électricité produite peut être établie sur une longue période ou sur une période relativement courte (vingt ans en Allemagne et en France pour le Photovoltaïque et un minimum de quatre ans en Espagne (avant 2004)).

Le financement des programmes

Le coût additionnel lié à l'application d'un système de prix d'achat garanti peut être supporté soit directement par les usagers finaux de l'électricité comme c'est le cas en France et en Espagne, soit par les usagers se trouvant dans la zone de desserte des opérateurs ayant pour obligation de racheter l'électricité renouvelable comme ce fut le cas en Allemagne jusqu'en 2000. Il peut également être financé par la mise en place d'une taxe spécifique appliquée à l'ensemble des usagers (exemple du programme danois).

Les spécificités liées aux capacités installées

L'application des systèmes de prix d'achat garantis peut être limitée aux nouvelles installations comme elle peut être généralisée à l'ensemble des capacités installées (anciennes et nouvelles). Aussi, dans certains pays, les installations éligibles à une production de masse (éolienne ou photovoltaïque) peuvent-elles être soumises à des capacités maximales ou à une délimitation de l'éligibilité des capacités installées en fonction des catégories d'agents (distinction entre les gros producteurs indépendants, les petits producteurs et les particuliers).

L'EFFICIENCE ECONOMIQUE DES MECANISMES DE PRIX DE RACHAT GARANTIS : LES AVANTAGES DU MODELE

L'appréciation de l'efficacité économique des mécanismes de prix d'achat garantis est effectuée en prenant en considération les apports et les limites de leurs mises en œuvre en termes de réduction et/ou de hausse de différentes catégories de coûts.

Globalement, les avantages économiques générés par ces mécanismes sont centrés d'une part, autour des possibilités de réduction des risques qu'ils offrent aux investisseurs potentiels et du faible niveau des coûts de transaction liés à leurs mises en œuvre, et d'autre part autour des incitations à l'innovation générées par les possibilités de rentes pour les producteurs les plus performants.

La contribution à la réduction des risques et des coûts transactionnels pour les investisseurs privés

La mise en place de contrats à terme garantissant aux producteurs d'électricité verte un prix stable sur une base temporelle définie offre une importante garantie contre les incertitudes liées à une baisse éventuelle du prix d'achat de l'électricité sur le marché spot. Ce risque est d'autant plus important dans un secteur électrique caractérisé par la présence de coûts fixes élevés associée à une fluctuation permanente des prix. Par ailleurs, la préparation et le développement des projets s'accompagnent d'importants coûts transactionnels relatifs à la recherche et au traitement de l'information à tous les stades de la procédure : évaluation des conditions d'éligibilité, préparation de la réponse aux appels d'offre, mise en conformité et soumission de la procédure de candidature, coordination avec les autorités de régulation, coordination et gestion des flux avec l'opérateur du réseau, etc.

Grâce à ce mécanisme, l'ensemble des producteurs peut ainsi bénéficier d'une information disponible et transparente portant non seulement sur les technologies éligibles et les niveaux des tarifs de rachat mais aussi sur la durée de la période de rachat et sur les différentes étapes de la procédure (soumission, arbitrage, contestation et appels, mise en œuvre des programmes, contrôle et coordination, etc.). En définitive, en lançant des appels d'offre affichant clairement les niveaux de prix garantis et les délais de rachat appliqués, le régulateur empêche toute asymétrie de l'information et réduit les coûts de transaction pour les producteurs puisque l'information sur les critères de chaque appel est disponible dans les mêmes conditions pour l'ensemble des investisseurs.

La contribution au soutien des technologies innovantes par l'octroi de rentes associées à des politiques tarifaires discriminatoires

La mise en place *ex ante* par le régulateur d'un prix d'achat sur une longue période nécessite la connaissance des courbes de coûts marginaux de production de l'électricité renouvelable ce qui est loin d'être garanti. Cela pourrait se traduire par l'apparition d'importantes rentes différentielles « *windfall gains* » pour les producteurs exploitant les premiers sites les plus prometteurs en termes de potentiels réalisables³³. Ces possibilités de rentes pourraient constituer une forte motivation à la baisse des coûts et au changement technologique en incitant les producteurs à développer des procédés plus efficaces et plus performants³⁴.

En vue d'améliorer les performances industrielles de certaines technologies ainsi que leur niveau de compétitivité (augmenter le degré de leur pénétration sur le marché) l'autorité publique peut mettre en place des régimes de tarifs de rachat différenciés en fonction de chaque technologie : celle dont les potentiels réalisables sont importants mais dont les niveaux de développement restent faibles peuvent bénéficier de régimes plus avantageux que celles dont les potentiels sont largement exploités et dont les niveaux de maturité et de compétitivité sont jugés comme plus importants.

En ce sens, la mise en place d'un prix d'achat élevé combiné à une période de rachat plus étendue exprime des opportunités de rentes plus ou moins importantes pour les producteurs utilisant les technologies les plus performantes. Ces rentes constituent une incitation à l'amélioration des processus de production et à la réduction des coûts, et donc *in fine* à une meilleure compétitivité.

Ces politiques tarifaires peuvent être définies soit en termes absolus « *fixed feeds in tariffs* » comme c'est le cas en France, en Allemagne et en Autriche, soit en termes relatifs selon le principe d'un prix additionnel au prix de l'électricité conventionnelle appelé en anglais « *fixed premium systems* »³⁵. Dans ce dernier cas, le prix total perçu par les producteurs est calibré sur le prix de l'électricité conventionnelle comme c'est le cas dans les systèmes danois et espagnols. Néanmoins, certains pays peuvent choisir de combiner deux approches tarifaires. C'est le cas au Luxembourg où le prix de rachat de l'électricité produite par la filière

³³ M. Ringel : « *Fostering the use of renewable energies in the European Union : the race between feed-in tariffs and green certificates* », *Renewable Energy*, 31 (1), (2006), pp. 1-17.

³⁴ R. Madlener, S. Stagl : « *Sustainability-guided promotion of renewable electricity generation* », *Ecological Economics*, 53 (2), (2005) pp. 147-167.

³⁵ P. Del Rio, M. A. Gual, « *An integrated assessment of the feed-in tariff system in Spain* », *Energy Policy*, 35 (2), (2007), pp. 994-1012.

photovoltaïque est établi en termes absolus empêchant ainsi toute variation pouvant provenir d'une volatilité des prix de l'électricité conventionnelle.

L'EFFICIENCE ECONOMIQUE DES MECANISMES DE PRIX DE RACHAT GARANTIS : LES LIMITES DU MODELE

Malgré les avantages exposés précédemment, la mise en place d'un système de prix d'achat garantis peut s'accompagner d'une hausse de certaines catégories de coûts. Cette hausse peut provenir non seulement de l'augmentation importante des niveaux de rentes revenant à certains producteurs mais aussi des coûts liés à l'intermittence de la production électrique renouvelable. Cela nous conduit à la question du coût additionnel supporté par la société pour soutenir l'électricité renouvelable et de l'efficacité économique d'une politique publique tarifaire³⁶³⁷.

Les risques de captation des rentes différentielles par les producteurs

Un des principaux inconvénients d'une politique publique de prix d'achat garantis se rapporte aux possibilités de captation de rentes différentielles importantes si les prix sont largement supérieurs aux coûts marginaux de production et qu'ils sont maintenus fixes (non dégressifs) pour l'ensemble des producteurs. Traditionnellement la rente différentielle caractérisant les investissements énergétiques exprime les revenus issus de l'exploitation des gisements les moins coûteux comparativement au gisement marginal le plus coûteux qui permettrait d'atteindre la quantité d'énergie souhaitée³⁸³⁹. Transposée au secteur de la production électrique renouvelable, la définition d'un prix d'achat garanti uniforme offre aux producteurs disposant des potentiels les plus avantageux (emplacements et gisements importants, technologie performantes, processus de production performants, etc.) des perspectives de rentes plus importantes que ceux dont les facteurs de production sont moins performants et plus coûteux. La difficulté de l'arbitrage réside dans la nécessité d'établir des prix suffisamment incitatifs vis-à-vis

³⁶ M. Ringel : «*Fostering the use of renewable energies in the European Union: the race between feed-in tariffs and green certificates*», Renewable Energy, 31 (1), (2006), pp. 1-17.

³⁷ R. Magdlenner, S. Stagl, «*Sustainability-guided promotion of renewable electricity generation*», Ecological Economics, 53 (2), (2005), pp. 994-1012.

³⁸ P. Del Rio, M. A. Gual : «*An integrated assessment of the feed-in tariff system in Spain*», Energy Policy, 35 (2), (2007), pp. 994-1012.

³⁹ J. Percebois, «*Les outils de promotion de l'électricité renouvelable*», cahier de recherche du CREDEN, 20p.

des investisseurs tout en cherchant à obtenir le surcoût le moins élevé pour la collectivité.

C'est pour limiter le niveau des rentes que le régulateur peut substituer les prix d'achat fixes par des procédures de prix dégressives. L'objectif étant de contrebalancer l'effet d'un prix surévalué par une révision temporelle à la baisse des tarifs d'achat en fonction de l'évolution technologique de la filière et du niveau de production. Une telle pratique est difficile à mettre en œuvre pour le régulateur car elle suppose une parfaite maîtrise de l'information sur l'évolution technologique des filières et sur les coûts de production. Appliquée également dans l'objectif de soutenir certaines filières par rapport à d'autres, cette politique ne garantit pas *in fine* une différenciation des tarifs en fonction des technologies utilisées. Selon Madlener et Stagl «(...) *il est très difficile de trouver (et d'ajuster dans le temps) des niveaux de tarifs optimaux pour chaque technologie renouvelable qui permettraient d'éviter les profits excessifs, d'atteindre un degré d'efficacité économique et de promouvoir l'ensemble des technologies de la manière et dans la direction souhaitées*⁴⁰ ».

En plus des risques de surestimation des prix d'achat, le financement du surcoût additionnel de l'électricité verte peut également provenir d'une hausse de la production électrique renouvelable. C'est le cas du Danemark qui a fini par supprimer le système d'achat garanti dans certaines régions suite à une forte percée des capacités éoliennes installées^{41,42}. L'imposition de l'obligation de rachat risque également d'aboutir à des traitements différenciés en termes d'objectifs entre compagnies électriques. Celles se situant dans des zones géographiques à forts potentiels renouvelables seront soumises à l'obligation de racheter d'importantes quantités par rapport à celles se trouvant dans des régions où les potentiels sont faibles. Ce caractère de différenciation régionale risque de créer *de facto* une distorsion en termes de compétitivité entre compagnies électriques subissant des contraintes hétérogènes.

La présence de coûts externes liés à l'intermittence

Une deuxième catégorie de coûts peut être accentuée par la mise en œuvre d'un système de prix d'achat garantis. Elle se rapporte à la présence de coûts

⁴⁰ R. Madlener, S. Stagl : « *Sustainability-guided promotion of renewable electricity generation* », Ecological Economics, 53 (2), (2005) pp. 147-167.

⁴¹ N. I. Meyer : « *European schemes for promoting renewables in liberalised markets* », Energy Policy, 31 (7), (2003), pp. 665-667.

⁴² N.I. Meyer, A.L. Koefoed : « *Danish energy reform: policy implications for renewable* », Energy Policy, 31, (7), (2003), pp. 597-607.

d'intermittence élevés qui correspondent en réalité à un effet externe négatif supporté par la collectivité. C'est le cas de la filière éolienne dont le prix d'achat garanti ignore l'effet externe provoqué par la combinaison de deux paramètres: (i) la chute de la production électrique en raison de la baisse du potentiel naturel (vitesse des vents) et (ii) le recours en urgence à la mobilisation de facteurs de production coûteux.

J. Percebois⁴³ illustre ce problème à travers l'exemple d'un pays ayant un recours massif à la filière éolienne ce qui implique l'injection sur le réseau de quantités importantes d'électricité verte. Le régulateur est alors amené à arrêter le fonctionnement en base des centrales conventionnelles à faibles coûts tout en programmant l'activation d'unités de production de secours à coûts élevés pour parer à toute intermittence. Le coût additionnel issu de cette programmation est considéré comme un effet externe négatif tant qu'il n'est pas intégré dans le calcul du prix d'achat garanti. Dans cette perspective un prix d'achat garanti incitatif est supérieur au bénéfice marginal de l'électricité verte (correspondant à la somme des coûts évités de l'électricité conventionnelle et du coût des externalités négatives évitées de l'électricité renouvelable). Cependant, en intégrant les effets d'intermittence le prix d'achat garanti peut également être inférieur au coût total social (prix d'achat garanti affiché additionné du coût lié à l'intermittence).

Il est alors possible de cadrer l'intervalle dans lequel se situe le prix d'achat garanti par la formule suivante⁴⁴ :

$$CEC + EP \leq PG < CS = PG + ED \quad \text{avec :}$$

PG : le prix d'achat garanti de l'électricité d'origine renouvelable.

CEC : le coût marginal évité à long terme de l'électricité conventionnelle.

EP : l'externalité négative évitée issue de la production de l'électricité renouvelable (exemple CO2).

CS : le coût total social total revenant à la charge de la collectivité issu de l'achat prioritaire de l'électricité renouvelable.

ED : l'externalité négative correspondant au caractère intermittent de l'électricité renouvelable (coût marginal de défaillance).

⁴³ J. Percebois : « *Les outils de promotion de l'électricité renouvelable* », cahier de recherche du C.R.E.D.EN, 20p.

⁴⁴ J. Percebois : « *Les outils de promotion de l'électricité renouvelable* », cahier de recherche du C.R.E.D.EN, 20p.

L'EFFICIENCE ENVIRONNEMENTALE DE LA POLITIQUE PUBLIQUE DES SYSTEMES DE RACHAT GARANTI : LES RISQUES DE DEFICIT OU DE SURPRODUCTION

L'inconvénient environnemental lié à ce mécanisme majeur est d'ordre quantitatif. Il concerne les possibilités de déficit ou de surproduction par rapport à la production totale d'électricité à terme souhaitée par le régulateur. La mise en place d'un prix de rachat garanti n'apporte aucune certitude quant à la réalisation des objectifs de production à la fin de la période contractuelle. Ce risque renvoie à l'indisponibilité de l'information sur les coûts de production de l'électricité verte qui empêche le régulateur d'aligner correctement le niveau du prix d'achat sur le niveau de la courbe de coût marginal de production.

Prenons l'exemple d'une politique publique visant à atteindre un niveau de production Q d'électricité verte sur la base d'un système de prix d'achat garanti P . En détenant l'information sur le prix affiché par le régulateur, les investisseurs dont les coûts marginaux de production sont inférieurs au prix d'achat chercheront à produire jusqu'à égalisation entre leurs coûts marginaux respectifs et ce prix d'achat.

Déterminer le prix d'achat P en situation d'incertitude (le régulateur ignore la forme de la courbe marginale de production de l'industrie) laisse supposer l'émergence de trois situations possibles (figure 1) :

- Soit le régulateur a évalué correctement la forme et le niveau de la courbe (C_{mr}) et dans ce cas l'objectif Q est atteint au moindre coût pour la collectivité, c'est à dire au prix P (intersection entre la droite verticale représentant les quantités souhaitées Q et la courbe de coût réel C_{mr})
- Soit le régulateur a sous-évalué la courbe de coût C_{m1} (coût marginal réel C_{mr} inférieur au coût marginal prévisionnel de l'industrie C_{m1} pour une même quantité produite) et dans cette situation l'objectif quantitatif Q ne sera pas atteint. Le prix d'achat P étant inférieur au coût marginal de production de l'unité Q le producteur produira uniquement jusqu'à égaliser son coût de production au prix P , soit au niveau Q_1 . Afin d'atteindre le niveau souhaité Q , le régulateur devrait augmenter le prix d'achat jusqu'au niveau P_1 , correspondant à l'intersection de la courbe de coût marginal C_{m1} et de la droite de la demande Q (point A).
- Enfin le régulateur peut avoir surévalué le niveau de la courbe de coût C_{m2} : pour une même quantité produite, le coût marginal réel C_{mr} est supérieur au coût marginal prévisionnel de l'industrie C_{m2} estimé par le régulateur. Dans cette configuration le producteur aura intérêt à produire au delà de la quantité fixée Q , c'est-à-dire tant que son coût de production réel C_{m2} reste inférieur à P , soit jusqu'à atteindre la quantité Q_2 . Dans cette situation l'objectif quantitatif n'est pas respecté (il est dépassé puisque

$Q_2 > Q$) entraînant un coût élevé pour la collectivité. Afin de ramener le niveau de production à la quantité Q souhaitée, le régulateur devrait abaisser le prix d'achat de P à P_2 , correspondant à l'intersection de la courbe de coût marginal Cm_2 et de la droite de la demande Q (point D).

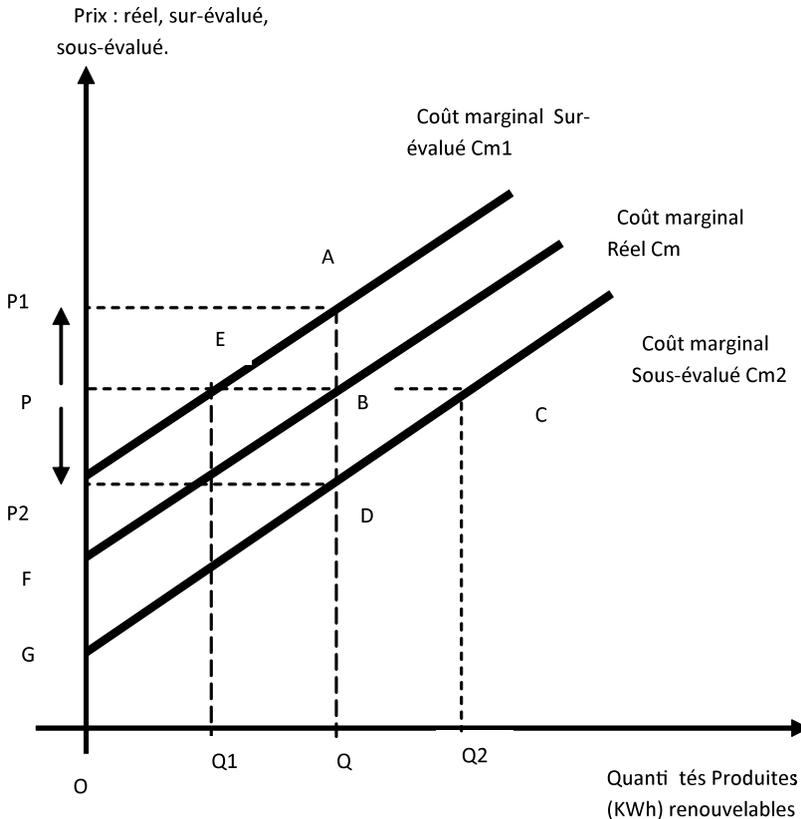


Figure 1 : Effet environnemental de la variation du coût marginal réel par rapport au coût marginal prévisionnel

En résumé, les systèmes de prix de rachat apportent une garantie effective aux investisseurs en termes de stabilité des prix tout en offrant d'importantes perspectives de rentes pour les producteurs les plus performants. Leurs applications ont permis de développer particulièrement la filière photovoltaïque en France et l'éolien en Allemagne, en Espagne et au Danemark, considérés comme des pays leaders en Europe et dans le monde.

Cependant, quels peuvent être les effets de ce mécanisme incitatif sur l'innovation et le changement technologique ? Nous abordons dans ce qui suit l'analyse de l'impact des systèmes de prix de rachat garanti sur le progrès technique

dans les filières renouvelables. Notre analyse est engagée dans le cadre d'un équilibre partiel où nous partons de l'hypothèse que l'existence de rentes potentielles constitue une incitation à la réduction des coûts de production grâce au changement technologique dans les filières renouvelables.

EVALUATION EN EQUILIBRE PARTIEL DE L'IMPACT DU SYSTEME DE PRIX DE RACHAT GARANTI SUR LE CHANGEMENT TECHNOLOGIQUE DANS LES FILIERES RENOUVELABLES

L'analyse de la contribution du système de prix de rachat garanti à l'innovation et au changement technologique est effectuée dans le cadre d'une lecture en équilibre partiel dans laquelle on suppose que la manifestation et la recherche d'un renforcement des rentes constituent une motivation à l'innovation et à l'amélioration progressive des processus productifs. Le déclenchement d'une trajectoire de progrès technologique dans le processus de production des filières énergétiques renouvelables implique une modification dans la forme de la courbe de coût marginal de production.

Les perspectives d'innovation et de changement technologique issues de l'application des systèmes de prix d'achat garanti fixe

L'adoption par le régulateur d'un tarif fixe (non dégressif) garanti sur l'ensemble de la période contractuelle incite les producteurs à innover en vue d'améliorer leurs processus productifs et à réduire les coûts de production. Prenons l'exemple d'un système d'achat garanti fixe appliqué à une filière renouvelable dont le coût marginal de production est représenté par la courbe (Cm0) sur la figure 2. L'équilibre est atteint au point A correspondant à l'intersection entre la courbe (Cm0) et le prix P0. Le producteur produit à l'équilibre une quantité d'électricité renouvelable Q0 et obtient une rente correspondant à la surface du triangle CAPO.

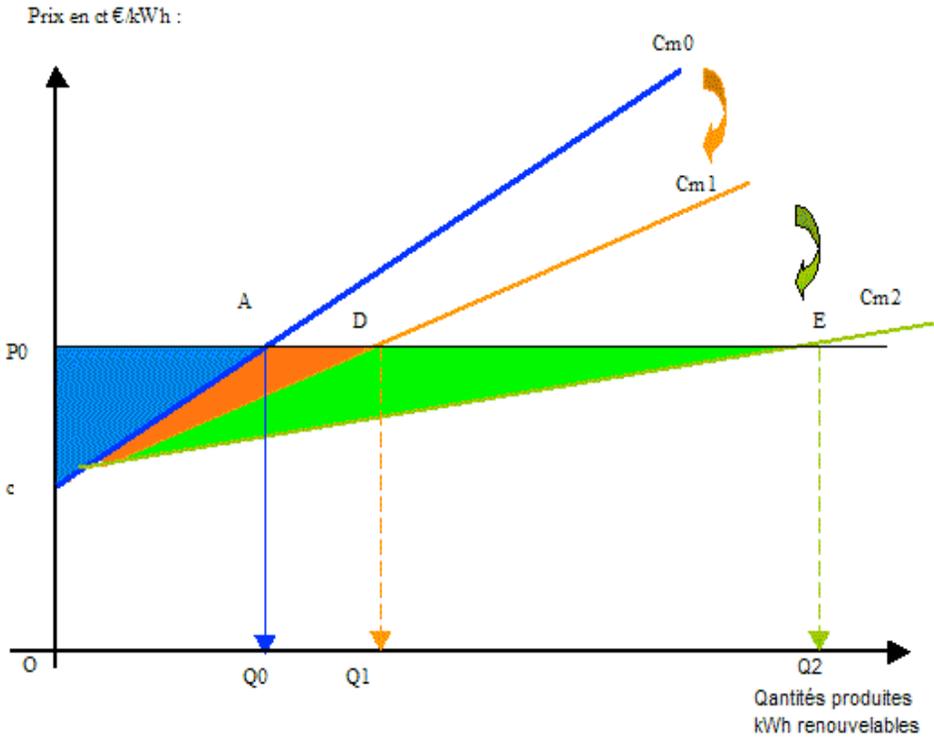
La manifestation de progrès techniques différenciés dans cette filière renouvelable permet d'abaisser la courbe de coût marginal de production de (Cm0) à (Cm1) et de (Cm1) à (Cm2) partir du point F. En partant de la courbe de coût marginal initiale Cm0, l'apparition d'un premier niveau de progrès technique fait déplacer le point d'équilibre du point A vers le point D. Etant donné que le coût marginal de production est devenu inférieur au prix par l'effet du progrès technique, le producteur cherchera à égaliser son nouveau coût de production marginal Cm1 avec le prix P0. Le nouvel état d'équilibre est réalisé lorsque Cm1 = P0 (soit au point D). Les nouvelles quantités produites à l'équilibre sont supérieures à celles produites en l'absence de progrès technique puisque $Q0 < Q1$. Au niveau de production Q1 le producteur réalise une rente supplémentaire (par rapport à la rente initiale) représentée par la surface du triangle AFD.

La recherche d'une rente additionnelle supplémentaire, incitera le producteur à abaisser, sous l'effet d'un deuxième niveau de progrès technique, son coût marginal de production faisant infléchir la courbe de coût de (Cm_1) à (Cm_2) . Le nouvel état d'équilibre est alors représenté par le point E correspondant à l'intersection de la nouvelle courbe (Cm_2) et du prix P_0 . Les quantités produites à l'équilibre Q_2 sont les plus élevés puisque $Q_0 < Q_1 < Q_2$. Le producteur réalise une rente supplémentaire correspondant à la surface CDE.

Les perspectives d'innovation et de changement technologique issues de l'application des systèmes de prix d'achat garanti variable

Contrairement au prix d'achat fixe, la mise en place par le régulateur d'une politique tarifaire dégressive s'applique à réduire les niveaux de rentes tirées par les producteurs. En anticipant la baisse des coûts marginaux de production par la manifestation d'un progrès technique, le régulateur adapte les prix de rachat garanti à l'évolution des courbes de coûts marginaux de production estimée. Cela se traduit sur le graphique par l'abaissement du tarif de rachat de la quantité Q_0 de P_0 à P_1 pour le premier niveau de progrès technique (figure 3). L'équilibre du producteur n'est plus réalisé au point D mais au point D' (intersection entre la courbe (Cm_1) et la nouvelle droite du prix dégressif P_1). Contrairement au fonctionnement d'un prix d'achat fixe, la rente additionnelle issue du progrès technique dans le cadre d'un système dégressif ne correspond plus à la surface du triangle AFD mais à une surface plus réduite (la surface orange sur le graphique).

Il en est de même pour le deuxième niveau de progrès technique où la réduction du prix d'achat de P_0 à P_2 fait passer l'équilibre du producteur du point E au point E' (intersection de la courbe de coût marginal (Cm_2) avec la nouvelle droite de prix P_2). La rente additionnelle issue du deuxième progrès technique ne correspond plus au triangle DEF, mais plutôt à la surface inférieure (surface verte sur le graphique). Dans un cas comme dans l'autre la baisse des prix accompagnant celle des courbes de coûts marginaux de production maintient l'apparition des possibilités de rentes pour les producteurs en les incitant à innover. Les prix respectifs dégressifs P_1 et P_2 permettent néanmoins d'atteindre l'objectif quantitatif Q_0 avec des niveaux de rentes inférieures à ceux affichés par un système de prix d'achat fixe. La situation la plus optimale pour le régulateur (et l'ensemble de la communauté) correspond au point E'. Avec la mise en place du prix P_2 le régulateur réalise l'objectif quantitatif Q_0 au moindre coût total (coût total de production + rente totale du producteur) : les coûts de production représentés par la surface OCFE'Q₀ sont les plus faibles et la rente totale additionnelle issue des deux progrès techniques attribuée au producteur est la moins élevée (surface CP2E'F).



-CAPo : Rente initiale.

-FAD : Rente additionnelle issue du progrès technique 1.

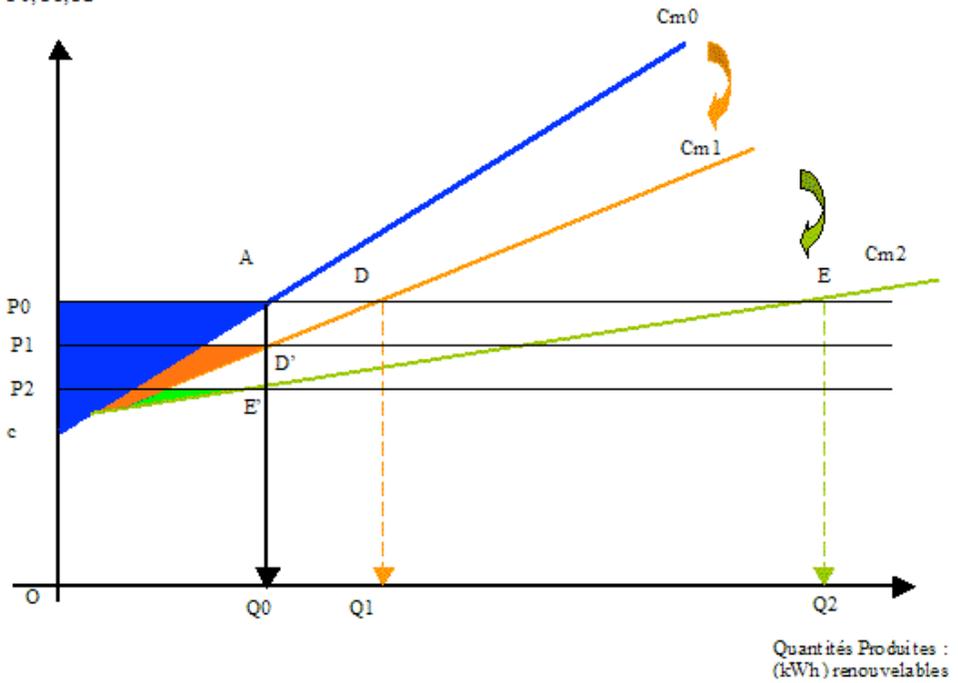
-FED : Rente additionnelle issue du progrès technique 2.

→ Rente totale : surface PoEFC.

→ Coût additionnel total pour la société : PoEFC + OCFEQ2

Figure 2 : Conditions d'équilibre avec baisse des coûts et incitations au progrès technique dans les systèmes de prix de rachat garanti fixe

Prix en ct €/kWh :
 P_0, P_1, P_2



- Rente initiale
- Rente additionnelle progrès Tech. 1
- Rente additionnelle progrès Tech. 2.

Rente totale en P_0 : CA_{P_0} .

Rente totale en P_1 : $CD'P_1$.

Rente totale en P_2 : $CFED'P_2$.

→ Coût total de la politique en P_2 : $CFED'P_2$ (rentes) + $CFE'EQ_2$ (coûts Prod.)

Figure 3 : Conditions d'équilibre avec baisse des coûts et incitations au progrès technique dans les systèmes de prix d'achat garantis variable

C'est cette approche qui a été renforcée récemment dans le cadre du prix de rachat garanti de l'électricité d'origine photovoltaïque en France (décret du 31 août 2010). Compte tenu de la hausse significative des demandes de contractualisation et du coût total de cette politique pour la communauté, le régulateur a choisi de calibrer les prix. Ainsi que le souligne le rapport de l'inspection générale des finances, les prix affichés ont dégagé une bulle spéculative qui a permis l'émergence d'effets d'aubaine et de rentes différentielles importantes pour les producteurs. Selon la commission, les prix de rachat qui varient de 314 €/MWh pour les installations au sol à 580 €/MWh (pour l'intégration au bâti sur les habitations) sont largement supérieurs au prix du marché de gros de l'électricité estimé à 56 €/MWh (contrat d'1 MWh en continu pendant un an en juin 2010).

Au-delà du coût financier actuel de ce programme de soutien qui est supporté par l'ensemble des consommateurs via le fond CSPE (charge de contribution au service public de l'électricité), la commission rappelle également que les tarifs de rachat appliqués à la filière photovoltaïque intégraient des coûts de la tonne de carbone évitée assez élevés. Ces coûts correspondaient à une valeur comprise entre 200 et 1800 € alors que des études récentes (commission Quinet de 2008 et Rocard de 2009) ont suggéré une valeur équivalente à 32€ la tonne de CO₂ évitée⁴⁵.

C'est en ce sens qu'une nouvelle grille tarifaire a été proposée. L'objectif étant d'orienter les subventions les plus élevées (prix de rachat le plus important) vers les technologies les plus performantes avec une priorité pour les systèmes photovoltaïques intégrées au Bâti (bâtiments à usage d'habitation, de santé et d'enseignement). Aussi, l'ensemble des tarifs proposés dans le système français seront indexés annuellement (à partir du 1^{er} janvier 2012) par multiplication de la valeur du prix de la période précédente par un coefficient (1-D) avec D = 10 %. Cette indexation concernera les demandes complètes de raccordement au réseau public envoyé après le 31 décembre 2011 (décret du 31 août 2010).

CONCLUSION

La mise en place des politiques publiques incitatives au développement des filières renouvelables pour la production électrique met le régulateur face aux difficultés de l'arbitrage entre d'une part, la nécessité d'accorder des prix incitatifs élevés pour encourager l'investissement dans les capacités productives (et le

⁴⁵ J.M. Charpin, A. Siné, P. Hellesein, C. Tlili, C. Trink, C. Stoffaes : *Mission Relative au développement de la filière photovoltaïque en France*, Rapport Final, Inspection Générale des Finances, (2010), Ministère du Budget de l'Economie et de l'Emploi, Ministère du Budget, des comptes publics et de la réforme de l'Etat.

développement technologique des filières) et d'autre part, l'obligation de réduire les coûts de ces politiques pour la communauté. Les systèmes de prix de rachat garanti de l'électricité d'origine renouvelable ont connu un grand essor en France, en Europe et dans le monde, particulièrement dans le développement des filières photovoltaïque et éolienne. En affichant des prix de rachat attractifs adossés à des durées contractuelles assez longues ce mécanisme a permis une hausse significative des capacités productives tout en présentant des perspectives de rentes importantes pour les grands producteurs. Ces possibilités de rentes peuvent également constituer une incitation au progrès technique dans l'optique d'améliorer les performances des filières et d'abaisser les coûts de production.

Néanmoins, les coûts relatifs aux systèmes de prix de rachat garanti, qui sont supportés en France par l'ensemble des contribuables *via* le fond de contribution au service public de l'électricité, peuvent être élevés. C'est en ce sens qu'une programmation de systèmes de prix de rachat variables (voire dégressifs) pourrait apporter une plus grande lisibilité de l'évolution du marché et de la performance des technologies pour le régulateur. Il pourra ainsi mieux calibrer les niveaux de prix pour orienter les subventions vers les innovations les plus performantes et réduire les risques de captation de rentes différentielles importantes pour les producteurs.

Analyse des mécanismes incitatifs à la rénovation des logements

Bruno Duplessis
Mathieu Labarre

RESUME

Avec le diagnostic de performance énergétique (DPE), les pouvoirs publics espèrent créer une valeur ajoutée pour les biens efficaces énergétiquement. En particulier, cette mesure pourrait créer une valeur résiduelle des investissements en efficacité énergétique lors de la revente du bien immobilier concerné. Le parc immobilier pourrait donc être modélisé à l'aide d'une métrique basée sur l'« étiquette DPE ». On fait ici l'hypothèse que la valeur ajoutée du DPE est un signal effectivement et rationnellement perçu par les acteurs du marché de l'immobilier (ici les propriétaires occupants), et on cherche à débattre des conséquences de cette perception sur les acteurs.

Dans un premier temps, une typologie de ces acteurs a été développée en supposant *a priori* que les critères de décision en faveur de l'investissement varient d'un type d'investisseur à un autre. Dans un deuxième temps, le choix de bouquets d'actions de rénovation par ces acteurs-types selon leur(s) critère(s) de décision – *a priori* différents du coût global actualisé, plus traditionnellement exploité par les pouvoirs publics – a été analysé. Cette méthodologie a permis d'initier une réflexion sur les mécanismes incitatifs à la rénovation des logements existants.

INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment, résidentiel et tertiaire confondu, représente plus de 40 % de la consommation finale en énergie en France. La consommation moyenne en énergie primaire du parc résidentiel est d'environ 260 kWh/(m².an), mais celle-ci peut dépasser 600 kWh/(m².an) pour les bâtiments les plus énergivores. L'Etat s'est donc fixé pour objectif de réduire de 38 % la consommation du parc existant d'ici 2020, ce qui signifie abaisser la consommation moyenne du parc résidentiel, sans prendre en compte les nouveaux logements, à environ 160 kWh/(m².an). Pour ce faire, différents dispositifs ont été mis en œuvre de manière à inciter les propriétaires à rénover leur logement.

L'objectif des travaux présentés dans ce chapitre est d'apporter une contribution à l'analyse de ces mécanismes incitatifs. Pour cela nous proposons une modélisation du comportement des propriétaires occupants permettant de représenter les motivations à la rénovation énergétique des logements. A travers cet exercice, nous avons en particulier cherché à représenter la variété des motivations susceptibles d'orienter les choix des propriétaires occupants en matière de solutions de rénovation énergétique. Dans le cadre de cet ouvrage, nous illustrons les possibilités d'analyse offertes par cette méthodologie à l'aide de quelques résultats.

MODELISATION DES MECANISMES DE DECISION DES PROPRIETAIRES

Afin de représenter de manière systématique les décisions des propriétaires en matière de rénovation, nous avons assimilé un propriétaire donné à un agent économique rationnel. Face à différentes solutions d'amélioration qui lui sont proposées, cet agent économique évalue les possibilités de rénovation avec les informations technico-économiques qu'il a à disposition et choisit, parmi celles-ci, celles qui satisfont le plus ses propres critères. Les éléments-clés de ces mécanismes de décision que nous avons cherché à représenter sont :

- les possibilités de rénovation (offre en matière de travaux de rénovation);
- la méthodologie d'analyse utilisée pour représenter les motivations des propriétaires ;
- les informations relatives à la performance énergétique du logement à la disposition des propriétaires ;
- les critères de décision des différents propriétaires.

L'offre de travaux de rénovation

Les possibilités de rénovation varient en fonction des caractéristiques techniques du logement à rénover, mais aussi en fonction des disponibilités du marché. Les hypothèses suivantes sont posées :

- un type de travaux de rénovation énergétique est disponible pour un logement donné uniquement s'il améliore les performances énergétiques du logement ;
- les offres de travaux de rénovation les plus courantes sont envisagées et disponibles pour tout type de maison individuelle considéré, quels que soient son emplacement géographique et ses caractéristiques (architecturales notamment). Ces travaux de rénovation ont été répartis en sept classes :
 - l'isolation des murs ;
 - l'isolation du plancher haut ;
 - l'isolation du plancher bas ;
 - le remplacement des vitrages ;
 - le remplacement du système de ventilation ;
 - le remplacement du système de chauffage ;
 - la pose d'un système de chauffe-eau solaire.

Chaque classe est composée de plusieurs solutions techniques plus ou moins performantes, représentatives de l'offre actuelle en matière de rénovation. Les caractéristiques de ces solutions ont été documentées ainsi que leur coût de mise en œuvre (coût de matériel et de main d'œuvre). L'ensemble des combinaisons des différentes classes est envisagé, créant ainsi un panel de plus de 100 000 bouquets de travaux parmi lesquels les propriétaires pourront « faire leur choix ». Cette exhaustivité est naturellement peu réaliste et il va de soi qu'un propriétaire particulier ne se livrera pas à une analyse aussi vaste. Dans le cadre de notre travail, cette grande variété de choix nous permet de mener une analyse de sensibilité aux critères de sélection des différents propriétaires des bouquets de travaux susceptibles d'être choisis et d'explorer ainsi le champ des possibles.

Méthode d'analyse : représentation des motivations des propriétaires

Les critères d'évaluation peuvent être extrêmement variables d'un propriétaire à un autre, et dépendent des motivations qui les poussent à envisager une rénovation. On peut toutefois mettre en avant quatre types de motivations :

- la recherche d'un gain économique : recherche d'une économie d'énergie

valorisable sur sa facture énergétique à court ou plus long terme, et/ou sur la valeur de son bien immobilier ;

- une volonté environnementaliste, par une réduction de sa consommation énergétique et/ou des émissions de gaz à effet de serre ;
- l'amélioration de son confort thermique, qui peut se traduire par une augmentation des consommations énergétiques ;
- d'autres motivations telles l'esthétique, la recherche du confort acoustique, etc.

Une des méthodes classiques en économie pour représenter ces différentes motivations et les comparer consiste à en monétariser les caractéristiques et à les intégrer dans un modèle de rationalité. Nous avons retenu le modèle économique reposant sur la maximisation de la valeur actuelle nette (ou VAN) de l'ensemble des valeurs monétaires des bénéfices et coûts associés aux travaux de rénovation.

L'équation [1] retranscrit ce modèle de rationalité.

$$Max_{Travaux} \left(VAN = \sum_{t=0}^n \frac{C_t - I_t}{(1+i)^t} + Env + Conf + Autre \right)$$

avec :

- n : horizon économique ;
- C_t : la somme des économies⁴⁶ sur facture générées par les travaux à l'année t, de la plus-value du logement suite à une possible revente à l'année n ;
- I_t : investissement à effectuer chaque année, ici l'investissement se fera à l'année 0, et intègre les éventuelles aides à l'investissement (investissement net après subventions)
- i : taux d'actualisation qui traduit la valeur que le propriétaire donne aux gains et aux dépenses futurs ;
- Env : la valeur en euros associée aux bénéfices ou aux désagréments pour l'environnement d'un bouquet de travaux, d'après le propriétaire considéré ;
- Conf : la valeur en euros associée au gain ou à la perte de confort à cause d'un bouquet de travaux, d'après le propriétaire considéré ;

⁴⁶ Le calcul des économies suppose l'établissement d'une consommation de référence avant travaux et d'une consommation après travaux. L'établissement de ces consommations est décrit dans la suite de ce chapitre.

- Autre : la valeur en euros associée aux autres motivations d'un bouquet de travaux, d'après le propriétaire considéré.

Ce modèle va donc nous permettre de déterminer – une fois les différents paramètres fixés – le bouquet de travaux dont les coûts et bénéfices apportent la valeur actuelle nette la plus grande. Nous verrons par la suite que les sorties du modèle (bouquet de travaux et VAN associée) sont fortement sensibles à la valeur des paramètres internes au modèle.

Dans le cadre de nos travaux, nous nous sommes attachés à définir et évaluer les valeurs des investissements, des économies sur la facture énergétique, ainsi que des paramètres (actualisation, horizon économique) du modèle économique. L'évaluation de la valeur accordée à l'environnement ou au confort thermique ou acoustique est plus délicate à mener et fait l'objet de travaux de recherche spécifiques (comme par exemple l'évaluation du confort d'été⁴⁷) : les travaux présentés dans ce chapitre ne portent pas sur ces évaluations spécifiques et se concentrent sur les éléments fondamentaux de choix.

Le diagnostic de performance énergétique : un outil d'évaluation de la performance énergétique des logements

Il est nécessaire de renseigner le modèle de rationalité présenté dans le paragraphe précédent avec une évaluation des économies générées sur la facture énergétique par la réalisation de chaque bouquet de travaux. Le but de notre démarche étant de reconstituer une démarche analytique accessible aux propriétaires de logements, nous avons recherché cette méthode d'évaluation parmi les outils et méthodes à portée de tous et les plus diffusés chez les particuliers. A ce titre, il nous est apparu que le diagnostic de performance énergétique répondait – du moins, répondrait à terme – à ces caractéristiques.

Le diagnostic de performance énergétique (DPE), basé sur la méthode de Calcul des Consommations Conventionnelles dans les Logements (3CL)⁴⁸, est un indicateur permettant de connaître la consommation énergétique conventionnelle en énergie primaire et finale d'un logement avant et après l'application de bouquets de travaux. Le DPE prévoit la rédaction d'un feuillet de suggestions de travaux de rénovation. A l'heure actuelle, l'analyse coût-bénéfice de ces améliorations présente ses résultats

⁴⁷ « Développement d'une méthodologie d'Analyse Coût-Bénéfice en vue d'évaluer le potentiel de réduction des impacts environnementaux liés au confort d'été », Laurent Grignon-Massé, Thèse de doctorat Mines ParisTech, 20 mai 2010.

⁴⁸ « La méthode de Calcul des Consommations Conventionnelles dans les logements », Justificatifs 3CL, TRIBU Energie, mars 2006.

de manière qualitative ce qui est insuffisant pour mener une analyse détaillée telle que nous la présentons dans ce chapitre. Nous constatons toutefois que tous les outils nécessaires à l'affichage de résultats quantitatifs existent et pourraient être diffusés auprès des certificateurs. Ainsi, nous pourrions recommander que le DPE présente les résultats quantitatifs (sans oublier qu'il s'agit de calculs conventionnels) de l'analyse coût-bénéfice de quelques travaux élémentaires de rénovation. Enfin, nous faisons l'hypothèse qu'à terme le DPE prendra une place centrale dans les mécanismes de décision de travaux de rénovation des logements, d'une part parce que les incitations (et probablement futures obligations) à la rénovation conduiront les propriétaires à étudier de plus près les opportunités de rénovation de leur bien et d'autre part parce que l'outil d'analyse le plus répandu le plus accessible est le DPE dont les résultats reposent sur la méthode de calcul 3CL.

A l'aide de la méthode 3CL, nous avons donc estimé les économies d'énergie et de facture énergétique résultant de la mise en œuvre de l'ensemble des bouquets de travaux sur un logement donné. Afin de représenter la diversité des performances parc de logements, nous l'avons segmenté en fonction de la performance énergétique des logements avant travaux, qui dépend principalement de l'année de construction du logement, de la zone climatique dans laquelle le logement est situé et du type d'énergie utilisée pour le chauffage des logements (voir figure 1).

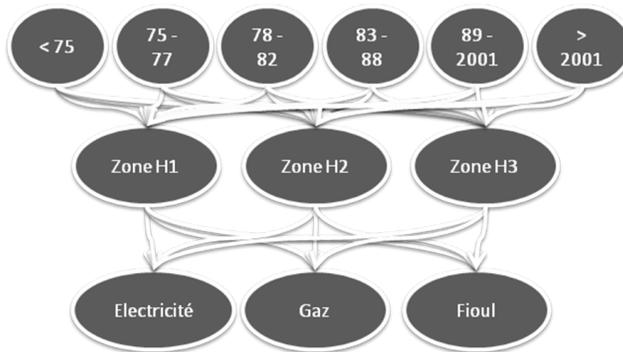


Figure 1 : Echantillon de maisons types étudiées

Critères de décision et représentation de la diversité des propriétaires

Enfin, nous avons cherché à représenter la diversité des propriétaires occupant ces logements. Pour cela, nous avons construit une typologie de propriétaires basée sur les critères de sélection que nous avons imaginés utilisés par ces propriétaires. Nous avons donc distingué les types de propriétaires suivants :

- « **Rationnel** » : ce type de propriétaire, parfaitement rationnel, averse au risque, cherche à minimiser le coût global des opérations d'amélioration de la performance énergétique de son logement. Il est parfaitement informé et raisonne sur la durée de vie des améliorations qu'il entreprend. Dans une certaine mesure, il réalise une optimisation proche de celle qui est réalisée par les pouvoirs publics.
- « **Myope** » : ce type de propriétaire n'a pas de visibilité sur le long terme, notamment sur l'horizon de vente de son logement pour lequel il n'envisage pas de valorisation des améliorations sur le prix de vente⁴⁹. Il est intéressé par le rendement à court terme.
- « **Hypermétrope** » : ce type de propriétaire n'est au contraire pas prioritairement intéressé par le court terme. Son objectif est, à plus long terme, de réduire au maximum la facture énergétique du logement dans lequel il pense rester pendant une période assez longue. Cependant, sa rationalité étant limitée, il ne sait pas explicitement donner de valeur actuelle à ses dépenses futures.

En plus de ces trois types principaux, d'autres critères peuvent être identifiés et peuvent venir s'ajouter aux comportements types décrits ci-dessus. On peut par exemple introduire :

- **Une contrainte budgétaire** : le choix des bouquets de travaux disponibles est contraint par le montant de l'investissement disponible ;
- **une contrainte patrimoniale** : le propriétaire pense pouvoir valoriser lors de la revente du logement son amélioration à travers son évolution sur l'échelle DPE. Il cherche donc à maximiser la classe DPE énergétique atteinte par son logement après travaux, ou à atteindre une classe énergétique donnée ;
- **une contrainte environnementale** : le propriétaire pense pouvoir valoriser lors de la revente du logement les réductions d'émissions de gaz à

⁴⁹ Le taux de rotation des occupants dans un même logement est très important : la durée moyenne d'occupation d'un logement est de 7 ans. Dans notre analyse, nous avons donc situé l'horizon économique des propriétaires « myopes » en-deçà, à 5 ans.

effet de serre réalisées. Il cherche donc à maximiser la classe DPE carbone atteinte par son logement après travaux, ou à atteindre une classe environnementale donnée.

Afin de modéliser ses différentes caractéristiques, des déviations sont donc introduites dans le modèle de rationalité présenté auparavant, soit en modifiant les paramètres du modèle (horizon économique, taux d'actualisation) soit en y introduisant des contraintes.

Caractéristiques identifiées	Paramètres	Contraintes
Rationnel	n = durée de vie des améliorations a = 4 %	
Myope	n = 5 ans a = 0 %	
Hypermétrope	n = durée de vie des équipements a = 0 %	Consommation d'énergie minimale
Contrainte budgétaire	-	$I_0 \leq Budget$
Contrainte patrimoniale	-	Classe DPE énergie > contrainte (A-G)
Contrainte environnementale	-	Classe DPE carbone > contrainte fixée (A-G)

Tableau 1 : paramètres de modélisation des différents types de propriétaires

AMÉLIORATION DES LOGEMENTS PAR LES PROPRIÉTAIRES

Analyse du potentiel de rénovation selon le type de propriétaire

Les différents types de propriétaires ont naturellement un comportement différent suivant l'état du logement qu'ils occupent. Afin d'illustrer la sensibilité de ces comportements, nous avons choisi de présenter un extrait de nos résultats. Nous présentons donc dans ce chapitre les résultats concernant trois types de logements se différenciant par leur période de construction : un logement ancien, construit avant 1975 et non rénové, un logement construit dans les années 1980 et un logement récent construit après 1990. L'énergie de chauffage de ces logements situés en zone H1 est le gaz et le choix de cette énergie n'est pas remis en cause lors

de la réalisation des travaux de rénovation. La géométrie des logements est identique : il s'agit d'une maison de 2 niveaux, de 65 m² chacun.

Les résultats seront présentés sous la forme d'une matrice de transitions de classe énergétique DPE indiquant pour un logement donné ses possibilités d'évolution sur l'échelle DPE (de A à G). Ces transitions ont été obtenues en faisant varier la contrainte patrimoniale imposée dans le modèle de rationalité économique : à chacune de ces transitions correspond donc un bouquet de travaux déterminé par le modèle ainsi que la valeur actuelle nette des bénéfices des travaux de rénovation. Des données internes à la modélisation peuvent être extraites afin d'enrichir l'analyse de ces transitions : on s'intéresse en particulier à l'investissement nécessaire pour réaliser ces transitions ainsi qu'à la consommation d'énergie finale atteinte (rappelons que l'échelle DPE reflète une consommation en énergie primaire).

Le Tableau 2 présente une matrice de transitions de classes énergétiques pour les trois principaux types de propriétaires occupants. Pour chacun de ces propriétaires, pour un logement à classe énergétique avant rénovation donnée (de G à E), on distingue les transitions ayant une rentabilité économique (notées « + » et « ++ ») de celles n'en ayant pas (notées « - »), ainsi que les transitions impossibles techniquement avec le bouquet de travaux étudié (notées « 0 »). Enfin, parmi les transitions de classes énergétiques ayant une rentabilité économique et qui sont donc susceptible d'être choisie par les propriétaires, on distingue celle qui présente la plus forte rentabilité selon les critères du propriétaire étudié (notée « ++ »), et qui est donc susceptible d'être choisie préférentiellement.

- Propriétaire de type rationnel

		Classe DPE après rénovation						
		G	F	E	D	C	B	A
Classe DPE avant rénovation	G	X	+	+	++	+	-	0
	E	X	X	X	++	-	-	0
	D	X	X	X	X	++	-	0

- Propriétaire de type myope

		Classe DPE après rénovation						
		G	F	E	D	C	B	A
Classe DPE avant rénovation	G	X	+	-	-	-	-	0
	E	X	X	X	-	-	-	0
	D	X	X	X	X	-	-	0

- Propriétaire de type hypermétrype

		Classe DPE après rénovation						
		G	F	E	D	C	B	A
Classe DPE avant rénovation	G	X	+	+	+	+	+	0
	E	X	X	X	+	+	-	0
	D	X	X	X	X	+	-	0

Tableau 2 : Matrices de transitions de classes énergétiques pour les trois principaux types de propriétaires.

Analyse des transitions de classes énergétiques

Le Tableau 2 met en évidence que les propriétaires de type rationnel et hypermétrype sont susceptibles de mener à bien des rénovations de plus grande importance en comparaison de ceux a priori acceptables par les propriétaires de type myope. En effet, malgré la grande diversité de travaux disponibles qui s'offrent à eux, ce type de propriétaire n'améliore quasiment pas la qualité de son logement à cause d'un horizon économique trop court (5 ans). On peut également noter que seuls les bâtiments les plus énergivores (de classe G) sont en mesure d'être améliorés de manière significative en atteignant la classe D pour les propriétaires hypermétrypes et rationnels. Les autres logements de classe E et D peuvent espérer gagner une classe énergétique en atteignant respectivement D et C, ce qui correspond à la moyenne des performances du parc de logements en France. Seule

une considération patrimoniale, c'est-à-dire la recherche de la classe énergétique maximale, est susceptible d'améliorer ces résultats en permettant un passage en classe B ou C tout en respectant les critères de rentabilité des propriétaires de type hypermétrépe.

La méthode d'analyse que nous avons développée permet également d'établir des résultats plus quantitatifs rendant possible une analyse plus fine des comportements des différents propriétaires en fonction du logement qu'ils occupent. Nous avons ainsi pu introduire des contraintes budgétaires dans le modèle via l'analyse de l'effort nécessaire en matière d'investissement pour passer aux classes énergétiques supérieures.

	Etat initial	G	F	E	D	C	B	A
Consommation en kWh _{ép} /m ² .an	505	471	333	231	212	149	89	
Investissement en euros	0	1 952	7 280	9 073	10 234	19 518	4 1778	
VAN en euros	0	1 249	8 714	16 486	17 027	13 644	-3 040	

Tableau 3 : extrait d'une matrice de transition – résultats quantitatifs

Le Tableau 3 montre ainsi que le choix optimum pour le propriétaire en question (ici de type rationnel) est soumis à une contrainte budgétaire de l'ordre de 10 000 € environ. En matière de politique publique d'incitations à la rénovation, ce résultat peut justifier l'octroi d'un prêt à taux zéro d'un montant égal à 10 000 € pour ce type de logement (classe énergétique G). Au-delà, non seulement, il faudrait doubler son montant pour faire changer la décision en matière de travaux mais dans le même temps, on éloignerait la décision de l'optimum technico-économique global. Un dimensionnement du prêt à taux zéro à 10 000 € est donc à prescrire pour réaliser le bouquet de travaux permettant de passer de la classe G à D (isolation renforcée des murs et des combles et changement du système de ventilation). Rappelons toutefois que cet optimum technico-économique peut évoluer dès lors que les considérations patrimoniales (comme la recherche de la classe DPE la plus élevée) sont valorisées par les acteurs du marché de l'immobilier ce qui n'est pas le cas à l'heure actuelle.

Dans le même temps, par analyse de chacune des transitions de classe énergétique, nous avons pu établir l'ordre de choix des travaux de rénovation. Pour le logement et le type de propriétaire étudié dans le Tableau 3, les travaux suivants sont réalisés dans l'ordre de transition des classes énergétiques :

- Changement de ventilation (amélioration des performances au sein de la classe G) ;
- Isolation des murs (passage de G à F) ;
- Isolation des combles (passage de F à E) ;
- Isolation renforcée des murs et combles (passage de E à D)
- Isolation du plancher (passage de D à C) ;
- Changement des fenêtres et installation d'un chauffe-eau solaire (passage de C à B)

On peut noter d'une part qu'aucun bouquet de travaux parmi ceux que nous avons étudiés ne permet d'atteindre la classe énergétique A : seule l'installation d'une pompe à chaleur (et donc un changement d'énergie finale) permettrait d'atteindre cette classe énergétique. D'autre part, pour le logement étudié, le système de chauffage (ici une chaudière gaz) n'est pas modifié par le propriétaire : le passage à la chaudière à condensation ne se justifie pas en regard des critères de choix de ce propriétaire.

Analyse des incitations à la rénovation des logements

Ces premiers résultats peuvent être complétés par une analyse de la sensibilité des choix en matière de rénovation des propriétaires à diverses incitations mises en place par les pouvoirs publics. Dans le cadre de notre travail, nous avons plus particulièrement étudié le crédit d'impôt et l'éco-prêt à taux zéro en les introduisant dans le modèle de décision décrit dans la première partie de ce chapitre. Pour cela, nous avons modifié certains paramètres du modèle pour représenter les caractéristiques de ces incitations.

Le crédit d'impôt est une aide directe⁵⁰, représenté dans le modèle de rationalité comme un revenu à l'année 0 diminuant de fait le montant de l'investissement perçu par les propriétaires. L'éco-prêt à taux zéro est un prêt à 0 % sur 10 ans et est donc intégré sous la forme d'une contrainte dans le modèle :

- Le budget minimal des propriétaires est au moins égal à la valeur maximale du prêt accordable. D'un autre point de vue, une partie de l'éventuelle contrainte budgétaire qui pèse sur le propriétaire est levée ;
- L'horizon économique des propriétaires (durée sur laquelle l'analyse technico-économique est réalisée) est supposé devenir au moins équivalent

⁵⁰ Les opérations éligibles au crédit d'impôt ainsi que le niveau du crédit d'impôt alloué considéré dans ces travaux correspondent aux instructions fiscales en vigueur au printemps 2010. Il en est de même pour les dispositions de l'éco-prêt à taux zéro.

à la période de remboursement du prêt. Par conséquent, nous faisons l'hypothèse qu'en contrepartie de la levée de la contrainte budgétaire provoquée par l'octroi d'un prêt à taux zéro l'horizon économique des propriétaires de type myope passe de 5 ans à 10 ans.

Le Tableau 4 présente les modifications engendrées par le crédit d'impôt sur le potentiel de rénovation par les différents types de propriétaires : celles-ci sont mises en évidence par rapport à la situation initiale par les cases grisées dans les matrices de transition de classe énergétiques.

- Propriétaire de type rationnel

		Classe DPE après rénovation						
		G	F	E	D	C	B	A
Classe DPE avant rénovation	G	X	+	+	+	+	+	0
	E	X	X	X	+	+	-	0
	D	X	X	X	X	+	-	0

- Propriétaire de type myope

		Classe DPE après rénovation						
		G	F	E	D	C	B	A
Classe DPE avant rénovation	G	X	+	+	+	-	-	0
	E	X	X	X	-	-	-	0
	D	X	X	X	X	-	-	0

- Propriétaire de type hypermétrype

		Classe DPE après rénovation						
		G	F	E	D	C	B	A
Classe DPE avant rénovation	G	X	+	+	+	+	+	0
	E	X	X	X	+	+	-	0
	D	X	X	X	X	+	-	0

Tableau 4 : Modification par la prise en compte du crédit d'impôt des matrices de transitions de classes énergétiques pour les trois principaux types de propriétaires

Comme on peut le constater, le modèle de décision que nous avons proposé est peu sensible à l'introduction du crédit d'impôt. Seuls les propriétaires cherchant à diminuer leur facture énergétique sur le long terme (de type hypermétrape) sont susceptibles de modifier leur décision : tous les types de logements étudiés pourraient ainsi atteindre la classe énergétique C, ce qui représente un potentiel d'amélioration important puisque la consommation d'énergie primaire est réduite d'un facteur 2 à 4 au lieu d'être réduite d'un facteur 2 à 3 selon la classe énergétique initiale du logement. Les choix en matière de rénovation des autres types de propriétaire ne sont pas remis en question par la prise en compte du crédit d'impôt.

Il faut toutefois mesurer nos conclusions sur l'apparente inefficacité du crédit d'impôt telle qu'elle apparaît sur ces résultats. D'une part, nous présentons des résultats sur un échantillon de logements très réduit, et d'autre part, l'effet signal du crédit d'impôt ne peut pas être négligé dans le cadre de l'analyse pratique réalisée par les propriétaires. En effet, en ciblant certaines opérations élémentaires de rénovation, le crédit d'impôt joue un rôle de sensibilisation en suscitant l'attention des contribuables à la rénovation énergétique de leur logement. Cet effet n'est absolument pas représenté dans notre analyse qui se limite aux aspects technico-économiques.

L'éco-prêt à taux zéro est introduit dans notre modèle par une modification de l'horizon économique sur lequel les propriétaires sont susceptibles de mener leur analyse : cet horizon économique devient au moins égal à l'échéance de remboursement du prêt, soit 10 ans. Vus les paramètres utilisés pour caractériser les différents propriétaires, seuls les propriétaires raisonnant à court terme sont susceptibles de voir leur choix en matière de rénovation impacté par la prise en compte du prêt à taux zéro.

Dans ces conditions, le Tableau 5 met clairement en évidence la sensibilité de notre modèle au rallongement de l'horizon économique. Alors que dans la situation initiale, seuls les logements de classe énergétique G pouvaient espérer être rénovés et atteindre la classe F, tous les logements étudiés peuvent être améliorés dans cette nouvelle situation et atteindre au minimum la classe énergétique D. Les choix en matière de rénovation de ce type de propriétaire se rapprochent très fortement des choix réalisés par les propriétaires de type rationnel. Le prêt à taux zéro, tel que nous l'avons représenté, a donc un impact important sur les choix en matière de rénovation et semble donc plus efficace que le crédit d'impôt en matière de potentiel de rénovation des logements.

Propriétaire de type myope

		Classe DPE après rénovation						
		G	F	E	D	C	B	A
Classe DPE avant rénovation	G	X	+	+	+	+	-	0
	E	X	X	X	+	-	-	0
	D	X	X	X	X	+	-	0

Tableau 5 : Modification par la prise en compte du prêt à taux zéro de la matrice de transition de classes énergétiques pour les propriétaires de type myope.

L'analyse qualitative menée jusqu'ici peut être enrichie par une analyse plus quantitative reposant sur le montant de l'investissement nécessaire la réalisation des transitions de classes énergétiques ainsi que sur le montant du crédit d'impôt susceptible d'être octroyé.

	Etat initial : G	F	E	D	C	B	A
Consommation en énergie primaire (en kWh _{ép} /m ² .an)	505	333	230	206	143	89	
Investissement (€)	0	7 280	9 126	12 185	21 416	41 778	
VAN (€)	0	9 093	17 303	18 736	17 230	4 279	
Crédit d'impôts (€)	0	380	826	3 060	4 908	7 319	
Investissement déduit du montant du crédit d'impôt (€)	0	8 713	8 300	15 676	16 508	34 459	

Tableau 6 : Extrait d'une matrice de transition complète (logement construit avant 1975, en zone H1, chauffé au gaz, pour un propriétaire rationnel, avec crédit d'impôts). La consommation primaire est donnée en kWh/(m².an), l'investissement, la VAN et le montant du crédit d'impôts en euros. La première ligne indique l'étiquette énergie après rénovation.

L'extrait de la matrice de transition présenté sur le Tableau 6 permet ainsi plusieurs analyses sur les incitations pour le cas présenté :

- Le crédit d'impôt, pour un couple avec deux enfants s'applique sur un montant de travaux d'une valeur maximale de 16 400 €. Ainsi, les sommes engagées pour les travaux sont toutes éligibles jusqu'à la classe énergétique D. En revanche, au-delà une partie des investissements n'est plus éligible ce

qui peut entraîner les propriétaires à faire des travaux n'excédant pas 16 400 € et donc à ne pas dépasser la classe énergétique D, bien que le propriétaire, de type rationnel ici, pourrait, d'après ses critères de décision, s'orienter vers une rénovation plus ample permettant à son logement d'atteindre la classe énergétique C.

- L'eco-PTZ a une valeur maximale de 30 000 €. Il permet de financer ici les travaux jusqu'à l'étiquette énergie C, mais pas au-delà. D'ailleurs, sur notre exemple 20 000 € suffisent à atteindre ce niveau : il y a donc un surplus de financement de 10 000 € dispensable à ce niveau.

Par ailleurs, nous avons montré que le crédit d'impôt avait peu d'influence sur la classe énergétique obtenue après travaux de rénovation. En réalité, une analyse détaillée des bouquets de travaux choisis avec ou sans crédit d'impôt montre que le choix de bouquet de travaux est tout de même légèrement différent. Mais cette différence de qualité de travaux n'a que peu d'impact sur les consommations d'énergie : avec ou sans crédit d'impôt, les propriétaires font à peu près les mêmes choix. Cette analyse met donc en évidence l'importance de l'effet d'aubaine en faveur de ces propriétaires.

CONCLUSIONS

Notre objectif était d'apporter une contribution originale à la réflexion sur les incitations à mettre en œuvre pour augmenter le rythme et la qualité des travaux de rénovation dans les logements. Nous avons donc cherché d'abord à représenter les analyses technico-économiques que pourrait mener la diversité des propriétaires souhaitant améliorer les performances énergétiques de leur logement. Dans un second temps, nous avons tenté de figurer la manière avec laquelle cette diversité pourrait interpréter les différents signaux envoyés par les pouvoirs publics.

L'analyse proposée dans ce chapitre repose donc sur la construction d'un modèle de rationalité économique dans lequel nous avons fait varier fortement quelques paramètres afin de rendre compte de la diversité des critères de décision susceptibles de guider les choix des propriétaires de logement en matière de rénovation énergétique. Seules trois configurations caricaturales ont été présentées ici, notre objectif n'étant pas de prétendre à l'exhaustivité mais de proposer des éléments de réflexion à partir d'une analyse variationnelle de notre modèle.

Comme nous l'avons présenté au début de ce chapitre, de nombreux facteurs de décision ne sont pas représentés. Les travaux de rénovation énergétique ne se traduisent pas uniquement par des gains énergétiques purs et il conviendrait d'intégrer d'autres bénéfices : amélioration du confort thermique et acoustique,

valorisation du bien immobilier, etc.. Bien que notre modélisation permette de le faire, le paramétrage de ces facteurs représente une tâche d'envergure et n'était pas l'objet de ces premiers travaux de recherche. Par ailleurs, cette analyse mono-factorielle permet d'évaluer la pertinence des dispositifs d'incitation au regard du critère énergétique seul.

Les premiers résultats mettent donc en évidence l'impact relatif que les incitations actuelles – une combinaison de prêt à taux zéro et de crédit d'impôt – ont sur les choix des propriétaires en matière de rénovation énergétique. Ainsi, une certaine inefficacité de ces incitations a été révélée et on peut se demander si les incitations actuelles sont bien adaptées à l'ensemble des types de propriétaires. En particulier, en l'absence de contrainte budgétaire, un propriétaire « myope » est par nature beaucoup plus sensible à l'octroi d'une aide directe à l'investissement de court terme comme le crédit d'impôt et l'est moins à l'octroi d'un prêt à taux zéro dont l'échéancier n'est pas en accord avec son horizon économique. De la même manière, il apparaît assez clairement que le crédit d'impôt constitue un effet d'aubaine important pour tout propriétaire raisonnant à plus long terme et sans contrainte budgétaire.

Notre analyse semble remettre en question la diversité structurelle des aides à la rénovation. Il semblerait judicieux de laisser le choix à chaque propriétaire de choisir un seul type d'aide – subvention directe à l'investissement ou aide à la levée de la contrainte budgétaire à une échéance de 10 ans – afin de lui permettre de révéler son comportement et d'agir sur le levier de décision le plus sensible. Cependant, certaines caractéristiques de ces aides existantes ne sont pas ou sont mal représentées : en particulier, nous avons émis peu de considérations sur la levée de la contrainte budgétaire apportée par le prêt à taux zéro et nous ne représentons pas non plus l'effet-signal du crédit d'impôt qui sensibilise d'une certaine manière les propriétaires à la problématique de la rénovation.

Enfin, le montant des aides pourrait être fixé non pas sur la performance des travaux pris individuellement mais attribué selon la transition de classes énergétiques réalisée. Les quelques exemples cités dans ce chapitre montrent bien l'existence d'optimums de performance globale des travaux de rénovation : du point de vue de la puissance publique, il nous semble plus pertinent de viser ces optimums que la plus faible consommation d'énergie primaire.

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

Stéphane Hallegatte
Vincent Vigié

RESUME

L'agglomération parisienne peut être bien décrite par un modèle mono-centrique. 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 1 700 m) 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.

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 nombreuses conséquences bénéfiques en permettant de réduire les consommations d'énergie⁵¹ et en améliorant la qualité de vie⁵². Sans entrer dans le débat entourant cette question⁵³, 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 transports⁵⁴. 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

⁵¹ P. Newman et J. R Kenworthy, *Cities and automobile dependence: a sourcebook* (Gower Publishing Company, Limited, 1989).

⁵² 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.

⁵³ 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.

⁵⁴ 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.

les outils classiques d'économie urbaine⁵⁵, et des données socio-économiques variées⁵⁶. 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 Quinet⁵⁷. Nous pensons 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 utilisés 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 1960⁵⁸. 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

⁵⁵ 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.

⁵⁶ Une modélisation utilisant un formalisme similaire au notre, mais des données et des hypothèses différentes a été effectuée par D. Rouchaud et A. 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. Août 2004

⁵⁷ Alain Quinet, *La valeur tutélaire du carbone*, La Documentation Française, 2009.

⁵⁸ 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.

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 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'agglomération⁵⁹. 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 classique⁶⁰:

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

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 :

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

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

60 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.

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

$$d\Pi/dK=0 \tag{5}$$

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.

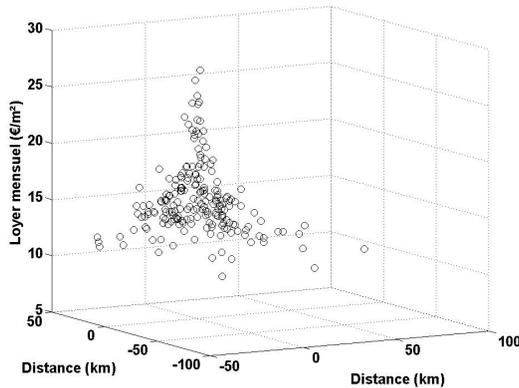


Figure 1 : Loyers en Île-de-France (source : Clameur)

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 demande⁶¹, nous avons supposé que 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.

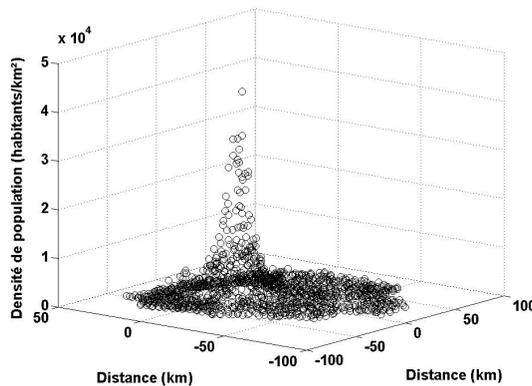


Figure 2 : Densité de population en Île-de-France (source : INSEE)

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

⁶¹ 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

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 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 median 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.

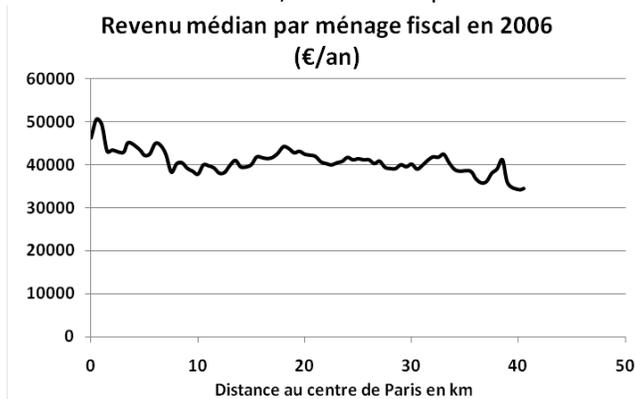


Figure 3 : Revenu médian par ménage fiscal (Source INSEE)

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'INSEE⁶². Les ratios de surfaces dédiées à l'habitat⁶³ 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 choisis 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 %⁶⁴.

En ce qui concerne les temps de transport⁶⁵, nous nous sommes appuyés sur le travail de D. Rouchaud et A. Sauvart⁶⁶. 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 100 km. 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 coûts associés aux transports en commun ont été estimés d'après les tarifs de la carte orange mensuelle en 2008.

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

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

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

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

66 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

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-ci⁶⁷.

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 6 au centre de Paris. La différence provient d'une part du fait que le dénominateur de notre ratio n'inclue pas la surface au sol des bâtiments⁶⁸, ainsi que du fait que le numérateur ne prend en

⁶⁷ 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.

⁶⁸ Il inclue également les cours d'immeubles, les petits jardins privatifs (d'une surface inférieure à $1000m^2$) et les voies d'emprise inférieure à 25m (cf note 15)

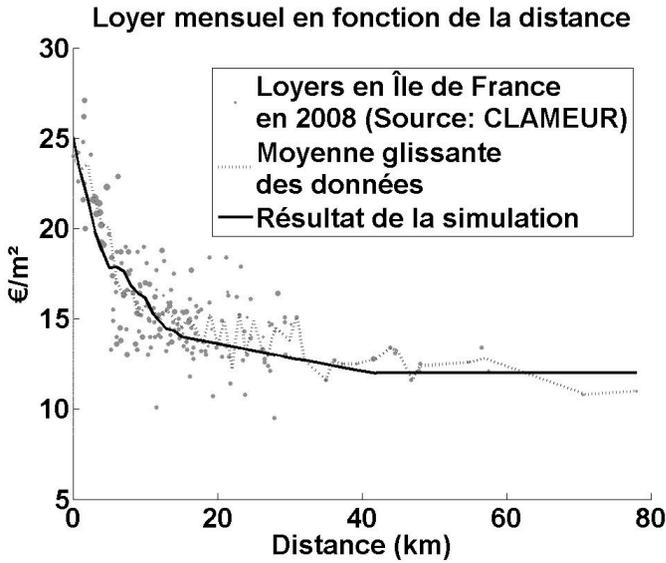


Figure 4 : Loyers calculés par le modèle (chaque point représente une commune, la taille du point étant proportionnelle à sa population)

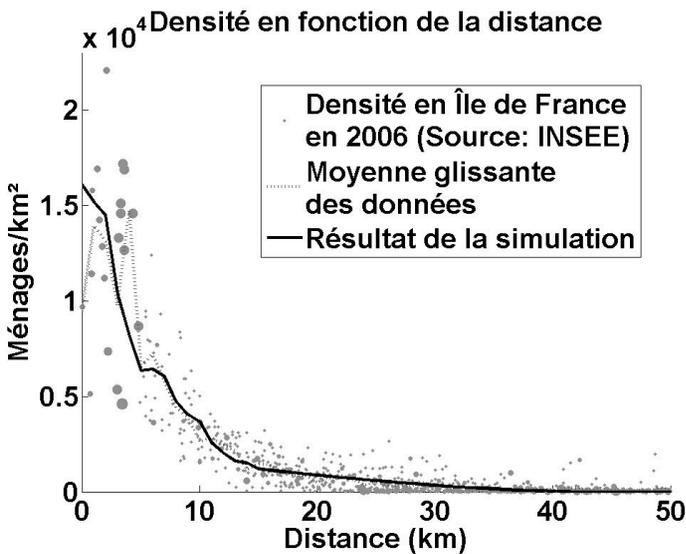


Figure 5 : Densité de population calculée par le modèle (chaque point représente une commune, la taille du point étant proportionnelle à sa population)

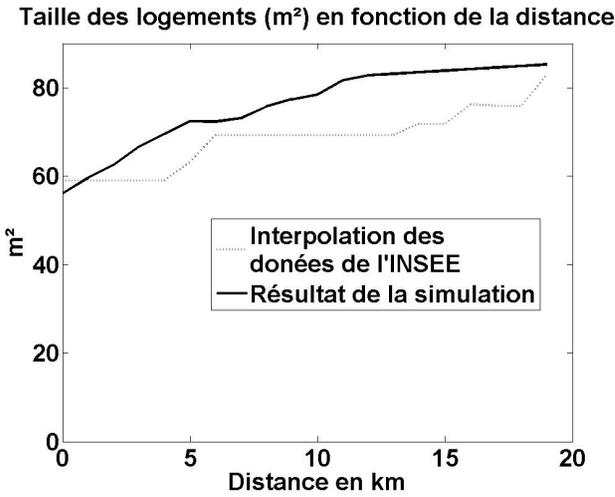


Figure 6 : Taille des logements

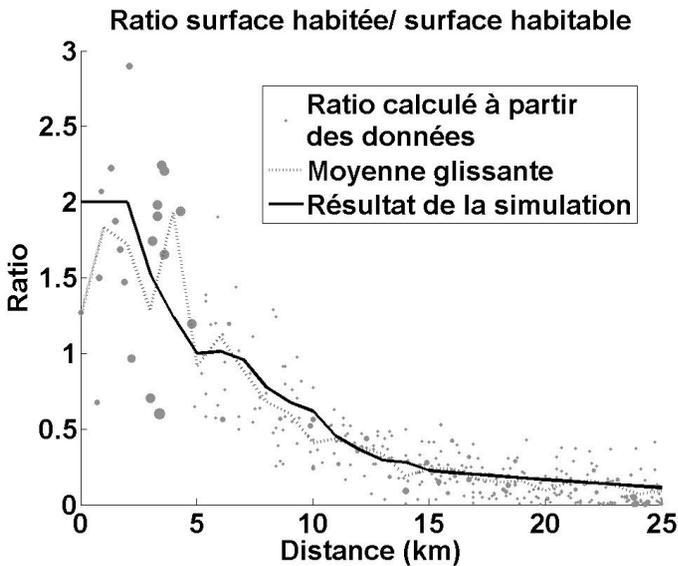


Figure 7 : Ratio surface habitée/surface habitable (chaque point représente une commune, la taille du point étant proportionnelle à sa population)

compte que la surface habitée, et non la surface construite totale⁶⁹. 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 CSTB⁷⁰. 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 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 augmente⁷¹. 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),

⁶⁹ 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.

⁷⁰ 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.

⁷¹ 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).

et techniques (durée et difficulté technique du chantier), qui peuvent expliquer la convexité de la courbe.

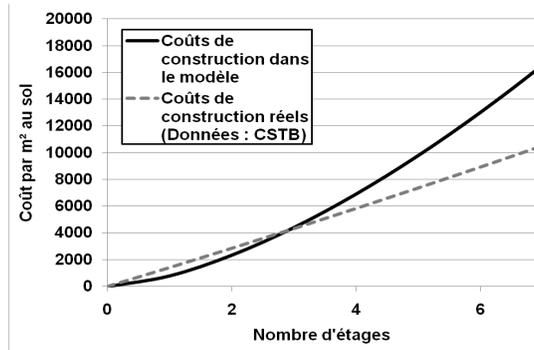


Figure 8 : Coûts de construction

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 quasi-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 28 min (ou, de manière équivalente, que la distance au centre de Paris est inférieure à 12 km), 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 2001⁷², à savoir 77 % du salaire brut horaire, c'est-à-dire environ le salaire net horaire.

⁷² 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 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 par ailleurs 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 vitesse⁷³, 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 longue⁷⁴. 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.

Quantitativement, on observe que la distance moyenne des habitants au centre-ville diminue de 1.5 %, soit 250 m. 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.

⁷³ 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.

⁷⁴ 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.

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 1 700 m) par rapport à l'état initial sans taxe, en passant d'environ 17 km 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 25 km 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 particulier, 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 l'éventualité d'une évolution polycentrique de l'agglomération en réutilisant le modèle, mais en l'appliquant plusieurs fois à 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 causé 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 politiques (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.

Nous tenons également à remercier Didier Rouchaud et Alain Sauvant 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.

Une prospective 2030 de l'usage du sol et du transport en Ile-de-France

Thierno AW
Jean LATERRASSE
Fabien LEURENT

RESUME

Depuis plus d'une génération, une stratégie d'aménagement polycentrique est poursuivie en Ile-de-France, au moyen notamment des Villes Nouvelles. L'article prospecte deux partis d'aménagement pour la période 2004-2030, tous deux favorisant la densification de l'agglomération mais l'un de manière homogène et l'autre de manière ciblée, favorisant davantage les grands pôles d'urbanisation.

En combinant une projection démographique spatialisée et une simulation de la demande de transport, nous montrons que ces scénarios de densification permettraient de renforcer la centralité urbaine des grands pôles, ainsi que leur équilibre et leur cohérence entre population et emplois ; et aussi d'abaisser les distances entre domicile et travail, de favoriser les circulations douces, et de maintenir la qualité de service sur le réseau routier, la restructuration spatiale compensant l'accroissement démographique. Ces résultats valent principalement pour le scénario de densification ciblée.

INTRODUCTION

Contexte

Pour planifier le devenir d'un territoire, il est classique de projeter l'évolution de l'usage du sol et du système de transport⁽⁷⁵⁾. La projection est fondée sur le principe que les lieux des activités, selon leurs fonctions urbaines respectives, sont en relation de complémentarité : cette complémentarité induit des besoins de déplacement, lesquels se concrétisent en des flux de transport. Souvent les projections sont réalisées de manière séparée par grand domaine, occupation des sols d'une part et transport de l'autre. Or il y a des interactions : en transport la charge locale de trafic détermine la qualité de service, ce qui influence les choix d'itinéraire des usagers et les conditions de transport par relation origine-destination, et par conséquent aussi la distribution des besoins de déplacement entre les lieux des activités.

En 2007 le Schéma Directeur de la Région Ile-de-France⁽⁷⁶⁾, document de planification stratégique du territoire francilien et de territorialisation des politiques d'aménagement à l'horizon 2030, a traité conjointement des deux volets, comme en témoigne le plan du document : (I) les défis et le projet, (II) les orientations fondamentales pour le développement durable et (III) celles pour l'aménagement territorial, (IV) les territoires de solidarités et la politique partenariale, (V) les mesures de suivi et d'évaluation – tandis que l'évaluation environnementale fait l'objet d'un volet spécifique.

L'évolution sémantique, du terme « Plan » à la « Stratégie » pour désigner le projet de développement et d'aménagement régional, témoigne bien que l'état futur n'est plus conçu comme une cible imposée, mais comme la résultante de choix politiques fondamentaux et concertés. A l'approche normative de la démarche planificatrice est préférée la méthode exploratoire d'une prospective procédant par scénarios.

Encore faut-il que la réflexion s'ouvre suffisamment aux potentialités, et qu'elle ne se cantonne pas au voisinage d'un scénario central : le risque serait de négliger les effets possibles de politiques plus volontaristes.

⁷⁵ Documents de référence en Ile-de-France (CIACT, PDU, Schémas Directeurs 1965-1976-1994) <http://www.ile-de-france.equipement.gouv.fr/>

⁷⁶ Projet du Schéma Directeur 2007 <http://www.iledefrance.fr/lactualite/conseil-regional/conseil-regional/le-projet-de-sdrif-en-ligne/>

Objectif

Notre objectif est de prospecter de manière intégrée l'évolution de l'usage du sol et des transports, pour l'Ile-de-France entre 2004 et 2030, en élaborant et en simulant deux partis contrastés d'aménagement spatial. Les deux partis respectent le schéma polycentrique d'urbanisation décidé en 1965 et régulièrement conforté dans la suite, notamment par le développement des Villes nouvelles⁽⁷⁷⁾. Les scénarios d'occupation des sols se différencient dans la localisation des développements urbains : le parti « DH », de densification homogène », intensifie la densité dans la zone la plus urbanisée, composée de Paris et la Petite Couronne. Le parti « DC », de « densification ciblée », privilégie les pôles suburbains bien desservis par les transports collectifs, afin d'y accroître la masse des activités, la polarisation, et finalement la centralité⁽⁷⁸⁾.

Méthode

Notre prospection se base sur un modèle de formation des déplacements et du trafic : nous simulons l'influence des conditions de déplacement sur les choix de mobilité quotidienne des habitants, et donc l'effet du parti d'aménagement sur les flux de transport, pour les modes automobile et collectifs.

Notre approche relève d'abord de la géographie, pour la localisation des activités, la formation des besoins de déplacement à partir de la configuration des activités, et l'inscription spatiale des courants de trafic. Elle relève aussi de l'économie du transport, car nous modélisons les comportements individuels des résidents dans leurs choix de mobilité (destination et moyen de transport) qu'ils opèrent selon une rationalité économique de minimisation d'un coût.

Notre prospection a encore un caractère démographique : nous avons simulé l'évolution de la population et celle des emplois, ainsi que l'évolution du taux d'activité professionnelle, pour l'ensemble du territoire régional, avant de la répartir dans l'espace selon le parti d'aménagement.

Enfin, nous avons conçu une batterie d'indicateurs pour synthétiser certains effets sensibles en matière de développement durable : indicateurs d'espacement entre les domiciles et les emplois, indicateurs de consommation de transport, indicateurs d'accessibilité territoriale.

⁷⁷ L. Vadelorge : « *Programme d'histoire et d'évaluation des villes nouvelles. Gouverner les villes nouvelles : le rôle de l'Etat et des collectivités locales 1960-2005* », Le Manuscrit, (2005).

⁷⁸ V. Fouchier : « *Les densités urbaines et le développement durable : le cas de l'Ile-de-France et des villes nouvelles* », Ed. du SGVN, (1997).

Plan de l'article

La suite du propos est organisée en cinq parties, outre la présente introduction et la conclusion. Nous opérons d'abord une analyse rétrospective de l'usage du sol et de la stratégie polycentrique, ainsi qu'un diagnostic à l'année de référence, 2004. Puis nous scénarisons l'occupation dans le sol, son évolution dans le temps et sa répartition dans l'espace. Ensuite nous traitons de la configuration respective des populations résidentes et des emplois, en examinant les appariements au titre de l'activité professionnelle, leur inscription spatiale et la consommation de transport qui en résulte, selon le parti d'aménagement. Enfin, nous inférons les conséquences sur le système de transport : les pressions déjà considérables sont appelées à se renforcer ; les partis d'aménagement se différencieraient sensiblement, l'un chargeant davantage un axe est-ouest, l'autre un axe nord-sud. Les conséquences sur l'accessibilité des territoires sont traitées dans un dernier volet.

RETROSPECTIVE ET SITUATION DE REFERENCE

Les bases de données cartographiques dites du Mode d'Occupation du Sol (MOS) ont été établies par l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de l'Ile-de-France (IAU-IdF) pour les années 1982, 1990 et 1999. Elles nous permettent de retracer objectivement l'évolution du territoire francilien, et d'évoquer l'évolution de la population et des emplois grâce aux données des recensements de population. Pour l'année de référence 2004, nous disposons aussi des bases de données sur les transports et les déplacements, établies par la Direction Régionale et Interdépartementale de l'Équipement et de l'Aménagement d'Ile-de-France (DRIEA-IDF) dans le cadre du modèle MODUS-2.

Une chronique de la stratégie polycentrique

Dès 1965 le schéma directeur avait prôné la création de « centres urbains nouveaux », le choix de zones préférentielles d'extension urbaine autour d'axes de transports structurants, et la cohérence d'ensemble de la région urbaine, comme principes pour répondre à la croissance démographique et économique et aux évolutions sociales marquées par l'augmentation du « temps libre » et du pouvoir d'achat. Le schéma directeur de 1976 avait ensuite quantifié les besoins de surface selon les zones d'extension urbaine, et prévu corrélativement le développement de liaisons radiales et périphériques : non seulement routières en cette période de diffusion rapide de l'automobile, mais aussi de transports collectifs (TC), en concomitance avec l'interconnexion des lignes A et B du Réseau Express Régional et plus largement, l'intégration des lignes ferrées, sans toutefois modifier le caractère radial dominant du réseau « lourd » de TC.

Le schéma directeur de 1994 a encore précisé la spécialisation des espaces, en promouvant une hiérarchie des pôles urbains favorable aux Villes nouvelles, ainsi qu'une protection pour certains espaces naturels ; en matière de transport, le besoin de liaisons tangentielles a été reconnu, et les réalisations ont été plus rapides pour le réseau routier que pour les réseaux ferrés. Dernièrement, le schéma directeur de 2007 a réaffirmé les objectifs précédents, et insisté particulièrement sur les enjeux de la protection environnementale et la maîtrise de l'étalement urbain, de la promotion de l'égalité territoriale et de la cohésion sociale, d'un meilleur rééquilibrage entre les fonctions résidentielles et économiques, afin de favoriser l'équité sociale et territoriale⁽⁷⁹⁾.

Rétrospective de l'usage du sol en Ile-de-France

Le territoire francilien couvre une superficie de 12 000 km², dont 20 % d'espaces urbanisés et 5 % d'espaces densément urbanisés (à 85 %) en 1999. Les 20 % d'espace urbanisé se répartissent en 7 % d'habitat individuel, 2 % d'habitat collectif, 5 % d'espace ouvert, 2 % pour l'activité productive, 2 % pour les équipements et 2 % pour les transports. La figure 1 montre la répartition du territoire par secteur morphologique au sens de l'IAU-IdF, d'après la densité d'établissement et le degré d'artificialisation du sol.

De 1982 à 1999, l'urbanisation a concerné minoritairement la petite couronne (2 400 hectares construits) et principalement la grande couronne (27 300 ha construits), pour accueillir les surplus de population et d'emplois. Une moitié (47 %) de l'urbanisation nouvelle en périphérie est effectuée dans les Villes nouvelles : ce 1 % de l'espace régional a été urbanisé pour moitié à Cergy-Pontoise et à Marne-la-Vallée. Cette dernière et Melun-Sénart sont les seules Villes nouvelles où l'espace disponible pour l'urbanisation reste majoritaire.

L'extension urbaine se décompose sur la période à 40 % pour l'habitat, dont 35 % pour l'habitat individuel, à 18 % pour les espaces urbains ouverts, 23 % pour l'activité productive et les équipements, 14 % pour les transports.

Nous constatons ainsi une concordance d'ensemble entre les principes établis dans les schémas directeurs, et les évolutions durant la période de 1982 à 1999. La concordance n'est ni absolue ni immédiate, mais bien avérée en termes tant d'affectation de l'espace foncier que de développement des réseaux de transport.

Cependant les enjeux en présence concernent des millions d'habitants et d'emplois supplémentaires par périodes de 20 ans : cette surcharge démographique engendre une surpression sur les espaces d'urbanisation et sur la capacité des

⁷⁹ IAURIF : « Point quantitatif sur SDRIF : Population, emploi et urbanisation », Note rapide n°332 sur le bilan du SDRIF, (2003).

réseaux de transport, avec des effets qui sont bien difficiles à maîtriser de manière globale car ils sont répartis, disséminés même, dans l'espace selon des logiques microéconomiques. Les ménages et les entreprises choisissent librement leur domiciliation, du moins dans le cadre de leur budget et de la disponibilité de locaux d'établissement. Les choix de localisation déterminent lourdement les consommations de distance et les flux de déplacement.

De fait, non seulement l'agglomération s'est étendue vers des zones cibles, mais encore les ménages comme les entreprises ont relativement délaissé le centre au profit de la périphérie. Parallèlement à ce mouvement démographique, le système de transport a été développé plutôt en périphérie pour la route, plutôt en liaison radiale pour les TC où le surcroît d'offre n'a permis entre 1990 et 2000 que de maintenir le trafic, pas de l'accroître. Le développement des TC a donc eu pour principal effet le maintien de l'attractivité du centre, ainsi que des liaisons radiales entre pôles éloignés : au lieu de canaliser des déplacements à moyenne distance en périphérie.

En 2004, un polycentrisme inabouti

Le polycentrisme se définit par la pluralité des centres urbains sur le territoire, et l'intensité des synergies entre les centres. En Ile-de-France, la localisation des populations tout comme celle des emplois manifeste l'existence de plusieurs pôles : Paris, La Défense et les Hauts-de-Seine, Roissy, etc. (fig. 4), sont des pôles importants à la fois en masse d'activité et en densité d'implantation⁽⁸⁰⁾. La superposition de plusieurs motifs d'activités, donc la multifonctionnalité, confère à un pôle massif et dense le statut d'un centre d'urbanisation.

Cependant, certains pôles présentent un déséquilibre local entre leur population active occupée et leur offre d'emploi : excédent en emplois pour Paris et La Défense, déficit pour la plupart des autres. Un tel déficit marque la subordination à la centralité dominante, au centre principal : s'il reste contenu en proportion, il ne remet pas en cause le statut de centre d'urbanisation. Mais ce critère démarque les pôles de La Défense, Paris, Evry, Roissy, au ratio Emplois sur Actifs occupés élevés, et ceux de Melun ou même Marne-la-Vallée, trop déficitaires en emplois. Dans une analyse par secteurs plutôt que par pôles, la persistance de déséquilibre a été constatée par l'Etat⁽⁸¹⁸²⁾ en accord avec le Conseil Régional⁽⁸³⁾ : persistance notamment des effets de la désindustrialisation dans un faisceau nord-est.

⁸⁰ DREIF : « *Mise à jour des occupations des sols dans MODUS* », Rapport d'études, (2005), 29 p.

⁸¹ DREIF : « *Réflexion sur l'avenir de l'Ile-de-France, Rapport du groupe de travail : Le polycentrisme en Ile-de-France* », (2003a), 65 p.

La confrontation entre les cartes d'occupation du sol (fig. 1, 3) et celles des réseaux de transport (fig. 2), nous montre que l'urbanisation francilienne a pour forme une zone centrale qui désormais englobe Paris et la Petite Couronne et leurs abords immédiats, soit un disque central de rayon environ 20 km, ainsi que quelques pôles secondaires reliés au disque central par de grandes infrastructures de transport (autoroutes et voies ferroviaires) et situés à une distance d'environ 40 km du centre donc 20 km du bord du disque central. Les axes lourds de transport supportent l'attraction métropolitaine. L'urbanisation paraît relativement maîtrisée aux confins de la zone centrale, les causes pouvant tenir à la maîtrise foncière comme aux coûts de transport en chaque lieu vers le reste de la configuration.

Entre les secteurs principaux d'urbanisation, subsistent des espaces interstitiels : leur position est caractéristique, délimitée par la zone centrale d'une part et les centres secondaires isolés d'autre part, et donc enchâssés, sectorisés entre deux corridors multimodaux de transport lourd, autoroute plus voie ferroviaire. A l'échelle de l'agglomération, l'urbanisation autour d'un échangeur autoroutier distant d'un pôle urbain paraît très secondaire : elle risque pourtant d'exercer deux effets notables, l'un de réduire la capacité des axes concernés, l'autre d'éloigner les habitants de la zone centrale et des espaces naturels qui subsistent.

Situation des transports en 2004

Les réseaux franciliens de transport acheminent des flux de déplacements selon une logique principalement à courte et moyenne distance pour l'automobile, ou mixte pour les transports collectifs, dont la matrice origine-destination journalière atteste aussi de la fonction radiale depuis et vers le département de Paris.

Au moyen du modèle MODUS-2 de la DRIEA-IDF, nous avons simulé les trafics routiers à l'heure de pointe du soir (moyenne horaire entre 17h30 et 19h30) et enregistré les distances parcourues et les temps passés par secteur d'urbanisation au sens de l'IAU. La banlieue urbanisée proche supporte 40 % des véhicules.kilomètres (véh.km) pour 46 % des véhicules.heures (véh.h). Le réseau routier rapide supporte 35 % des véh.h et 55 % des véh.km, ce qui démontre son rôle majeur dans le franchissement d'espace. Concernant les charges locales de trafic routier, le rapport entre volume et capacité installée dépasse $\frac{3}{4}$ en de nombreux sites, qui sont particulièrement soumis à la saturation : notamment le boulevard périphérique de Paris et l'autoroute A4 qui le relie à la partie Est de l'agglomération. Des cartes

⁸² DREIF : « *Le desserrement de l'emploi dans la région urbaine de Paris 1975-1999* », (2003b), 100 p.

⁸³ CESR : « *Diagnostic sur le développement économique de l'Ile-de-France en 2005* », (2005) 100 p.

similaires commencent tout juste à être produites pour le réseau ferroviaire (Stif, 2009).

La mobilité par habitant en 2004

Nous nous concentrons ici sur le motif le plus contraint de déplacement, entre le domicile et le lieu de travail. La distance moyenne par individu varie du simple au triple en s'éloignant du centre (fig. 5a). En termes économiques de coût généralisé de déplacement, intégrant non seulement le coût financier mais aussi la valorisation monétaire du temps passé (coefficient d'équivalence fixé à 13 €/h), un fort resserrement de l'éventail est observé sur une plage allant de 1 à 1,5 : et ce grâce au mode automobile, qui est très performant pour franchir l'espace (fig. 5b). La valorisation du temps est fortement prépondérante dans le coût généralisé, à 90 % : l'utilisateur paye son déplacement par une dépense surtout temporelle, significative pour lui mais qui ne produit pas en contrepartie une ressource pour financer la production du transport.

L'accessibilité territoriale en 2004

Pour apprécier la qualité d'accès depuis un lieu d'établissement vers la configuration des activités, nous avons retenu en sens opposé une impédance du transport entre le domicile et les emplois. L'indicateur mesure le coût moyen depuis un domicile vers les emplois, en pondérant chaque zone d'emploi par la probabilité que l'actif y exerce son emploi. La carte des accessibilités par le mode automobile manifeste l'avantage d'une localisation plus centrale : avantage qui évidemment se monnaie sur le marché immobilier.

SCENARISATION DANS LE TEMPS ET DANS L'ESPACE

Nous avons projeté l'évolution de l'agglomération entre 2004 et 2030 dans le temps en base annuelle, et dans l'espace selon deux logiques respectivement par secteur (couronne, département) et par pôle. Le parti d'aménagement joue sur la logique des pôles. Nous avons concilié les deux logiques spatiales à l'échelle des zones élémentaires : les 1 300 fragments territoriaux distingués dans le modèle MODUS-2 de la DRIEA-IDF.

Hypothèses démographiques d'évolution globale

Au niveau global de la région francilienne, nous avons supposé qu'elle garderait une part stable dans la population métropolitaine, bien qu'avec une répartition par

catégorie d'âge moins vieillie, et que la population d'ensemble évoluerait conformément au scénario central de l'INSEE⁽⁸⁴⁸⁵⁾, entre une valeur basse de 64 M d'habitants et une valeur haute de 70 M en 2030, selon l'évolution du taux de fécondité.

Pour la région francilienne, la valeur centrale s'élèverait à 12,6 M d'habitants en 2030, entre une valeur basse à 12,0 et une valeur haute à 13,2 M. Les taux annuels d'évolution ont été distingués par classe d'âge, notée i . Nous avons ainsi déterminé des valeurs $P_i(t)$ pour la population dans la classe d'âge i à l'année t .

Nous en avons déduit les effectifs d'emplois par des hypothèses sur les taux de personnes actives (A) et occupées (O) : en décomposant ce taux selon

$$\tau_i^{AO}(t) = 1 - [\tau_i^{\bar{A}}(t) + \tau_i^{\bar{O}}(t) + \tau_i^R(t)], \quad [1]$$

$\tau_i^R(t)$ étant la proportion de personnes retraitées, $\tau_i^{\bar{O}}(t)$ celle de chômeurs, $\tau_i^{\bar{A}}(t)$ celle de personnes sans activité professionnelle.

En superposant les classes d'âge, nous avons alors recomposé la population active occupée totale :

$$P_{\text{tot}}^{AO}(t) = \sum_i P_i^{AO}(t) = \sum_i P_i^{AO}(t) \cdot \tau_i^{AO}(t). \quad [2]$$

L'effectif des emplois en découle en intégrant un facteur de redressement $\rho(t)$ qui représente l'attractivité économique de l'Ile-de-France relativement au reste du territoire métropolitain. Au total,

$$E_{\text{tot}}(t) = \rho(t) \cdot P_{\text{tot}}^{AO}(t) \text{ et } E_i(t) = \rho(t) \cdot P_i^{AO}(t). \quad [3]$$

Dans notre scénario central, la région accueillerait 550 000 emplois supplémentaires entre 2004 et 2030.

Méthodologie de répartition spatiale

Le schéma ci-après expose la méthode de répartition spatiale : deux logiques, l'une par secteur et l'autre par pôle, ont été conciliées par sous-ensemble intersection d'un secteur et d'un pôle, ou complémentaire aux pôles dans un secteur.

⁸⁴ L. Toulemon et I. Robert Bobée, « Population française : vers une stabilisation à 70 millions d'habitants », Population & Sociétés, (2006), n°429.

⁸⁵ Dekneudt, « Le modèle de projection OMPHALE 2000 », INSEE Méthodes, La Documentation Française, (2001), 61 p.

Puis l'évolution démographique a été projetée par fragment spatial selon sa part initiale dans son sous-ensemble de rattachement.

Les grands secteurs distingués sont les départements administratifs. De manière synthétique, par couronne dans l'agglomération, il est supposé que les populations se stabiliseraient à Paris et en petite couronne, avec des taux annuels d'évolution de 0,08 % et 0,20 %, respectivement ; tandis qu'en grande couronne le taux d'évolution annuelle s'élèverait à 1,0 %.

Nous avons distingué des pôles pour la population et pour les emplois (figure 4).

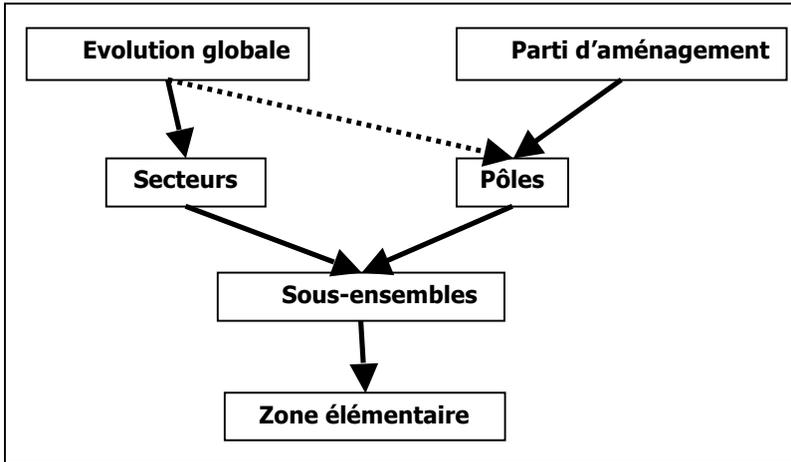


Schéma méthodologique de la répartition spatiale.

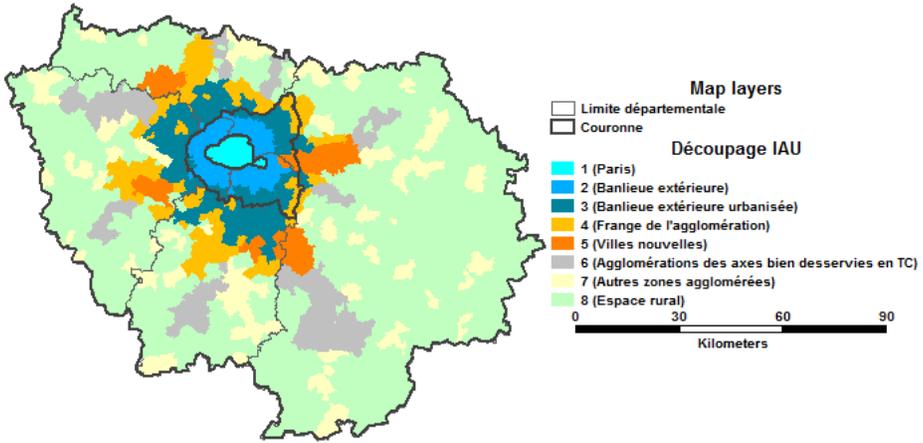
Pour chaque thème démographique noté ϕ , population ou emplois, nous avons spécifié chaque parti d'aménagement sous la forme de taux d'évolution annuelle $\alpha_{z'}^{\phi}(t)$ pour la variable démographique $D_{z'}^{\phi}(t)$ associée à la fonction ϕ du pôle z' à l'année t . De t à t' la variable concernée passe à

$$D_{z'}^{\phi}(t') = [1 + \alpha_{z'}^{\phi}(t)]^{t'-t} D_{z'}^{\phi}(t), \quad [4]$$

en supposant que le taux d'évolution est constant sur $[t, t']$.

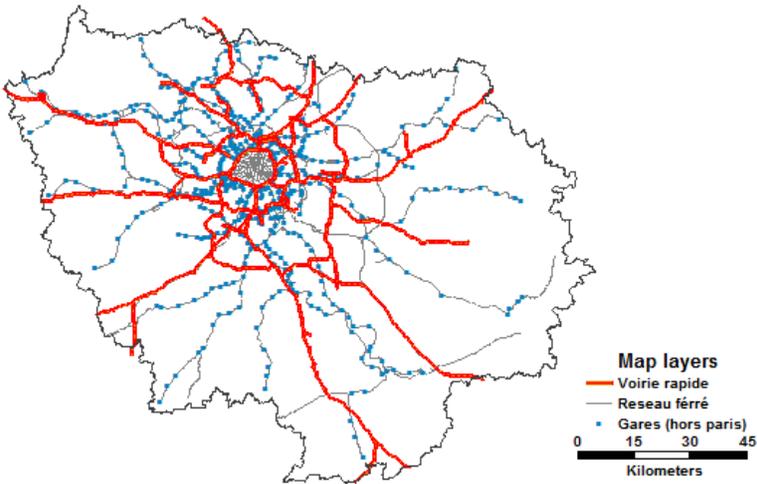
De plus, nous avons normalisé les évolutions de chaque fonction pour l'ensemble de la région, en déduisant l'évolution du reste de la région, d'une part de l'évolution globale et d'autre part de celle des pôles. Pour l'espace régional complémentaire associé à la fonction ϕ , nous conservons un indice z' de zone, mais son taux spécifique $\alpha_{z'}^{\phi}(t)$ est déduit des hypothèses antérieures.

Figure 1 : Secteurs morphologiques IAU et découpage administratif en Ile-de-



France, 1999

Figure 2 : Cartes des réseaux lourds de transport



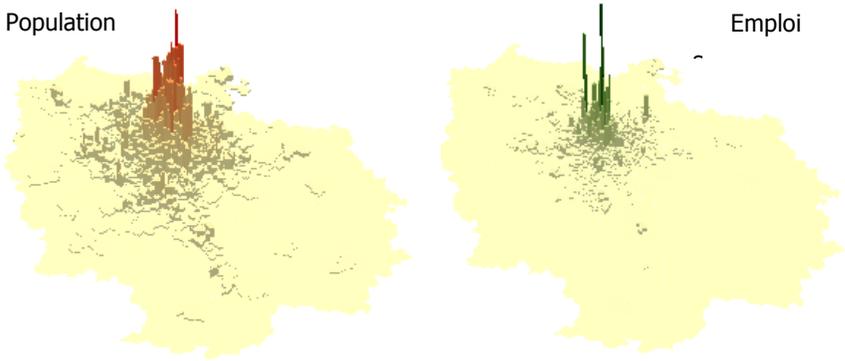


Figure 3 : Représentation prismatique de la localisation de la population et de l'emploi en 2004

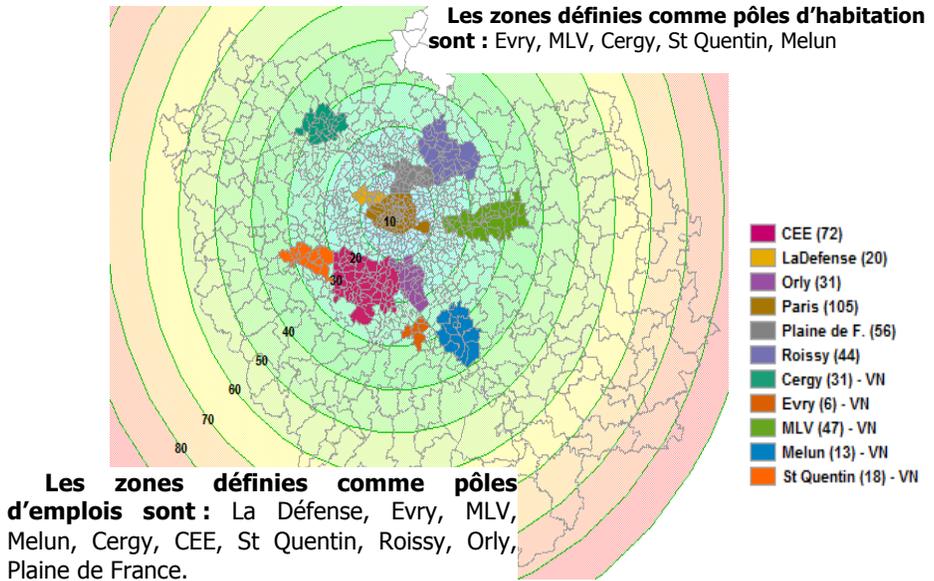


Figure 4 : Pôles stratégiques d'habitation et pôle d'emplois

Entre deux années t et t' suffisamment éloignées pour que plusieurs taux d'évolution soient considérés successivement pour une même variable démographique, la formule d'évolution est composée sous une forme produit.

Après avoir traité les secteurs et les pôles, ceux-ci en fonction du parti d'aménagement, il reste à concilier les deux traitements. Nous avons procédé par secteur (en pratique, département administratif) et par fonction démographique, en y considérant l'intersection avec chaque pôle comme un sous-ensemble, de même que l'espace complémentaire. Un sous-ensemble d'intersection a reçu la variable démographique qui résulte de sa part dans le pôle pour cette fonction. L'espace complémentaire dans le secteur a reçu l'évolution qui découle de celles du secteur et des sous-ensembles polarisés.

Le dernier grand traitement concerne les fragments spatiaux (zones du modèle de transport) pour leur attribuer l'évolution propre au sous-ensemble du secteur dont ils relèvent, par fonction démographique et par année.

Ainsi notre méthode de répartition spatiale intègre un parti d'aménagement dans l'évolution des variables démographiques locales, pour la population ou pour les emplois. Elle produit les variables d'occupation du sol qui servent d'inputs fondamentaux dans la simulation des déplacements, dans laquelle sont endogènes notamment la distribution des flux entre les zones élémentaires.

Spécification des partis d'aménagement

Dans la continuité des Schémas Directeurs, nous avons exclu d'emblée un parti d'étalement urbain non maîtrisé, et considéré une densification de l'espace urbanisé pour loger le surcroît démographique.

Dans le parti DH de Densification Homogène, nous privilégions l'intensification de l'urbanisation en zone déjà dense, sur un disque central depuis le centre géographique jusqu'à un rayon d'environ 24 km, et nous y répartissons l'intensification au prorata des surfaces disponibles localement. En périphérie l'intensification procède par polarisation dans les pôles stratégiques d'aménagement.

Dans le parti DC de Densification Ciblée, nous canalisons davantage l'évolution démographique dans les pôles stratégiques, dans une couronne spatiale entre les rayons 24 et 37 km. Ainsi l'urbanisation concerne plus fortement les pôles mieux desservis par les transports collectifs.

Hypothèses d'évolution pour les réseaux de transport

Nous avons considéré un seul scénario d'évolution pour les réseaux de transport automobile et collectif à l'horizon 2030. Parmi les projets d'aménagement du réseau routier, le réseau de voies rapides serait renforcé en améliorant le maillage radial et en complétant les rocade, pour faciliter les flux à portée régionale ou supra-régionale. L'évolution en linéaire serait faible, mais plus sensible en capacité : ces

indicateurs ne traduisent pas la qualité du maillage, qui pourtant a produit d'importants effets dans nos simulations. Le réseau artériel ferait l'objet d'aménagements ciblés pour requalifier des voiries en zone dense, pour aménager des collectrices et des échangeurs en périphérie.

Concernant les transports collectifs, antérieurement aux projets du Grand Paris, nous avons intégré comme aménagements d'infrastructure des prolongements radiaux de lignes de métro, et des liaisons ferroviaires en rocade : à environ 15 km du centre, des liaisons orbitales nord-ouest (La Défense-La Plaine) et sud-ouest (Issy-Ivry), et à environ 20-25 km du centre, des liaisons tangentielles au nord (Sartrouville-Noisy le Sec puis Pontoise-Le Bourget) et au sud (Evry-Massy). De manière plus générale, nous avons supposé un renforcement des fréquences pour les services ferroviaires.

LA CONFIGURATION DES RESIDENTS ET DES EMPLOIS

Nous avons projeté les hypothèses d'évolution pour chaque scénario associé à un parti d'aménagement : les résultats en matière d'usage du sol concernent la distribution de la population dans l'espace, la distribution spatiale des emplois, ainsi que la configuration respective des résidents et des emplois. Cette configuration respective a été simulée avec le modèle de distribution spatiale des déplacements pour le motif domicile-travail : ce modèle, repris du modèle MODUS de la DRIEA-IDF, intègre l'influence des conditions modales de déplacement sur la répartition du trafic entre les relations origine-destination⁽⁸⁶⁾.

La distribution spatiale de la population

Nos deux scénarios d'évolution respectent le scénario central de l'INSEE pour l'évolution démographique et sa répartition entre les couronnes (Paris, Petite Couronne et Grande Couronne), à 1 % près pour chaque couronne. De 1999 à 2030, chaque grand anneau ainsi distingué accueillerait des effectifs supplémentaires de population, de manière plus sensible pour les rayons « intermédiaires » entre 15 et 40 km, que pour les rayons faibles en deçà de 15 km et les rayons élevés au-delà de 40 km.

Le scénario de densification ciblée se démarque du scénario de densification homogène en éloignant du centre les effectifs supplémentaires de population, du moins pour la zone dense : de manière très modérée dans Paris même (département

⁸⁶ DREIF : « MODUS-V2.0 : Documentation détaillée du calcul de la demande de déplacements », Rapport d'études, (2006), 149 p.

75), plus marquée en Petite Couronne, tout en maintenant l'effectif de chaque grand anneau. En grande couronne le différentiel d'effet s'inverse : la partie plus proche du centre est plus chargée tandis que les communes éloignées sont moins chargées.

La distribution spatiale des emplois

Les évolutions des effectifs d'emploi en fonction de la distance au centre sont plus contrastées, d'abord entre les scénarios d'évolution et les évolutions antérieures, ensuite entre un scénario et l'autre. L'évolution 1999-2015 continuerait le desserrement de l'emploi déjà constaté entre 1968 et 1999, tout en amorçant une recharge au centre. L'évolution de 2015 à 2020 produirait une hausse en chaque rayon mais plus forte en zone centrale, à contre-courant des évolutions antérieures. De 2020 à 2030 l'emploi se stabilisait nettement, anticipant la stabilisation ultérieure de la population dont la croissance ralentirait sur cette période : le vieillissement expliquant le décrochage entre les deux évolutions.

Entre les deux scénarios d'évolution, la densification ciblée favorise la zone la plus centrale puis produit un desserrement, qui globalement décharge un anneau proche et surcharge un anneau plus éloigné, mais quasiment sans effet à longue distance (au-delà de 60 km du centre).

La configuration relative des actifs et des emplois

Pour chaque époque et chaque scénario, notre projection démographique a produit par zone les effectifs d'actifs occupés et d'emplois, respectivement. Par secteur IAU (fig. 6a) et par pôle d'aménagement (fig. 6b), nous avons comparé les effectifs respectifs des actifs occupés et des emplois. Paris et plus encore La Défense resteraient asymétriques, avec beaucoup plus d'emplois que d'actifs occupés. La densification ciblée permettrait de renforcer les emplois en périphérie, au bénéfice de l'activité notamment à Marne-la-Vallée et Cergy.

Sans distinguer des catégories professionnelles, nous avons simulé l'appariement entre d'une part les actifs occupés établis dans leur zone de résidence, et d'autre part les emplois selon leur zone d'implantation, au moyen d'un modèle de distribution gravitaire sous « contraintes de marges » (i.e. les émissions et les réceptions sont fixées par zone élémentaire).

La sensibilité au coût de transport par relation origine-destination est celle constatée en 2001 dans l'enquête de déplacements auprès des ménages franciliens⁽⁸⁷⁾. Les deux scénarios de densification ont pour effet principal, relativement à la situation de base, une moindre distance entre lieux de résidence et

⁸⁷ DREIF, STIF : « *Les déplacements des franciliens en 2001-2002. Enquête Globale de Transport* », (2002).

de travail pour l'ensemble des secteurs périphériques à partir de la banlieue extérieure, une distance en très légère hausse pour la banlieue extérieure et en petite hausse pour Paris intra-muros (fig. 7a). Entre les deux scénarios, la densification ciblée renforce l'effet réducteur en périphérie, tandis que la densification homogène favorise la réduction en banlieue intérieure et extérieure (fig. 7b).

Ces effets spatiaux de la densification sont confirmés par un examen de la proportion d'actifs occupés employés « en interne » dans chacun des grands pôles d'urbanisation résidentielle. La proportion d'actifs occupés qui travaillent dans leur pôle de résidence, augmenterait sensiblement dans chaque pôle et ce pour chaque scénario, avec un effet plus fort encore pour la densification ciblée. Les valeurs de 50 % pour Evry et Cergy sont remarquables, et derrière elles le 45 % de Marne-la-Vallée : elles révèlent le renforcement de la centralité urbaine dans chacun de ces pôles.

CONSEQUENCES SUR LE SYSTEME DE TRANSPORT

L'évolution de l'occupation du sol et celle des réseaux de transport produisent des effets sur la demande, l'offre et l'usage de transport : évolution des flux par relation origine-destination et donc de la structure spatiale du trafic, évolution de la répartition modale, des charges locales de trafic et des coûts de déplacement.

Nous avons simulé ces effets pour une heure de pointe du soir en jour ouvrable moyen, en année de référence 2004 ou à l'horizon 2030 pour chaque scénario, avec le modèle de choix modal et les modèles d'affectation du trafic aux réseaux respectivement routier ou de transport collectif : ces modèles émulent le modèle MODUS de la DRIEA-IDF et sont statiques⁽⁸⁸⁾. Nous avons conservé pour 2030, la structure horaire des déplacements et les comportements économiques révélés par l'EGT de 2001, et notre simulation est restreinte aux déplacements des résidents franciliens.

Une polarisation accrue des flux

De 2004 à 2030 les flux de déplacements augmenteraient de manière sensiblement proportionnelle à l'accroissement démographique, soit 9 % en tout. Mais la densification renforce les flux à portée locale, particulièrement ceux qui restent internes aux grandes zones d'aménagement : le nombre des déplacements

⁸⁸ i.e. la dynamique des flux est négligée, et les effets les plus forts de congestion sont sous-estimés.

internes augmenterait plus en valeur absolue que le nombre de déplacements émis, et les flux d'un pôle vers l'extérieur baisseraient légèrement.

Une orientation modale plus favorable aux circulations douces

Entre 2004 et 2030, le mode automobile reste dominant en nombre de déplacements comme en distance parcourue. Cependant, comme la densification renforce les centralités locales et l'importance relative des relations de proximité, le partage modal évolue par report des modes motorisés (VP, TC) vers les modes doux que sont la marche et les deux roues, et par endroits des reports de la VP vers les TC.

Le scénario de densification ciblée procure des baisses nettes de part modale pour la voiture, pour tous les pôles d'urbanisation hormis Paris intra-muros ; une faible hausse des TC ; une hausse sensible des circulations douces. La densification ciblée profite davantage aux modes doux que la densification homogène, mais les écarts sont réduits.

Réseau routier : la pression du trafic augmentera

Nous avons comparé les trafics routiers à l'Heure de Pointe du Soir, entre le scénario de densification ciblée en 2030 et la situation de référence en 2004 (fig. 8a). Globalement les distances parcourues augmenteraient mais proportionnellement moins que la population, en raison des concentrations locales et des reports modaux. Les temps de parcours augmenteraient légèrement : la raison tenant à une utilisation renforcée des voies rapides, qui accroîtraient leur importance majoritaire en périphérie, et globalement leur fonction de canalisation.

Par secteur, les Villes Nouvelles et la banlieue externe verraient même leur trafic total se réduire légèrement, alors que leur trafic sur voirie rapide augmenterait donc les voiries locales seraient déchargées, ce qui pourrait permettre une certaine réallocation de capacité routière en faveur des modes doux. Cependant ces effets d'allègement sont restreints au scénario de densification ciblée, car dans aucun secteur le scénario de densification homogène n'économiserait du trafic par rapport à la situation de référence (fig. 8b).

L'accroissement sensible du trafic des VRU, d'environ 2 %, irait de pair avec une hausse un peu moindre des temps passés, donc une légère hausse de la vitesse moyenne pour l'ensemble : mais cela tient à la part croissante des déplacements en périphérie dans le total, et pour Paris intra-muros les temps croîtraient bien plus que les distances, signe de l'engorgement croissant du boulevard périphérique parisien. La densification ciblée charge davantage un secteur nord et un secteur sud-est, mais décharge notablement un secteur ouest et surtout un secteur est qui inclut Marne-la-Vallée.

Le renforcement des trafics de TC en période de pointe

Le nombre de déplacements en TC émis par chaque secteur morphologique d'urbanisation se renforcerait sensiblement de 2004 à 2030, avec en moyenne une hausse de 13 % qui reflète non seulement l'augmentation d'ensemble des déplacements mais aussi une amélioration de la part modale des TC. Sur le réseau ferroviaire, l'amélioration des liaisons en rocade induirait une augmentation de 4 % du trafic pour le RER et le train régional, assortie d'une stabilisation pour le trafic du métro. La carte des charges de trafic sur le réseau ferroviaire lourd manifeste notamment l'intérêt de la tangentielle nord et le renforcement de l'axe radial sud-est.

Vers une réduction des coûts de déplacement en automobile ?

Nous avons supposé que les coûts d'usage d'une voiture par unité de distance resteraient inchangés en 2030 par rapport au niveau de 2004, de même que le coefficient monétaire pour valoriser le temps passé en déplacement. Donc nous n'avons pas intégré d'évolution de la fiscalité, ni de variation du prix de l'énergie, encore moins d'effet de revenu.

Sous ces hypothèses, l'évolution de la structure spatiale des déplacements en voiture, avec une réduction de la distance pour la plupart, se solderait par une réduction du coût moyen par déplacement automobile. Le coût moyen évoluerait à la baisse entre la situation de référence en 2004 et la situation 2030 du scénario de densification ciblée, sauf dans le centre de Paris et le long des corridors A4 et A6. Les gains procurés par la densification sont en général plus forts pour le scénario ciblé que pour le scénario homogène.

Des polluants routiers parfois en diminution

Nous avons considéré pour 2030 un parc automobile de même structure qu'en 2004, à un facteur d'échelle près, sans intégrer une évolution « démographique » des véhicules vers de moindres consommations d'énergie ou une motorisation électrique. En 2004 ce parc était composé à 36 % de véhicules à moteur diesel, cette part augmentant avec l'éloignement au centre (24 % à Paris, 32 % en petite couronne et 40 % en grande couronne). Nous avons proportionné le nombre de véhicules au nombre d'individus conducteurs.

Nous avons évalué les émissions de gaz carbonique (CO₂) pour la contribution à l'effet de serre (effet global mais dont les sources sont locales), ainsi que les émissions des polluants suivants : monoxyde de carbone (CO), oxydes d'azote (NO_x) et microparticules (PM). Les modèles d'émission intègrent

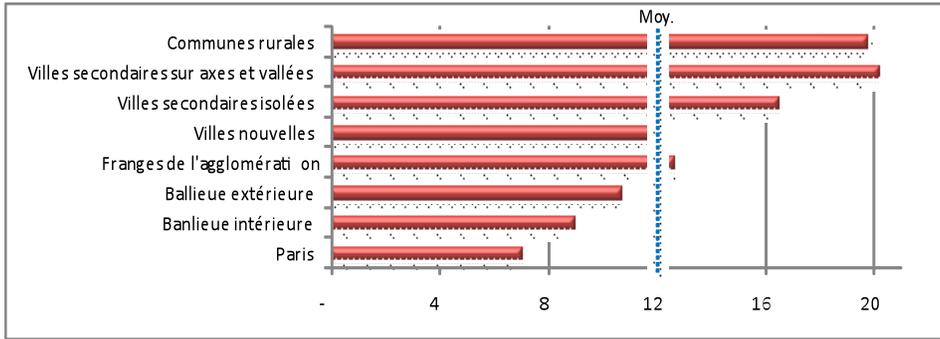


Figure 5a : Distances moyennes parcourues pour le motif domicile-travail, selon secteurs IAU

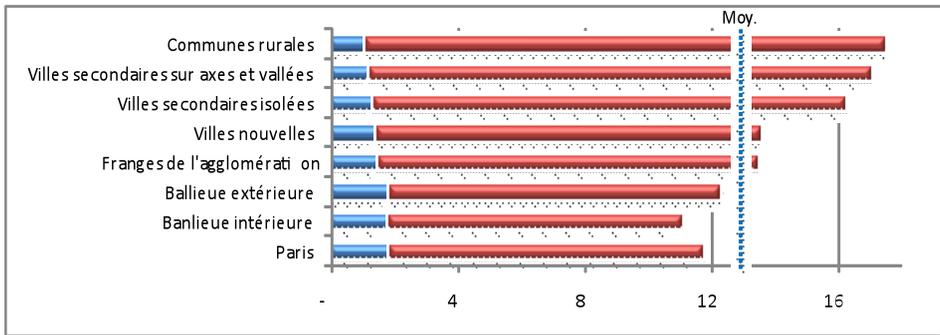


Figure 5b : Coût généralisé de déplacement VP en période de pointe (partie financière en bleu, partie temporelle en rouge)

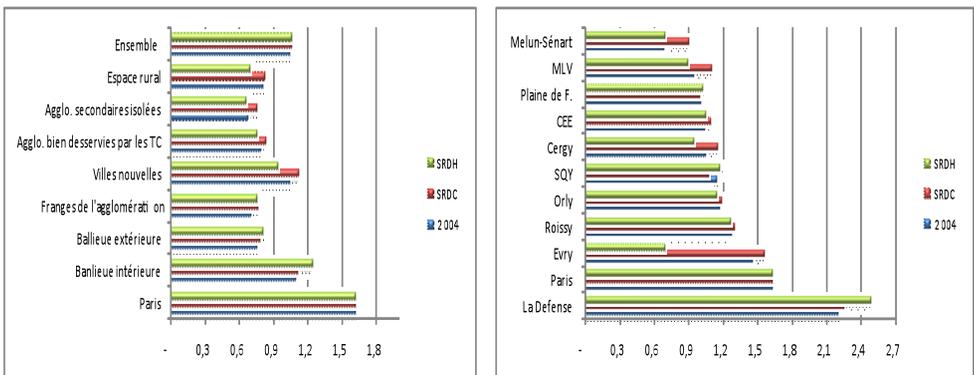


Figure 6 : Ratio des emplois aux actifs occupés résidant localement (a) par secteur, (b) par pôle

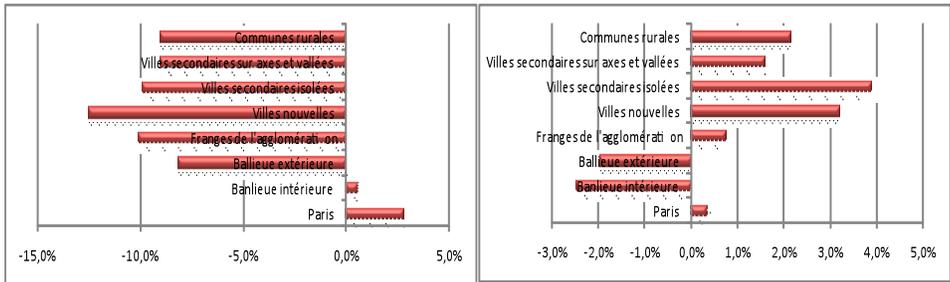
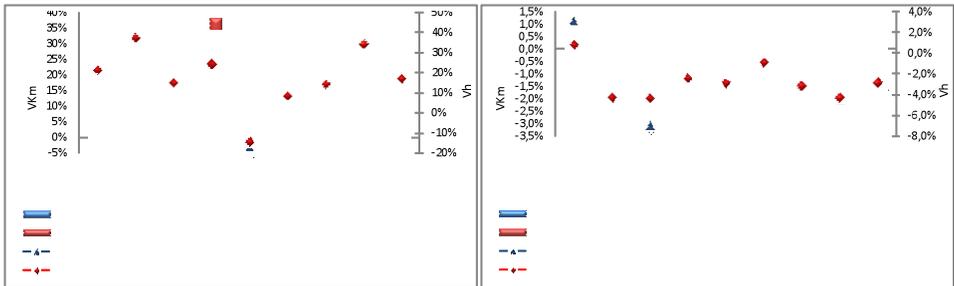


Figure 7 : Variation des distances domicile-travail (a) 2004-2030 DC, (b) 2030 DC-DH



Tous types de voies (Taux de variation SRDC-2004) / Tous types de voies (Taux de variation SRDC-SRDH)

Figure 8 : Evolution des indicateurs spécialisés de trafics, selon secteur IAU

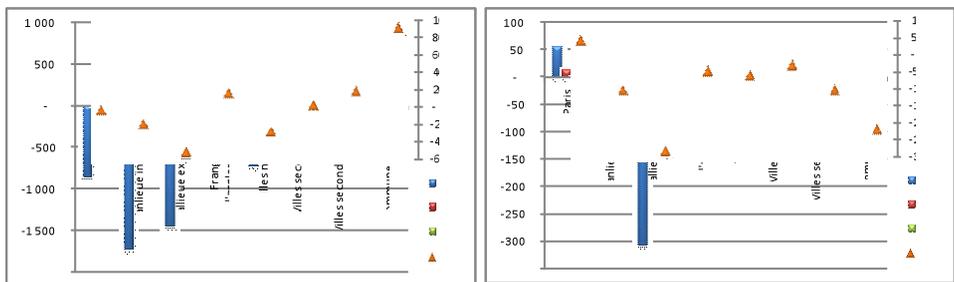


Figure 9 : Emissions de polluants, en kg par heure de pointe (a) 2030 DC-2004, (b) 2030 DC-DH

l'influence de la vitesse sur le taux d'émission par unité de distance parcourue⁽⁸⁹⁾, influence décroissante puis croissante.

Sur ces bases, entre 2004 et 2030 dans le scénario de densification ciblée, par heure de pointe les émissions passeraient de 27 400 kg à 21 800 kg pour le CO, de 13 800 kg à 14 000 kg pour les NO_x, de 350 kg à 370 kg pour les PM. Les raisons de faible hausse pour ces deux derniers postes, et de la baisse sensible pour le premier, tiennent à la structure spatiale des flux routiers et à leur meilleure canalisation par le réseau de voies rapides (fig. 9). Concernant le CO₂, le volume des émissions évoluerait de 3 710 tonnes par heure de pointe en 2004 à 3 740 tonnes en 2030 pour le scénario de densité ciblée, soit une hausse limitée à 1 %. Vraisemblablement, l'évolution structurelle du parc automobile produira un effet opposé d'amplitude nettement plus importante.

EFFETS SUR L'ACCESSIBILITE TERRITORIALE

Enfin, l'accessibilité territoriale combine les effets sur l'usage du sol et les interactions spatiales entre les lieux selon leurs activités respectives, avec les conditions de déplacement offertes par les réseaux de transport. Nous avons considéré d'une part un indicateur d'accessibilité sous contrainte budgétaire de temps, et d'autre part un indicateur d'accessibilité de type gravitaire.

Accessibilité sous contrainte budgétaire de temps

Par zone de destination, nous avons dénombré l'effectif des populations établies dans des zones d'origine qui sont capables d'y accéder en un temps inférieur à une valeur plafond. En fixant le plafond à 45 minutes, nous constatons que l'agglomération présente un cœur d'accessibilité routière situé en centre-nord, au sein duquel le critère dépasse 40 % du total d'agglomération. Le critère baisse à 30 % en banlieue proche, à 20-25 % en banlieue éloignée et sous 15 % hors de la banlieue (fig. 10a). En 2030 pour le scénario de densification ciblée, le cœur d'accessibilité routière serait élargi à l'ouest, au centre et même à l'est. De manière générale le critère progresserait, alors même que la population aurait augmenté donc le critère serait plus contraignant.

Pour le réseau de transport collectif, le cœur d'accessibilité est confiné au centre de Paris et le critère décroît plus rapidement avec l'éloignement du centre. L'accessibilité TC évoluerait peu de 2004 à 2030, la raison pouvant tenir à notre méthode pour évaluer l'indicateur, en simulant des rabattements à pied et non en automobile vers les stations de TC (fig. 11).

⁸⁹ P. Bickel & R. Friedrich, "Environmental External Costs of Transport", Springer, (2001) 326 p.

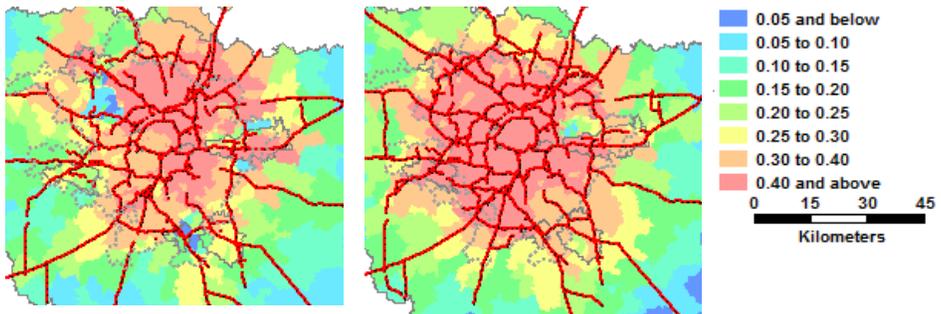


Figure 10 : Accessibilité routière en temps, heure de pointe du soir (a) 2004, (b) 2030 DC

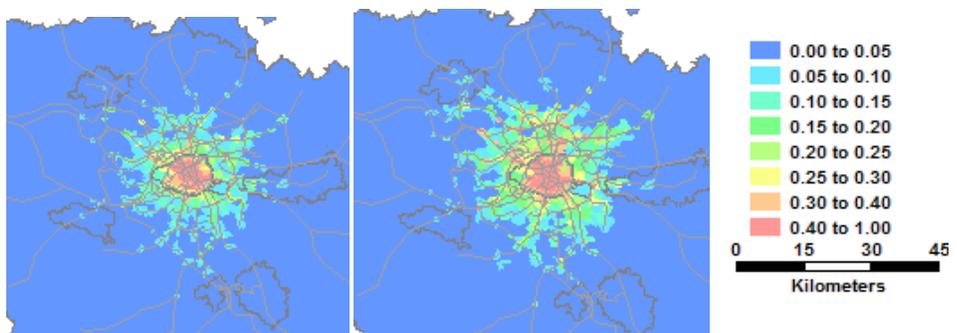


Figure 11 : Accessibilité TC en temps (a) 2004, (b) 2030 DC

Toutes ces figures sont basées sur des données de la DRIEA-IDF et des calculs des auteurs (2008)

Un indicateur gravitaire d'accessibilité

L'indicateur d'accessibilité à la Hansen (1957), Poulit et Koenig (1973) intègre les effectifs d'opportunités pour un client potentiel établi en une zone d'origine, atténués par le coût d'y accéder, au travers d'une fonction d'impédance de type exponentiel. Pour l'accessibilité depuis une zone d'origine o vers l'ensemble Z des zones de destination d , l'indicateur d'accessibilité suit la formule suivante :

$$A_o = \sum_{d \in Z} E_d \exp(-\theta G_{od}) \quad [5]$$

avec E_d l'effectif des opportunités localisées en zone d , G_{od} le coût généralisé de transport pour un déplacement depuis o jusqu'à d et θ un paramètre. Cet indicateur intègre le degré de proximité entre l'origine et la destination, mesuré par un coefficient $\exp(-\theta G_{od})$ compris entre 0 et 1, d'autant plus réduit que les deux zones sont plus éloignées en coût de franchissement. On peut concevoir le terme $E_d \exp(-\theta G_{od})$ comme une sorte de nombre équivalent d'opportunités en zone o , comme si le transport filtrait la répartition des opportunités dans l'espace.

Selon cet indicateur, en 2004 l'accessibilité routière est plus forte dans le centre de Paris et en toute proche banlieue ; moyenne sur une bande est-ouest élargie à l'ouest ; faible au-delà. Tandis que l'accessibilité en transport collectif est plus élevée en zone hypercentrale, moyenne sur une tâche centrale large mieux répartie que pour l'automobile, et faible en périphérie éloignée. Entre 2004 et 2030 dans le scénario de densification ciblée, l'indicateur d'accessibilité routière augmenterait relativement dans un faisceau sud-est et au voisinage de l'autoroute A86 au nord, mais baisserait pour une large part de la grande couronne ainsi qu'en zone centrale. L'accessibilité en TC évoluerait très peu. Entre les deux scénarios d'aménagement, seule la densification ciblée induirait des évolutions notables de l'accessibilité gravitaire entre 2004 et 2030.

CONCLUSION

Récapitulation

Nous avons simulé des scénarios d'évolution de l'usage du sol et des réseaux de transport pour le territoire francilien, entre une situation de référence en 2004 et un horizon en 2030. Notre simulation repose sur le modèle MODUS d'offre de transport et de demande de déplacement développé par la DRIEA-IDF, et sur une méthode de projection démographique spatialisée basée sur le modèle Omphale de l'INSEE et ajoutant une focalisation par sous-ensemble territorial.

Dans ces conditions, nous avons montré que l'évolution démographique prévue d'ici 2030, canalisée dans l'espace selon une logique de densification, devrait permettre un renforcement de la centralité urbaine dans les grands pôles d'aménagement que sont les Villes Nouvelles, avec une intensification de la cohérence urbaine entre les domiciles et les emplois, une réduction des distances moyennes entre domicile et travail, et une proportion accrue de déplacements effectués par des modes non motorisés. Ces effets seraient plus forts avec le scénario de densification ciblée qu'avec celui de densification homogène.

Les transformations dans la structure des interactions spatiales et dans les besoins de déplacement, couplées au développement programmé des réseaux de transport, mais confrontées à l'accroissement démographique, sembleraient

permettre de maintenir la qualité de service sur le réseau routier de l'agglomération, du moins pour la période simulée i.e. l'heure de pointe du soir. Cette stabilisation reposerait notamment sur un recours accru aux voies rapides urbaines. Dans le scénario de densification ciblée, l'emprise du trafic routier sur le reste du réseau (hors VRU) pourrait même décroître quelque peu dans certains secteurs, permettant de mieux y répartir la capacité viaire en faveur des circulations douces. Le développement démographique et le maintien de la qualité de service en transport concourraient à améliorer non seulement les centralités secondaires donc l'accessibilité dans un cadre de proximité, mais encore les effectifs de population susceptibles d'atteindre une destination en un temps limité, ou le nombre d'emplois pouvant être visés depuis un lieu de domicile.

Limitations

Notre simulation intègre les interactions spatiales entre les populations et les emplois selon leurs lieux d'implantation respectifs, les comportements microéconomiques des individus dans leurs choix de déplacement (mode, itinéraire), et certains effets de congestion sur le réseau routier. Elle ne considère pas les prix immobiliers et les décisions de localisation des ménages ou des entreprises ; ni les évolutions potentielles dans la répartition horaire des déplacements, dans la structure sociologique des résidents (décohabitation...), ou dans leur attitude face à la motorisation automobile. Elle ne considère pas non plus la présence des visiteurs et leur mobilité pour motifs d'affaire ou de tourisme, ni les trafics de fret. En ce qui concerne l'offre de transport, nous n'avons considéré le stationnement que forfaitairement, et nous avons négligé les contraintes de capacité sur les réseaux de transport collectif.

Enfin, l'essentiel de notre investigation a précédé les récents et importants projets d'aménagement pour des liaisons ferroviaires en périphérie de l'Ile-de-France, au titre de l'aménagement du Grand Paris. Comme notre simulation d'intègre pas les effets de capacité en transport collectif, un renforcement de ce mode impacterait peu notre simulation des relations radiales, majoritaires dans la structure spatiale des déplacements pour ce mode. A notre avis, de tels aménagements concerneraient principalement l'usage du sol au voisinage des gares mieux desservies ou créées à leur occasion. Une simulation des effets, intégrant les phénomènes de congestion sur le réseau routier et ceux sur les transports collectifs, ainsi que les mécanismes du stationnement, et les phénomènes de localisation des acteurs micro-économiques, constitue un objectif pour notre équipe de recherche, dans un terme de trois ou quatre ans afin de bénéficier de la nouvelle Enquête Globale de Transports de voyageurs que le Stif vient de lancer en cette fin d'année 2009.

Remerciements et avertissement.

Notre travail a bénéficié du soutien financier de la Région Ile-de-France, au travers de la thèse de doctorat de Thierno Aw, et de la Chaire Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures de transport, qui associe trois écoles de ParisTech, en partenariat avec le Groupe Vinci. Nous remercions aussi très chaleureusement la division des Etudes Stratégiques de Déplacements à la Direction Régionale et Interdépartementale de l'Équipement et de l'Aménagement en Ile-de-France, particulièrement François Bertrand, Yoann La Corte et Eric Ladegaillerie ; leur maintien des bases de données et du modèle de simulation a été la condition *sine qua non* de notre étude. La formulation des partis d'aménagement, leur simulation, l'établissement d'indicateurs et l'obtention de résultats qualitatifs et quantitatifs, demeurent de notre seule responsabilité d'auteurs, dans un cadre de recherche.

Accessibilité urbaine et politiques publiques : vers des « stress tests » pour une mobilité durable ?

Yves CROZET
Aurélie MERCIER
Nicolas OVTRACHT

RESUME

Le concept d'accessibilité, en associant au système de transport les opportunités qu'il permet d'atteindre, constitue un outil intéressant d'aide à la décision publique. Considérant la nécessité croissante d'intégrer la dimension environnementale dans les politiques de transports et d'aménagement du territoire, ce chapitre vise à mettre en évidence le potentiel de l'approche d'accessibilité dans une perspective de mobilité durable. Il propose ainsi au travers de « stress-tests » de tester la résilience de la mobilité urbaine à des chocs sur les coûts et les conditions de mobilité. En mobilisant la plate-forme MOSART, deux politiques de transports pouvant être qualifiées de « radicales » sont testées : un péage de zone pour circuler au sein des communes de Lyon et Villeurbanne puis une taxe « extrême » sur l'usage de l'automobile.

La mise en place d'un péage de zone se traduit par une perte d'accessibilité des résidents de Lyon/Villeurbanne, dont le coût de déplacement est fortement pénalisé, mais tendrait à favoriser les automobilistes de la grande couronne qui bénéficient de meilleurs temps de parcours. Une hausse du prix du carburant à 3 € le litre souligne la performance du réseau ferré régional qui, pour des liaisons périphérie/centre, peut offrir une accessibilité meilleure que l'automobile.

INTRODUCTION

Depuis le début des années 1990, les politiques de transport en milieu urbain se traduisent par un « retour à la lenteur » dans les centres-villes des agglomérations françaises. Face aux contraintes de rareté de l'espace, de congestion, et aux exigences de développement durable, la recherche de gains de temps n'est plus la priorité. La mise en service de transports en commun en site propre, et notamment de lignes de tramway, illustre un ensemble de priorités visant à reconquérir les centres-urbains en luttant contre l'étalement croissant de la ville au-delà de ses frontières historiques.

Dans ce contexte, le concept d'accessibilité en associant au système de transport les opportunités qu'il permet d'atteindre (commerces, emplois, logements...) tout en intégrant la perception du coût de déplacement (monétaire et temporel) par les individus, s'avère pertinent pour comprendre les évolutions récentes et anticiper les enjeux à venir. Considérant la nécessité croissante d'intégrer la dimension environnementale dans les politiques de transports et d'aménagement du territoire, ce chapitre vise à mettre en évidence le potentiel de l'approche d'accessibilité dans une perspective de mobilité durable. L'objectif n'est pas tant d'évaluer des choix politiques que de tester la résilience de la mobilité urbaine à des chocs sur les coûts et les conditions de mobilité. Pour ce faire, une méthodologie basée sur le principe des « stress tests », est utilisée. Souvent appliqués dans le secteur financier, ces « stress tests » posent la question de la stabilité d'un système ou d'une entité au regard de différents chocs économiques. Dans ce travail, notre objectif est d'adapter ces stress tests pour répondre aux questions de mobilité dans le cadre d'un développement durable des territoires. A partir d'une analyse de l'existant qui constitue une situation de référence pour faire émerger des politiques futures, nous envisageons une hausse des coûts des déplacements pour répondre aux questions suivantes : « Quelles seraient les répercussions en termes d'accessibilité d'un accroissement des coûts généralisés des déplacements automobiles ? », « Dans quelle mesure un péage urbain peut-il influencer les choix modaux et, *in fine*, les niveaux d'accessibilité ? », « Dans quelle mesure une taxation élevée sur le carburant peut-elle encourager le report modal ? ».

En mobilisant la plate-forme MOSART, développée au Laboratoire d'Economie des Transports comme une aide à la décision dans le cadre de politiques de transport et d'aménagement du territoire, une analyse sera menée en trois temps. A partir d'une analyse de l'existant présentée dans une première partie, les deuxième et troisième parties simulent différentes politiques alternatives offertes aux élus en s'intéressant

respectivement à la mise en place d'un péage urbain et à l'application d'une taxe « extrême » sur le carburant.

CONSIDERATIONS METHODOLOGIQUES

MOSART : une plateforme de modélisation et de simulation pour une mobilité urbaine durable

L'outil MOSART, acronyme pour Modélisation et Simulation de l'Accessibilité aux Réseaux et aux Territoires, est développé comme une plateforme de modélisation pour l'aide à la décision dans le cadre d'une mobilité durable (Bonnafous *et al.*, 2009)⁹⁰. A partir d'analyses en termes d'accessibilité gravitaire (Hansen, 1959)⁹¹, il vise à répondre à trois objectifs principaux que sont :

- La modélisation et la simulation de politiques de transport en considérant différents types de réseaux de transport (réseaux routiers, de transports en commun à l'échelle urbaine et/ou interurbaine, réseaux de modes doux...);
- La comparaison de différents scénarios de politiques de transport ou d'aménagement du territoire ;
- La présentation de résultats cartographiques par le biais d'un web-mapping et d'un site web.

L'échelle géographique du périmètre d'étude constitue un élément important du périmètre d'étude. Comme le soulignent Kwan et Weber (2008)⁹², une analyse à une échelle régionale vise à intégrer l'évolution de la structure urbaine tandis qu'une analyse à l'échelle locale s'inscrit à l'échelle de la ville et du développement de ses quartiers. En développant MOSART à l'échelle de l'aire urbaine de Lyon (telle que définie en 1999), l'objectif est de pouvoir mobiliser l'outil tant pour des analyses régionales que locales en se concentrant, dans ce dernier cas, sur un périmètre plus restreint. L'aire urbaine de Lyon comprend plus de 1.6 millions d'habitants (INSEE, 1999) avec une densité de 508 habitants par km². Cette aire urbaine est très dynamique : la croissance de la population est la plus importante de France (0.8 % par an entre 1999 et 2005) et le nombre d'emplois atteint 800 000 pour 765 000

90 A. Bonnafous, Y. Crozet, A. Mercier, N. Ovtracht, V. Thiébaud : « MOSART (MODélisation et Simulation de l'Accessibilité aux Réseaux et aux Territoires) : un prototype d'outil d'aide à la décision individuelle et collective pour une mobilité durable ». Rapport final pour le compte du PREDIT, 2009.

91 W.G. Hansen: "How accessibility shapes land use", Journal of the American Institute of Planners, 25 (1959) 73-76.

92 M. P. Kwan, J. Weber, 2008. "Scale and accessibility : Implications for the analysis of land use-travel interaction", Applied Geography , 28 (2008) 110-123.

actifs. Populations et emplois tendent à se concentrer : 42 % et 83 % des emplois sont localisés respectivement dans Lyon-Villeurbanne et leur 1^{ère} couronne (le Grand Lyon) pour 34 % et 75 % de la population.

MOSART a été développé, à l'origine, comme un SIG dédié aux transports. Les bases de données, directement importées dans le SIG ou bien créées manuellement, se décomposent en deux grandes catégories que sont les réseaux de transport et les données socio-économiques. Le réseau routier, reconstitué à partir de la base NAVTEQ, se compose de plus de 90.000 nœuds et de 220 000 liens. Chaque tronçon se caractérise par une longueur, une capacité, une vitesse maximale (vitesse à vide) et une direction (sens unique ou double-sens). Le réseau de transports urbain en commun a été créé comme une chaîne topologique. Chacune des 100 lignes de bus, 4 lignes de métro et 3 lignes de tramway est caractérisée par ses différentes stations, sa vitesse commerciale et sa fréquence. Le système de vélos en self-service Velo'v a également été intégré avec ses 340 stations. Parallèlement aux réseaux de transport, le SIG s'appuie sur des données socio-économiques issues principalement des recensements de l'INSEE. L'analyse de données issue de MOSART « Version 1 » se concentre sur une approche temporelle par le biais de mesures isochrones de l'accessibilité (Crozet *et al.*, 2008⁹³).

Considérant l'intérêt d'un tel outil et son potentiel en termes d'analyse spatiale, MOSART a été enrichi dans une seconde version pour devenir une véritable plateforme numérique de modélisation. Au SIG et aux données multi sources existantes (BD réseaux VP et TCU, BD socio-économique) sont venus s'ajouter un réseau de transports en commun interurbain (réseau TER) ainsi qu'un modèle de transport. La mise en œuvre conjointe des modules SIG, aménagement du territoire et du modèle de transport vise d'une part à mener des analyses spatiales de type gravitaire à une échelle très détaillée. L'aire d'étude est ainsi divisée en un quadrillage de 4 344 zones variant de 250 mètres à 2 kilomètres de côté en fonction de leur localisation au centre ou en périphérie. Une telle désagrégation permet de limiter le poids des opportunités internes (Gutiérrez et Gomez, 1999⁹⁴ ; Frost et Spence, 1995⁹⁵). D'autre part, une technologie de type « Webmapping » vise à diffuser et utiliser les résultats.

93 Y. Crozet, F. Marchal, N. Ovtracht, V. Thiebaut, C. Yvon, P. Bischoff : « Mise en place d'un outil d'aide à la décision et à l'aménagement du territoire : MOSART », International Conference on Spatial Analysis and GEOmatics (SAGEO), 2008.

94 J. Gutiérrez, G. Gomez: "The impact of orbital motorways on intra-metropolitan accessibility: the case of Madrid's M-40", *Journal of Transport Geography*, 7 (1999) 1-15.

95 M.E. Frost, N.A. Spence: "The rediscovery of accessibility and economic potential: the critical issue of self-potential", *Environment and Planning A*, 27 (1995) 1833-1948.

Choix et mesure de l'accessibilité gravitaire

Grâce à son SIG précédemment présenté et ses différentes couches d'information relatives aux réseaux de transport, l'outil MOSART nous permet de déterminer, entre chacune des 4 344 zones de l'aire d'étude, la distance et le temps de transport nécessaire pour le parcours (en voiture ou en transports en commun). A partir de ces fonctionnalités, nous « formatons » l'outil MOSART en intégrant différentes contraintes dans l'optique de mesurer l'accessibilité.

Une définition de l'accessibilité, dans son acception générale, est donnée par Morris *et al.* (1978)⁹⁶. L'accessibilité peut être définie comme une mesure de la séparation spatiale des activités humaines. Elle traduit la facilité avec laquelle les activités peuvent être atteintes étant donné un lieu d'origine et un système de transport. Parmi la variété de mesures recensées dans la littérature (Pirie, 1979⁹⁷ ; Handy et Niemeier, 1997⁹⁸ ; Geurs et Wee, 2004⁹⁹), le choix de l'une ou l'autre d'entre elles dépend des objectifs de travail. Nous travaillons à partir des *location-based measures* et, plus particulièrement, des mesures gravitaires de l'accessibilité. Ces mesures s'inscrivent dans une dimension d'aménagement du territoire et reposent sur la relation entre la distribution des activités et le système de transport. A partir des travaux d'Hansen (Hansen, 1959), l'accessibilité gravitaire peut être envisagée comme une mesure de la séparation spatiale des activités autour d'un point, ajustée par la capacité et la volonté des individus, ou des firmes, de franchir cette barrière spatiale.

L'accessibilité depuis la zone i aux opportunités localisées dans la zone j s'écrit :

$$A_i = \sum_{j=1}^n E_j \exp^{-\beta C_{ij}}$$

avec E_j le nombre d'opportunités (d'emplois) de la zone j , C_{ij} le coût généralisé (somme du coût temporel et du coût monétaire) de déplacement entre les zones i et j , β un paramètre de sensibilité au coût de déplacement et n le nombre de zones.

L'accessibilité depuis la zone i aux emplois localisés dans la zone j , est donc directement proportionnelle au nombre d'emplois de la zone j et inversement

96 J.M. Morris, P.L. Dumble, M.R. Wigan: "Accessibility indicators for transport planning", *Transportation research A*, 13 (1998) 91-109.

97 G.H. Pirie: "Measuring accessibility: a review and proposal", *Environment and Planning A* 11 (1979) 299-312.

98 S.L. Handy, D.A. Niemeier: "Measuring accessibility : an exploration of issues and alternatives", *Environment and Planning A*, 29 (1997) 1175-1194.

99 K.T. Geurs, G.P. Van Wee: "Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions", *Journal of Transport Geography*, 12 (2004) 127-140.

proportionnelle à la distance séparant les deux zones. L'accessibilité gravitaire apparaît donc comme le produit de deux facteurs antagonistes que sont la présence d'opportunités, qualifiées « d'éléments moteurs du déplacement », et le coût du déplacement envisagé comme « l'élément résistant du déplacement » (Koenig, 1974¹⁰⁰).

Si le niveau d'opportunités peut être directement obtenu en sortie du SIG, il est en revanche nécessaire de procéder à une série de calculs pour déterminer le coût généralisé, et plus précisément sa composante temporelle. Le temps d'un déplacement en transports en commun présente au minimum trois composantes.

- Le temps « en véhicule » qui dépend de la structure du réseau ainsi que des fréquences et vitesses de chacune des lignes. Ces éléments sont intégrés dans les fiches horaires de chaque ligne.
- Les trajets d'accès au réseau et terminaux qui sont effectués à pied entre le centroïde des zones origine et destination et le réseau de transports en commun à une vitesse de 4 km/h.
- Les temps d'attente aux éventuelles correspondances.

Alors que le temps perçu « en véhicule » est considéré comme identique au temps réel, la perception du confort est intégrée dans le calcul des temps d'accès et terminaux ainsi que dans le temps d'attente qui sont doublés (Commissariat Général du Plan, 2001¹⁰¹).

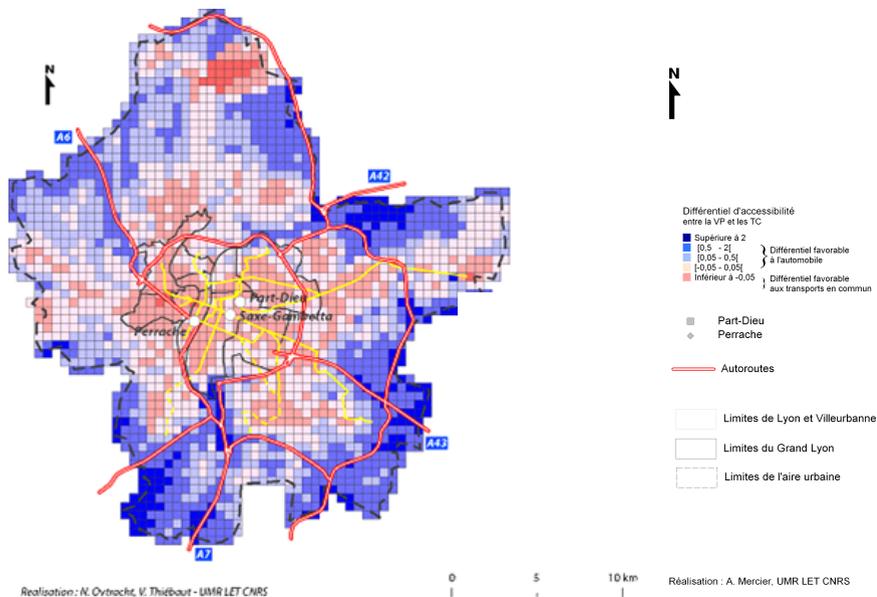
Un modèle de transport (appelé modèle à « 4 étapes ») permet d'intégrer les niveaux de congestion dans le calcul des temps de parcours. Ce modèle, mis en place sous VISUM, a pour objectif d'estimer rétroactivement les niveaux de trafic sur chacun des tronçons (en heure de pointe et sur l'ensemble de la journée) à partir de données socio-économiques issues de l'Enquête Ménages Déplacements réalisée à Lyon en 2006 (pour une présentation détaillée du modèle voir Mercier et Stoiber, 2010¹⁰²).

100 J.G. Koenig : « Théorie économique de l'accessibilité urbaine », *Revue Economique*, 2 (1974) 275-297.

101 Commissariat Général du Plan : « Transports : choix des investissements et coût des nuisances », La documentation française, 2001.

102 A. Mercier, T. Stoiber : "Improving accessibility measurement combining transport modelling and GIS analysis: two examples from France and Germany", 12th World Conference on Transportation Research (WCTR), 2010.

Carte a) Différentiel d'accessibilité aux emplois du Grand Lyon



Carte b) Différentiel d'accessibilité aux emplois de l'aire urbaine de Lyon

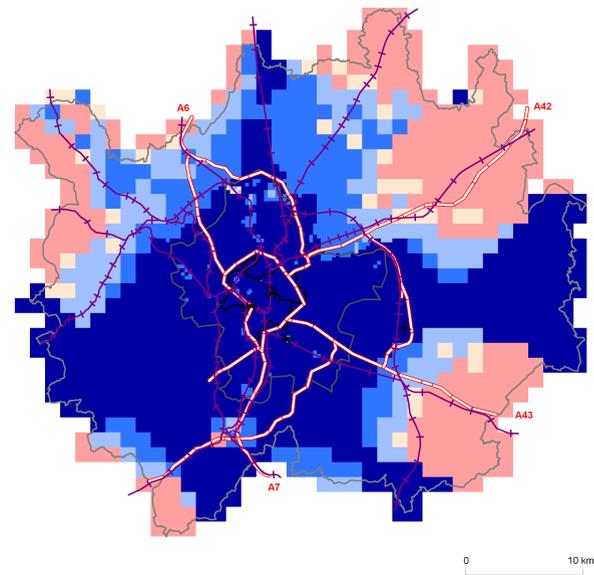


Figure 3 : Différentiel d'accessibilité aux emplois entre la VP et les TC

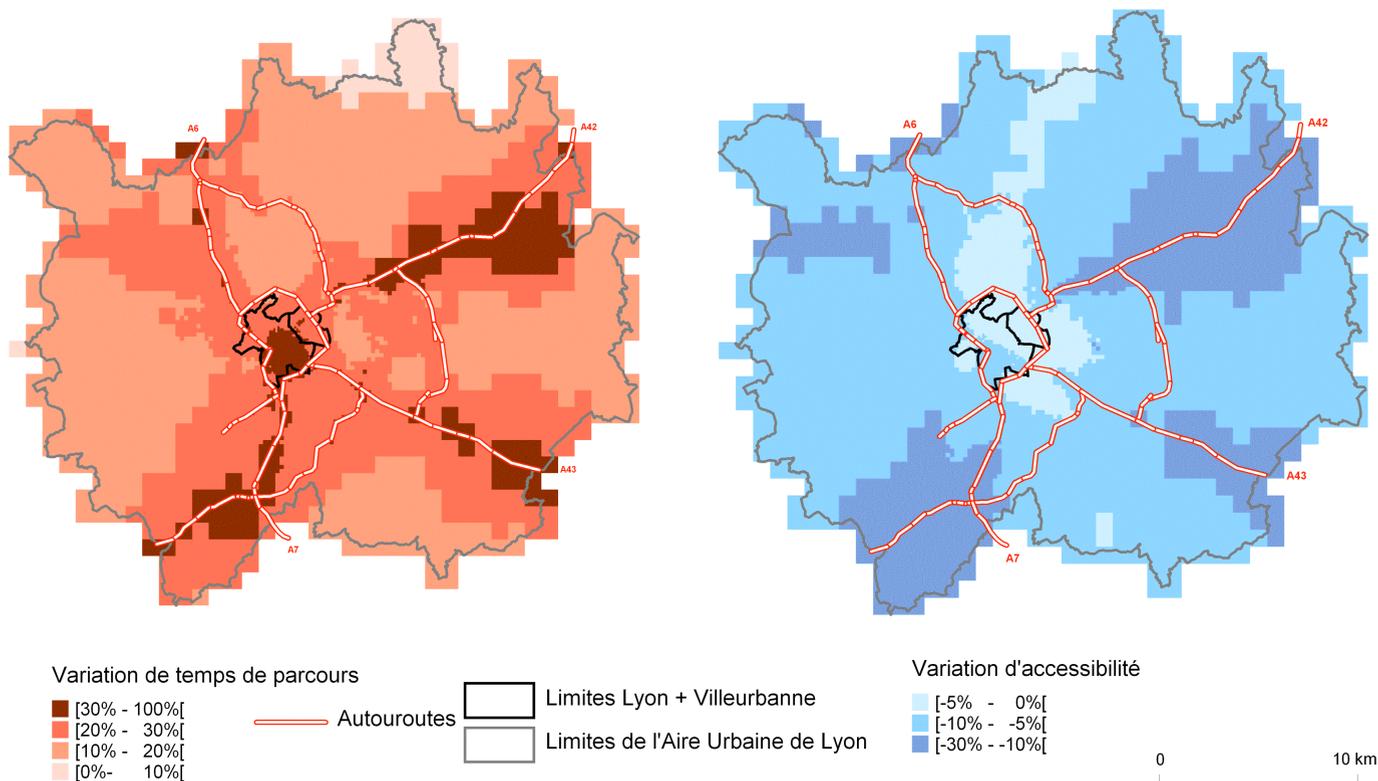


Figure 4 : Variation de temps de parcours et d'accessibilité aux emplois de l'aire urbaine suite à l'introduction du niveau de congestion automobile

Accessibilité : des résultats sensibles à analyser avec précaution

Parmi les difficultés rencontrées lors de mesures d'accessibilité gravitaire, la sensibilité au périmètre de l'aire d'étude et du niveau de désagrégation spatiale ainsi que celle du temps de déplacement sont les plus fréquentes (Pirie, 1979¹⁰³; Geurs et Ritsema Van Eck, 2001¹⁰⁴). Il convient dès lors d'examiner comment, sur notre aire d'étude, le périmètre d'étude et la prise en compte de la congestion peuvent impacter le niveau d'accessibilité.

Chacune des deux cartes de la Figure 3 illustre le différentiel d'accessibilité aux emplois entre la voiture particulière et les transports en commun, sur la période d'heure de pointe du matin. Tandis que la carte a) se concentre sur le territoire du Grand Lyon et n'intègre que les emplois présents dans ce périmètre, la carte b) s'intéresse plus largement à l'aire urbaine et considère l'ensemble des emplois qui y sont offerts.

La Figure 3a) illustre une accessibilité aux emplois du Grand Lyon, depuis les communes de Lyon et Villeurbanne, meilleure en transports en commun qu'en voiture particulière. Ce résultat est à relier avec d'une part une forte concentration des emplois du Grand Lyon dans les zones centrales et d'autre part un réseau de transport en commun en site propre très performant avec notamment le réseau métro et tramway. Toutefois, à l'échelle de l'aire urbaine, c'est la voiture qui offre la meilleure accessibilité aux emplois. Ce résultat peut sembler, à première vue, paradoxal. En effet, le réseau de transport en commun urbain performant à l'échelle du Grand Lyon devrait également permettre aux transports en commun de concurrencer la voiture particulière sur l'aire urbaine et ce d'autant plus que la majorité des emplois de l'aire urbaine sont localisés dans le Grand Lyon. Toutefois, deux éléments nous permettent de mieux comprendre ce résultat paradoxal. D'une part, les TC sont certes plus performants que la VP pour accéder aux emplois du Grand Lyon mais le différentiel reste assez faible (inférieur à 30 %). Alors que les métros (mode de transport collectif le plus rapide) présentent en moyenne une vitesse commerciale en heure de pointe de 25 km/h environ, la vitesse automobile moyenne est de 48 km/h (tous tronçons confondus de l'aire urbaine). D'autre part, contrairement au réseau routier, le réseau de transports en commun dessert principalement le Grand Lyon et quelques zones périurbaines. Or, plusieurs bassins d'emplois de l'aire urbaine sont localisés à l'extérieur du Grand Lyon et ne sont pas

103 G.H. Pirie : "Measuring accessibility: a review and proposal", *Environment and Planning A*, 11 (1979) 299-312.

104 K.T. Geurs, J.R. Ritsema Van Eck, J. R. : "Accessibility measures : review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transport scenarios, and related social and economics impacts", Rivm, 2001.

ou peu desservis par les transports en commun quand, dans le même temps, ils sont à proximité d'une sortie d'autoroute.

L'impact du niveau des vitesses automobiles, et plus précisément la prise en compte de la congestion, se révèle déterminant sur le niveau d'accessibilité. L'intégration des niveaux de trafics différenciés selon les tronçons se traduit par un accroissement du temps de déplacement de 23 % sur l'ensemble de l'aire urbaine. Les zones les plus congestionnées (taux de congestion supérieur à 60 %) sont localisées à proximité des autoroutes et/ou dans le centre-ville de Lyon. Comme illustré Figure 4, depuis ces zones, le temps d'accès aux emplois est majoré de 30 % en heure de pointe par rapport à un trafic fluide. De telles variations de temps de parcours se répercutent sur le niveau d'accessibilité, mais dans une moindre mesure. A l'échelle de l'aire urbaine, la baisse du niveau d'accessibilité est estimée à 5 % en cas de congestion. Tout comme précédemment, ce sont les zones à proximité des axes autoroutiers qui sont le plus affectées par une perte d'accessibilité pouvant atteindre 30 %. La faible variation d'accessibilité dans le centre-ville de Lyon peut sembler surprenante : tandis que le temps de transport s'y accroît de 30 % en situation de congestion, la baisse d'accessibilité ne dépasse pas 10 %. L'introduction des coûts monétaires et du nombre d'emplois (concentrés dans le centre-ville) permettent de compenser cette hausse du coût temporel.

ACCESSIBILITE ET CONCURRENCE MODALE EN SITUATION DE REFERENCE

La situation « de référence » reflète la structure des réseaux routiers et de transports en commun (réseau urbain lyonnais et réseau ferré régional) début 2009. Deux types de cartes sont présentés :

- les cartes de « niveau d'accessibilité » illustrent l'accessibilité – depuis chaque zone à l'ensemble des emplois des autres zones de l'aire urbaine de Lyon, en heure de pointe du matin – en référence à l'accessibilité de la zone présentant le niveau d'accessibilité le plus élevé (localisée dans le quartier de la « Part-Dieu »),
- les cartes de « différentiel d'accessibilité » sont mobilisées pour représenter, pour chaque zone, la « performance » du mode qui offre le meilleur niveau d'accessibilité aux emplois ou bien pour illustrer, pour un mode donné, l'évolution du niveau d'accessibilité suite à la mise en place d'une politique de transport.
-

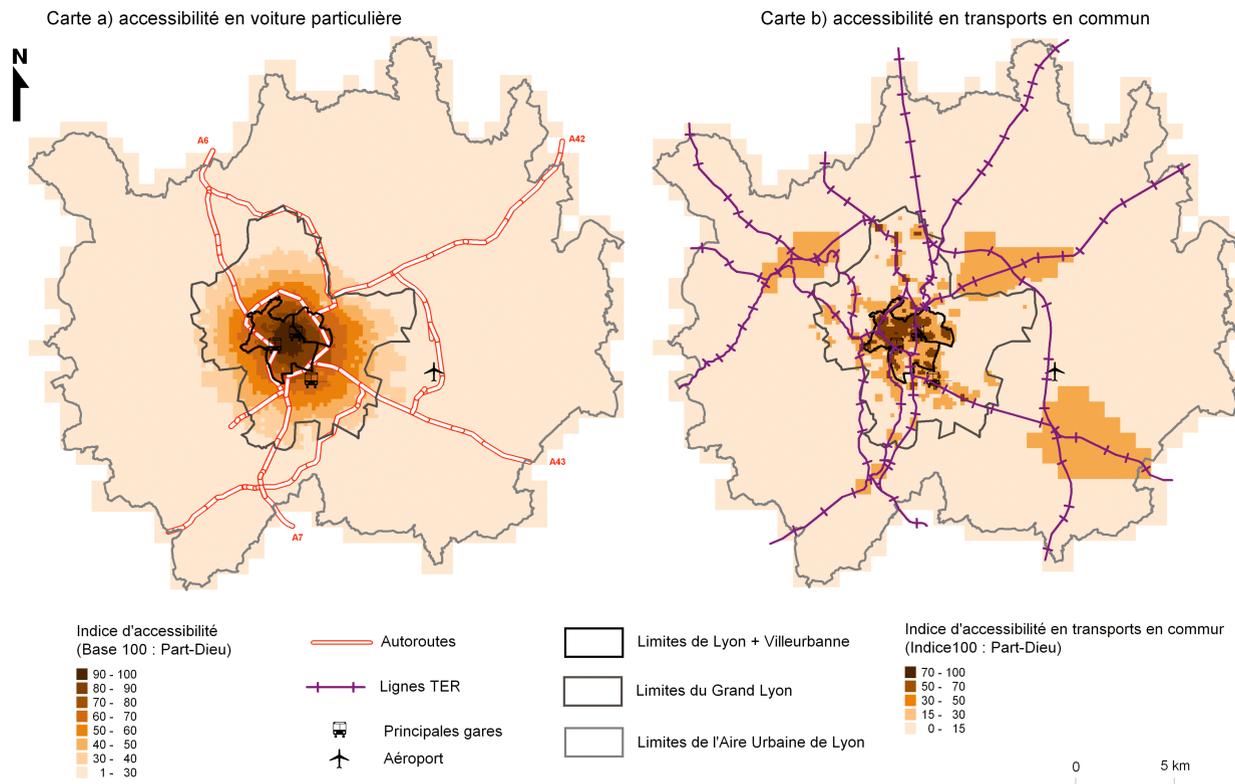


Figure 5 : Accessibilité aux emplois de l'aire urbaine en voiture particulière et en transport en commun

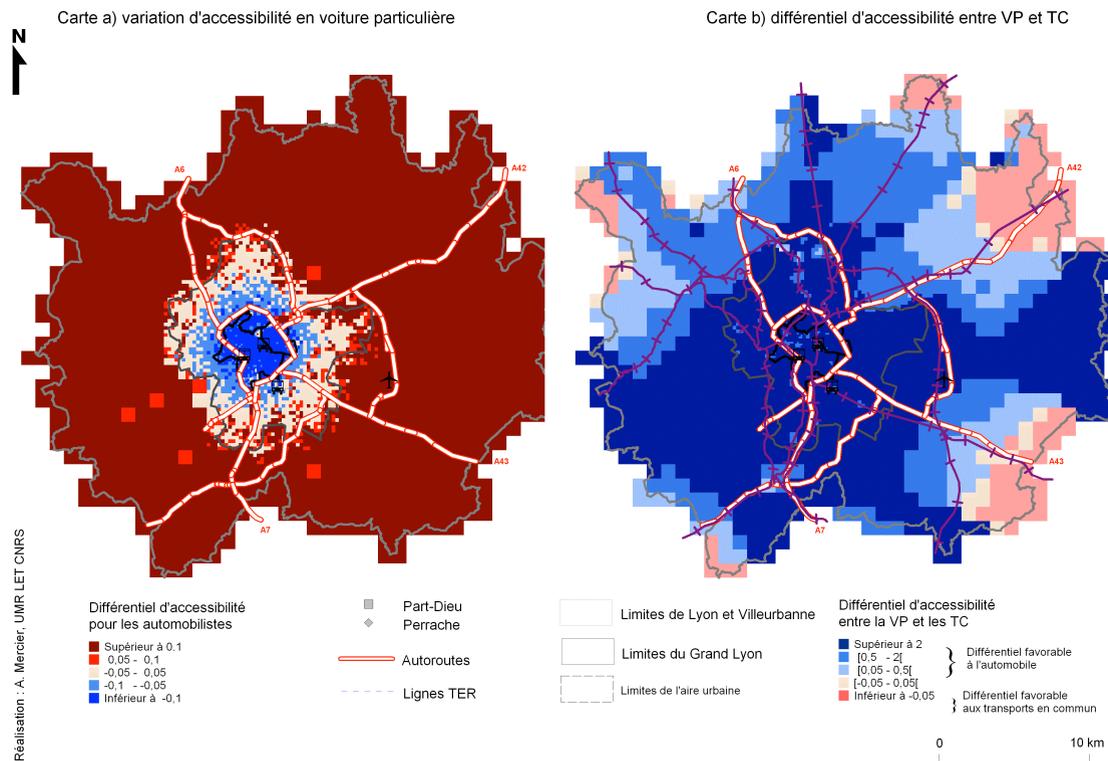


Figure 6 : Variations d'accessibilité aux emplois de l'aire urbaine suite à l'introduction d'un péage urbain

Considérant une vision globale de l'aire d'étude, le niveau d'accessibilité est décroissant avec la distance au centre et ce, quel que soit le mode considéré (cf. Figure 5). La concentration des emplois dans ces quartiers centraux (avec une densité d'emploi au km² supérieure à 10 000) est un facteur essentiel pour expliquer de tels résultats. Les actifs résidant à proximité de ces emplois, ou bien pouvant y accéder rapidement, bénéficient donc d'une accessibilité meilleure que ceux résidant dans les zones plus éloignées en termes de temps de parcours. Tandis que les actifs localisés au centre bénéficient d'une accessibilité aux emplois supérieure à 60 en voiture et supérieure à 15 en transports en commun, ceux résidant hors du Grand Lyon bénéficient d'une accessibilité inférieure à 30 en voiture particulière (VP) et, dans la plupart des cas, à 15 en transports en commun.

Un certain nombre de disparités propres à chacun des deux modes mérite d'être exposé. L'accessibilité en voiture particulière (Figure 5, carte a) apparaît ainsi sous la forme de cercles concentriques au centre et ce, en raison du maillage du réseau routier qui tend à homogénéiser les temps de transport et donc les niveaux d'accessibilité. Le niveau d'accessibilité en voiture particulière semble davantage dépendre de la distance au centre que de la structure du réseau autoroutier. Le niveau de saturation sur ces tronçons peut ainsi expliquer en partie ce constat. Les infrastructures autoroutières qui présentent, en heure de pointe du matin, des niveaux de trafic denses voire saturés ne permettent pas des vitesses de déplacements supérieures à celles des infrastructures routières traditionnelles. Ainsi 30 % des tronçons dont la vitesse « à vide » est supérieure ou égale à 110 (les tronçons autoroutiers) sont saturés et 70 % présentent un trafic dense en heure de pointe du matin.

L'accessibilité en transports en commun présente une structure comparable à des « doigts de gants », soulignant le double impact du réseau de transports en commun urbains et du réseau ferroviaire sur le niveau d'accessibilité aux emplois. Cette représentation de l'accessibilité s'explique principalement par la présence de lignes de transports en commun urbains performantes. L'intermodalité entre des « lignes fortes » de type métro ou, dans une moindre mesure, des lignes de tramway et de bus semble être la clé d'un bon niveau d'accessibilité en milieu urbain. Ainsi, la présence d'une station de métro à l'intérieur, ou à proximité, d'une zone lui garantit un niveau d'accessibilité supérieur à 30. Le même constat peut être formulé à l'échelle périurbaine où la présence de lignes de chemin de fer permettant de rejoindre les zones centrales influence significativement le niveau d'accessibilité. Ainsi la (Figure 5, carte b) met en évidence différentes zones (localisées au sein ou à l'extérieur du Grand Lyon) présentant un niveau d'accessibilité supérieur à 15 alors qu'elles ne sont pas (ou mal) desservies par un réseau de transports en commun urbain. Ces zones bénéficient d'une connexion au réseau ferroviaire régional qui les relie à Lyon. A l'issue de leur voyage en train, les usagers ont la possibilité d'utiliser

le réseau métro desservant la quasi-totalité des gares lyonnaises (à l'exception de Lyon Saint-Paul) pour effectuer leur trajet terminal.

A l'échelle de l'aire urbaine, l'automobile offre un niveau d'accessibilité largement supérieur aux transports en commun (Figure 3 – carte b). – carte b). L'ampleur du différentiel est à relier à la structure du réseau routier, présent sur l'ensemble du territoire, et à celle des réseaux de transports en commun, localisés au sein du PTU et sur quelques itinéraires interurbains. Toutefois, nous constatons que les transports en commun génèrent un niveau d'accessibilité supérieur à celui de l'automobile pour 5 % des zones, exclusivement localisées à l'extérieur du Grand Lyon. Ces zones se situent dans un périmètre de 10 kilomètres autour des dessertes ferroviaires qui, pour des liaisons avec Lyon-Villeurbanne offrent des coûts généralisés plus compétitifs que l'automobile. Ainsi, prenons la liaison entre Ambérieu et Lyon Part-Dieu : bien que le temps de transport soit estimé en moyenne à 34 minutes en train et à 24 minutes en voiture, le coût du déplacement, moins élevé en train (avec l'utilisation d'un abonnement mensuel) qu'en voiture permet de compenser cet écart.

A partir de cette situation « de référence », nous envisageons différents « stress-tests » pour comprendre l'impact de différents chocs sur les conditions d'accessibilité et de mobilité. Ces « chocs » se traduisent par un accroissement du coût monétaire pour les automobilistes. Ils ne se veulent pas exhaustifs : d'autres alternatives pourraient, par exemple, s'intéresser au partage de la voirie entre les différents types d'usagers (voir par exemple, Héran, 2005¹⁰⁵).

QUELS SERAIENT LES IMPACTS D'UN PEAGE URBAIN ?

Présentation du péage urbain et hypothèses de travail

Dans le contexte actuel de rareté de l'espace urbain, de crise des finances publiques et de contraintes environnementales croissantes, le péage urbain peut constituer un outil au service des politiques de transport en milieu urbain. A finalités multiples, le péage urbain recouvre « toute forme quelconque de paiement imposé aux automobilistes pour pouvoir circuler en certains endroits de certaines parties des zones urbaines » (A. Lauer, 1997, repris dans Centre d'Analyse Stratégique,

105 F. Héran : « De la ville adaptée à l'automobile à la ville pour tous. L'exemple parisien », in Anne Grillet-Aubert, Sabine Guth (dir.), Déplacements. Architectures du transport, territoires en mutation, Ed. Recherches/Ipraus, 2005.

2008¹⁰⁶). L'objectif de la simulation d'un péage urbain consiste à envisager l'impact d'un accroissement du coût monétaire des déplacements automobiles à destination des communes de Lyon et Villeurbanne sur le niveau de trafic automobile et par conséquent le niveau d'accessibilité des automobilistes. Le péage urbain envoie un signal-prix afin que les automobilistes dont le consentement à payer est inférieur au prix du péage ne circulent plus dans la zone permettant ainsi aux autres automobilistes de bénéficier de temps de parcours plus performants.

Un péage urbain peut prendre différentes formes spatiales (péage d'infrastructure, péage de zone, péage cordon) et temporelles (péage modulé ou non en fonction des périodes de la journée) selon l'objectif poursuivi (financement des infrastructures de transport ou réduction de la congestion automobile). Le contexte et les finalités de notre travail, qui vise à tester différents scénarios dans une optique de développement durable, nous conduisent à simuler un péage en heure de pointe qui s'apparente à un péage de zone sur les communes de Lyon et Villeurbanne. Les déplacements dont le coût est majoré sont uniquement ceux à destination de Lyon ou Villeurbanne (même si l'origine de ces déplacements se trouve également dans le centre-ville). Le montant du péage fixé à 3 € (Raux et Andan, 2002)¹⁰⁷, est relativement faible pour toucher le plus grand nombre d'automobilistes sans pour autant les inciter à se reporter sur les axes de circulation non concernés par le péage ou sur les modes alternatifs à la voiture. En considérant une valeur du temps tutélaire estimée à 11.4 € par heure¹⁰⁸, un péage de 3 € peut être compensé par un gain de temps de 16 minutes environ.

Péage urbain et accessibilité automobile

L'introduction d'un péage urbain de 3 € se traduit pour les automobilistes par une perte d'accessibilité globale de 5 %. A la lecture de la Figure 6 (carte a), nous pouvons opérer un regroupement des zones en trois grandes classes, en fonction de leur distance au centre :

- Les zones centrales et leur 1^{ère} couronne voient leur niveau d'accessibilité diminuer. Cette baisse est estimée entre 10 et 20 points dans les zones centrales et à 10 points en 1^{ère} couronne. Seules quelques zones localisées à proximité du périphérique ne connaissent pas de variation d'accessibilité

106 Centre d'Analyse Stratégique : « Péage urbain : principes pour une loi », La documentation française, 2008.

107 C. Raux, O. Andan : "Comment les péages urbains peuvent-ils satisfaire une politique d'agglomération ?", Recherche Transports Sécurité, 75 (2002) 115-130.

108 Commissariat Général du Plan : « Transports : choix des investissements et coût des nuisances ». La documentation française, 2001.

automobile.

- Les zones périphériques de la 2^{ème} couronne du Grand Lyon conservent un niveau d'accessibilité identique avec un différentiel estimé entre -5 et 5 points.
- L'ensemble du territoire hors Grand Lyon bénéficie d'une nette amélioration du niveau d'accessibilité en voiture suite à la mise en place du péage. Pour la quasi-totalité de ces zones, le différentiel d'accessibilité automobile est supérieur à 10 %.

En situation de référence, les zones localisées à l'intérieur de la zone de péage présentent les temps de parcours les plus faibles pour accéder d'une part à l'ensemble des autres zones et d'autre part à la majorité des emplois de l'aire urbaine de Lyon. Dès lors, imposer un péage équivalent à un accroissement du temps de parcours de 16 minutes pour des déplacements dont le temps moyen est inférieur à 12 minutes aggrave fortement le coût généralisé du déplacement (+37 % pour un déplacement interne à la zone centrale). Ces résultats soulignent ainsi qu'un péage urbain de 3€ ne se traduit pas par une baisse de trafic automobile suffisante, dans les zones centrales, pour générer un gain de temps qui compenserait le coût monétaire lié au péage. Les répercussions d'un péage urbain sont plus limitées pour les zones situées dans la 2^{ème} couronne du Grand Lyon. L'explication réside également dans la structure du coût généralisé des déplacements à destination de Lyon ou Villeurbanne : le prix du péage représentant une part relative du coût généralisé plus faible pour les déplacements depuis la 2^{ème} couronne que depuis la 1^{ère} couronne, son influence sur le niveau d'accessibilité est réduite. L'accroissement de l'accessibilité automobile des zones extérieures au Grand Lyon peut paraître, en revanche, plus surprenant. Comment, en effet, des zones peuvent-elle bénéficier d'une baisse du coût automobile généralisé suite à l'introduction d'un péage urbain ? La baisse du coût généralisé est à relier à une diminution du coût temporel des déplacements et, plus particulièrement, au report modal consécutif à la mise en place du péage urbain. Le modèle de transport conclut ainsi à une diminution de la part modale de l'automobile (- 4 points) au profit des deux roues (motorisés et non-motorisés confondus) qui ne s'acquittent pas du péage. Les tronçons sur lesquels le trafic diminue le plus se situent en dehors du Grand Lyon. Dès lors, les déplacements « Hors Grand-Lyon-zones centrales », empruntant principalement les axes autoroutiers bénéficient d'un accroissement relatif des vitesses. Le coût temporel des déplacements s'en trouve alors diminué : la mise en place d'un péage urbain se traduit par une réduction de 25 % du coût généralisé des déplacements réalisés depuis les zones externes au Grand Lyon (toutes destinations confondues).

Péage urbain et concurrence modale

Le péage urbain, en aggravant le coût généralisé des déplacements automobiles, permet de réduire le différentiel d'accessibilité entre la voiture particulière et les transports en commun. Toutefois l'automobile demeure, de loin, le mode offrant le meilleur niveau d'accessibilité (plus de 90 % des zones présentent un niveau d'accessibilité en voiture particulière supérieur à celui des transports en commun). Tandis qu'en situation de référence plus de 5 % des zones présentaient un différentiel favorable aux modes collectifs, elles ne sont plus que 2 % avec l'introduction du péage urbain. Seules les zones situées à la frontière de l'aire d'étude gardent une accessibilité meilleure en transports en commun. La bonne performance des liaisons ferroviaires « hors Grand Lyon-zones centrales » en situation de congestion routière se trouve minorée par la baisse de trafic automobile et les gains de temps qui en résultent.

Le péage urbain, dans cette configuration géographique et tarifaire ne constitue pas un outil capable de renverser les termes de la concurrence modale au niveau de l'aire d'étude. Malgré l'apparition du péage, le coût monétaire supérieur pour les automobilistes est compensé par des temps de transport plus faibles que pour les usagers des transports en commun. La baisse du trafic automobile (la part de la voiture baisse de 4 points avec l'introduction du péage) et la baisse de la congestion qui en résulte pourrait expliquer le fait que les automobilistes persistant sur le réseau routier conservent une accessibilité meilleure que les usagers des transports en commun mais la payent au prix fort. On retrouve alors une conclusion en accord avec un des objectifs possibles des péages urbains à savoir diminuer la congestion et offrir aux automobilistes avec un fort consentement à payer des temps de transports moins élevés et plus fiables.

LA TAXE SUR L'USAGE DE L'AUTOMOBILE

Une simulation de la taxe carbone

Une première simulation de taxe s'intéresse à la taxe carbone telle qu'elle aurait dû être appliquée en France au 1^{er} janvier 2010. Cette taxe visait la consommation de gaz, de pétrole et de charbon. A partir d'une estimation de la tonne de CO₂ à 17 €, la taxe carbone se traduit « concrètement » dans le secteur des transports par une hausse du prix du carburant de 4 centimes d'euros par litre d'essence et de 4,8 centimes par litre de gasoil. Cette taxe fait l'objet d'une compensation financière, 85 euros en moyenne par foyer, que nous n'intégrons pas dans nos calculs.

En considérant une consommation moyenne (tous parcours confondus) de 4.9 litres au 100 kilomètres et un coût en carburant de 0,064 € par kilomètre (contre 0,062 en situation de référence)¹⁰⁹, la taxe carbone n'impacte pas de manière significative le coût moyen au kilomètre qui reste à 0,49 €¹¹⁰. Le coût marginal¹¹¹ augmente lui très légèrement passant de 14 à 15 centimes par kilomètre. Les composantes monétaires et temporelles de l'accessibilité s'en trouvant inchangées, les automobilistes conservent un niveau d'accessibilité identique à celui de la situation de référence.

La taxe carbone, calculée à partir d'une tonne de CO₂ à 17 €, n'est ainsi pas suffisante pour modifier à elle seule la structure du coût généralisé des déplacements automobiles. Dès lors, pour investiguer davantage les possibles effets d'un accroissement du coût de l'usage de l'automobile, sous quelque forme que ce soit, nous simulons un scénario « extrême ».

Une taxe "extrême"

L'idée est ainsi de mettre en place une taxe sur l'usage de l'automobile de sorte que le prix du carburant soit plus que doublé par rapport au prix plafond de juin 2008 en s'élevant à 3 € le litre. Sous cette hypothèse, un prix du litre de carburant (essence et gasoil confondus) de 3 € se traduit par un coût monétaire moyen au kilomètre de 0,58 € (soit un accroissement de 18 points par rapport au coût moyen en situation de référence) et un coût marginal de 0,23 € (soit un accroissement de 64 %). Nous considérons que cette taxe est progressive et qu'elle n'influence pas les choix de déplacements des automobilistes. Autrement dit, dans un premier temps, les automobilistes ne diminuent pas leur kilométrage annuel ni ne prennent en considération ce coût monétaire dans la distribution de leurs déplacement ou leur choix modal.

La variation d'accessibilité pour les automobilistes n'est pas examinée : cette taxe « extrême » impactant le coût de déplacement en fonction de la distance, la variation d'accessibilité automobile ne semble pas pertinente à analyser. La structure du différentiel d'accessibilité entre la VP et les TC est comparable à celle observée en situation de référence. Elle traduit néanmoins une dégradation du niveau d'accessibilité automobile : le différentiel d'accessibilité est estimé à 4.14 contre 4,6 en situation de référence. Les zones pour lesquelles l'impact est le plus fort sont

109 Automobile Club: « Budget de l'automobiliste français 2008 », 2009.

110 Le coût moyen comprend les frais d'achat moins les frais de reprise de l'ancien véhicule, les frais financiers liés à l'achat ainsi que les dépenses d'assurances, de carburant, d'entretien et de garage.

111 Le coût marginal comprend les dépenses de carburant et d'entretien.

localisées dans une 1^{ère} couronne à l'extérieur du périmètre du Grand Lyon, principalement dans le secteur nord-est de l'aire d'étude ainsi que le secteur nord-ouest. Un fort accroissement du prix du carburant se traduit, pour ces zones, par une accessibilité meilleure en transports en commun qu'en voiture particulière. Le réseau ferré régional « performant », tant en termes de cadence que de vitesse, qui les dessert explique ce résultat. Toutefois, moins d'une centaine de zones voit les termes de la concurrence modale s'inverser. Malgré un doublement du prix du carburant, la répartition des zones en fonction du niveau d'accessibilité reste identique à la situation de référence : plus de 90 % des zones présentent un différentiel favorable à l'automobile.

Dans les différentes simulations réalisées et principalement dans le cadre d'une hausse du coût monétaire, les zones présentant un différentiel favorable aux transports en commun sont toujours situées à l'extérieur du Grand Lyon. Or, ce dernier dispose d'un réseau de transports en commun qui semble performant. Comment, dès lors, expliquer que les zones irriguées par un réseau de transports en commun urbains présentent un différentiel toujours favorable à l'automobile ? Au-delà de la structure-même des coûts de déplacements automobiles qui n'intègrent pas les coûts monétaire et temporel liés au stationnement, l'explication réside dans la portée du réseau urbain et notre périmètre d'étude. L'aire urbaine de Lyon s'étend bien au-delà des limites du périmètre des transports urbains de l'agglomération lyonnaise et la portée des déplacements dépasse bien souvent la zone couverte par les transports urbains. Depuis Lyon ou Villeurbanne, ce sont ainsi plus de 60 % des liaisons qui ne peuvent être réalisées intégralement en transports urbains. Un périmètre d'étude restreint au Grand Lyon, intégralement desservi par les transports en commun, et non à l'aire urbaine nous aurait conduit à des résultats d'accessibilité plus favorables aux transports en commun dans les zones centrales, dans la mesure où la quasi-totalité des liaisons pourraient être réalisées en transports en commun. Par ailleurs, comme nous l'avons mentionné précédemment, en dépit de la congestion, le réseau routier et autoroutier offre, en heure de pointe du matin, des vitesses de déplacement (calculées à partir du temps en véhicule) au moins comparables à celle des transports en commun urbains en site propre, et notamment du métro.

CONCLUSION

Tandis que le seuil de 50 % de la population mondiale vivant en ville a été atteint en 2009, ce chapitre s'interroge sur les conditions du développement urbain au regard des contraintes de rareté de l'espace urbain et de développement durable. Si l'attractivité de la ville, grâce aux multiples opportunités qu'elle offre, est à la source de son succès, elle est également à l'origine de ses multiples difficultés (congestion

routière, saturation des transports en commun, etc.). Le développement durable, et la mobilité durable son corollaire, ne peuvent être appréhendés uniquement sous l'angle du système de transport mais doivent être couplés à une réflexion sur les localisations.

A travers le prisme du concept d'accessibilité, différents scénarii de politiques publiques sont examinés. Différents constats peuvent être tirés de ces analyses. Il apparaît ainsi, qu'à l'échelle de l'aire urbaine, la performance du réseau de transport régional (TER) est, avec l'intermodalité qu'il suppose, l'une des clés principales pour favoriser le report modal des automobilistes vers les transports collectifs. Toutefois, paradoxalement, en offrant des niveaux d'accessibilité aux emplois comparables à la voiture particulière depuis la 2^{ème} couronne, le réseau TER tend à favoriser l'étalement urbain. Par ailleurs, pénaliser l'usage de la voiture en zones urbaines centrales (par le biais d'un péage de zone, par exemple) affecte principalement les automobilistes résidant dans les centres urbains et les incite à se reporter vers des modes alternatifs.

Ainsi ces différents scénarii, mobilisant conjointement le couple transport/localisation, soulignent que ce n'est pas tant la vitesse de déplacement qui importe mais davantage la diversité, la densité et la qualité des opportunités auxquelles le déplacement permet d'accéder.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le PREDIT (Programme de Recherche et d'Innovation dans les Transports terrestres) pour le financement de cette recherche.

Sommaire

Avant-propos	5
Les laboratoires et organismes membres du réseau « Economie et Développement Urbain Durable »	7
Présentation des auteurs	9
Introduction	13
Analyse des inventaires locaux d'émissions de gaz à effet de serre : quel inventaire pour quelle utilisation ?	15
Résumé	15
Introduction	16
Concepts clés pour comprendre les enjeux autour des inventaires	17
Une analyse basée sur l'utilisation	23
Conclusions et implications	29
Quelle contribution du progrès technique à la réduction des émissions du secteur automobile ? L'exemple du petit véhicule urbain	33
Résumé	33
Introduction	34
Objectifs de l'étude	35
Modéliser la dimension urbaine dans les transports	36
Les évolutions technologiques futures	39
Résultats	41
Conclusions	49

Les systèmes de prix de rachat garanti pour la production électrique renouvelable : fondements économiques, critères de mise en œuvre et impacts sur le progrès technique des filières	51
Résumé	51
Introduction	52
Les systèmes de prix d'achat garanti : la transposition du principe de la subvention à la production électrique d'origine renouvelable	52
Procédures de mise en œuvre, tarification et éligibilité	53
L'efficacité économique des mécanismes de prix de rachat garantis : les avantages du modèle	56
L'efficacité économique des mécanismes de prix de rachat garantis : les limites du modèle	58
L'efficacité environnementale de la politique publique des systèmes de rachat garanti : les risques de déficit ou de surproduction	61
Evaluation en équilibre partiel de l'impact du système de prix de rachat garanti sur le changement technologique dans les filières renouvelables	63
Conclusion	67
Analyse des mécanismes incitatifs à la rénovation des logements	69
Résumé	69
Introduction	70
Modélisation des mécanismes de décision des propriétaires	70
Amélioration des logements par les propriétaires	76
Conclusions	84
Une taxe carbone peut-elle rendre l'agglomération parisienne plus dense ?	87
Résumé	87
Introduction	88
Le modèle mono-centrique	89
Données	93
Calibration	95

Sommaire	155
Impacts de la taxe carbone	100
Conclusion	106
Remerciements	106
Une prospective 2030 de l'usage du sol et du transport en Ile-de-France	107
Résumé	107
Introduction	108
Rétrospective et situation de référence	110
Scénarisation dans le temps et dans l'espace	114
La configuration des résidents et des emplois	120
Conséquences sur le système de transport	122
Effets sur l'accessibilité territoriale	127
Conclusion	129
Accessibilité urbaine et politiques publiques : vers des « stress tests » pour une mobilité durable ?	133
Resume	133
Introduction	134
Considérations méthodologiques	135
Accessibilité et concurrence modale en situation de référence	142
Quels seraient les impacts d'un péage urbain ?	146
La taxe sur l'usage de l'automobile	149
Conclusion	151
Remerciements	152
Sommaire	153



CIRED
CENTRE
INTERNATIONAL
DE RECHERCHE
SUR L'ENVIRONNEMENT
ET LE DÉVELOPPEMENT



LET

Laboratoire
d'Économie
des Transports



Le réseau « Économie et développement urbain durable » a comme ambition de contribuer au développement de la recherche économique dans le domaine du développement urbain durable en prenant en compte les préoccupations des acteurs socio-économiques (élus, entreprises, associations).

Ce réseau rassemble sept équipes de recherche :

- le Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED) ;
- le Laboratoire d'économie de la production et de l'intégration internationale (LEPiI) ;
- le Laboratoire d'économie des transports (LET) ;
- le Laboratoire ville, mobilité, transports (LVMT) ;
- l'École des MINES ParisTech ;
- le Département économie et sciences humaines du Centre scientifique et technique du bâtiment ;
- la Mission climat de la Caisse des dépôts.

Ce livre présente les travaux exposés et partagés lors de la deuxième réunion annuelle du réseau en 2010. Ces travaux sont dédiés aux inventaires des émissions urbaines et aux politiques publiques en faveur de la maîtrise de ces émissions dans le bâtiment ainsi qu'à la problématique de l'usage des sols dans le cadre de la mise en œuvre de politiques publiques des transports.

39 euros

ISBN : 978-2-911256-44-8



9 782911 256448