

Revue de la littérature scientifique sur le lien entre les formes d'organisation territoriale, les consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre

Quelle contribution de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire à l'atténuation du changement climatique ?

Xavier Desjardins - Marie Llorente
Juin 2009

Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer
Plan Urbanisme Construction et Architecture
Décision attributive de subvention du 23 juin 2008 numéro M 08-02

Les auteurs

Xavier Desjardins

Maître de conférences en aménagement et urbanisme

Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

UMR Géographie-Cités, Equipe CRIA

191 rue Saint-Jacques

75005 Paris

xavier.desjardins@univ-paris1.fr

Marie Llorente

Chargée de recherche, économiste

Laboratoire de sociologie urbaine générative

Département Economie et Sciences Humaines

CSTB - Université Paris Est

10 Cours Louis Lumière

94300 Vincennes

marie.llorente@cstb.fr

SOMMAIRE

Introduction.....	5
<i>Quel urbanisme et quel aménagement du territoire face aux enjeux du changement climatique ?.....</i>	<i>7</i>
<i>Pour une connaissance générale des enjeux liés à l'énergie et au changement climatique.....</i>	<i>8</i>
<i>Plan du rapport.....</i>	<i>10</i>
1^{ère} Partie - Les méthodes d'évaluation des consommations énergétiques urbaines et des émissions de GES associées.....	13
I.1- Les méthodes standardisées de quantification des GES	13
<i>I.1.1- Les principes généraux de calcul des émissions.....</i>	<i>14</i>
<i>I.1.2- Les différentes approches d'inventaire</i>	<i>16</i>
1.2.1- Déduction ou induction.....	16
1.2.2- Approche producteur et approche consommateur	17
1.2.3- Le bilan énergétique.....	17
<i>I.1.3- Un exemple de méthode : le bilan Carbone® de l'ADEME.....</i>	<i>18</i>
<i>I.1.4- Un exemple d'appropriation des méthodes : Grenoble Alpes Métropole.....</i>	<i>20</i>
1.4.1- Le cadastrage des émissions	20
1.4.2- Le bilan énergétique.....	21
I.2- Les analyses de flux de matière et d'énergie	24
<i>I.2.1- Les principes</i>	<i>24</i>
<i>I.2.2- L'analyse de flux de matière et d'énergie de Lille</i>	<i>26</i>
I.3- Pourquoi compter ?.....	30
<i>I.3.1- Pour construire et évaluer des politiques locales.....</i>	<i>30</i>
<i>I.3.2- Jusqu'où va la responsabilité écologique d'un territoire ?.....</i>	<i>32</i>
<i>I.3.3- Compter pour créer un marché territorial d'échange des droits d'émission de GES ?</i>	<i>32</i>
2^{ème} Partie - Ville, énergie et GES : un panorama des travaux menés par les sciences sociales et grands résultats	37
II.1- Un corpus large et éclaté	37
<i>II.1.1- Des travaux très disparates</i>	<i>37</i>
<i>II.1.2- De multiples origines disciplinaires.....</i>	<i>37</i>
<i>II.1.3- D'une crise à l'autre : un intérêt fluctuant.....</i>	<i>39</i>
<i>II.1.4- Un reflux des approches critiques et radicales ?</i>	<i>40</i>
II.2- Quelques résultats de recherche	43
<i>II.2.1- Le lien entre densité métropolitaine ou régionale, déplacements quotidiens de personnes et consommation énergétique.....</i>	<i>43</i>
2.1.1- Les travaux de Newman et Kenworthy.....	43
2.1.2- Les travaux de Michael Breheny.....	46
2.1.3- Les travaux de Peter Naess	47
<i>II.2.2- Lien entre taille, densité des métropoles, consommation énergétique pour les déplacements de personnes et l'habitat</i>	<i>49</i>
<i>II.2.3- Consommation énergétique des individus pour les déplacements quotidiens selon leur localisation au sein des métropoles.....</i>	<i>52</i>
2.3.1- Les « budgets énergie environnement déplacements » étudiés par l'INRETS.....	52
2.3.2- Les travaux de Vincent Fouchier.....	55

II.2.4- <i>Consommation énergétique des individus pour les déplacements quotidiens et l'habitat selon leur localisation au sein des métropoles</i>	57
II.3- D'autres résultats prometteurs : la modélisation économique à l'épreuve des enjeux énergétiques territoriaux	61
II.3.1- <i>Les finalités de la modélisation économique dans le champ urbain</i>	61
II.3.2- <i>La question énergétique pose de nouveaux défis à la modélisation</i>	64
3.2.1- Les modèles intégrés urbanisme-transport	67
3.2.2- Les autres types de modèles	69
II.3.3- <i>Apports et limites de la modélisation économique</i>	70
II.4- Ce que les résultats disent ... et ne disent pas	73
3ème Partie - L'urbanisme et l'aménagement face à l'atténuation du changement climatique : illusions et opportunités	77
III.1- Il n'existe malheureusement pas de solution miraculeuse	79
III.1.1- <i>A pétrole cher, ville compacte ?</i>	79
III.1.2- <i>La voiture électrique : solution ou problème de demain ?</i>	83
III.2- Les réponses a-territoriales sont déterminantes	85
III.3- Aménager les territoires pour renforcer des accessibilités peu consommatrices d'énergie et peu émettrices de GES	87
Bibliographie générale	91
Bibliographie par partie	101
<i>Bibliographie de l'Introduction</i>	101
<i>Bibliographie de la 1^{ère} partie</i>	102
<i>Bibliographie de la 2^{ème} partie</i>	103
<i>Bibliographie de la 3^{ème} Partie</i>	109
Liste des entretiens réalisés	111
Annexe : les modalités de calcul des émissions selon les types de source ..	113
Le calcul des émissions énergétiques	113
<i>Le calcul des émissions liées à la production d'énergie (exemple de l'électricité)</i>	113
<i>Le calcul des émissions du secteur des transports routiers</i>	116
L'approche par livraisons de carburants	116
L'approche trafic	120
Autres types de transports	121
<i>Le calcul des émissions des secteurs résidentiel et tertiaire</i>	121
<i>Le calcul des émissions de gaz fluorés</i>	122
Le calcul des émissions non énergétiques	122
<i>Les émissions liées aux déchets</i>	122

Introduction

« Nous déclarons que la splendeur du monde s'est enrichie d'une beauté nouvelle : la beauté de la vitesse. Une automobile de course avec son coffre orné de gros tuyaux, tels des serpents à l'haleine explosive... une automobile rugissante, qui a l'air de courir sur de la mitraille, est plus belle que la Victoire de Samothrace.

[...] Nous chanterons les grandes foules agitées par le travail, le plaisir ou la révolte : les ressacs multicolores et polyphoniques des révolutions dans les capitales modernes ; la vibration nocturne des arsenaux et des chantiers sous leurs violentes lunes électriques ; les gares gloutonnes, avaleuses de serpents qui fument ; les usines suspendues aux nuages par les ficelles de leurs fumées ; les ponts aux bonds de gymnastes lancés sur la coutellerie diabolique des fleuves ensoleillés ; les paquebots aventureux flairant l'horizon ; les locomotives au grand poitrail qui piaffent sur les rails, tels d'énormes chevaux d'acier bridés de longs tuyaux et le vol glissant des avions, dont l'hélice a des claquements de drapeaux et des applaudissements de foule enthousiaste. »

Filippo Tommaso MARINETTI, *Manifeste du futurisme*, 1909

Ces quelques lignes ont un siècle ! On mesure le changement par rapport aux visions les plus diffusées dans le monde de l'aménagement aujourd'hui, qui rêve, sinon d'une ville sans énergie, du moins d'une ville « zéro carbone » ou « post-carbone » où l'impact des énergies utilisées soit le plus faible et le plus indolore. Certes, les provocations avant-gardistes des futuristes ne reflètent pas l'esprit d'une époque, du moins, leur évocation nous rappelle-t-elle que, jusqu'au début des années 1970, l'on avait une perception positive de l'énergie ou plutôt, que l'accès à un usage simple de l'énergie était un avantage recherché et d'abord « urbain ». Pendant longtemps, on a d'ailleurs pensé, en Europe comme en Amérique du Nord, qu'une des manières efficaces de lutter contre l'exode rural était de favoriser l'électrification des campagnes. L'Etat aurait pu soutenir la production autonome d'électricité pour les usages non substituables (éclairage) et le moteur à explosion pour la force motrice, mais un « *imaginaire politique modernisateur* » a conduit à faire le choix du développement des réseaux électriques dans le monde rural ... sans pouvoir empêcher le développement des villes (COUTARD, 2001).

Le lien entre ville et énergie s'est ainsi presque inversé en un siècle : une augmentation de la consommation énergétique ne semble plus conduire à un accroissement de la vitalité urbaine.

Désormais, la plupart des politiques publiques, et tout particulièrement les politiques territoriales, intègrent parmi leurs objectifs la diminution des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre (GES). C'est le cas des politiques urbaines et d'aménagement. En effet, l'idée que l'aménagement du territoire puisse, d'une manière ou d'une autre, contribuer à la lutte contre le réchauffement climatique est aujourd'hui largement répandue (au moins dans les discours et les intentions). En octobre 2008, un éditorial du New York Times est sobrement titré « *Cut the Sprawl, Cut the Warming* » pour saluer l'adoption par l'Etat de Californie d'une loi d'urbanisme qui vise à contenir l'extension spatiale des agglomérations. En France, la loi du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement ajoute, à l'article augural L.110 du Code de l'urbanisme, que les collectivités publiques se doivent, par leurs prévisions et leurs décisions d'utilisation de l'espace, « *de réduire les émissions de gaz à effet de serre, de réduire les consommations d'énergie, d'économiser les ressources fossiles* ».

Entre le début du vingtième siècle et aujourd'hui, rappelons pour mémoire, ces quelques éléments majeurs qui expliquent ces changements d'appréhension de la question énergétique :

- la croissance des consommations énergétiques a été extrêmement forte. A l'échelle mondiale, l'énergie primaire consommée est passée de moins de 1 milliard de tonnes équivalent pétrole en 1930, à 5,5 en 1974 ; 8 en 1985 et près de 12 aujourd'hui (IEA, 2008) ;
- l'hypothèse d'une pénurie des ressources pétrolières se précise, avec l'approche du fameux « *pic de Hubbert* » qui marque le début de la réduction de la production pétrolière (HUBBERT, 1956) ;
- la multiplicité des conflits et guerres liés à la maîtrise de la production ou du transport de l'énergie inquiète (Nigéria, Angola, Irak, Iran, Koweït, Géorgie etc.) ;
- les effets environnementaux liés à la production, au stockage, au transport et à la consommation d'énergie sont variés et dangereux. Alors que la plupart d'entre eux sont localisés, certains sont à l'échelle mondiale, notamment le changement climatique. La responsabilité anthropique du changement climatique restait incertaine dans le premier rapport du groupe international d'experts sur le climat (GIEC) en 1990, mais elle ne fait plus aucun doute dans le quatrième rapport paru en 2007.

Aussi, la question énergétique, qui avait tant agité les esprits au cours des années 1970, avant de tomber dans un relatif désintérêt, redevient-elle objet d'attention médiatique et politique depuis

une décennie. Face à l'ampleur des défis, l'objectif de réduction par quatre des émissions de GES figure dans le protocole de Kyoto. Pour l'atteindre, le rapport de Boissieu indique que tous les secteurs doivent être mis à contribution pour atteindre cet objectif (DE BOISSIEU, 2006). Ville et territoire apparaissent comme des leviers d'action à ne pas négliger.

Quel urbanisme et quel aménagement du territoire face aux enjeux du changement climatique ?

Dans ce cadre et conformément aux attentes du PUCA et du PREBAT, cette préoccupation nous a conduits à nous interroger sur l'état des connaissances relatives à la relation entre forme d'organisation territoriale d'une part, consommation d'énergie et émission de gaz à effet de serre d'autre part, ainsi que sur les mesures préconisées et/ou mises en œuvre pour atténuer ces dernières. En effet, quelle peut être la contribution des politiques d'aménagement du territoire à l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de maîtrise des consommations énergétiques ? La question de l'énergie redonne vigueur aux pratiques aménagistes et confère une nouvelle impulsion à une planification urbaine qui vise à lutter contre un étalement et un émiettement urbains considérés comme « *énergivores* » tant sont importants les déplacements automobiles des habitants des périphéries urbaines.

Face à cet enjeu, nous présenterons successivement les résultats de recherches sur :

- le lien entre les formes urbaines, les consommations énergétiques et les émissions de GES ;
- la capacité des politiques d'urbanisme et d'aménagement du territoire à influencer sur ce lien.

Nous circonscrivons notre propos aux enjeux des politiques d'urbanisme et d'aménagement du territoire. Par celles-ci nous entendons les politiques qui visent, explicitement, à organiser l'affectation et l'utilisation de l'espace ainsi que l'organisation des flux :

- **d'urbanisme et d'aménagement du territoire**, parce que les échelles en jeu sont diverses et que le second terme, plus englobant, permet de prendre en compte les espaces ruraux mais aussi les espaces sous influence urbaine à faibles densités, dont le statut, urbain ou non, fait souvent débat ;
- **explicitement**, parce que si toute politique peut avoir un effet territorial (réforme de la justice, évolution du système de protection sociale, taxe sur le carbone etc.), l'intention des politiques d'aménagement vise ouvertement à modifier l'organisation du territoire ;

- **d'affectation et d'utilisation de l'espace et organisation des flux**, puisque mobilité et agencement territorial ne peuvent être pensés séparément en raison de leur interdépendance et de leurs effets réciproques.

Notre travail ne traite donc qu'incidemment des conséquences pour l'aménagement et l'urbanisme des mutations sectorielles imposées par l'objectif de réduction des émissions de GES dans le secteur du transport, du bâtiment, de l'agriculture ou encore de la production d'énergie (SOUAMI, 2007). Le développement des énergies renouvelables pose notamment un redoutable problème foncier (ADEF, 2007). Notre propos concerne la contribution propre de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire à l'enjeu énergétique et climatique.

Pour une connaissance générale des enjeux liés à l'énergie et au changement climatique

Volontairement, nous ne mentionnerons pas dans ce rapport les grands éléments de connaissance sur l'énergie et le réchauffement climatique qui permettent de situer les questions évoquées dans le cadre des enjeux plus globaux ; mais nous renvoyons le lecteur à un certain nombre d'ouvrages et documents aisément accessibles.

Pour des éléments statistiques sur la production et la consommation d'énergie :

- à l'échelle mondiale, l'agence internationale de l'énergie publie des séries annuelles depuis 1973. On les retrouve sur le site Internet www.iea.org ;
- à l'échelle française, la Direction générale de l'énergie et du climat du ministère de l'Écologie publie de nombreuses données sur son site <http://www.developpement-durable.gouv.fr/energie/sommaire.htm>.

Pour un état des lieux des connaissances sur le changement climatique et des politiques mises en œuvre, notamment à l'échelle internationale, l'ouvrage de Sylvie Faucheux et Haitham Joumni, *Economie et politique des changements climatiques*, est clair et complet (FAUCHEUX, JOUMNI, 2005).

Pour le bâtiment, le rapport de Jean Orselli du Conseil Général des Ponts et Chaussées (ORSELLI, 2008) donne des informations particulièrement nombreuses. Le rapport de Philippe Pelletier apporte des compléments sur la question de la réhabilitation (PELLETIER, 2009). Mindjid Maizia (MAIZIA, 2007) et Jean-Pierre Traisnel (TRAISNEL, 2001) ont élaboré différents travaux de prospective sur l'énergie dans le bâtiment

Dans le domaine des transports, un article d'Alain Morcheoine, Bernard Bresse et Jean-Pierre Orfeuill « Energie, environnement et déplacements urbains : quelques points de repères », paru dans le numéro 89 de *Transports urbains* en 1995 fournit des informations utiles.

Concernant la consommation des ménages, l'IFEN a publié un intéressant 4 Pages : « Les ménages acteurs des émissions de gaz à effet de serre » en novembre-décembre 2008.

La revue *Futuribles* a consacré de nombreux articles aux questions énergétiques, parmi lesquels le numéro 189 des mois de juillet et août 1994 sur « les politiques énergétiques et le développement durable », le numéro 315 de janvier 2006 sur la maîtrise des émissions de GES ainsi que le numéro 341 de mai 2008 consacré au « changement climatique : risques géopolitiques ».

Sur la question territoriale, trois numéros de revue offrent des synthèses de nombreux travaux scientifiques récents :

- le numéro 147 des Cahiers de l'IAURIF de février 2008 est consacré aux Contraintes énergétiques et mutations urbaines, La gestion de l'espace : forme urbaine, densités et enjeux énergétiques ;
- le numéro 2 de la revue Territoires 2030 de la DIACT de décembre 2005 est consacré au Changement climatique, énergie et développement durable des territoires ;
- le numéro 103 des Annales de la recherche urbaine de 2007 est consacré à la Ville dans la transition énergétique.

Deux autres ouvrages peuvent être mentionnés, pour leurs éclairages sur les controverses et enjeux des politiques énergétiques. *Pétrole Apocalypse*, du député vert et ancien ministre de l'aménagement du territoire de 2001 à 2002 Yves Cochet, présente les controverses à propos des réserves pétrolières et se prononce vigoureusement pour une « société de sobriété » capable d' « autosuffisance locale et régionale » pour la production vivrière ou industrielle (COCHET, 2008). Dans un registre différent, Pierre Merlin présente dans son ouvrage *Energie et environnement* (MERLIN, 2008) un état des lieux de la question ainsi que des pistes qui, à la différence de celles que propose Yves Cochet, n'excluent pas le nucléaire.

Plan du rapport

Ce présent rapport centré autour des résultats scientifiques sur les liens entre formes urbaines, énergie et GES comprend trois parties :

- une présentation des méthodes pour une mesure territoriale des émissions de gaz à effet de serre et des consommations énergétiques ;
- une présentation du corpus scientifique consacré au lien entre organisation territoriale, consommation énergétique et émissions de gaz à effet de serre et l'état des résultats scientifiques sur cette question ;
- une discussion sur le rôle de l'aménagement du territoire au sein des politiques de lutte contre le réchauffement climatique.

Cette revue de la littérature scientifique ne vise pas l'exhaustivité mais présente quelques résultats majeurs sur la question, met en évidence un certain nombre de questions non résolues et met en débat les politiques d'aménagement au regard de cet état des connaissances.

1^{ère} Partie - Les méthodes d'évaluation des consommations énergétiques urbaines et des émissions de GES associées

Toute politique territoriale de réduction des émissions de GES nécessite une mesure, à la fois pour connaître l'existant et pour en évaluer les effets. Deux types de méthode sont utilisés :

- les inventaires d'émissions ;
- les évaluations de flux de matière et d'énergie.

I.1- Les méthodes standardisées de quantification des GES

Le travail sur les méthodes de quantification des émissions de GES a permis de montrer que leur champ d'application est très vaste puisqu'elles concernent autant des activités très variées (transport, bâtiment, agriculture ...) que des territoires de différentes tailles (pays, régions, départements, communes, quartiers). Cette quantification se fait dans tous les cas sur la base d'un inventaire des émissions. Les règles utilisées peuvent varier d'un inventaire à l'autre, ce qui, bien sûr, pose des problèmes pour la comparaison des résultats. Il faut bien noter qu'un inventaire quantifie des flux d'émissions de polluants et de GES dans l'atmosphère, mais qu'il ne s'agit en aucun cas d'une évaluation des concentrations atmosphériques.

Les inventaires nationaux de GES suivent le plus souvent la méthodologie du GIEC¹ ou la méthodologie CORINAIR (*CORe INventory of AIR emissions in Europe* - inventaire de référence des émissions atmosphériques en Europe). Chaque Etat membre de l'Union européenne doit remettre chaque année un rapport d'inventaire. Un organisme est chargé de la réalisation du rapport. Souvent cet organisme est un ministère, un institut de recherche ou une agence nationale de protection de l'environnement. Pour la France, le CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique) a été désigné comme organisme référent national par le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT). Le CITEPA a développé sa propre méthodologie pour la réalisation des inventaires et s'inspire des principes de CORINAIR. Le système² mis en place est le Système National d'Inventaires des Emissions de Polluants dans l'Atmosphère (SNIEPA) dans le cadre du programme CORALIE (COordination de la RéALisation des Inventaires d'Emissions) avec le concours financier du MEEDDAT. Le principe d'unicité du

¹ GIEC, 2006, *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre*

² L'organisation du système actuel a fait l'objet d'un arrêté interministériel du 29 décembre 2006.

système d'inventaire permet de garantir diverses qualités de cohérence, comparabilité, transparence, exactitude et exhaustivité. Le CITEPA élabore des inventaires nationaux, régionaux et départementaux.

A l'échelle infrarégionale, différentes méthodologies sont utilisées en fonction du but poursuivi et s'inspirent des méthodologies internationales précédentes, avec des adaptations plus ou moins importantes. Elles sont développées soit par des bureaux d'étude qui disposent alors de leur propre outil, soit par des organismes publics, comme le Bilan Carbone[®] mis au point par l'Ademe en France ou le protocole anglo-saxon GHG - *Greenhouse Gas Protocol Initiative*.

1.1.1- Les principes généraux de calcul des émissions

Un inventaire vise dans un premier temps à identifier les sources de polluants gazeux et particulaires émis dans l'atmosphère par l'ensemble des activités humaines et naturelles présentes sur une zone géographique donnée. Par conséquent, avant de calculer les émissions, il est d'abord nécessaire de définir le concept de « source ».

Les sources émettrices de polluants dans l'atmosphère sont classées de la manière suivante :

- les grandes sources ponctuelles. Il s'agit de sources fixes, canalisées ou diffuses, dont les rejets potentiels ou effectifs dans l'atmosphère, excèdent certains seuils. En France, grâce aux déclarations relatives aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), on connaît l'importance et la toxicité de ces grandes sources ponctuelles ;
- les sources linéaires. Elles sont essentiellement constituées par les principaux axes de communication (routier, fluvial, maritime,...) et incluent parfois des sources fixes telles que gazoducs, oléoducs, etc. ;
- les sources surfaciques. Cette catégorie comprend les autres sources fixes qui ne sont pas incluses dans la catégorie des grandes sources ponctuelles et les sources diffuses (ex. : émissions des sols agricoles) et mobiles non comprises dans les sources linéaires (ex : la circulation urbaine assimilée de par sa densité à une source surfacique). Il faut cependant noter que les sources linéaires sont souvent assimilées à des sources surfaciques quand on les découpe en tronçons.

Dans un second temps, il est possible de calculer et/ou d'estimer les émissions, ce qui est réalisé à partir des activités émettrices. La formule générale et schématique pour les émissions d'une activité donnée s'écrit sous la forme :

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

Avec

=> E : émission relative à la substance « s » et à l'activité « a » pendant le temps « t »

=> A : quantité d'activité relative à l'activité « a » pendant le temps « t »

=> F : facteur d'émission relatif à la substance « s » et à l'activité « a ».

Les termes A et F sont déterminés de manière souvent beaucoup plus complexe car ils dépendent de paramètres tels que le type de combustible, de sources, de procédé, etc. en relation avec la fréquence, l'entité géographique... Chaque méthode précise les facteurs d'émissions qu'elle retient. La notion de facteur d'émission est essentielle : l'équivalent carbone est la mesure « officielle » des émissions de gaz à effet de serre, converties en « équivalent carbone ». Il ne faut donc pas confondre « équivalent carbone » ou « équivalent CO2 » et émissions de CO2 seul, erreur fréquente.

L'ADEME fournit aux usagers de la méthode Bilan Carbone® un document qui permet de détailler le calcul de chacun des facteurs d'émission contenus dans les différents tableurs composant la méthode et d'en préciser les sources. Cela est d'autant plus nécessaire que chacun des facteurs d'émission possède une incertitude qui lui est associée. A titre d'exemple, dans son « Guide facteurs d'émissions, Version 5.0, janvier 2007 », l'Ademe précise pour le secteur énergie, à propos des combustibles fossiles : « *Les émissions de gaz à effet de serre liées à la combustion de gaz, de charbon et de pétrole sont bien documentées, car elles sont objet de nombreux travaux. La source d'incertitude majeure résulte dans la connaissance précise du composé brûlé, surtout pour le charbon, dont la composition est très fortement variable d'une qualité à une autre. Lorsque le composé est bien connu, la variabilité liée aux conditions de combustion est faible. De ce fait, les facteurs d'émission calculés dans ce document et utilisés dans le tableur Bilan Carbone® ont été affectés d'une incertitude par défaut de - 5% pour les produits pétroliers et gaziers, - 20% pour le charbon et les produits dérivés.* ».

Par ailleurs, les émissions présentent dans certains cas des relations complexes avec de nombreux paramètres. Il est alors nécessaire de recourir à des modèles spécifiques pour obtenir une bonne représentation des phénomènes. C'est le cas du trafic routier, pour lequel le modèle COPERT est souvent utilisé, des émissions biotiques, etc. Quelques-unes de ces méthodes sont présentées en annexe.

Les grandes sources ponctuelles sont étudiées une par une à partir des données d'émissions connues spécifiquement ou pouvant être déterminées facilement.

1.1.2- Les différentes approches d'inventaire

Plusieurs paramètres rentrent en jeu pour le calcul des émissions et différentes options peuvent être choisies, en particulier concernant le mode de collecte, lui-même lié à la disponibilité des données. Les organismes qui réalisent le bilan sont forcément confrontés à ce choix et arbitrent entre différentes approches.

1.2.1- Déduction ou induction

L'une des différences essentielles qui va déterminer la précision de l'inventaire et dont va découler sa méthode de réalisation est le choix préalable de l'approche choisie pour la collecte des données. On peut ainsi distinguer les approches inductive et déductive.

L'approche déductive

L'estimation déductive a pour principe de collecter des données générales à un niveau géographique donné (ex : national, régional), de calculer les émissions grâce à ces données et ensuite de réattribuer les émissions à l'échelle spatiale désirée (ex : régionale, départementale, communale) en fonction d'indicateurs statistiques (population, routes, utilisation des terres...). Certaines données ne sont effectivement accessibles qu'au niveau national, il est ensuite nécessaire de les désagréger au niveau régional ou infrarégional (département, commune). C'est notamment l'approche du CITEPA. Ce type d'approche prévoit aussi la désagrégation temporelle pour laquelle du niveau annuel de départ on arrive à celui de résolution mensuelle, journalière ou horaire des émissions.

L'approche inductive

A l'inverse, cette approche part de l'échelle locale en essayant de collecter les données les plus fines possibles (communes, quartiers, établissement par établissement pour l'industrie...) puis, une fois les émissions calculées, elles sont rassemblées, agrégées pour atteindre le niveau géographique requis dans l'inventaire.

En pratique ces deux approches sont utilisées simultanément, on privilégie généralement l'une ou l'autre des approches selon le niveau de détail désiré. Il est effectivement difficile de réaliser entièrement un inventaire avec l'approche inductive, d'une part à cause du coût et du temps

nécessaires pour le faire, mais surtout à cause des problèmes de collecte des données qui sont soit confidentielles (énergie), soit très difficilement attribuables à un niveau local.

Aussi, aboutit-on fréquemment à la réalisation d'un inventaire hybride où se côtoient les données provenant de ces deux types d'approches. On remarquera que dans la terminologie du Bilan Carbone[®], l'approche inductive est dite « territorialisée » tandis que l'approche déductive est dite « dégradée », car moins fine.

1.2.2- Approche producteur et approche consommateur

Pour la réalisation d'un inventaire on peut également distinguer deux approches pour la comptabilisation et surtout l'attribution des émissions. Ces deux approches sont les suivantes : l'approche « producteur » et l'approche « consommateur ».

La première approche, proposée par le GIEC, suggère simplement d'appliquer une méthode géographique : la comptabilisation ne doit considérer que les émissions de CO2 directement attribuées à chaque secteur de la portion de territoire étudiée et donc à l'intérieur de ses limites géographiques. C'est ainsi par exemple que l'on réalise le cadastre des émissions, qui permet de restituer de façon spatialisée/maillée les données d'inventaire, en évitant les doubles comptes. Dans ce cas, la contribution aux émissions globales est évaluée pour chaque source d'émissions au niveau local, sans inclure par exemple la combustion de matières énergétiques indirectement reliée au système (comme le fait par contre le Bilan Carbone[®] qui prend en compte les émissions indirectes générées en dehors du territoire, comme les émissions liées à la fabrication de produits utilisés par la collectivité). Le cadastrage des émissions est, bien sûr, à interpréter avec prudence : si l'on considère par exemple un territoire qui importe uniquement des biens transformés, sans les transformer dans les limites de la région, on observera certainement une situation paradoxale avec des émissions très faibles par rapport au niveau de vie de la région. Dans d'autres cas, notamment avec la notion d'empreinte écologique, on attribue l'émission de GES au consommateur (NICOLAS *et alii*, 2006), afin de rétablir une certaine équité dans la responsabilité écologique.

1.2.3- Le bilan énergétique

Quant au bilan énergétique, il répond à une question différente puisqu'il vise à restituer la consommation d'énergie par habitant et les émissions de GES associées, (le passage de l'un à l'autre se faisant à travers les facteurs d'émissions comme on l'a vu plus haut). En simplifiant, le cadastrage des émissions répond à la question « où sont les émissions de GES sur le territoire ? »

et le bilan énergétique « par qui sont-ils émis ? ». Plus précisément, un bilan énergétique réalise une photographie de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂, CH₂ et N₂O associées par secteur (résidentiel, tertiaire, industrie, transports et agriculture), par produit et par usage sur un périmètre donné. La réalisation d'un bilan énergétique s'appuie également sur un inventaire et des modèles de simulation (voir le schéma ci-après sur la construction des bilans énergie et GES). Concernant la partie bâtiment, des modèles sont réalisés tant par des bureaux d'étude (Explicit, Energies demain...), des agences d'urbanisme, que le CSTB, le plus souvent à partir des bases de données de l'INSEE (enquêtes logement, recensement général de la population...). A titre d'exemple, on peut renvoyer à la présentation de la méthodologie d'évaluation utilisée dans une étude de l'atelier parisien d'urbanisme (APUR, 2007). Cette étude permet l'évaluation des consommations d'énergie et des émissions de GES liées au chauffage des résidences principales parisiennes et analyse la performance énergétique de la forme urbaine parisienne. Pour le volet transport, différentes approches existent, mais comme on l'a déjà vu, le modèle trafic est le plus fréquent (voir annexe).

1.1.3- Un exemple de méthode : le bilan Carbone® de l'ADEME

L'outil Bilan Carbone® est une méthode de comptabilisation des émissions de GES qui se décline en deux versions : la version « entreprises » qui permet d'évaluer les émissions liées au fonctionnement d'une activité industrielle ou tertiaire et la version « collectivités », qui nous intéresse ici. Elle se décompose en deux modules différents selon le périmètre que l'on souhaite analyser et qui sont renseignés à l'aide de tableurs Excel :

- le Module « Patrimoine et Services » : les émissions de GES qu'il comptabilise sont liées au fonctionnement propre de la collectivité et des services qu'elle rend (par exemple, émissions de l'activité des services administratifs et techniques, de l'activité des écoles, des crèches, des piscines, des bibliothèques, de la collecte des ordures ménagères, etc.) ;
- le Module « Territoire » : les émissions qu'il comptabilise découlent de l'ensemble des activités du territoire de la collectivité (par exemple les émissions des activités économiques, touristiques, culturelles, les émissions des transports individuels et collectifs -routier, aérien, fluvial-, les émissions des ménages -chauffage, consommation-, etc.).

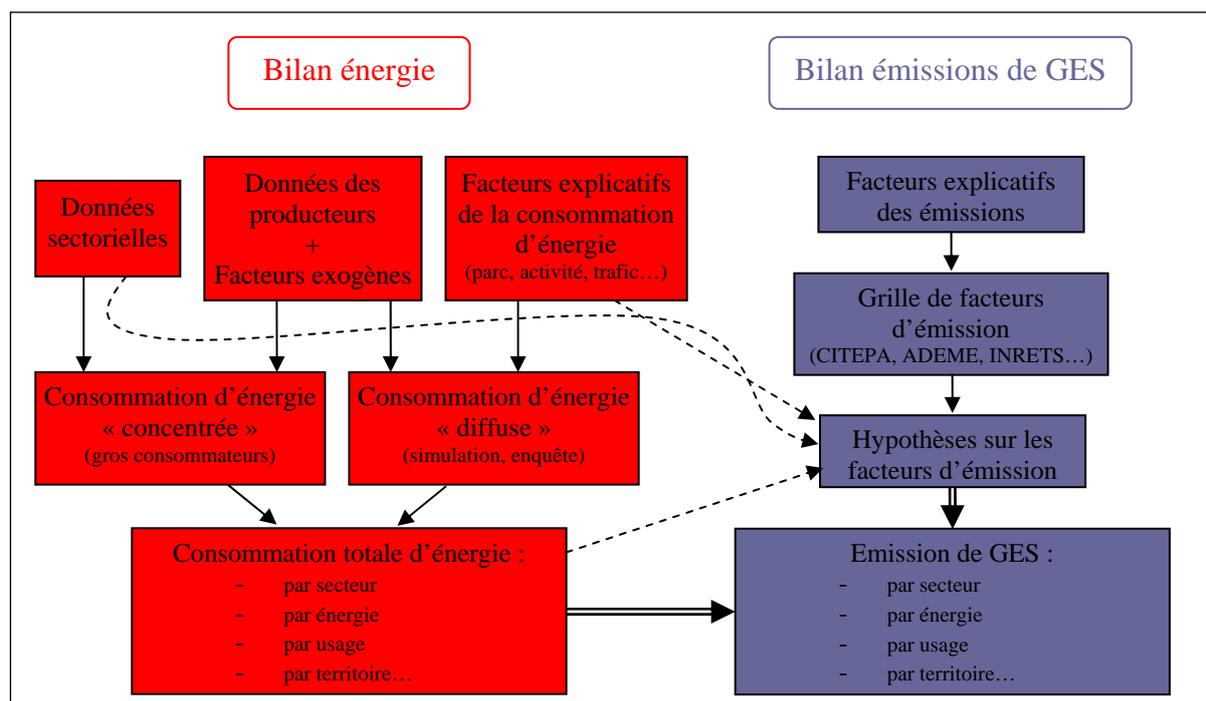
L'approche retenue dans le cadre d'un Bilan Carbone® est globale dans le sens où elle évalue aussi bien les émissions produites sur le territoire de la collectivité (approche producteur), que celles émises en dehors du territoire mais engendrées par une consommation dans le territoire (approche consommateur), c'est-à-dire les émissions directes et indirectes. Cela implique par

conséquent que cette méthode est indifférente à la localisation des émissions de gaz à effet de serre évaluées.

En termes d'appropriation, quelques retours d'expériences révèlent que c'est un outil qui ne suscite pas forcément l'adhésion de toutes les collectivités. Certaines estiment qu'il pousse trop loin le niveau de détail par rapport à leurs besoins. On lui reconnaît une utilité indéniable lorsqu'il s'agit de réaliser un premier diagnostic, en revanche ce n'est pas un outil facilement maniable pour assurer un suivi (dans le cadre d'un plan climat territorial par exemple), car il demande un nombre très important de données tout en comportant un certain niveau d'imprécision (cf. le niveau d'incertitude affecté aux facteurs d'émission). On peut toutefois faire valoir que dans le cadre d'une réflexion sur un projet de territoire à grande échelle (tel qu'un schéma de cohérence territoriale), connaître les émissions indirectes permet sans doute de révéler d'autres types de leviers d'actions.

Le schéma ci-dessous récapitule les différentes étapes pour établir un inventaire ou un bilan énergétique et le calcul des émissions de GES associées, où l'on retrouve les différentes sources de données possibles (cf. approche inductive et/ou déductive), et implicitement le niveau d'incertitudes lié à ces méthodes compte tenu des hypothèses sur les facteurs d'émission et le recours à des modèles de simulation. Du côté des prestataires qui réalisent ces bilans, il y a donc une exigence de transparence sur la fiabilité des données et les hypothèses retenues.

Construction des bilans / inventaires énergie et GES



Source : ADEME

1.1.4- Un exemple d'appropriation des méthodes : Grenoble Alpes Métropole

L'exemple de la communauté d'agglomération Grenoble Alpes Métropole est intéressant puisqu'elle a recours aux deux méthodes complémentaires de l'inventaire à partir des sources d'émissions et du bilan énergétique.

1.4.1- Le cadastrage des émissions

Pour le cadastrage des émissions, sont utilisées les données de l'ASCOPARG (Association pour le Contrôle et la Prévention de l'Air dans la Région Grenobloise). Cette association fait partie du réseau d'associations locales à qui sont confiées les missions de surveillance et d'information sur la qualité de l'air (comme AIRPARIF pour la région Ile-de-France par exemple). L'inventaire des émissions de GES est basé sur :

- la modélisation du trafic pour le transport ;
- les données de l'INSEE pour le parc résidentiel et tertiaire, pour le bâtiment ;
- les émissions déclarées des sites industriels.

Cette méthode ne prend pas en compte les GES :

- liés à la consommation d'électricité quand elle n'est pas produite dans le territoire ;
- liés aux déplacements des habitants hors de l'agglomération ;
- « incorporés » dans les biens importés.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet la comparaison avec d'autres inventaires locaux ou nationaux.

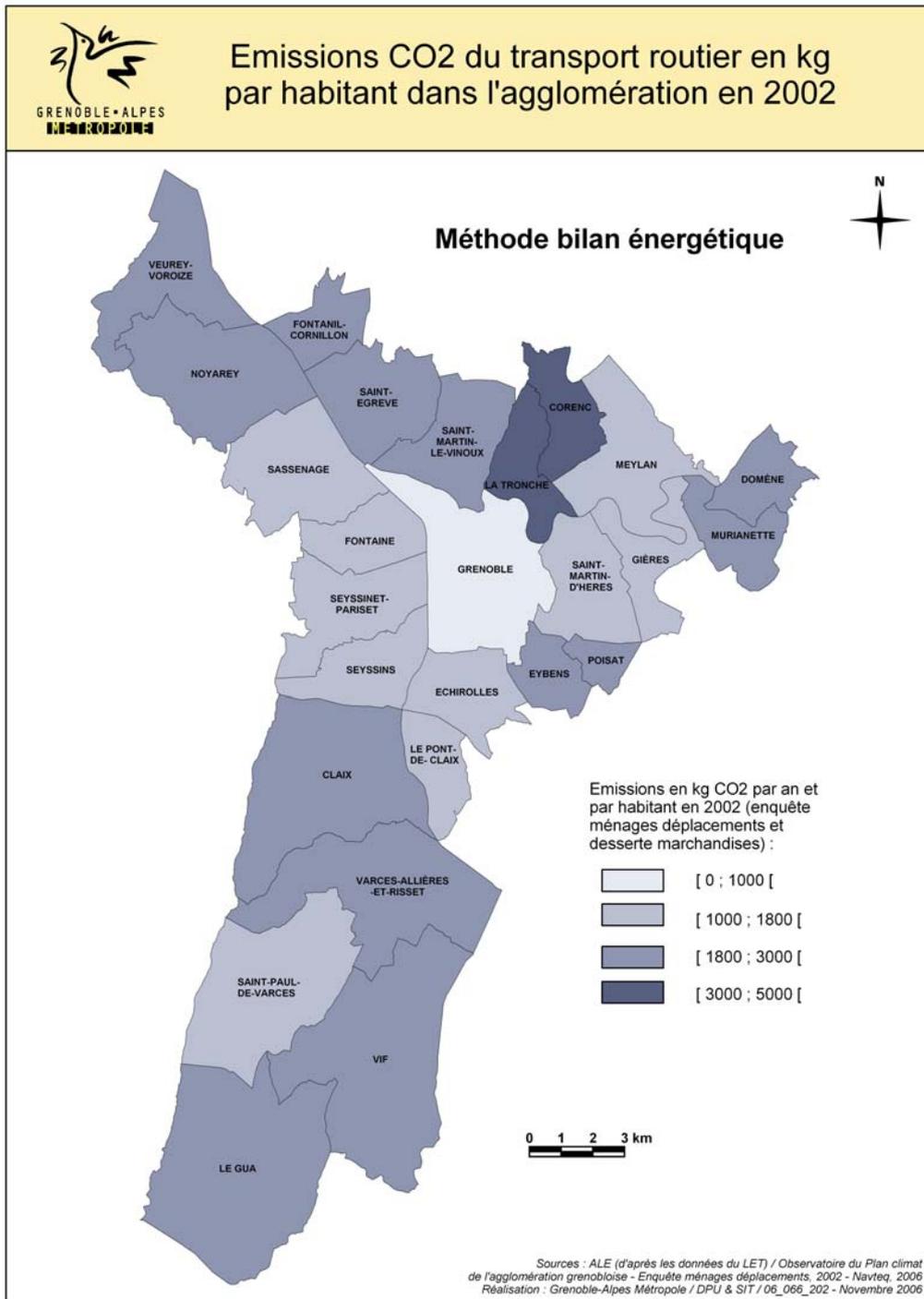
1.4.2- Le bilan énergétique

Une autre méthode est le bilan énergétique qui évalue la contribution des habitants aux émissions de GES. Le bilan se construit ainsi :

- pour la production de chaleur et l'électricité, les données sont issues des chiffres de ventes des distributeurs de gaz et d'électricité, des données relatives aux énergies utilisées pour le chauffage urbain, ainsi que d'évaluations pour les consommations d'autres énergies telles que le fioul ou le propane ;
- pour les transports, les données sont issues des enquêtes sur les déplacements des ménages ainsi que du modèle de trafic de l'ASCOPARG pour les émissions liées au trafic de marchandises.

Cette méthode rend difficile la ventilation des émissions par secteur d'activités. Par ailleurs, elle ne prend pas non plus en compte les déplacements des habitants hors de l'agglomération ni le carbone incorporé dans les biens importés.

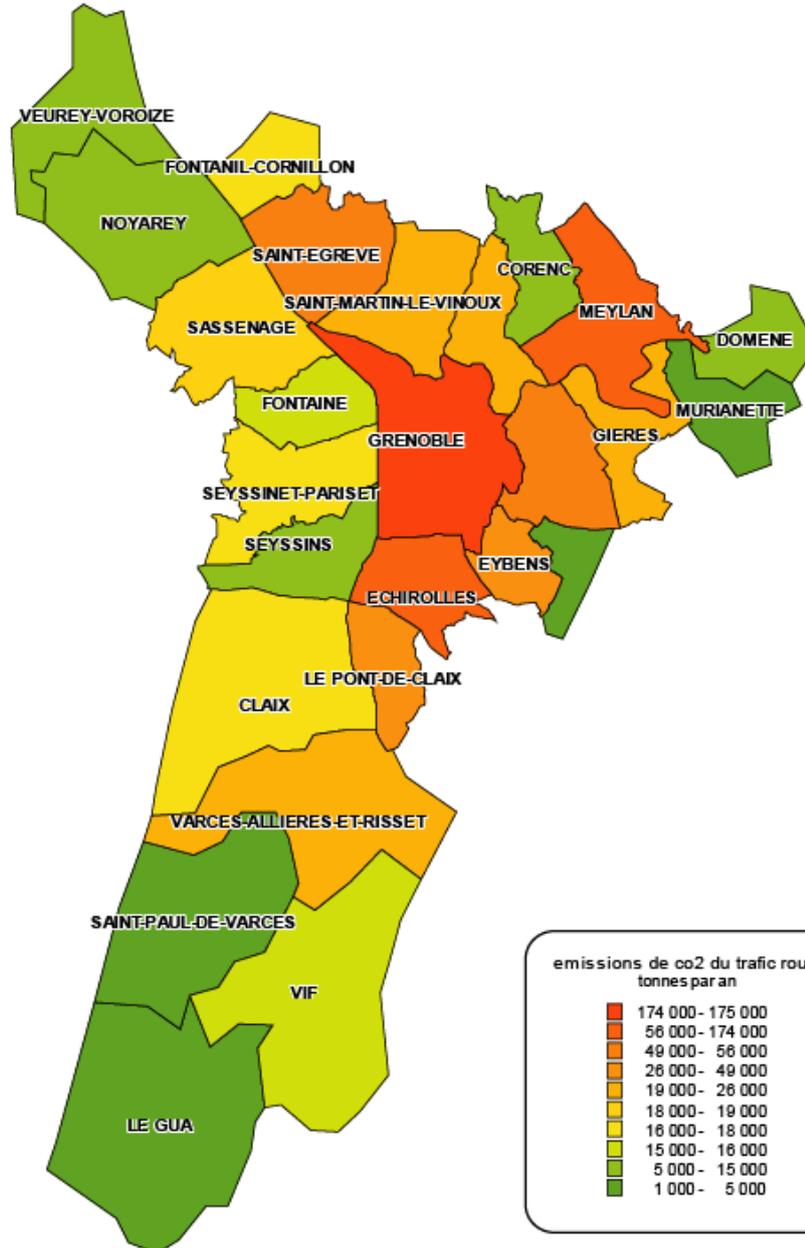
Les cartes qui suivent donnent une illustration de ces deux méthodes, dans le cas des émissions de CO₂ dues au transport routier dans l'agglomération de Grenoble. On retrouve un résultat assez classique, à savoir que la ville-centre concentre le plus d'émissions (phénomènes de polarisation et de congestion), alors que les habitants des périphéries de l'agglomération se révèlent, en moyenne, plus fortement émetteurs.



ASCOPARG



Emissions de CO2 du Transport Routier en tonnes par an - 2004



I.2- Les analyses de flux de matière et d'énergie

Alors que les méthodes que nous venons de présenter sont construites à partir des *sources d'émissions*, d'autres méthodes analysent le *métabolisme urbain*, c'est-à-dire qu'elles identifient des *flux de matière et d'énergie* qui entrent dans la ville, éventuellement se transforment dans celle-ci et en ressortent (NGHIEM, 2005). Ce type d'approche a été particulièrement développé au cours des années 1970 dans le cadre du programme *Man and biospher* de l'UNESCO (BEAUCIRE, 1985).

I.2.1- Les principes

Il existe deux méthodes abouties de comptabilisation des flux de matières et d'énergie, dont la pertinence est fonction de l'échelle territoriale : la méthode Baccini-Brunner (BACCINI – BRUNNER, 1992) et la méthode Eurostat, qui est une méthode standardisée proposée par les services de statistique de la Commission Européenne (EUROSTAT, 2001). Sa vocation initiale est la réalisation de bilans nationaux voire continentaux. La méthode Eurostat a en effet pour objectif d'aider les Etats à réaliser la comptabilité des flux de matière et établir le solde matériel de l'économie nationale afin d'en tirer des indicateurs.

Sabine Barles, qui retient la méthode Eurostat pour la région parisienne, montre bien qu'une telle démarche nécessite la localisation et la collecte d'un nombre important de données relativement éparées, qui ne sont pas toujours spatialisées (BARLES, 2007). La mise en place de la matrice d'analyse constitue donc l'une des principales tâches à accomplir. L'idée est de poser les bases d'un cadre d'analyse pérenne, d'une mise à jour aisée, qui permette de suivre dans le temps l'évolution du métabolisme parisien. L'un des enjeux est de définir le cadre spatial de cette analyse, puisque, si les limites administratives de la Ville de Paris proprement dite constituent un cadre pérenne depuis 1860, celles de l'agglomération parisienne dans son ensemble sont mouvantes et plus difficiles à fixer.

La méthode de Peter Baccini et Paul H. Brunner, présente l'intérêt d'avoir été élaborée précisément pour les approches régionales et locales et d'avoir déjà été appliquée à plusieurs agglomérations (en particulier Vienne et plus récemment Genève). Les principes généraux sont les suivants :

- le système est constitué « par un groupe d'éléments, les interactions entre ces éléments, et les frontières entre eux et d'autres éléments dans l'espace et le temps », soit les limites géographiques du système étudié et un laps de temps d'une année dans la plupart des cas,

sachant que les limites verticales sont fixées à 500 mètres du niveau du sol en hauteur et à une profondeur telle que les eaux souterraines y sont incluses ;

- les flux étudiés sont liés à quatre activités humaines, considérées comme résumant les besoins matériels humains : 1) nourrir, 2) laver, 3) résider et travailler, 4) transporter et communiquer.

Ces méthodes comportent également un volet inventaire. Sur le poste combustible, Sabine Barles (BARLES, 2007) fait remarquer que, de façon assez surprenante vu les enjeux actuels, les statistiques relatives à la circulation de l'énergie sont à la fois rares et éparses, et ne donnent pas directement les informations nécessaires à la réalisation d'une matrice. Selon elle, la méthode du bilan énergétique régional proposée par le groupe de travail « Observation de l'énergie et de l'effet de serre en régions », animé par le Réseau des Agences Régionales de l'Énergie et de l'Environnement (RARE), ne peut être mobilisée, car elle ne vise pas à contribuer à un bilan de matières et ne considère que les consommations d'énergie finale³. La principale source d'informations est fournie par la Direction Générale de l'Énergie et du Climat du ministère de l'Écologie, avec des données régionales établies tous les deux ans. Ces statistiques comprennent :

- la production d'énergie primaire locale (en ktep) ;
- la consommation énergétique finale (en ktep) par type d'énergie et par secteur d'activité (industrie, secteurs résidentiel et tertiaire, agriculture, transports) ;
- quelques indicateurs énergétiques, notamment la puissance électrique installée (utile pour évaluer la production locale d'électricité).

Ces chiffres présentent un certain nombre de limites :

- exprimés en ktep, ils nécessitent d'être convertis afin de remonter aux quantités de matières réellement mises en jeu ;
- ils reflètent la consommation finale, mais ne donnent ni la consommation primaire (en particulier pour l'électricité), ni les exportations (en particulier pour les produits pétroliers), ni les lieux de production (Île-de-France versus autre lieu de production, sauf pour le pétrole dont les quantités extraites en Île-de-France sont connues).

³ *Bilan énergétique régional*, Toulouse : RARE / Paris : ADEME / MIES / Observatoire de l'Énergie (coll. « Cahiers techniques », n° 1), voir le site, <http://www.rare.asso.fr>

C'est pourquoi des données complémentaires sont utilisées, en particulier celles d'AIRPARIF qui réalise le cadastre francilien des émissions selon les méthodes standardisées, mais en adoptant une résolution spatiale plus fine et en observant un moins grand nombre de substances, soit cinq polluants (oxydes d'azote, monoxyde de carbone, dioxyde de soufre, composés organiques volatiles non méthaniques) et trois gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, protoxyde d'azote, méthane)⁴. Les données accessibles aujourd'hui portent sur ces trois gaz.

Ainsi les méthodes utilisées pour les bilans et inventaires énergétiques et les analyses de flux de matière et d'énergie se recoupent en partie, ce qui au final n'est pas une réelle surprise compte tenu des données disponibles, en particulier pour l'énergie.

1.2.2- L'analyse de flux de matière et d'énergie de Lille

En termes d'exemplarité, on peut citer la ville de Lille (et ses communes associées, Hellemmes et Lomme) qui a développé un projet d'écologie territoriale, c'est-à-dire qui assimile le fonctionnement du territoire à celui d'un écosystème. L'objectif est d'initier une gestion plus sobre des ressources sur le territoire et de définir des stratégies de dématérialisation et de relocalisation des activités. La visée est donc plus ambitieuse que celle d'un bilan énergétique et de GES, puisque précisément d'autres flux que ceux liés à l'énergie sont pris en compte. Pour cela, la ville a privilégié une AFME comme outil de diagnostic territorial. La méthode Eurostat a été retenue.

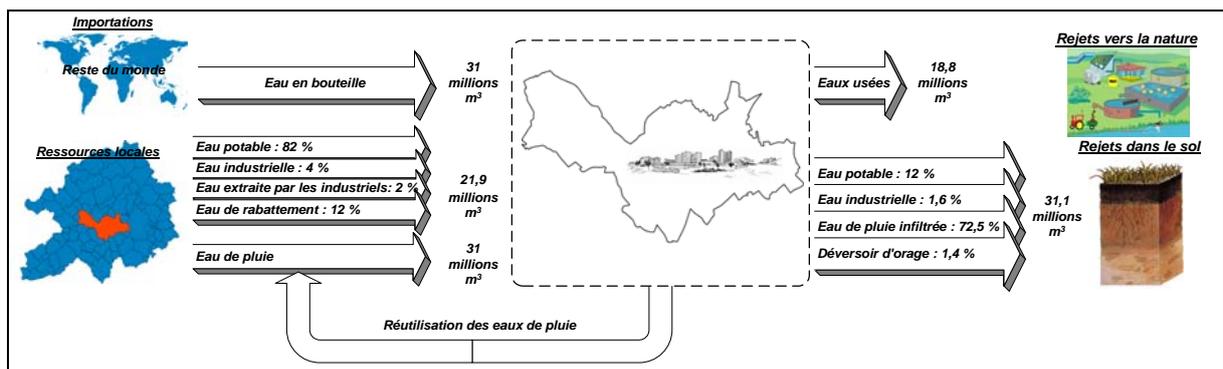
⁴ *Analyse de l'inventaire et du cadastre des émissions des principaux gaz à effet de serre en Île-de-France*, Paris : AIRPARIF, sept. 2005, disponible au format PDF, <http://www.airparif.asso.fr/airparif/pdf/Rges.pdf>, [réf. Du 4 juin 2009]

Le projet propose une comptabilité en tonne (ou en unité d'énergie) des flux de ressources les plus importants pour les activités du territoire lillois :

- l'énergie : gaz naturel, charbon, fioul, pétrole, électricité, bois ;
- l'eau : eau potable, eau industrielle, eau de remontée de nappe, eau de pluie, eau en bouteille ;
- les matériaux de construction : béton, ciment, brique, verre ;
- les produits alimentaires : ensemble des produits destinés à l'alimentation humaine ;
- le textile : vêtement, ameublement ;
- le bois, les papiers et cartons ;
- les métaux : fer, acier.

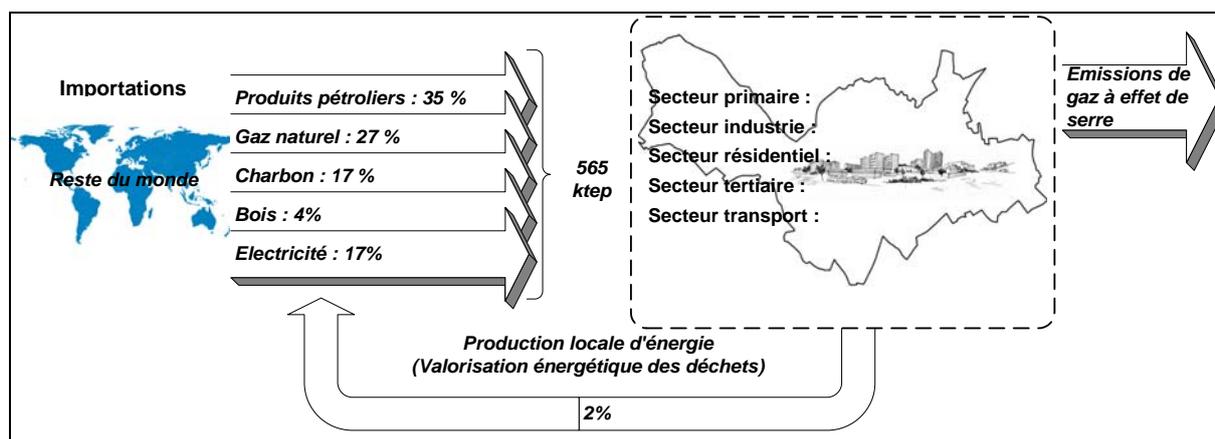
Les premiers résultats permettent de dégager des pistes d'action.

En matière d'eau, ce bilan favorise la maîtrise des consommations et l'évaluation des problèmes d'approvisionnement. Les résultats font notamment apparaître des opportunités telles que la réutilisation possible des sables issus des stations d'épuration en tant que matériaux de construction.



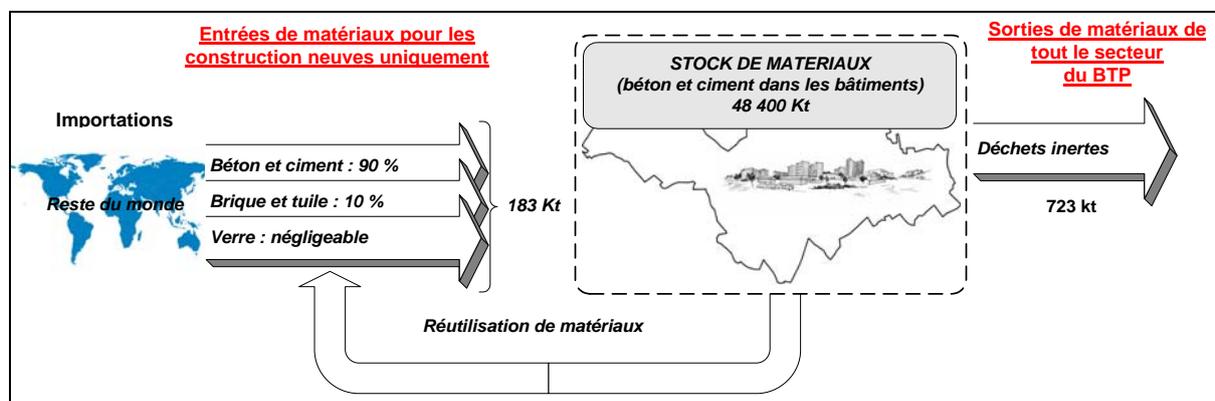
Source : AFME de Lille, 2005

En matière d'énergie, le bilan montre, sans surprise, une forte dépendance du territoire vis-à-vis de l'extérieur pour son approvisionnement en énergie (notamment les énergies fossiles). Le potentiel de production locale d'énergie peut être augmenté, à travers le renforcement du réseau de chaleur et l'installation de chaudière à biomasse.



Source : AFME de Lille, 2005

Le bilan effectué dans le cadre de l'AFME pour la ville de Lille a fait émerger un autre exemple très concret : le cas des matériaux de construction. L'accent est mis ici sur le concept de « déconstruction », où la qualification du flux sortant, encore trop souvent assimilé à un flux de déchets (c'est-à-dire qu'on ne considère pas son potentiel de réutilisation ou de valorisation), se rapproche plutôt à d'un flux de matières secondaires ayant une certaine intensité énergétique. Par un processus de déconstruction qui privilégie systématiquement le tri de matériaux *in situ* plutôt que l'évacuation sous la forme d'un flux mêlé, une réutilisation locale et optimale des matières devient envisageable (DURET et al. 2007).

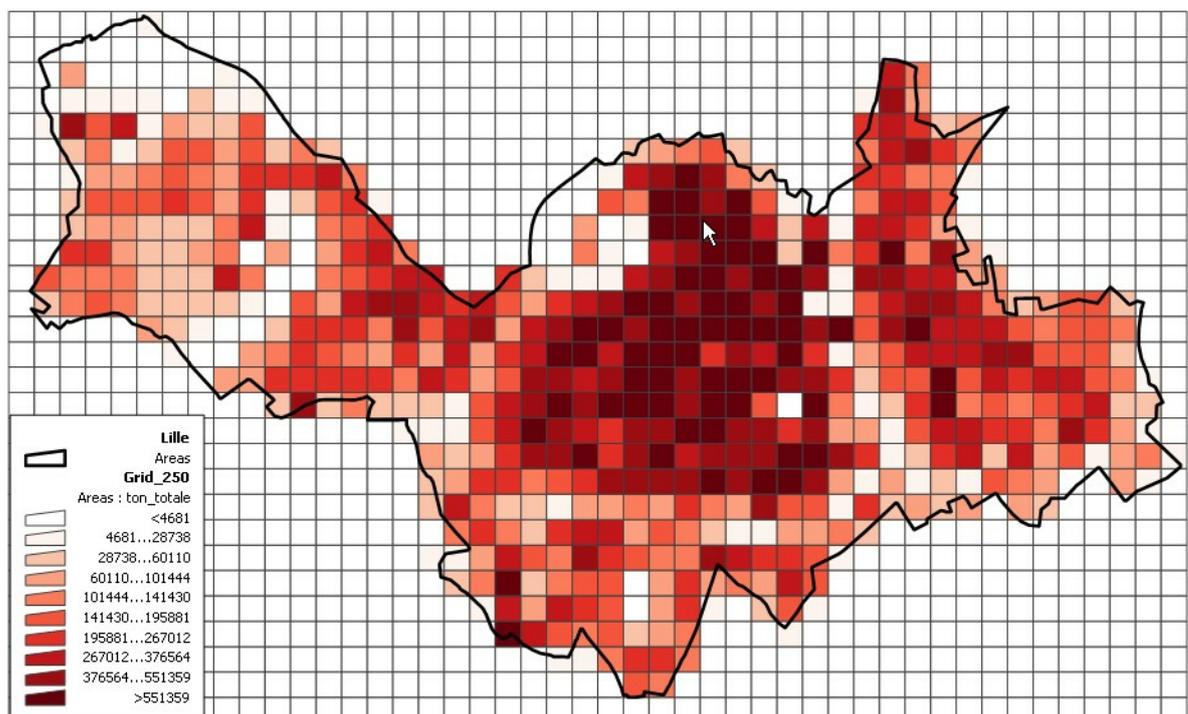


Même si ce bilan des flux de matériaux est seulement en cours d'achèvement, il montre déjà le potentiel de recyclage dans les opérations de rénovation des quartiers. Un autre intérêt de l'AFME est qu'elle peut être modélisée sous forme de carte, ce qui, dans cet exemple, permet de quantifier et de localiser les matériaux de construction stockés dans les bâtiments. C'est donc d'une grande utilité pour la ville dès lors qu'elle souhaite impulser une dynamique auprès des acteurs locaux :

Contour des bâtiments sur le territoire



Localisation des matériaux par densité stockée



I.3- Pourquoi compter ?

Les méthodes d'évaluation des consommations énergétiques et des émissions de GES sont diverses, même si l'on a pu remarquer que les séquences suivies sont assez semblables. Mais ces nuances constituent pourtant une réelle difficulté pour qui se livre à des comparaisons entre les territoires.

I.3.1- Pour construire et évaluer des politiques locales

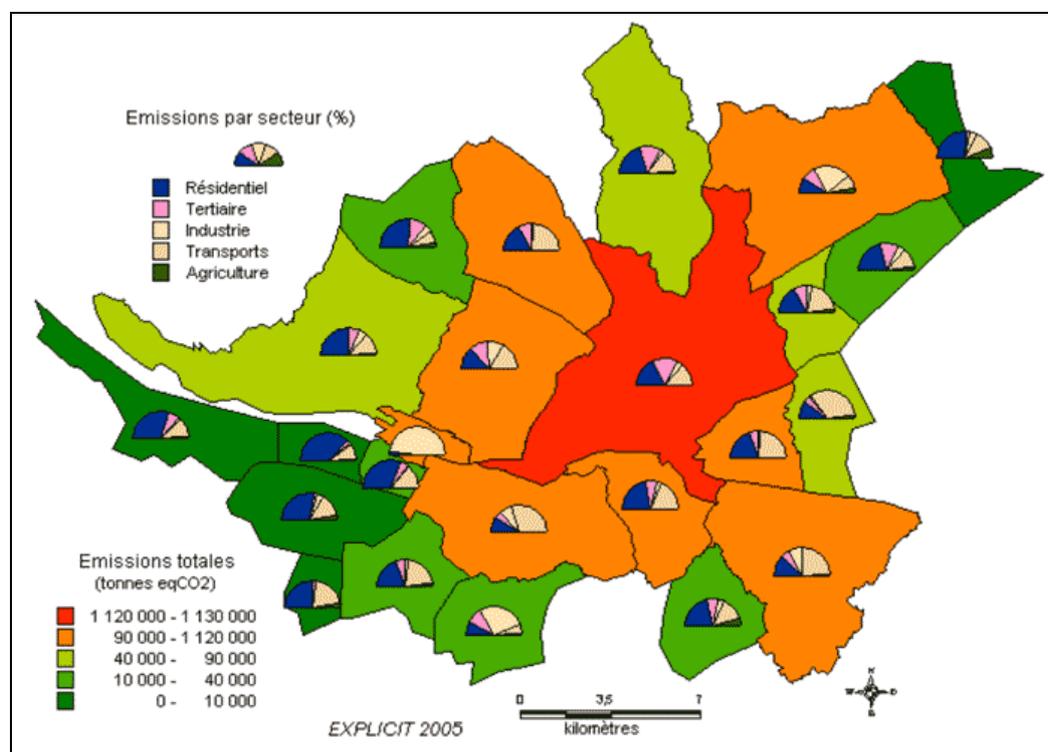
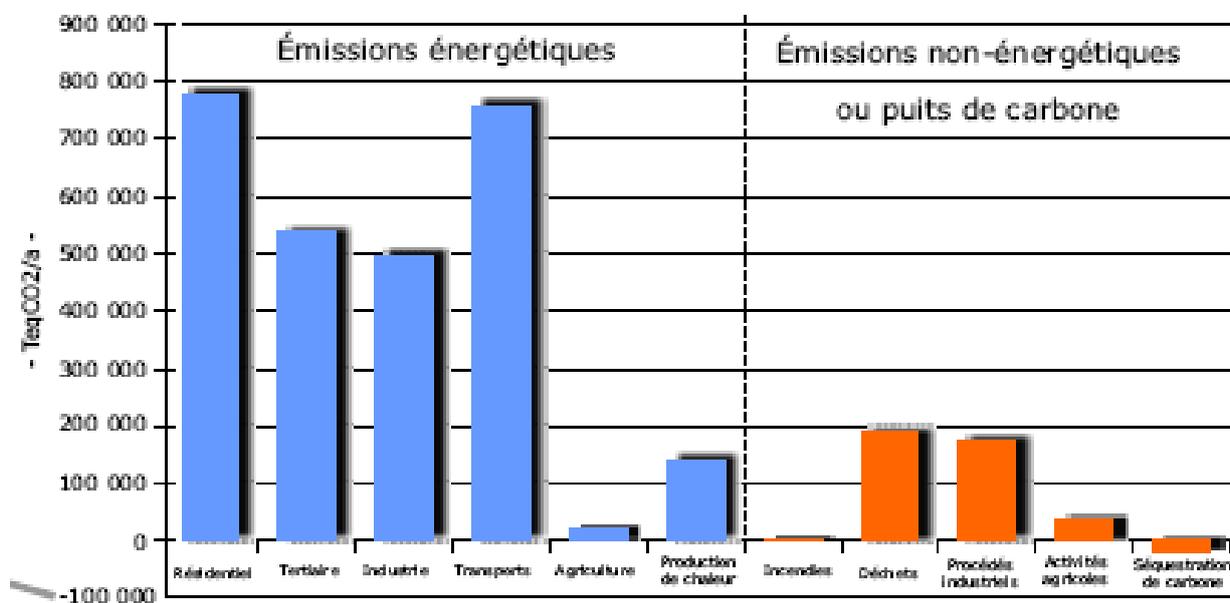
Durant la période récente, qui correspond finalement à une période d'apprentissage, certaines collectivités pionnières, sensibilisées sur les questions de changement climatique ont produit des données, d'abord en faisant appel à l'expertise de bureaux d'études, avant parfois de développer leurs propres outils et indicateurs de suivi.

Quels sont les effets sur les politiques locales de ces études ? Il est encore bien trop tôt pour conclure, mais quelques enseignements se dégagent. Les collectivités, à partir de ces diagnostics, identifient les gisements d'économie d'énergie les plus « évidents ». Les actions sur le cadre bâti (amélioration thermique des bâtiments, notamment publics) apparaissent ainsi comme les plus simples –techniquement, non financièrement ! - à mettre en œuvre.

A l'instar de la communauté urbaine de Nantes qui est l'une des pionnières en matière de Plan Climat Territorial, on constate que le recours à ces bilans a permis une meilleure compréhension du territoire et de l'origine des consommations énergétiques et des sources d'émissions de GES. Cela peut permettre de réorienter les politiques publiques en matière de transport et d'habitat. Le travail sur ces questions a démarré en 2004 sous l'impulsion du président et du vice-président de la communauté urbaine. Le bureau d'étude Explicit a été lauréat de l'appel d'offre lancé pour réaliser un diagnostic territorial. Ce diagnostic effectué en 2005 décrit les émissions par secteur (industrie, transports, habitat résidentiel, tertiaire et agriculture) et montre que plus de la moitié des émissions de CO₂ de l'agglomération nantaise (51%) provient de l'habitat résidentiel et du tertiaire, alors que 29% sont imputables aux transports. Ces chiffres confirment que le couple urbanisme-transport est au cœur des défis énergétiques et militent pour une meilleure compréhension des dynamiques urbaines. C'est à cette fin que la communauté urbaine associe à sa démarche un conseil scientifique et technique pour l'aider également à affiner ses méthodes et ses hypothèses. L'autre intérêt de ce diagnostic est sa dimension spatialisée, puisqu'il précise les émissions pour chacune des 24 communes de l'agglomération, ce qui permet d'avoir une vision plus fine que celle que l'on obtient avec des données agrégées. Ces résultats sont l'occasion de penser à un autre aménagement du territoire, notamment parce que les communes les moins bien

desservies par les transports collectifs apparaissent comme les plus importantes émettrices de GES par habitant.

Bilan des émissions de gaz à effet de serre par source en 2003 pour Nantes Métropole EXPLICIT-2006



1.3.2- Jusqu'où va la responsabilité écologique d'un territoire ?

Si cette question peut sembler à première vue éloignée de notre propos sur les formes urbaines, il n'en demeure pas moins que les villes et la manière dont elles sont agencées sont pleinement concernées, si l'on considère qu'elles sont au cœur de la problématique sur le changement climatique, comme le déclarait en 2007 Mme Tibaijuka, Secrétaire Générale adjointe des Nations Unies et Directrice exécutive de l'agence Onu-Habitat. A ce titre, la question de la responsabilité écologique préoccupe directement les acteurs politiques, compte tenu des implications liées au choix des instruments proposés par la communauté internationale.

Dès lors, faut-il imputer au producteur ou au consommateur les émissions de GES liées à la fabrication et au transport d'un bien ? Les consommateurs français doivent-ils se voir imputés une partie des émissions de GES des ouvriers de Shanghai, dans la mesure où ce sont largement les délocalisations vers la Chine qui permettent aux pays du Nord d'importer massivement des biens manufacturés à bas coût ? Signalons en effet qu'environ 20 à 30% des émissions de la Chine proviennent de productions destinées à l'exportation. A Shanghai, les usines sont responsables de 80% des émissions et de 65% à Pékin, contre seulement 7% à Londres et 10 % à New-York, rappelle David Dodman (DODMAN, 2009) dans la revue *Environment and urbanization*. Le chercheur préconise pour sa part une mesure des émissions basée non sur la production, mais sur la consommation, via l'empreinte écologique individuelle, qui attribue au consommateur l'impact écologique de ce qu'il achète. Cette analyse rejoint la demande formulée par la Chine, qui revendique que ses émissions de gaz à effet de serre liées à ses exportations soient exclues des négociations sur le climat ...

Imputer un niveau d'émissions plus important au territoire importateur peut être vu comme plus équitable parce qu'il fait payer la note de GES aux consommateurs, mais en corollaire, il sera moins incitatif pour créer des processus productifs plus propres et plus efficaces en termes d'émissions de GES dans les régions exportatrices.

1.3.3- Compter pour créer un marché territorial d'échange des droits d'émission de GES ?

Deux instruments économiques existent pour inciter à des changements des comportements des agents en matière d'émission de GES : les incitations fiscales ou la création d'un marché.

Adoptées comme premiers instruments de lutte contre les dégradations environnementales, les incitations fiscales se déclinent en deux grandes catégories : les taxes ou les subventions. La

modification des prix dans le cadres de régimes fiscaux spécifiques permet aux consommateurs et aux producteurs d'apprécier la valeur attribuée aux priorités environnementales de pouvoir diminuer (ou non) les activités nocives pour l'environnement. Il s'agit par ces mécanismes fiscaux d'internaliser tout ou partie du coût des effets externes. C'est le principe d'une taxe sur le carbone ou contribution climat et énergie (ROCARD *et alii*, 2009)

Un autre instrument économique est le recours aux mécanismes de marché. En supposant l'existence de coûts de réduction différenciés entre les agents économiques, le recours à un système d'échange de droits d'émission vise à égaliser les coûts marginaux de réduction d'émissions entre les différents acteurs. Un agent achète un permis d'émettre tant que les coûts de dépollution sont supérieurs au prix du permis sur le marché. Au-delà, il est moins coûteux de dépolluer que d'acquérir un permis. Le jeu de l'offre et de la demande sur le marché finit par établir un prix du permis qui égalise le coût marginal de dépollution pour l'ensemble des acteurs.

Peut-on faire l'hypothèse d'une entrée des collectivités locales dans un système de marché d'échanges des émissions de GES ? Différents types de marché d'échange de permis d'émission de GES existent :

- **des marchés d'échanges de permis d'émissions entre territoires.** Dans le cadre du protocole de Kyoto, les différents Etats signataires se sont engagés à limiter leurs émissions de GES ;
- **à l'intérieur d'un territoire, des marchés sectoriels d'échanges de permis d'émissions.** Un tel marché existe en Union européenne depuis 2005 pour les émissions provenant de cinq secteurs d'activités : énergie, production et transformation des matériaux ferreux, industrie minérale, fabrication de produit céramique de cuisson, production de pâtes à papier.

Quel est le principe d'un marché d'échanges de permis d'émission de GES ? Pour les parties prenantes d'un marché, si les rejets dépassent les quantités à émettre dont elles disposent, elles se voient dans l'obligation d'engager des efforts de réduction de ses émissions pour les quantités non couvertes par ses permis d'émission ou de procéder à l'achat de permis auprès d'une autre partie prenante qui n'a pas consommé la totalité des permis mis à sa disposition. Ainsi, un marché se crée sur lequel les participants peuvent céder ou acquérir une partie des quantités d'émission. Les quantités offertes et acquises sont donc à somme nulle, toute addition d'un côté entraîne une soustraction de l'autre, ce qui permet de garantir le respect d'un plafond total d'émissions à émettre. Suivant les conditions dans lesquelles ils peuvent réduire les émissions, les

agents achètent ou non des permis supplémentaires sur le marché. Le cours du permis tend ainsi à se fixer au niveau du coût marginal de réduction des émissions pour l'ensemble des émetteurs.

Aujourd'hui un marché « *territorial* » d'échanges des permis d'émission existe entre certains Etats, notamment au niveau communautaire. Peut-on imaginer la création d'un marché entre ensembles territoriaux de plus petite dimension, par exemple, à l'intérieur d'un Etat, entre régions ou entre communes ? Cette solution, qui nécessiterait une généralisation des inventaires territoriaux d'émissions de GES pour la lisibilité du marché, pose de très nombreuses questions :

- sur les secteurs concernés. Les collectivités publiques pourraient entrer dans un marché couvrant les seules émissions liées à l'exploitation de leur patrimoine (bâtiments publics, flotte de véhicules, etc.), mais cette solution serait peu incitative en matière d'aménagement du territoire et d'urbanisme. Une vision élargie de la responsabilité territoriale des collectivités pourrait consister à inclure l'ensemble des émissions (hormis, peut-être, les émissions industrielles pour lesquels un marché existe déjà à l'échelle de l'Union européenne). Les émissions imputées aux collectivités territoriales pourraient être toutes celles émises au sein de leur territoire (mais un territoire traversé par une autoroute est-il responsable de l'augmentation du trafic sur celle-ci ?) ou celles émises par les habitants (mais faut-il prendre en compte l'ensemble des émissions, par exemple celles liées aux déplacements à longue distance ou celles incorporées dans les biens de consommation ?).
- sur le périmètre adéquat. A l'évidence, les périmètres intercommunaux, éventuellement élargis à ceux des schémas de cohérence territoriale, sont les seuls à même de prendre en compte les effets de politiques d'aménagement et de transport conçues à l'échelle des bassins de vie.
- sur la fixation des quotas. Autre question épineuse, il faudrait pouvoir fixer des seuils initiaux d'émission qui tiennent compte des particularités climatiques, économiques et géographiques (taille des agglomérations, dispersion de l'habitat, reliefs etc.) ; à la manière des négociations entre Etats au moment de la fixation des seuils d'émissions à la suite du protocole de Kyoto.

Pour la mise en place d'un tel marché, les difficultés sont nombreuses et les arbitrages politiques extrêmement délicats. Par ailleurs, techniquement, l'existence d'un tel marché supposerait la possibilité d'un suivi annuel des évolutions des émissions de GES. Dans l'hypothèse où le marché

entre collectivités ne porterait que sur le segment des déplacements quotidiens, tels que ceux étudiés dans les enquêtes auprès des ménages sur les déplacements réalisés selon la méthode CERTU, il faudrait compter près de 60 millions d'euros par an pour couvrir l'intégralité du territoire français ...

Une telle entrée des collectivités territoriales dans un marché carbone est possible mais serait (excessivement ?) complexe, en raison de la nature des données à mobiliser pour créer des données fiables, bases de l'échange. Ses finalités seraient différentes selon les options retenues pour la création du marché. Une responsabilité généralisée permettrait aux collectivités d'arbitrer leurs efforts en direction des segments les plus porteurs (amélioration thermique des bâtiments, développement de filières d'énergie renouvelable locale, développement de lignes de transport collectif etc.) ; mais il n'est pas alors évident que les politiques d'aménagement du territoire, dont les résultats en matière de réduction de GES ne peuvent être qu'à très long terme, soient alors considérées comme prioritaires.

2^{ème} Partie - Ville, énergie et GES : un panorama des travaux menés par les sciences sociales et grands résultats

II.1- Un corpus large et éclaté

II.1.1- Des travaux très disparates

Les travaux en sciences sociales concernant le lien entre énergie et villes, et plus globalement, énergie et société, existent et sont nombreux, mais ils forment un corpus peu visible et fragmenté.

En effet, l'ingénieur est le premier sollicité pour résoudre les questions énergétiques ; aussi les chercheurs en sciences sociales qui traitent de ces questions proviennent-ils souvent d'organismes de recherche principalement centrés sur les questions techniques ou technologiques. En France, des sociologues, géographes, économistes ou autres, traitent de ces questions au sein du Centre scientifique et technique du Bâtiment (CSTB) ; de l'institut national de recherche sur les transports et leur sécurité (INRETS) ; au sein de l'Agence pour l'environnement et la maîtrise de l'énergie (ADEME), des centres de recherche des producteurs d'énergie (EDF, GDF, etc.). La recherche universitaire en sciences sociales est moins immédiatement mobilisée sur ce type de sujet. Aux Etats-Unis également, il semble que la question du lien entre énergie et territoire soit d'abord saisie par les sciences de l'ingénieur avant d'être abordée par les sciences sociales (ROSA, MACHLIS, KEATING, 1988).

Ce corpus de recherche est ensuite fragmenté par objets techniques (le bâtiment, les transports, les infrastructures urbaines), les spécialistes eux-mêmes se divisent souvent selon des sous-spécialités, (les modes de transport, les parties du bâtiment, etc.) mais aussi par discipline scientifique.

II.1.2- De multiples origines disciplinaires

En effet, toutes les disciplines scientifiques peuvent apporter un éclairage sur la question du lien entre ville, énergie et émissions de gaz à effet de serre. Parmi les sciences sociales qui ont une production notable sur le lien entre énergie, émissions de polluants et territoire, notons :

- la géographie et, plus généralement, le domaine des approches « territoriales ». Les travaux des spécialistes visent à territorialiser les consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre et à étudier les liens entre les évolutions du territoire et les changements de consommation et de production énergétiques ;

- le droit. Des juristes traitent de cette question à partir des évolutions du droit de l'urbanisme liées à la volonté de diminuer les consommations énergétiques (BROUANT, 2007), et, plus généralement, des relations entre les collectivités publiques et les producteurs d'énergie (MARCOU, WOLLMANN, 2007) ;
- la science politique. De nombreux travaux ont eu pour objet l'impact de la question des gaz à effet de serre sur la conduite des politiques publiques (GIDDENS, 2009). De nombreux travaux analysent les difficultés d'émergence de politiques territoriales efficaces pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre. En effet, ces politiques nécessitent (voir, par exemple PETERSON, ROZE, 2006 ; ROMERO LANKAO, 2007) :
 - une remise en cause des sectorisations traditionnelles des administrations ;
 - l'engagement d'actions de très long terme – avec des objectifs souvent fixés à 2050, voire 2100 – en décalage avec le rythme des élections, et plus encore celui des médias ;
 - la coordination des politiques entre échelles différentes de gouvernement. Les enjeux varient pourtant selon les échelles et les particularités des modes locaux de production d'énergie, les tissus économiques etc. ;
- la sociologie. De nombreux travaux portent sur les usages et réceptions des techniques et incitations à la maîtrise de la consommation énergétique, par les habitants (DARD, 1986) et par les artisans (ROUDIL, 2007). Dans ce champ, une recherche américaine (SOCOLOW, 1978) est devenue un « classique » en la matière, en montrant que dans deux pavillons, conçus selon les mêmes caractéristiques, dans le même quartier et occupés par des familles de même taille aux caractéristiques socio-économiques similaires, on pouvait observer des différences de 1 à 2 en termes de consommation énergétique. Ces résultats ont montré l'intérêt d'investigations complémentaires en matière d'études des modes de vie dans le logement, et mis en évidence les limites des approches uniquement techniques de la question énergétique. Des travaux ont ainsi porté sur les comportements spécifiques de certaines populations, notamment les pauvres (DEVALIERE, 2007), les personnes âgées etc. ;
- l'économie. Le lien entre énergie et territoire est principalement saisi par les économistes à travers les travaux de modélisation de l'espace, auxquels est ajouté un module consacré à l'énergie (cf. infra) et à travers des tentatives de territorialisation des effets des

instruments économiques au service de l'objectif de réduction des émissions de GES, taxes et marchés ;

- la philosophie, puisque la question énergétique et celle des émissions de gaz à effet de serre est l'occasion de repenser les problèmes anciens du rapport entre l'humanité, la technique et la nature (CLARK, YORK, 2005 ; PAQUOT, 2007) ;
- l'histoire. On peut notamment mentionner le développement de l'histoire de l'environnement, à travers des recherches sur les liens passés entre urbanisation, énergie et pollution (par exemple, DEREVELL, HISE, 2006 ou PLATT, 2005), mais aussi les apports de l'histoire des techniques ou du climat (LE ROY LADURIE, 2009).

Cette liste est loin d'être exhaustive, mais montre l'extrême variété des travaux. Notons que tous ne traitent pas directement et principalement du lien entre ville, territoire et énergie et que cette question y est parfois incidente.

II.1.3- D'une crise à l'autre : un intérêt fluctuant

Dès la crise pétrolière de 1973, une abondante littérature émerge sur le lien entre ville et énergie (CRU, 1976). Une simple analyse chronologique de la parution d'ouvrages, rapports ou articles sur le lien entre urbanisme et énergie montre un très net recul de cette préoccupation au cours des années 1980 et 1990. Au sein de la base de données de la Bibliothèque Nationale de France, 15 ouvrages répondent aux deux mots clés « urbanisme » et « énergie ». Parmi ceux-ci, dix ont été publiés entre 1979 et 1986, par suite, le plus souvent, de programmes de recherche lancés au lendemain du choc pétrolier de 1973. L'étude de la question de l'énergie et de l'aménagement du territoire est très étroitement liée à une programmation de la recherche très sensible aux effets de mode et à l'agenda politique.

Depuis le milieu des années 1990, le lien entre ville et énergie redevient une question vive pour la recherche pour deux raisons majeures.

La première est la montée en puissance de la question du réchauffement climatique. Alors que dans les années 1970, la question énergétique était principalement abordée sous l'angle de la pénurie prévisible des énergies fossiles ainsi que de « l'indépendance énergétique » des pays non producteurs de pétrole, depuis les années 1990, s'ajoute à ces préoccupations une inquiétude quant aux effets du réchauffement de la planète (FAUCHEUX, JOUMNI, 2005).

La seconde raison est la mise en évidence, par des travaux extrêmement popularisés de deux chercheurs australiens, Peter Newman et Jeffrey Kenworthy (NEWMAN, KENWORTHY, 1989), d'une relation entre la densité des villes et la consommation en pétrole de leurs habitants. En montrant que plus une ville est dense, moins les habitants consomment de pétrole, les auteurs semblent indiquer une solution universelle d'aménagement - la densification des villes - à la question extrêmement complexe du réchauffement climatique. Ces travaux ont immédiatement reçu un écho dans certains milieux politiques et techniques et sont encore aujourd'hui très cités. On peut rappeler notamment que la Commission européenne s'en est saisie dès 1990 dans son livre vert sur l'environnement urbain (COMMISSION EUROPEENNE 1990). Ces travaux montrent un profil relativement homogène de consommation des villes européennes et confortent une immixtion, non prévue dans les traités, de la commission dans le champ des politiques urbaines. Par ailleurs, ces travaux semblent indiquer une solution simple à travers le modèle de la ville compacte (LEVY, 1995, POUYANNE, 2004).

Ce débat se pose également avec une forte acuité dans les pays en développement, où le rythme d'urbanisation est beaucoup plus rapide et se fait le plus souvent de manière désordonnée. Si elles existent potentiellement, les marges de manœuvre des planificateurs pour influencer sur le développement urbain sont limitées par la nécessité d'agir vite pour tenter de freiner et surtout d'organiser cette croissance urbaine (BERTAUD, 2004).

II.1.4- Un reflux des approches critiques et radicales ?

A la différence de ce qui se passait dans les années 1970, les chercheurs ne se saisissent maintenant que très peu de la question énergétique pour discuter de l'organisation de la société. Au cours des années 1970, la question énergétique était associée par de nombreux chercheurs et essayistes à la défense des spécificités culturelles, à la protection des patrimoines culturels locaux, à des formes de résistance à l'intégration économique des territoires dans des ensembles plus vastes ; bref à de multiples luttes contre le développement du capitalisme.

Le propos d'Ivan Illich (ILLICH, 1976) peut être rappelé, tant il tranche avec les orientations les plus souvent véhiculées aujourd'hui. Sa thèse consiste à montrer, qu'au-delà d'un certain niveau de dépense énergétique par tête, c'est l'ensemble de la structure sociale qui se corrompt et devient inégalitaire. Pour lui, ce « *quantum* » d'énergie au-delà duquel une société se corrompt, est indépendant de l'origine de cette énergie : la production propre d'énergie « *substituerait à l'exploitation écologique, une exploitation psychologique et sociale* ».

Pour montrer la nocivité d'une dépendance élevée à l'énergie, Ivan Illich développe l'exemple des transports et de leur vitesse. La vitesse dans les transports est liée à la consommation énergétique. Des transports rapides, même écologiques, lui apparaissent préjudiciables pour plusieurs raisons :

- la vitesse ne fait pas gagner de temps. En effet, la vitesse transforme l'espace social en éloignant les « ressources » des individus. *« Passé un certain seuil de consommation d'énergie, l'industrie du transport dicte la configuration de l'espace social. La chaussée s'élargit, elle s'enfoncé comme un coin dans le cœur de la ville et sépare les anciens voisins. La route fait reculer les champs hors de portée du paysan mexicain qui voudrait s'y rendre à pied. Au Brésil, l'ambulance fait reculer le cabinet du médecin au-delà de la courte distance sur laquelle on peut porter un enfant malade. A New York, le médecin ne fait plus de visite à domicile, car la voiture a fait de l'hôpital le seul lieu où il convienne d'être malade ».*
- Le temps passé à travailler pour gagner de quoi se déplacer vite produit un rapport temps/distance peu favorable au transport motorisé. En effet, si on ajoute au temps passé à la conduite, le temps passé à travailler pour acheter une automobile, assurer son entretien et payer le carburant, un ouvrier se déplace à 12 km/h en automobile ... quand il peut dépasser les 15 Km /h en bicyclette !
- La banalisation du transport motorisé (collectif comme individuel) rend les individus totalement dépendants de l'industrie. « Dès que la vie quotidienne dépend du transport motorisé, l'industrie contrôle la circulation. Cette mainmise de l'industrie du transport sur la mobilité naturelle fonde un monopole bien plus dominateur que le monopole commercial de Ford sur le marché de l'automobile ou que celui, politique, de l'industrie automobile à l'encontre des moyens de transport collectifs. Un véhicule surpuissant fait plus: il engendre lui-même la distance qui aliène. A cause de son caractère caché, de son retranchement, de son pouvoir de structurer la société, je juge ce monopole radical ».
- La liberté du mouvement ne devient que la liberté d'être transporté. Les individus perdent la maîtrise de leurs conditions de vie et de déplacement, en se soumettant, pour l'ensemble des déplacements, à l'industrie.

On peut formuler de nombreuses critiques de ces thèses. Ne peut-on imaginer une gestion démocratique des grands réseaux techniques qui rendent les individus, non pas soumis à l'industrie, mais partie prenante de son évolution ? Le temps passé à travailler pour « acheter » de la vitesse n'est-il que du temps perdu, dans la mesure où le travail peut apporter d'autres satisfactions que sa seule rémunération monétaire ? Ne faudrait-il pas différencier de bons et de

mauvais usages de la vitesse ? Bref, les critiques peuvent être nombreuses, mais là n'est pas l'objet de notre propos. Ce rappel des écrits d'Ivan Illich permet surtout de montrer, en creux, l'absence actuelle de projet de transformation sociale radicale dans les écrits sur l'énergie et l'environnement.

II.2- Quelques résultats de recherche

La distribution des choses et des hommes dans l'espace a une incidence sur les consommations énergétiques et les émissions de GES. Ce résultat, partagé par toutes les recherches, montre, l'intérêt des recherches géographiques en ce domaine d'une part, l'influence potentielle de l'aménagement du territoire d'autre part. Mais la principale difficulté consiste à comprendre la part respective du territoire et des autres déterminants (techniques, économiques, sociaux, culturels etc.) dans les consommations énergétiques et les émissions de GES.

Les recherches sur le rapport entre organisation territoriale, énergie et émissions de gaz à effet de serre portent principalement sur trois champs :

- le lien entre la densité (à l'échelle des métropoles ou des régions) et l'énergie consommée pour les déplacements quotidiens de personnes. Nous présentons ainsi trois recherches importantes aux résultats relativement concordants ;
- le lien entre la taille et la densité des métropoles d'une part, et la consommation énergétique dans le domaine des transports et des bâtiments d'autre part. Nous présentons ainsi les résultats d'une recherche, qui, comme les précédentes, compare l'efficacité énergétique de différentes métropoles, mais en prenant également en compte les données relatives au bâtiment ;
- l'efficacité relative des différents quartiers ou secteurs d'une agglomération en matière énergétique – pour les déplacements, et parfois le bâtiment - en fonction de leurs caractéristiques.

II.2.1- Le lien entre densité métropolitaine ou régionale, déplacements quotidiens de personnes et consommation énergétique

2.1.1- Les travaux de Newman et Kenworthy

Très vite popularisés, les travaux de Newman et Kenworthy ont eu un grand retentissement : on en a retenu un lien simple entre la densité des agglomérations et la consommation énergétique des habitants (NEWMAN, KENWORTHY, 1999). Les recherches de Newman et Kenworthy ont été réalisées à partir d'une commande de la Banque Mondiale et montrent qu'il existe une liaison entre la densité et la consommation de carburants pour la mobilité des personnes (ce qui ne représente, rappelons-le, qu'une part minoritaire des consommations énergétiques totales d'une

ville, puisque cela n'inclut pas les transports de marchandise, les déplacements inter-urbains de personnes, ni, bien sûr, les émissions liées au secteur du bâtiment ou de l'industrie).

Les deux chercheurs ont comparé les situations de 37 métropoles d'Amérique du Nord, d'Australie, d'Europe et d'Asie. Une des grandes difficultés d'une telle entreprise réside dans la nécessité de collecter des données directement comparables. Pour étudier le lien entre forme urbaine et énergie, ils ont effectué un bilan énergétique de la mobilité métropolitaine à partir :

- du nombre de kilomètres réalisés en automobile ;
- du taux moyen d'occupation des automobiles (tout au long de la semaine) ;
- d'une estimation de la consommation énergétique du parc automobile ;
- du nombre de voyageurs pour chaque mode de transport collectif ;
- des distances moyennes parcourues par voyage en transport collectif ;
- d'une estimation de la consommation énergétique des différents modes de transport collectif.

Si les données concernant les transports collectifs urbains sont les plus simples à réunir, on ne peut, souvent, établir que des estimations à propos de la circulation automobile. Les auteurs ne précisent pas s'ils prennent en compte le trafic de transit dans leur calcul.

En ce qui concerne les émissions de CO₂, le calcul est simple pour les transports utilisant du pétrole (les auteurs utilisent des conventions d'émission de carbone par litre de carburant), pour l'électricité, une approximation est effectuée à partir des modes de production de celle localement consommée (charbon, hydraulique, nucléaire, etc.).

Pour calculer des densités, l'exercice est difficile puisqu'il faut définir des périmètres métropolitains comparables. Les auteurs prennent en compte les périmètres fonctionnels et non la contiguïté du bâti. Cela conduit à sortir des limites administratives et à définir une « métropole fonctionnelle ». Aux Etats-Unis, les services statistiques ont défini une « aire métropolitaine » à partir des données du recensement (*Standard Metropolitan Statistical Area*). Toutefois, il y a des exceptions, notamment pour le cas de Los Angeles, où les données utilisées correspondent principalement aux limites du Los Angeles County. Pour Singapour et Hong-Kong, les auteurs ont pris simplement les frontières nationales qui leur semblent correspondre aux limites de la région fonctionnelle. Londres est défini par les limites du *Greater London*. Pour Paris, ce sont les

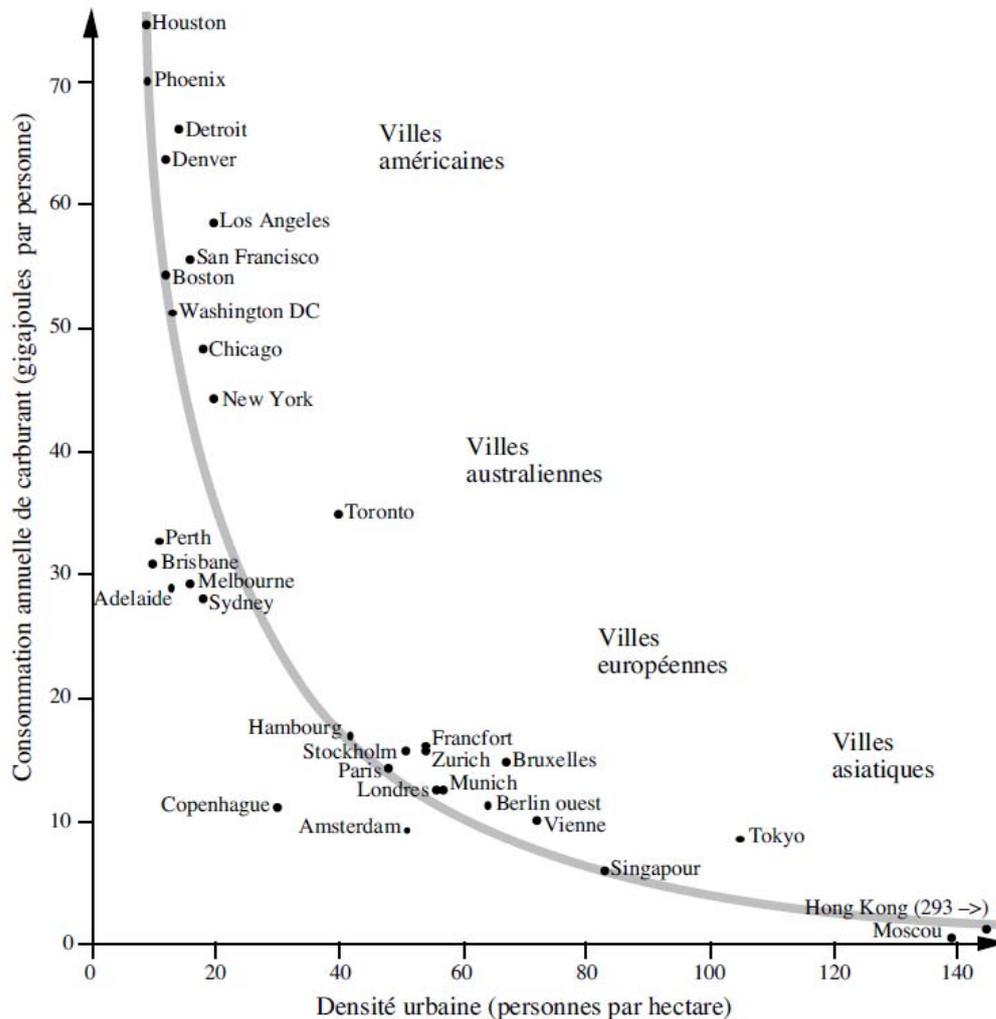
limites de la région Ile-de-France qui sont retenues, notamment parce que cela permet un traitement aisé des sources statistiques. Bref, on perçoit à travers ces quelques exemples que les données sont à prendre avec précaution⁵.

Les résultats de cette enquête montrent une relation entre la densité et l'énergie dépensée pour les transports de personne. Trois groupes de villes se distinguent : les villes nord-américaines et australiennes sont caractérisées par de faibles densités urbaines et une consommation d'énergie très importante (elle est un peu moins forte cependant dans les villes canadiennes). Un deuxième groupe de villes, dont la densité et la consommation d'énergie pour les transports privés sont moyennes, est principalement constitué par les villes européennes. Enfin, les villes les plus denses et les moins « énergivores » se révèlent être les villes asiatiques.

Les résultats des travaux de Newman et de Kenworthy ont été beaucoup discutés, notamment en raison de l'agrégation des données utilisées et de leur fiabilité incertaine. Nous y reviendrons, mais le débat a principalement porté sur les préconisations pratiques que les auteurs ont formulées en s'appuyant sur les résultats empiriques qu'ils avaient obtenus.

⁵ De nombreux chiffres apparaissent ainsi très étonnants : un tableau de la page 100 montre que la densité humaine nette (population et emploi) a décru de manière importante entre 1960 et 1990 à Paris passant de 101 à 68. Ces chiffres rapportés à l'Ile-de-France paraissent très élevés (la réalité est plus proche de 15) et en tout état de cause, à l'échelle de l'Ile-de-France, la tendance est inverse puisque la région a gagné habitants et emplois pendant ces trente années ...

Consommation de carburant et densité urbaine



Source : NEWMAN, KENWORTHY, p. 46

2.1.2- Les travaux de Michael Breheny

Une recherche britannique réalisée en 1993 pour le compte du ministère de l'Environnement donne quelques résultats intéressants sur la relation entre densité et consommation énergétique (BREHENY, 1995). Il y a un lien très net entre la densité de population et le nombre de kilomètres parcourus par personne et par semaine.

Le nombre de kilomètres parcourus, tout mode de déplacement confondu, par personne et par semaine est en moyenne de 160, mais varie entre 206 pour les zones de moins de 1 habitant par hectare à environ 129 pour les quartiers qui ont une densité supérieure à 50 habitants par hectare, en passant par 153 pour les quartiers comprenant entre 15 et 30 habitants par hectare. Le nombre

de kilomètres parcourus en automobile par semaine et par individu varie du simple (80 kilomètres) au double (près de 160 kilomètres) selon que l'on passe des zones les plus denses (plus de 50 habitants par hectare) au moins denses (moins de 1 habitant par hectare). Sans surprise, la part modale des transports collectifs et de la marche à pied augmente avec la densité.

La même recherche montre que les distances parcourues, par personne et par semaine, sont très différentes selon la taille des agglomérations. Un habitant de l'*Inner London* parcourt en 1993, une moyenne de 141 kilomètres (dont 76 en automobile), un habitant d'une aire métropolitaine de plus de 250 000 habitants hors Londres, 113 (dont 70 en automobile), celui d'une agglomération comprise entre 100 et 250 000 habitants, 160 kilomètres (dont 115 en automobile) ; enfin plus de 211 kilomètres pour un habitant du monde rural (dont 164 en automobile).

Il n'y a pas de lien simple et linéaire entre la taille de la ville et le nombre de kilomètres parcourus : les habitants de l'*Inner London* ne sont pas ceux qui parcourent le moins de kilomètres par semaine : en moyenne 140 contre 120 pour ceux des « *Metropolitan Areas* ». Les habitants de l'*Outer London*, se singularisent par un nombre de kilomètres élevés (166 km) et une part importante de l'automobile (114 km)

A partir de ces données, des calculs ont été effectués par Breheny pour estimer la consommation d'énergie pour les déplacements par type de territoire. L'énergie consommée par individu, varie de près de 1 à 2 entre l'*Inner London* et le monde rural.

2.1.3- Les travaux de Peter Naess

Peter Naess (NAESS, 1995) a utilisé différents matériaux pour calculer le lien entre énergie et forme urbaine :

- une base de données approfondie sur 22 villes nordiques,
- une étude extensive mais moins détaillée des 97 plus grandes villes de Norvège ;
- une analyse des déplacements domicile-travail autour de 15 villes suédoises ;
- une enquête auprès de 321 ménages dans 30 quartiers de la région d'Oslo ;
- une enquête auprès d'employés de six quartiers de la région d'Oslo.

Peter Naess a étudié la situation selon des angles très nombreux pour identifier les effets des variables qui décrivent les formes urbaines et les conséquences des autres facteurs, notamment

des facteurs socio-économiques. Il souhaite répondre aux économistes qui estiment que les effets des densités disparaissent dès lors que les traitements statistiques prennent en compte les facteurs tels que les revenus, les taux de motorisation, l'efficacité du véhicule, la structure du ménage etc.

Son calcul des densités urbaines se fait par division du nombre d'habitations par la surface urbanisée des villes considérées. Cette surface est estimée à partir de cartes.

Ses conclusions sont que les variables décrivant les formes urbaines exercent une forte influence sur la consommation d'énergie dans les transports et que les principaux facteurs qui expliquent une faible consommation d'énergie sont :

- une forte densité de population à l'échelle de la ville ;
- une forte densité dans les quartiers de la ville ;
- une densité plus forte dans le centre que dans la périphérie ;
- une localisation déconcentrée des villes à l'échelle régionale ;
- une taille importante des villes.

Dans l'échantillon des 22 villes nordiques, lorsque les autres variables influençant la consommation d'énergie sont gardées constantes, il apparaît que les habitants de la ville la moins dense (15 habitants/ hectare urbain : Halden) utilisent 25 % d'énergie de plus que les habitants de la ville la plus dense (33 habitants / hectare urbain : Copenhague) pour leurs déplacements. Pour l'ensemble des villes étudiées, le coefficient de corrélation entre la consommation d'énergie en transport par individu et la densité urbaine est de $-0,73$.

II.2.2- Lien entre taille, densité des métropoles, consommation énergétique pour les déplacements de personnes et l'habitat

Les recherches précédemment présentées étaient principalement centrées autour de la question des déplacements. Un projet financé par la Brookings Institution, permet d'avoir une estimation des émissions de carbone dans les 100 plus grandes métropoles des Etats-Unis qui prenne en compte tant l'habitat que les déplacements (BROWN, SOUTHWORTH, SARZYNSKI, 2009)

Pour estimer les émissions, les auteurs ont examiné les données concernant le transport routier de personnes et de fret ainsi que les consommations d'énergie liées au secteur résidentiel. Toutes les émissions ne sont donc pas prises en compte dans cette recherche, puisque, notamment, ne figurent pas le secteur des bâtiments non résidentiels (industriels et tertiaires), ni les émissions liées à l'industrie, aux avions, trains et trafics de transit. L'ensemble de ces postes d'émissions non pris en compte dans la recherche représente près de la moitié de l'ensemble des émissions des Etats-Unis.

Pour le calcul des émissions liées au transport, les données sont construites à partir des estimations de trafic, un ratio moyen d'émissions par kilomètre leur est ensuite appliqué. Pour les émissions liées au secteur résidentiel, les émissions de carbone sont calculées en prenant en compte la part des différents combustibles utilisés ainsi que la source primaire de l'électricité consommée.

- Les grandes villes se révèlent moins émettrices de GES par habitant

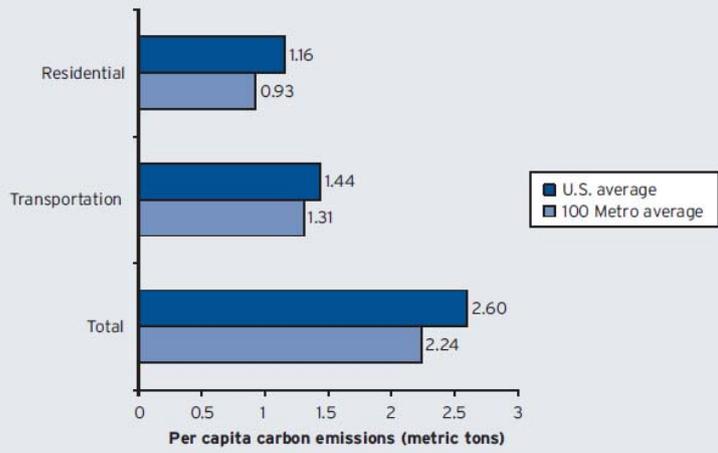
Bien que rassemblant les deux tiers de la population et les trois quarts de l'activité économique, les 100 plus grandes métropoles américaines ne produisent que 56 % des émissions de carbone des Etats-Unis sur les postes « circulation automobile » et « secteur résidentiel ». Parmi ces métropoles, les plus grandes ont d'ailleurs le meilleur rendement énergétique, rapporté au nombre d'habitants ou au PIB par habitant. Les émissions moyennes d'un américain sur les postes étudiées sont de 2,6 tonnes, contre 2,24 en moyenne pour l'habitant d'une des cent plus grandes villes. La différence est principalement liée à une utilisation moindre de l'automobile et de l'électricité domestique dans les grandes villes. On observe cependant une utilisation égale du fret et du fioul résidentiel.

- Les variations d'émission d'une métropole à une autre sont très importantes

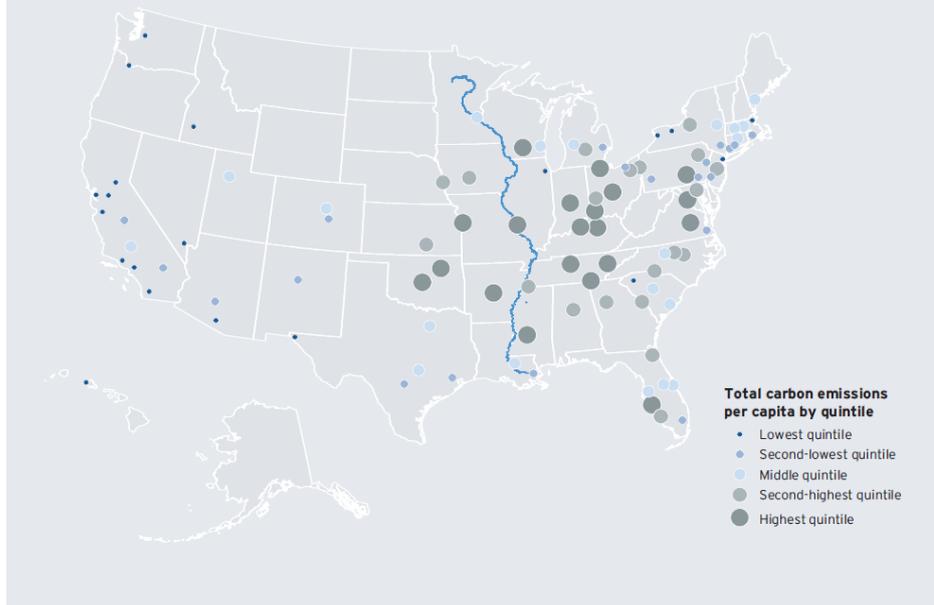
Les émissions de carbone par habitant sont très élevées à Lexington dans le Kentucky (3,5 tonnes), et très faible à Honolulu (1,4 tonnes). Le Mississippi divise le pays entre hauts émetteurs, à l'est, et bas émetteurs, à l'ouest (à l'exception d'Oklahoma City). Parmi les éléments qui expliquent les différences entre métropoles :

- Les villes très denses émettent moins de carbone. Les agglomérations les plus denses (New York, Los Angeles, San Francisco) ont une faible émission de carbone pour les transports et le secteur résidentiel. A contrario, les villes très peu denses de Nashville et d'Oklahoma sont parmi les 10 plus gros émetteurs ;
- Les villes qui ont eu la croissance la plus récente sont les plus émettrices, notamment parce que celle-ci s'est réalisée de manière très lâche et peu dense ;
- Les villes qui ont un bon réseau de transport ferroviaire connaissent des émissions par tête plus faibles ;
- des différences très importantes dans le profil d'émission des métropoles sont liées à l'origine de l'électricité. Seattle a une émission faible de carbone grâce à l'hydroélectricité. Au contraire, dans la Vallée de l'Ohio et dans les Appalaches, une utilisation très forte du charbon augmente les émissions de gaz à effet de serre ;
- un effet sur le climat très lié au ... climat ! Les villes situées le long de l'Océan Pacifique ont les consommations les plus faibles en raison d'un climat très clément, tandis que les besoins en chauffage ou en climatisation sont plus forts auprès du Golfe du Mexique ou dans le nord-est des Etats-Unis.

Residents in the largest metro areas emitted less carbon than the average American in 2005



All of the metro areas with the largest per capita carbon footprints in 2005 were located in the East-Central and Eastern United States, while most of the metro areas with the smallest footprints were located in the West



Source : BROWN *et alii*, 2009

Ces différents résultats montrent les déterminants principaux du profil énergétique des grandes villes. Il est très difficile de lire, dans ces chiffres, les effets de politiques locales différenciées en faveur de la maîtrise des consommations énergétiques et de la réduction des émissions de gaz à effet de serre parce que ces politiques restent encore très récentes.

II.2.3- Consommation énergétique des individus pour les déplacements quotidiens selon leur localisation au sein des métropoles

Différents chercheurs se sont penchés sur le lien entre les formes urbaines et les émissions de GES, mais en comparant les différents quartiers ou secteurs au sein d'une métropole.

2.3.1- Les « budgets énergie environnement déplacements » étudiés par l'INRETS

De nombreuses recherches ont été menées par l'INRETS pour mesurer les consommations énergétiques des ménages selon leur localisation au sein des aires urbaines. Ces travaux ont été menés à partir d'une exploitation *ad hoc* des résultats des enquêtes sur les déplacements des ménages. Cette approche a été initiée par Jean-Pierre Orfeuil et Alain Bieber au début des années 1980. Ils ont cherché à estimer les budgets-énergie transport (BET) définis comme la somme des consommations énergétiques engendrées en une journée par les déplacements d'une personne ou d'un ménage. A chaque déplacement, décrit par sa vitesse, son mode et sa distance, on peut associer un impact environnemental. Laurent Hivert a complété l'approche énergétique en prenant en compte différents polluants : monoxyde de carbone, hydrocarbures, oxydes d'azote et particules. Il définit alors un budget énergie environnement des déplacements (BEED). Des recherches ont été réalisées en Ile-de-France (GALLEZ et *alii*, 1995), à Lille (GALLEZ et *alii*, 1996), Grenoble (HIVERT et *alii*, 1997), ou encore à Bordeaux, (HIVERT et *alii*, 1998).

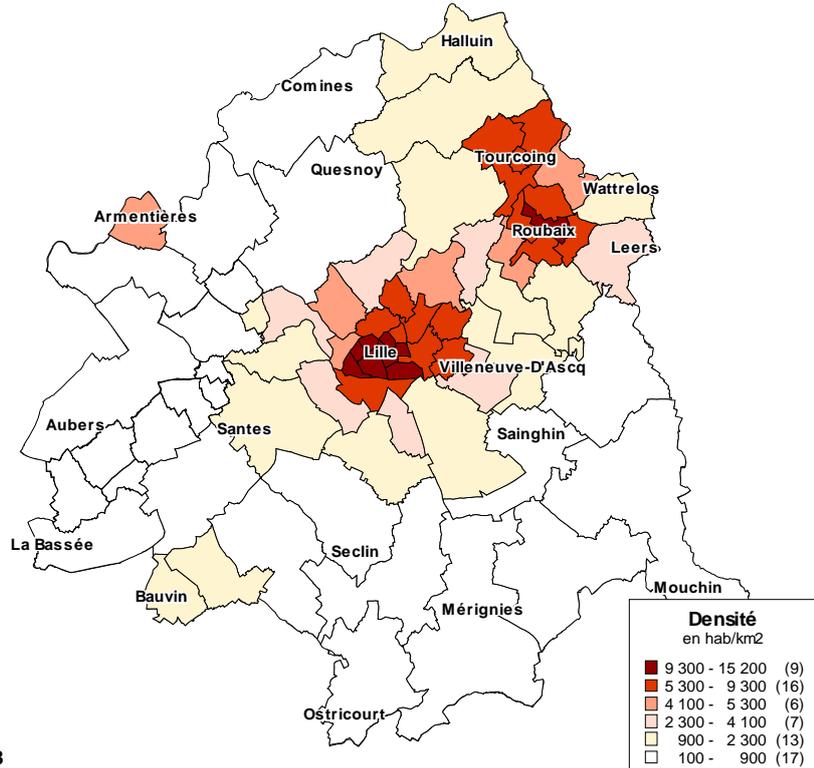
La consommation d'énergie est calculée à partir des informations sur la mobilité des ménages pendant les jours de semaine, issues des enquêtes sur les déplacements réalisés selon la méthode du CERTU (Centre d'études sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les Constructions Publiques). Elle correspond au produit de la distance parcourue par les valeurs respectives de la consommation et des émissions unitaires. Ces valeurs unitaires sont elles-mêmes définies par des mesures expérimentales réalisées par les laboratoires de l'INRETS. Pour les déplacements automobiles, sont pris en compte les caractéristiques des véhicules (types de carburant, puissance fiscale, âge), la vitesse et les départs à froid.

Les messages issus des travaux sur les budgets énergie transport sont assez simples : selon que l'on vit dans une zone bien desservie et bien équipées, ou que l'on vit dans une zone peu dense et dépendante de l'automobile pour la plupart des activités, **la consommation d'énergie pour la mobilité varie dans un rapport de 1 à 3 pour des personnes comparables en termes de niveau de vie et d'âge**. La part la plus importante des écarts constatés s'explique par des différences dans la distance que les personnes ont à parcourir pour réaliser leurs activités quotidiennes. Une part minoritaire mais significative tient aux différences d'usage des modes de transport, puisque les habitants des cœurs urbains font une part plus importante de leurs déplacements à pied ou en transport en commun.

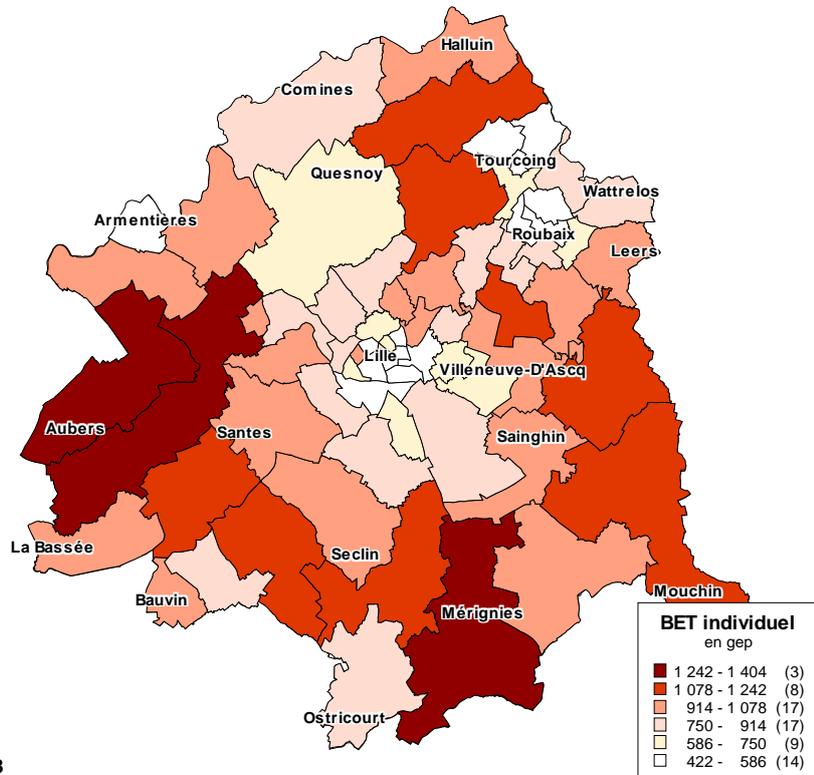
Dans le cas de l'agglomération lilloise, on remarque, en 1998, qu'à Lille, Roubaix et Tourcoing, les personnes de plus de 6 ans effectuent en moyenne 12 km/jour dont 50% en automobile particulière. On passe de 16,5 km/jour dont 60% en automobile, dans la banlieue de Lille à 18,5 km/jour dont 65% en automobile dans la banlieue de Roubaix et de Tourcoing, enfin dans les secteurs périurbains on arrive à 22,7 km/jour dont 59% en automobile. Si la distance au centre de l'agglomération explique la part plus importante de l'automobile, notons que la consommation énergétique est parfois élevée dans les banlieues proches et huppées de Lille, en raison d'un parc de véhicules plus consommateurs.

De manière très intéressante, la comparaison entre les enquêtes sur les déplacements de 1987 et de 1998 permet d'observer l'évolution des mobilités. La longueur des navettes entre le domicile et le travail augmente pour les habitants de toutes les zones de l'agglomération, mais plus vite pour les habitants des zones périurbaines (+48% contre +30% en moyenne). Les écarts s'accroissent : entre les habitants du périurbain et ceux de la banlieue, le rapport des distances domicile-travail est passé de 1,5 en 1987 à 1,8 en 1998.

Densité résidentielle des secteurs de résidence (découpage en 68 secteurs)



BET individuel selon le secteur de résidence (découpage en 68 secteurs)



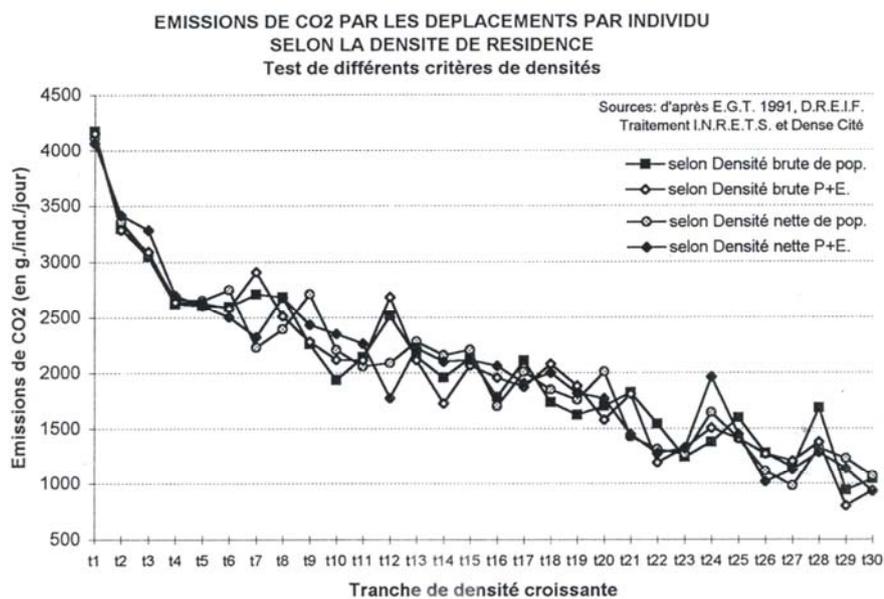
Source : HIVERT, 1999

Pour évaluer plus précisément le rôle d'un urbanisme planifié et celui du développement de l'offre en transports collectifs, les chercheurs ont comparé, dans le cas de l'Ile-de-France les consommations des villes nouvelles avec celles des autres franges de l'agglomération, à la même distance de Paris, entre vingt et trente kilomètres, mais au développement moins planifié. Il apparaît clairement que les villes nouvelles, dynamiques en emploi, directement desservies par le RER et bénéficiant d'un réseau local de transports de qualité, se distinguent des communes des franges de l'agglomération, malgré une densité résidentielle à peu près comparable. La consommation énergétique y est en moyenne sensiblement inférieure, ce gain d'efficacité est principalement dû à un partage modal plus favorable au transport collectif. Ainsi, une femme active consomme quotidiennement en moyenne 1264 gep quand elle réside dans une ville nouvelle, contre 1585 gep quand elle habite une commune des franges de l'agglomération. Dans le premier cas, elle parcourt 31 kilomètres dont 16,3 en transport collectif et 10,6 en automobile, dans le second cas, elle parcourt 32 kilomètres dont 14,5 en transport collectif et 14,2 en automobile. Cette différence est beaucoup moins marquée pour les hommes. A densité comparable, les choix d'aménagement expliquent néanmoins les différences importantes de consommation énergétique pour les déplacements.

2.3.2- Les travaux de Vincent Fouchier

Selon la localisation des ménages au sein des grandes agglomérations, les attitudes face à la mobilité sont ainsi très contrastées. Vincent Fouchier (FOUCHIER, 1997) a montré que les distances parcourues par individu et par jour sont d'autant plus faibles que la densité humaine nette (c'est-à-dire population + emploi / hectare urbain) de la commune de résidence est forte. Les résidents des communes de forte densité humaine nette parcourent des distances 2,6 fois plus courtes que leurs homologues des communes aux densités les plus faibles: 11,7 km/ jour contre 30,3 selon les résultats de l'enquête globale de transport de 1991. Il montre également que le temps moyen de déplacements varie très peu en fonction de la densité : *« une telle constatation est essentielle. Elle montre le fait que parcourir des distances plus longues, lorsqu'on habite en faible densité, n'est pas pénalisant pour l'individu quant au temps qu'il passe dans les transports (p.133) »*. La principale raison est une vitesse moyenne de déplacement plus réduite pour les résidents des zone de forte densité, due à la fois à une congestion des réseaux et à une répartition modale différente des déplacements.

Avec Caroline Gallez, Vincent Fouchier a évalué les conséquences environnementales de la mobilité en fonction des densités (FOUCHIER, 1997, pp. 177-184). L'impact environnemental de chaque déplacement des franciliens a été évalué en faisant le produit de la consommation ou pollution unitaire, en fonction du mode et de la longueur du déplacement. Lorsqu'on applique un coefficient de sinuosité aux déplacements à vol d'oiseau (ce qui permet de mieux mesurer les distances effectivement parcourues), les distances quotidiennes par individu varient d'un facteur de 2,3 entre la tranche de densité humaine nette la plus faible et la tranche de densité la plus forte. Mais puisque les parts modales et les vitesses de déplacement sont de surcroît différentes selon la densité, on mesure que les consommations énergétiques varient dans des proportions beaucoup plus importantes. L'écart est ainsi de 3,2 pour les consommations énergétiques et de 5,2 pour les émissions de CO₂. La figure reproduite ci-dessous montre que les émissions de CO₂ décroissent très rapidement entre la première et la cinquième tranche de densité ; les densités nettes de population et d'emploi inférieures à trente en Ile-de-France semblent donc créer des situations particulièrement pénalisantes en matière environnementale.



Source : FOUCHIER, 1997, p. 178

De nombreuses recherches, dans des pays différents, montrent le même type de résultat en défaveur des périphéries urbaines dans des villes aussi différentes que Bandung (PERMANA et *alii*, 2008) ou Oslo (HOLDEN, NORLAND, 2005).

II.2.4- Consommation énergétique des individus pour les déplacements quotidiens et l'habitat selon leur localisation au sein des métropoles

Les travaux sur l'efficacité énergétique des bâtiments ne prennent souvent en compte, en matière territoriale, que la seule variable climatique. Néanmoins quelques recherches ont cherché à évaluer la consommation énergétique des ménages en prenant en compte à la fois le logement et la mobilité locale.

Charles Raux, Jean-Pierre Traisnel et leurs équipes (RAUX, TRAISNEL, 2007) ont étudié l'effet de la localisation de l'habitat en prenant en compte à la fois le logement et la mobilité locale (c'est-à-dire la somme des déplacements effectués à moins de 80 kilomètres à vol d'oiseau du domicile). Trois catégories de zone ont été définies :

- les communes centres d'agglomérations ou les zones très denses à moins de 10 kilomètres du centre dont la densité est supérieure à 2000 habitants au km² ;
- des communes périphériques moyennement denses (B)
- des communes périurbaines ou rurales peu denses (C)

Les émissions de CO₂ par actif, par tonne et par an sont très différenciées selon les territoires : environ 2,5 en zone A, un peu plus de 3 en zone B, près de 4 en zone C. Les émissions de CO₂ apparaissent extrêmement contrastées en fonction de la localisation du logement.

Trois paramètres sont croissants du centre à la périphérie :

- la surface habitable (volume chauffé) ;
- les distances totales parcourues (pour la mobilité locale) ;
- la part de l'automobile dans les déplacements.

Tandis qu'une politique volontariste dans le logement permettrait de diminuer d'un facteur 2, voire 3, les émissions de gaz à effet de serre correspondantes, une croissance non maîtrisée des émissions dues au transport dans les zones périurbaines et rurales pourrait annihiler ce gain ...

Une autre recherche réalisée par le CEREN (centre d'études et de recherche économique sur l'énergie) et l'INRETS vise à croiser les approches par l'habitat et celles par la mobilité (PLATEAU, 2008). Cette recherche vise précisément à évaluer la quantité de CO₂ émise par les ménages franciliens dans leur logement et pour leurs transports quotidiens et leurs transports de courte

distance (moins de 100 kilomètres) en fonction de la localisation résidentielle. Les émissions de CO₂ causées par les déplacements quotidiens en Ile-de-France sont calculées selon la méthode des diagnostics énergie et environnement des déplacements de l'INRETS, présentée ci-dessus. Les émissions de CO₂ dues au logement sont calculées par le CEREN à partir des descriptions fines du parc données par le recensement de 1990 (type de logement, date de construction, surface et type de chauffage) et de sa connaissance des consommations unitaires des logements selon ces leurs caractéristiques. Les consommations d'énergie liées à l'eau chaude sanitaire, la cuisson et les appareils électroménagers sont évaluées en fonction des caractéristiques des logements.

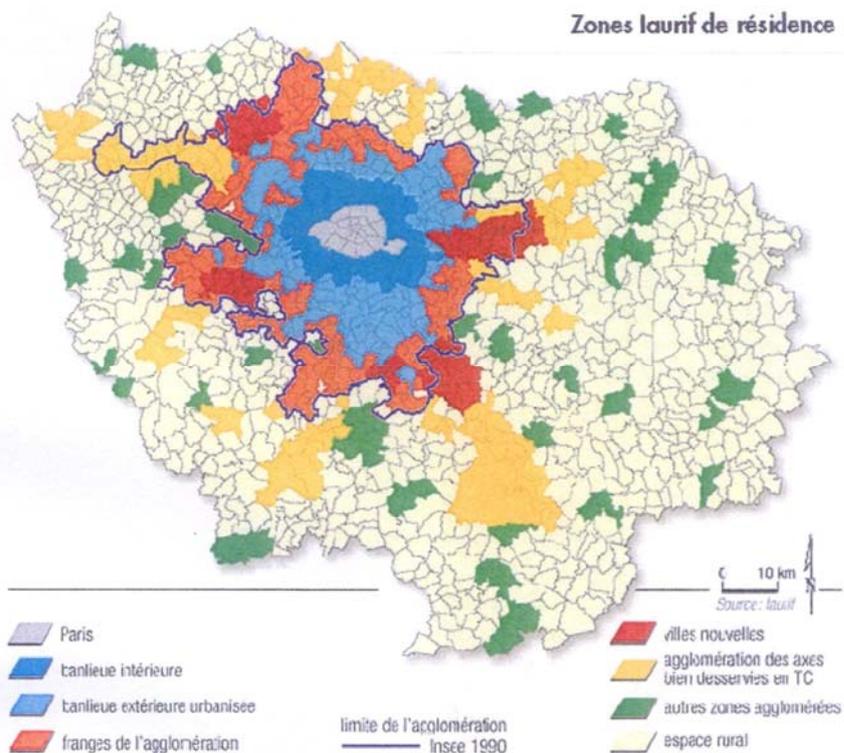
Les résultats sont présentés par ménage ou par personne et sont calculés pour les huit zones du découpage morphologique réalisé par l'institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France : Paris, ses banlieues (intérieure et extérieure) et cinq zones périphériques (les franges de l'agglomération urbaine, les agglomérations secondaires des axes et vallées, les villes nouvelles, les agglomérations secondaires isolées et les communes rurales). Chacune de ces zones correspond à des densités, des types d'habitat et des réseaux de transport différents.

Les résultats de cette étude montrent que les disparités spatiales d'émission sont plus fortes pour les transports que pour le logement. Un Francilien émet 1,9 tonne de gaz carbonique par an, les deux tiers pour les besoins de son logement, le reste pour les transports.

Pour les transports, les émissions de CO₂ par individu croissent continûment, dans un rapport de un à trois, depuis Paris jusqu'aux zones les plus excentrées. Les émissions de CO₂ pour le logement par individu sont moins dispersées et n'augmentent pas continûment du centre vers la périphérie. Elles sont plus élevées en moyenne dans la banlieue extérieure qu'à Paris car les logements y sont plus grands et plus souvent chauffés au fioul. Rapportés à la personne les émissions sont peu différenciées d'une zone à l'autre car la surface du logement par habitant varie peu quelle qu'en soit la localisation.

Les émissions liées au transport et au logement sont les plus fortes dans la banlieue extérieure. Le parc de logements est plutôt ancien, comprend davantage de maisons individuelles et les énergies fossiles sont souvent utilisées pour le chauffage. Le bilan global se maintient à ce niveau dans les espaces périurbains, qui sont certes plus loin du centre que la banlieue, mais qui bénéficient d'un parc de logements moins anciens et plus souvent chauffés à l'électricité, si bien que le supplément d'émission par les transports est compensé par de moindres émissions dans les logements. L'exception des villes nouvelles est notable puisque les émissions de CO₂ par habitant d'une ville

nouvelle ne sont supérieures que de 6 % à celle d'un parisien. Les émissions par individu, en ce qui concerne le transport, sont supérieures de 80 % à celles d'un parisien (grâce à la présence efficace du RER et des réseaux locaux d'autobus) et les émissions de chauffage par habitant inférieures de 17 % à celles de Paris grâce à un parc récent et souvent chauffé à l'électricité. Ces émissions sont plus élevées dans les franges d'agglomération, à la même distance de Paris mais avec un parc de logement moins performant et une desserte en transport collectif de moindre qualité.

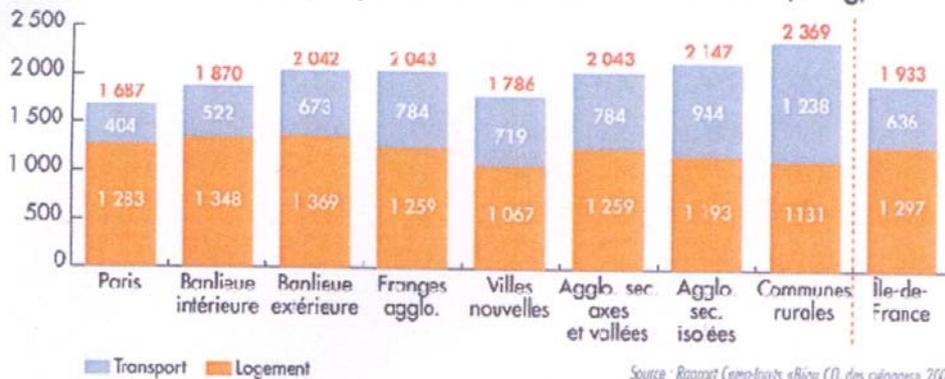


Caractéristiques démographiques et géographiques des zones laurif en 1990

Zone laurif de résidence	Surface en ha (%)	Densité (hab./km ²)	Part urbain construit (%)	Distance moyenne au centre (km)
Paris	10 532 (1,0)	24 160	75	3,6
Banlieue intérieure	35 515 (3,0)	9 030	77	8,5
Banlieue extérieure urbanisée	78 423 (6,5)	3 630	58	16,0
Franges de l'agglomération	85 801 (7,0)	850	25	23,0
Villes nouvelles	43 695 (3,5)	910	30	26,9
Agglomérations secondaires axes et vallées	126 766 (10,6)	480	15	41,8
Agglomérations secondaires isolées	98 203 (8,0)	290	10	58,2
Communes rurales	729 307 (60,5)	60	2	45,3

Source : Insee - Recensement de la population 1990

Émissions totales de CO₂ par personne en Île-de-France en 1990 (en kg)



Bilan individuel journalier dans les transports en Île-de-France en 1990

Zone laurif de résidence	Répartition population francilienne (%)	Distance parcourue (km)	Répartition par mode de transport en % des distances parcourues				Émissions de CO ₂ (gramme)
			Véhicule particulier		Transport collectif	Marche, vélo	
			Chauffeur	Passager			
Paris	18	16	29	7	55	9	1 177
Banlieue intérieure	27	19	39	9	45	7	1 685
Banlieue extérieure urbanisée	26	25	43	10	43	5	2 236
Franges de l'agglomération	8	29	49	9	38	4	2 726
Villes nouvelles	7	29	44	11	41	5	2 421
Agglomérations secondaires axes et vallées	8	33	43	9	44	4	2 599
Agglomérations secondaires isolées	3	37	51	13	32	4	3 256
Communes rurales	4	37	60	14	23	3	3 883

Source : Enquête globale transport (EGT), 1991, estimation Inrets 2005

Nota : les déplacements domicile-travail ne sont qu'une composante de l'ensemble des déplacements. À Paris, en semaine, les déplacements se font sur des distances plus courtes qu'en fin de semaine, et en transport en commun (moins émetteurs de CO₂ par individu que les voitures particulières). Les habitants des communes rurales utilisent davantage les voitures particulières, et sur des distances plus longues.

Source : PLATEAU, 2008, pp. 172-173.

II.3- D'autres résultats prometteurs : la modélisation économique à l'épreuve des enjeux énergétiques territoriaux

« Les villes ont 6000 ans, leur modélisation économique quelques décennies. Les villes sont en avance sur leurs modèles ; les modèles sont des représentations rigoureuses, utiles pour contrôler les raisonnements et éviter les débordements rhétoriques, mais insuffisants pour tout expliquer ».

Huriot, Bourdeau-Lepage, 2009, p. XII

Si la section qui précède met en avant des résultats empiriques tirés d'observations « réelles » et faisant l'objet pour certaines d'un traitement statistique, il s'agit ici de présenter des résultats d'une autre nature, issus de la modélisation économique. En effet, la modélisation tente à travers une certaine formalisation, d'expliquer les phénomènes de manière à pouvoir ensuite tester différents scénarii lorsque l'on modifie ou insère de nouvelles variables, ou bien à optimiser le système actuel. Cette sous-partie vise précisément à énoncer les apports et limites de la modélisation économique concernant la formalisation des dynamiques urbaines, en lien avec la question de l'énergie. Aussi, avant de présenter quelques modèles qui appréhendent plus ou moins directement le lien entre forme urbaine et émissions de GES, rappellerons-nous brièvement les objectifs et les finalités de la modélisation économique dans le champ urbain, afin de manier avec lucidité les résultats produits.

II.3.1- Les finalités de la modélisation économique dans le champ urbain

Tout d'abord, il est utile de rappeler que la ville, en tant qu'acteur économique significatif, n'apparaît dans les travaux des économistes que dans les dernières décennies du XX^e siècle. L'espace, certes, est présent dès le XVIII^e chez les premiers économistes, soit sur le thème de l'opposition entre ville-campagne (de laquelle naît l'échange que va formaliser Richard Cantillon en décrivant le circuit économique), soit sur celui de la spécialisation nationale et internationale des échanges chez les classiques à la suite de Smith, soit encore sur le thème de la localisation optimale des activités agraires dans un espace monocentrique et de la rente foncière chez von Thünen, mais la question des forces d'agglomération et de dispersion qui composent et recomposent les villes n'apparaît que très récemment.

Comme le notent Huriot et Bourdeau-Lepage (2009), « *l'économie urbaine a encore du mal à s'imposer et à se dégager clairement d'une analyse économique des territoires. Le plus souvent, les discours économiques sur la ville sont avant tout des discours économiques généraux appliqués à la ville et celle-ci tend à rester le parent pauvre en termes de moyens affectés à son analyse, comparé aux études « régionales et rurales* ». Toutefois, il existe bien des concepts et des raisonnements économiques pour comprendre la ville d'hier et d'aujourd'hui, recensés par de (trop) rares manuels d'économie urbaine.

Ils entrent dans le champ de « *l'économie de l'agglomération* » qui regroupe les travaux de la microéconomie urbaine (voir par exemple FUJITA et THISSE 2002, OGAWA et al. 1980, HURIOT 2004) et ceux de la nouvelle économie géographique (KRUGMAN 1992). Les modèles qui en sont issus sont résolument microéconomiques au sens où ils partent de l'idée que c'est bien l'ensemble des comportements et des interactions des agents économiques qui engendre l'organisation tant économique que spatiale des villes. Par analogie avec la théorie de la firme, ils s'appuient sur l'idée que l'espace urbain est soumis à des forces concurrentes : une force de concentration qui permet de réaliser des économies d'échelle⁶ et limiter les coûts de transaction⁷ et une force de déconcentration pour contrebalancer les déséconomies d'échelle et les coûts d'information internes.

⁶ Une **économie d'échelle** est une réduction du coût unitaire de production (un gain de productivité) qui découle d'une hausse de la quantité produite, pour un coût fixe constant (loi des **rendements croissants**). Une ville réalise ce type d'économie dans la mesure où, par sa taille, elle « mutualise » le coût et la disponibilité de certains équipements et services globalement bénéfiques pour toute l'économie et qui sont « indivisibles » dans leur utilisation. Cela peut être des réseaux de transports (aéroports, autoroutes, réseau ferroviaire), des équipements de formation et de recherche (universités, écoles), des équipements culturels, des centres de congrès, des zones d'activité spécialement équipées, etc. Cette « mutualisation » d'équipements passe beaucoup par la puissance publique qui va gérer et offrir un certain nombre de services financés totalement ou partiellement par l'impôt.

⁷ Les **coûts de transaction** (notion issue des travaux de Ronald Coase) recouvrent notamment les ressources utilisées pour négocier, écrire (recherche et énumération de toutes les éventualités), faire respecter les contrats, les renégocier, qui sont autant de coûts à soustraire du gain potentiel que les parties peuvent retirer de la transaction, ainsi que les coûts de coordination, de gestion des interfaces. Il s'agit d'une catégorie particulière de coûts d'information.

En fait, l'économie urbaine développe cinq grands principes explicatifs de la formation et de la croissance des villes (CAMAGNI, 1996) :

- le principe d'agglomération (ou de synergie) qui répond à la question « pourquoi la ville ? »,
- le principe d'accessibilité (ou de la compétition spatiale) qui enquête sur les modes de localisation des différentes activités, résidentielles et productives, en compétition entre elles pour l'espace urbain : « où dans la ville ? »,
- le principe d'interaction spatiale (qui gouverne les échanges interurbains) qui s'interroge sur les rapports établis entre les différentes parties de la ville et les leurs activités respectives : « comment en ville ? »
- le principe de hiérarchie (ou d'ordonnement des villes), qui explore les lois d'organisation de l'espace interurbain le plus vaste, et les logiques qui président à la taille et à la localisation relative de certains centres : « quelles villes et combien de villes ? »
- et enfin le principe de compétitivité (ou de la base d'exportation, c'est-à-dire la croissance urbaine tirée par les exportations) qui montre les conditions et les modalités du développement des villes : « pourquoi la ville se développe-t-elle ? ».

C'est la combinatoire de ces cinq principes qui permet d'expliquer la croissance urbaine, avec toutefois une dominance certaine du principe d'agglomération. Ainsi, une structure spatiale concentrée procure un certain nombre d'avantages, que l'on désigne par économies d'agglomération. Elles englobent :

- les économies externes qui procèdent de la proximité des firmes :
 - d'autres firmes (ce qui peut faciliter les relations de sous-traitance et les synergies entre entreprises du même secteur) ;
 - d'un grand marché qui représente un débouché immédiat pour sa production ;
 - et d'un marché du travail susceptible d'aider au recrutement d'une main-d'œuvre qualifiée (capital humain) ;
- et les économies dites d'urbanisation, qui reposent sur l'utilisation indivise des équipements publics et infrastructures de base.

Mais ces externalités positives peuvent être compensées par des déséconomies d'agglomération, comme les nuisances et la congestion, lorsqu'à partir d'un certain niveau, le rendement marginal que retire un ménage ou une entreprise de sa localisation commence à décroître. C'est par exemple ce que l'on observe quand les emplois quittent le centre pour la périphérie, comme on le note actuellement en Ile de France (HALBERT 2004, GILLI 2007).

A partir de ces différents principes, l'économie urbaine et les modèles de l'économie géographique visent à rendre compte des processus menant à la concentration ou à la dispersion des activités sur des territoires précis et essaient de trouver des lois générales qui simulent la reproduction de ces activités. Ils ont donc un caractère normatif. Ils incitent à voir la ville ou les systèmes de villes (formalisés par des modèles polycentriques) comme une source d'économie d'agglomération dont le niveau détermine l'importance de l'attractivité économique et de la productivité, ainsi que le rang des services et des équipements collectifs. Par contre, ils ne disent pas si une ville dense est plus performante qu'une ville étalée ou inversement, car l'hypothèse d'optimalité qui est l'un des fondements du modèle renvoie au principe qu'à chaque ville correspond un optimum qui lui est propre (CASTEL 2005).

De plus, si ces modèles accordent une réelle importance aux économies d'échelle et aux externalités, fondamentales en aménagement, ils ne permettent pas en revanche d'appréhender les variations conjoncturelles du marché immobilier, ni les configurations locales à l'échelle du quartier. En outre, le rôle du prix du pétrole dans les possibles reconfigurations territoriales est difficile à apprécier. L'analogie ville-entreprise présente donc certaines limites pour analyser l'urbanisation, d'autant que bon nombre d'entreprises ne se localisent pas selon les prédictions de ces modèles. Ces exercices de modélisation sont utiles à la formalisation de raisonnements et à l'explication de certains phénomènes, même si l'on perçoit bien que déduire, à partir des comportements d'optimisation, des lois générales qui expliqueraient à coup sûr le développement urbain en tout lieu est impossible, dans la mesure où les modèles ne prennent pas en compte qu'un certain nombre de critères.

II.3.2- La question énergétique pose de nouveaux défis à la modélisation

Avec la prise en compte de la question énergétique, on déborde le cadre de la modélisation micro-économique pour aller vers le développement de modèles « hybrides », qui portent un regard plus macro-géographique. Ces dernières années, on assiste au développement de plusieurs modèles dits intégrés, dont la principale originalité est d'examiner les interactions entre transport et occupation des sols et qui sont les plus propices à pouvoir « incorporer » la dimension

énergétique, même si cela se limite le plus souvent aux déplacements (flux) sans prise en compte du cadre bâti (stock). Cela s'explique par les objectifs initiaux de ces modèles, tournés vers une préoccupation aménagiste, mais indépendamment, dans un premier temps, de la dimension environnementale.

Comme le rappelle Lefèvre (2007, p. 254), il existe deux catégories de modèles intégrés urbanisme-transport avec des objectifs distincts : les modèles de prévisions et les modèles d'optimisation.

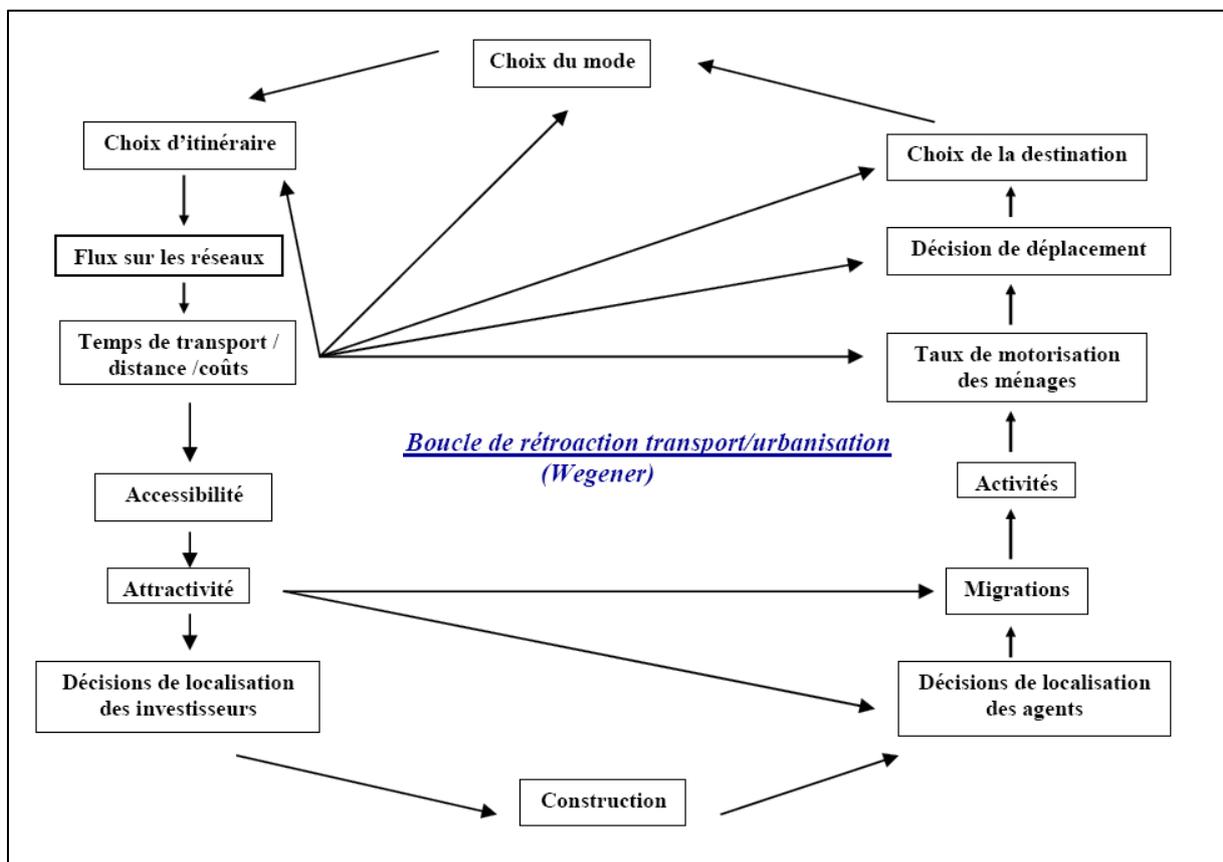
Les modèles de prévision cherchent à définir les effets des politiques de transport et d'urbanisme sur la structure urbaine. Ils s'intéressent à l'explication des changements dans les systèmes de transport et d'usage des sols, et à l'évaluation des effets d'un changement dans les variables exogènes ou endogènes. Ils sont fondés sur un ensemble de relations comportementales.

Les modèles d'optimisation ont pour fonction de déterminer les grandes lignes du processus de structuration urbaine au regard d'un objectif ou d'un ensemble d'objectifs. Ils sont utilisés pour évaluer les effets d'une politique particulière ou d'un ensemble de politiques en fonction d'un objectif.

Ces modèles émanent de la mise en relation de deux disciplines : l'économie des transports et l'économie urbaine. La rencontre de ces deux disciplines vise à rendre compte de l'idée d'une interaction entre l'utilisation des sols et les transports, idée qui ne s'est répandue que très lentement dans les études de planification (Masson, 1998). Jusqu'au développement de ces modèles intégrés à partir des années 1970, les modèles traditionnels de prévision de déplacements ont des difficultés à appréhender les interactions entre transport et urbanisation, car ils ne considèrent qu'un sens de causalité : la répartition de la population et des activités conditionne la formation des déplacements, mais la structure urbaine est une donnée sur laquelle l'offre de transport ne joue pas, alors qu'à long terme, l'effet des déplacements sur la forme urbaine doit être pris en considération (MASSON, 2004). Les modèles traditionnels sont donc inadaptés à l'évaluation des politiques de planification de long terme, alors que les modèles intégrés apportent une réelle avancée dans cette voie, même s'ils demeurent eux aussi une représentation simplifiée de la réalité ... complexe.

Dans le schéma suivant, on peut voir un exemple de formalisation par Wegener (1994) de la boucle de rétroaction transport/urbanisation, qui est à la base de plusieurs modèles intégrés et qui repose également sur différents sous-systèmes aux temporalités différentes :

- changement très lent : réseaux, occupation des sols ;
- changement lent : lieux d'emplois, logements ;
- changement rapide : emploi, population ;
- changement immédiat : les décisions de déplacements ;
- changement « complexe » : l'environnement, qui subit des impacts directs et indirects, à court terme comme à très long terme.



WEGENER 1994, cité par LEFEVRE 2007

3.2.1- Les modèles intégrés urbanisme-transport

Les modèles intégrés⁸ (tels que MEPLAN, ITLUP, POLIS, TRANUS, URBANSIM⁹...) appréhendent ces bouclages et ces interfaces au sein du système urbain en s'appuyant sur différents modules et sous-systèmes. Par exemple, le modèle TRANUS comporte un « module » dynamique de la croissance urbaine, qui lui-même est appréhendé à travers l'interaction de deux sous-systèmes :

- Le système de localisation des ménages et des activités, qui correspond au mode d'occupation des sols et donc à l'urbanisation ; la localisation résulte d'un arbitrage [économique] de la part des acteurs économiques, qui combine à la fois une stratégie de maximisation des aménités liées à cette localisation, une minimisation des frais de transport et de loyer et qui équilibre l'offre et la demande de travail et de service ;
- Le système de transport, qui représente le système d'offre de transport multimodal.

Par ailleurs, dans ses travaux sur le développement du modèle intégré TRANUS, Lefèvre (2007) ajoute un autre module, la « *signature énergétique des transports urbains* » qui permet de calculer les consommations énergétiques et les émissions liées. Il applique ce modèle à la ville indienne de Bangalore. Pour cette ville, il teste deux scénarios qui lui permettent de simuler sur une période de 25 à 30 ans les évolutions du système urbain, selon des actions différenciées sur le système de transport (choix d'investissement, tarification, subvention...) et sur le système de localisation (réglementation sur les zones urbanisables, COS, fiscalité foncière...). Cette approche est particulièrement intéressante pour évaluer les effets combinés de plusieurs types d'instruments (réglementaires, incitatifs, etc.) en ce qui concerne :

- l'organisation spatiale : localisation des activités et des ménages, formes de développement urbain ;
- le trafic : mode utilisé, parcours. ;
- l'économie: prix foncier ;
- les finances: taux de recouvrement des investissements ;

⁸ Pour une revue exhaustive des modèles d'interaction entre urbanisme et transport, voir par exemple : DEYMIER G., NICOLAS J.P. 2005, ou encore les travaux de l'ISGLUTI (International Study Group on Land Use Transport Interaction) tels que WEGENER 2004, etc.

⁹ En France, on trouve principalement deux applications du modèle Urbansim : le projet SIMAURIF, à la fois pionnier en France et cité dans de nombreuses publications internationales comme étant le projet de modélisation de l'interaction urbanisation-transport de Paris, et le projet SIMBAD développé par le LET à Lyon.

- L'environnement: consommation énergétique, émissions de CO₂, etc.

Les deux scénarios sur une période de 20 ans

« Business as usual » (politiques au fil de l'eau)	« Metro + » (Scénario volontariste)
Investissement en infrastructure de transport : - Construction de deux périphériques : intérieur (de 3 à 5 Km du centre ville) et extérieur (de 18 à 20 Km) - Interventions sur points critiques du réseau routier	Programme d'investissement en infrastructure de transport : - Construction des 2 lignes de métro
Urbanisme : - Urbanisation spontanée	Politique d'urbanisme volontariste : - Densification du centre et de la première couronne - Endiguement de l'étalement urbain dans la couronne périphérique
Evolution du parc et choix modal : - Prolongement des lignes de bus - Taux de motorisation croissant	Lutte contre l'usage des véhicules particuliers : - Taxe sur les carburants - Parking payant au centre et en première couronne
Population estimée dans 20 ans : 10,2 millions d'habitants	Population estimée dans 20 ans : 10,2 millions d'habitants
Emploi total : +66%	Emploi total : +66%
Emissions CO ₂ : + 70%	Emissions CO ₂ : + 9%

Source : Lefèvre (2007)

Les résultats de l'application de TRANUS à Bangalore montrent qu'avec le scénario Metro +, et malgré la croissance démographique, on peut parvenir à quasiment stabiliser les émissions de CO₂, alors qu'elles augmentent de 70% dans le scénario « *Business as usual* ». Ces résultats militent en faveur de politiques réalistes qui combinent différents instruments (construire un réseau de métro, favoriser un urbanisme de densification et mettre en place des instruments économiques incitatifs et qu'elles permettraient de conduire à des inflexions significatives des consommations énergétiques.

Bien sûr, ces résultats sont à prendre avec toutes les précautions relatives à un exercice de modélisation et aux hypothèses sur lesquelles il se fonde. Il permet toutefois de dégager des grandes tendances selon les choix et les combinaisons d'instruments, sous réserve que les interactions et rétroactions soient appréhendées le plus fidèlement possible, ce qui dans le champ urbain semble relever d'une quête sans fin...

L'article de Grazi *et al.* (2008) montre également que la performance attendue des politiques climatiques en termes de minimisation des GES dépend de la combinaison de différents instruments agissant sur la structuration spatiale, mais qu'aucun instrument pris isolément n'est supérieur à un autre, si l'on regarde en même temps les différents critères d'évaluation d'une politique publique : l'efficacité sociale (c'est-à-dire la maximisation du bien-être collectif), l'efficacité (c'est-à-dire la réalisation des objectifs environnementaux), l'équité (c'est-à-dire la nature des effets redistributifs) et la mise en œuvre effective (suivi et contrôle). Il passe en revue aussi bien des instruments de type incitatif (comme les prix, taxes, péages), de planification spatiale au sens physique du terme, que de type « *command and control* » (par exemple, interdiction de certains véhicules dans le centre-ville) ou encore des instruments de type « informatif » (comme la sensibilisation publique). Cette comparaison d'instruments, même si elle est qualitative, permet de montrer la diversité des effets attendus d'une politique publique si l'on s'astreint à bien prendre en compte les différents critères d'évaluation, et non pas seulement celui de l'efficacité. L'auteur souligne en outre que ce type de recherches sur les leviers de l'organisation spatiale est encore embryonnaire dans la littérature sur le changement climatique.

3.2.2- Les autres types de modèles

A côté des modèles dits « LUTI » (Land Use Transportation Integrated) que nous venons de citer, il faut également mentionner les modèles macro-économiques d'équilibre général, tels que, en France, IMACLIM développé par le CIRED, ou POLES développé par le LEPII, qui ont une visée prospective de long terme et une fonction d'évaluation des politiques publiques, en particulier des politiques climatiques et énergétiques. Il s'agit là encore de modèles hybrides dans le sens où ils intègrent à la fois les savoirs des économistes, des ingénieurs, des climatologues, des biologistes et d'autres acteurs (politiques, industriels, associations...)

L'architecture de modélisation « IMACLIM » intègre une approche macro-économique et des visions « d'ingénieur » au niveau sectoriel. Elle se décline actuellement en une version de projection statique IMACLIM-S et une version dynamique récursive IMACLIM-R :

- IMACLIM-S élabore un tableau de l'économie d'un pays ou d'une région à un horizon donné (par exemple 2030), en tenant compte des contraintes liées d'une part à l'équilibre macroéconomique et d'autre part à l'éventail des possibilités techniques. Il permet d'évaluer en particulier les impacts macroéconomiques d'une contrainte carbone (taxes, quotas) selon diverses modalités d'application (recyclage des recettes, réforme fiscale verte...). Les travaux récents se sont particulièrement focalisés sur la France.
- IMACLIM-R représente l'économie comme une succession d'équilibres statiques annuels dont l'évolution est guidée par les dynamiques de croissance démographique, d'accumulation du capital et de changement technique. Il connecte au modèle input-output de la version statique 12 modules sectoriels détaillés (électricité, transport, énergies fossiles, résidentiel...) appliqués dans 12 régions. IMACLIM-R est utilisé pour réaliser des scénarios de long terme d'évolution des systèmes énergétiques et pour l'évaluation des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Ces modèles s'appliquent à des territoires étendus (pays) et sont donc peu opérants pour des préconisations en termes d'aménagement régional ou urbain. Ils appréhendent les émissions de GES selon un maillage lâche. Certaines « boîtes noires » du modèle peuvent être améliorées, telles que le module bâtiment par exemple, puisque les simulations sur l'évolution du parc immobilier et les consommations d'énergie associées sont encore incertaines. Les bouclages entre modules sectoriels constituent également une autre difficulté à lever dans ces modèles, par ailleurs très consommateurs en données.

II.3.3- Apports et limites de la modélisation économique

Ces différentes approches modélisatrices, en particulier les modèles LUTI, constituent une réelle avancée pour appréhender de manière dynamique les interactions urbanisation-transport et tester différents scénarios. Par contre, il faut bien se garder de toute généralisation et apprécier les limites actuelles de ces modèles. Les sources d'incertitudes sont encore nombreuses, qu'il s'agisse de la modélisation des comportements et des arbitrages des ménages, de la connaissance de la formation et de l'évolution des prix immobiliers, de l'insuffisance des données statistiques, de l'évaluation socio-économique des transports où la tendance reste encore de convertir en gain de temps les avantages d'une nouvelle infrastructure (résultat démenti par les enquêtes générales sur les transports en Ile de France par exemple, qui montrent plutôt que ces gains de temps sont convertis en gains de distance par les usagers, ce qui est facteur d'étalement urbain). On peut

également évoquer le problème de la spéculation foncière qui n'est pas traité, non plus que les problèmes institutionnels et politiques.

Ce type de recherches est toutefois prometteur et encore très récent en France, alors qu'il est beaucoup plus développé aux Etats-Unis. Cela vient du fait que la réglementation¹⁰ rend obligatoire depuis peu la prise en compte de l'interaction urbanisation-transport dans l'élaboration des plans de transport régionaux, ce qui constitue sans doute une piste d'instrument réglementaire intéressante dans le contexte français... Ces modèles montrent que les réponses au défi du changement climatique ne se résument pas à un type de mesure, en particulier à la planification, mais qu'il faut les accompagner d'incitations réglementaires ou financières.

Ces modèles sont plus aboutis sur le volet transport (grâce au développement des modèles de trafic par l'économie des transports, champ depuis longtemps bien constitué) que sur le volet cadre bâti, qui reste souvent une boîte noire pour les économistes. Ainsi, l'énergie et le CO2 estimés sont surtout relatifs aux transports. Il reste quand même une question en débat, qui est celle de la traduction des effets produits par une amélioration des conditions de déplacements en gains de temps, même si l'on a bien vu que les modèles LUTI intègrent le fait qu'il y a coproduction entre la forme urbaine et la mobilité. Autrement dit, on reste dans le flou concernant les économies potentielles en GES liées à de nouvelles infrastructures de transport...

Enfin, la question de la « forme urbaine » en économie n'est pas véritablement traitée, ou plutôt, elle n'apparaît qu'en creux. Les économistes s'attachent davantage à comprendre la croissance urbaine et à en tirer des lois générales, mais on l'a vu, le principe d'optimalité rend impossible toute préconisation sur la forme urbaine. Au mieux, l'économie géographique à travers les économies / déséconomies d'agglomération tente d'expliquer les phénomènes de concentration / dispersion selon l'importance de l'attractivité économique et de la productivité. Mais comme le rappelle Castel (2005), « l'idée même que l'urbanisation puisse se décrire avec de telles lois fait l'objet de critiques ». La ville finalement se trouve réduite dans les modèles à un gradient de densité, résultant d'un système de localisation et d'usage du sol.

Ainsi, la modélisation reste un outil à manier lucidement. Dans un registre plus pragmatique, on citera le point de vue d'un praticien de l'aménagement, Jean-Michel Roux (2008): « *Un système urbain, en effet, comporte trop de variables et trop de critères d'appréciation pour être optimisé. (...) Assurément, il convient d'utiliser les sites disponibles dans le tissu urbain continu et de soigner dignement nos périphéries. Mais si*

¹⁰ Lois sur l'air ISTEA 1991 et TEA 21 1998.

on parlait en premier de continuité de l'espace public, si on rapprochait habitat, boutiques et artisans, qui avaient fait alliance depuis le néolithique et qu'on sépare désormais, si on collait mieux à la demande résidentielle, si on améliorait nos outils fonciers, si on réanimait l'aménagement en déclin (donc les ZAC en pratique), si on s'attaquait aux questions institutionnelles qui handicapent aujourd'hui la maîtrise d'ouvrage de projets complexes, mais j'en oublie, on verrait renaître la demande d'urbanité et diminuer le gaspillage de sol, sans avoir à user d'une langue de plomb. »

II.4- Ce que les résultats disent ... et ne disent pas

« Effet : ce qui est produit par une cause. Impact : effet d'une action forte, brutale (...). C'est bien à une vision déterministe des rapports entre réseaux de transport et structures urbaines que les notions d'impact, d'effet (induit, structurant) font référence (...). Il est inutile de s'appesantir sur le syllogisme classique qui confond concomitance et corrélation, puis corrélation et rapport de cause à effet ».

OFFNER, Jean-Marc, *Les effets structurants du transport. Mythe politique, mystification scientifique*, Paris, ENPC, 1992, p. 4

Les recherches menées sur le lien entre formes urbaines, énergie et émission de gaz à effet de serre convergent vers un certain nombre de résultats importants :

- pour les grandes métropoles, il y a un lien inverse entre densité urbaine et consommation énergétique par tête pour les déplacements de personnes ;
- dans les pays développés, en tendance, les espaces à faible densité – principalement des espaces ruraux mais aussi certains espaces périurbains – présentent une consommation énergétique par tête pour les déplacements locaux de personnes et l'habitat, supérieure à celle que l'on rencontre dans les espaces denses ;
- à densité comparable, la présence de transports collectifs s'accompagne d'une réduction des émissions moyennes de GES pour les déplacements.

Les différentes recherches citées montrent donc qu'il existe un lien entre la densité et la consommation énergétique des ménages, que ce soit à l'échelle des métropoles, ou, à l'intérieur de celles-ci, à l'échelle des quartiers. De ce fait, il peut paraître intéressant de mener une politique de « densification des villes » pour en attendre une diminution des consommations énergétiques. Cette recommandation est reproduite par de multiples organismes (Banque Mondiale, Commission européenne ...) au point qu'on a pu parler d'une forme d'« obsession de la densité¹¹ »

¹¹ La question de la densité fait l'objet de débats multiples et nombreux. Sur ce point, nous renvoyons le lecteur à deux synthèses éclairantes sur le sujet : FOUCHIER, 2001 et MICHEAU, 2003.

(THEYS, 2009). Mais n'est-on pas passé un peu hâtivement d'une lecture des constats à une solution qui a le mérite d'être simple et universelle ?

En effet, pour une juste interprétation de ces recherches, il faut rappeler que celles-ci :

- ne prennent que peu en compte les consommations liées au transport de marchandise ainsi qu'au trafic de transit ;
- ne tiennent pas compte des déplacements à longue distance. Or, ce type de déplacement, notamment par avion, est en plein développement. On peut d'ailleurs faire l'hypothèse que les habitants des zones denses des grandes villes ont un budget énergétique élevé pour les déplacements saisonniers ou de fin de semaine ... ce qui annihilerait le gain énergétique constaté pour les déplacements quotidiens ;
- rendent délicate la mise en évidence de la part strictement liée à la forme urbaine dans les différences constatées en matière de consommation énergétique et d'émissions de GES.

Par ailleurs, ces recherches montrent qu'outre la densité, une part très importante des déterminants territoriaux en matière de consommation énergétique et d'émission de GES relève de la répartition des ressources (logements, emplois, services, etc.) à l'intérieur de l'espace urbain. L'éclatement des fonctions à l'intérieur de l'agglomération, tout autant que son étalement spatial ou sa densification, a de lourdes conséquences sur les distances des déplacements et le choix modal. Comme le rappelle Vincent Fouchier, à propos de l'Ile-de-France : *« on aurait pu penser, de manière simpliste, que l'accroissement des distances moyennes entre domicile et lieu d'emploi est proportionnel à l'accroissement spatial de l'agglomération ; mais ce n'est pas le cas. Dans la région, entre 1982 et 1990, on a vu les distances moyennes de déplacements domicile-travail augmenter rapidement (+17,6 %), mais beaucoup plus vite que le rythme de l'urbanisation (+7,6 %) ou l'accroissement net de population et emploi »* (FOUCHIER, 1997, p. 187) Une abondante littérature a ainsi montré les effets de la répartition des activités sur les déplacements (AGUILERA, MADRE, MIGNOT, 2004 ; SENECAI et alii, 2005). Aussi le fait qu'une grande partie de la littérature concentre ses préoccupations sur les seules densités résidentielles peut-il conduire à des conclusions trompeuses dans la mesure où la localisation des emplois par rapport aux axes de transport et aux possibilités de stationnement a une incidence majeure pour l'organisation des déplacements et le choix modal (EWING, CERVERO, 2001). Bref, la recherche montre donc que le levier d'action principal est moins la forme urbaine ou la densité pour elle-même que la manière dont s'agencent individus, activités et réseaux de transport pour faciliter une accessibilité peu émettrice de GES et peu consommatrice d'énergie.

3ème Partie - L'urbanisme et l'aménagement face à l'atténuation du changement climatique : illusions et opportunités

Relisons quelques lignes d'un rapport consacré à l'urbanisme à la suite du choc pétrolier de 1973 :

« Examinons quels sont les principes généraux qui paraissent devoir présider à une étude d'économie énergétique appliquée à la construction urbaine.

Dans le domaine des transports, l'élévation des coûts énergétiques devrait freiner sensiblement les tendances actuelles à la spécialisation excessive des espaces urbains (zones commerciales, universitaires, de loisir, industrielles ...), et à la dé-densification de l'habitat périphérique. Le zonage abusif et le manque d'intégration des équipements accroissent en effet la propension des citadins à se déplacer (et à gaspiller ainsi, outre de l'énergie, une proportion toujours plus grande de leur budget-temps) et, par ailleurs, la mise en place d'un système efficace et économique de transports collectifs est incompatible avec l'existence d'un tissu urbain trop dilué (les villes américaines en sont l'exemple le plus frappant).

Les tendances inverses (quartiers plus complets, plus diversifiés et plus autonomes, développement des transports en commun, des espaces piétonniers et des pistes cyclables, densification de l'habitat et des activités autour des stations de transports collectifs en site propre...) paraissent devoir être les options principales de l'urbanisme futur (BONNOME, in CRU, 1976)».

Voici un court passage consacré, une trentaine d'années plus tard, à l'aménagement dans un rapport coordonné par Christian de Boissieu, consacré à la division par quatre, d'ici 2050, des émissions de GES :

« Par ses choix en matière d'aménagement et d'urbanisme, la collectivité locale détermine les futures consommations d'énergie des habitants de son territoire et rend le territoire plus ou moins vulnérable face aux risques naturels.

L'enjeu est de taille : il s'agit de planifier le futur en intégrant les conséquences possibles du changement climatique. Cela implique une vision prospective et dynamique du territoire. [Aussi, il convient de] contenir l'étalement urbain pour réduire les consommations d'énergie afin d' :

- *orienter, de façon volontariste, la localisation des activités, des équipements et des zones résidentielles pour limiter l'étalement urbain ;*
- *favoriser les opérations de renouvellement urbain, la réutilisation des friches urbaines, la valorisation du patrimoine ;*
- *sensibiliser les décideurs et le grand public en les informant clairement sur les inconvénients de l'étalement urbain existant (coût des équipements urbains, temps de transport, ségrégation spatiale etc.) ;*
- *limiter l'implantation des grands projets commerciaux, industriels et de loisirs sur des zones périphériques et/ou non desservies efficacement par les transports en commun ;*
- *limiter la dispersion des activités et des lieux de résidence, maintenir les écoles de manière équilibrée sur le territoire au lieu de concentrer les établissements sur la ville-centre ;*
- *rendre la ville agréable et attirante sous un climat futur plus chaud, en créant des espaces ouverts adaptés à la vie en extérieur ».*

Entre les deux dates, si l'inquiétude a grandi, puisqu'il ne s'agit plus simplement de diminuer les consommations énergétiques, mais également de lutter contre un risque planétaire de réchauffement climatique, on ne peut qu'être frappé par la constance des recommandations, et par l'inconstance des politiques, puisque la ville a évolué de manière assez éloignée de ces principes...

Au terme de cette revue de la littérature scientifique, nous souhaitons donc conclure sur le rôle que pourraient avoir l'aménagement et l'urbanisme dans le cadre des politiques plus globales de lutte contre le réchauffement climatique. En effet, deux attitudes se distinguent dans ce débat. Pour certains, la question énergétique confirme les critiques qu'ils formulent contre la banalisation de l'automobile, l'urbanisation diffuse, l'absence de coordination entre les grands équipements urbains et les réseaux de transports collectifs. Ils en appellent donc à un sursaut collectif pour repenser la manière de vivre et de construire les territoires, à la nécessité d'une prise de conscience des changements indispensables et d'un infléchissement des politiques d'aménagement. Pour d'autres, la réduction des émissions de GES passent d'abord et plus sûrement par des avancées technologiques, notamment dans le domaine de l'automobile et du bâtiment, et moquent cette « illusion aménagiste » qui use de la question climatique pour redonner légitimité à des démarches qu'ils rejettent ou auxquelles ils ne croient plus, notamment à la planification territoriale. Entre ces deux positions, volontairement simplifiées, quel rôle peut

réellement jouer l'aménagement du territoire ? Face à une organisation territoriale qui conduit les individus à des consommations énergétiques et des émissions de GES de plus en plus importantes, les mutations technologiques et les incitations économiques à travers une éventuelle taxe carbone seront-elles suffisantes ? Autrement dit, les problèmes territoriaux seront-ils d'abord traités par des solutions a-territoriales ?

III.1- Il n'existe malheureusement pas de solution miraculeuse

Face à l'accroissement des mobilités, et donc des émissions de GES liées au transport, deux solutions, contradictoires, sont souvent avancées pour préférer l'attentisme à une politique d'urbanisme et d'aménagement préventive :

- une mobilité excessive est certes la résultante d'erreurs en matière d'aménagement du territoire, mais les évolutions technologiques vont permettre d'annihiler les effets négatifs d'une mobilité trop importante, notamment grâce à la voiture électrique. Il ne sert à rien de vouloir changer l'organisation territoriale, la technologie suffira ;
- les résultats des politiques d'aménagement sont trop aléatoires, l'outil le plus simple pour le changement des comportements est l'incitation par le prix. Une taxe carbone accompagnera la hausse tendancielle du coût de l'énergie, les ménages et les entreprises réajusteront leur implantation, avec l'aide éventuelle de la collectivité publique pour les cas les plus difficiles. Il ne sert à rien de débattre collectivement de la manière d'organiser le territoire, ménages et entreprises le transformeront par leur comportement économique face à une hausse des prix de l'énergie ...

III.1.1- A pétrole cher, ville compacte ?

Si la dispersion urbaine est souvent analysée comme une conséquence de la banalisation de l'automobile et des faibles coûts énergétiques, la question se pose de savoir si, en période de cherté énergétique, on ne pourrait pas assister à une forme de « rétraction périurbaine ». Le coût de l'énergie devrait tendanciellement fortement augmenter, sous l'effet de la raréfaction de la ressource, et, surtout, de décisions politiques d'instauration de taxes spécifiques sur les émissions de GES (ROCARD, 2009). Après les chocs pétroliers de 1973 et 1979, beaucoup de scientifiques avaient déjà émis l'hypothèse d'un retournement de tendance en faveur de plus de compacité urbaine. Aussi, Maurice Wolkowitsch prévoyait-il en 1981 : « *La diffusion de l'habitat risque alors d'être remise en cause ; dans le cas d'une relative densité ou de lotissements organisés, le relais par les transports collectifs*

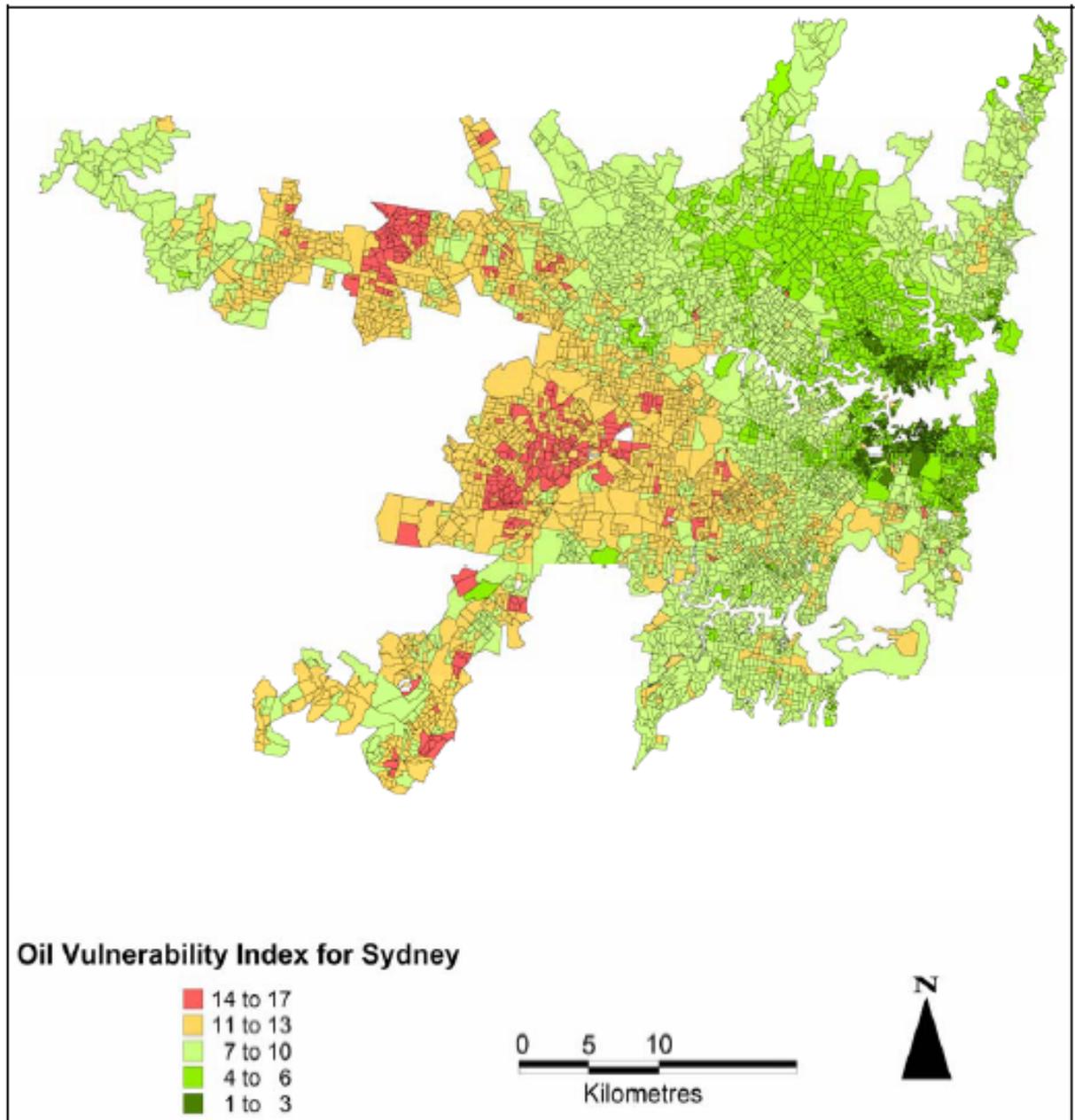
est partiellement envisageable (expériences d'un autobus appelé par téléphone), dans le cas fréquent de la dispersion totale, le changement de résidence risque d'être un terme inéluctable. Plusieurs exemples nous sont donnés à Paris et à Cherbourg de majorations très fortes de loyers dans le centre ou dans des secteurs bien desservis par les transports collectifs : la demande se trouvait renforcée par la volonté de rapprocher les lieux de résidence et de travail et de réduire les achats d'essence » (WOLKOWITSCH, 1981, pp. 554-555). La baisse du coût de l'énergie au cours des années 1980 n'a pas permis de confirmer cette hypothèse (BEAUVAIS, 2008).

Dans les espaces périurbains à faible densité, les ménages pauvres apparaissent en effet parmi les plus vulnérables face à une élévation du coût de l'énergie. Des chercheurs australiens ont élaboré un indice de vulnérabilité énergétique à partir :

- des caractéristiques socio-économiques des ménages ;
- de la « *dépendance automobile* » des ménages, estimée à partir d'un certain nombre de résultats obtenus grâce au recensement (principalement le taux de motorisation des ménages ainsi que le mode de transport utilisé pour les déplacements domicile-travail).

Cet indice permet d'identifier des zones à risque. Sans grande surprise, on voit que les ménages les plus vulnérables sont situés dans les franges des agglomérations, et ceci, dans les trois villes étudiées de Brisbane, Melbourne et Sydney (DODSON, SIPE, 2007).

Vulnérabilité des espaces urbains face à la cherté du pétrole



Source: DODSON, Jago, SIPE, Neil, *Oil Vulnerability in the Australian City*, Urban Research Paper, Griffith University, December 2005.

L'hypothèse d'une « rétraction périurbaine » en cas de cherté énergétique peut également s'appuyer sur des travaux qui montrent qu'en Ile-de-France, une des principales solutions trouvée par les ménages qui résident dans des espaces très mal desservis par les transports collectifs et, qui pour

une raison ou pour une autre, se retrouvent sans véhicule, est le déménagement vers des zones mieux desservies (MOTTE- BAUMVOL, MASSOT, BYRD, 2009).

Les ménages semblent en effet être assez sensibles au prix de l'énergie pour leurs pratiques de mobilité. Quelques données statistiques montrent que celles-ci évoluent légèrement en fonction des prix. Deux enquêtes auprès des ménages sur les déplacements réalisés en 2006 signalent, pour les agglomérations de Lille et de Lyon, un retournement de tendance avec une mobilité quotidienne en automobile en diminution par rapport aux années 1990 (QUETELARD, 2008). D'autres données concernant la mobilité sur longue distance, c'est-à-dire de plus de 100 kilomètres, indiquent pour l'année 2006 un recul du nombre de kilomètres parcourus en automobile d'un peu plus de 2 %. Néanmoins, si ces chiffres marquent une certaine sensibilité des ménages au prix du carburant, il est trop tôt pour savoir si on assiste à un simple effet de conjoncture ou à un bouleversement structurel plus profond. Aux États-Unis, où la hausse des coûts du carburant a été beaucoup plus forte qu'en Europe entre 2003 et 2008 avec un quasi-triplement du prix de l'essence, on observe une diminution du nombre de kilomètres parcourus en automobile de près de 6 % pendant la même période. Il y a donc eu une diminution passagère, mais en 2008 le nombre de kilomètres automobiles parcourus par habitant est toujours supérieur de près de 40 % à celui de 1983 (DESJARDINS, 2008b) ! On voit donc quelques signes de changements, mais, pour l'instant, il est encore trop tôt pour prédire une transformation profonde du système territorial sous le seul effet du prix de l'énergie.

Pourquoi l'impact de la hausse du coût de l'énergie sur le territoire paraît-il encore assez faible ? Tout d'abord, de grands progrès ont été réalisés et sont encore attendus pour améliorer l'efficacité énergétique des automobiles. Entre 1970 et 2005, si le nombre de véhicules-kilomètres parcourus a été multiplié par 2,5 en France, la consommation énergétique a été seulement multipliée par deux grâce à l'amélioration des technologies. On peut supposer que les constructeurs vont fortement accélérer la mise au point de véhicules plus sobres dans un contexte de hausse durable des coûts de l'énergie (et de contraintes légales liées à la politique de lutte contre le réchauffement climatique et de diminution des émissions de gaz à effet de serre). Les ménages peuvent ainsi répondre à une hausse durable du coût du carburant, non par une diminution de leur kilométrage automobile, mais par le choix de véhicules plus sobres. De plus, rappelons que si le carburant est l'élément déterminant du *coût psychologique* de l'usage d'un véhicule, il ne constitue toujours qu'une part minoritaire du coût réel de son utilisation (souvent moins d'un quart). Ensuite, les ménages ont, dans leur budget, la capacité de reporter l'effet de la hausse du coût de l'énergie sur d'autres postes de consommation que la mobilité. Un résultat

inattendu d'une enquête exploratoire que nous avons menée dans le périurbain francilien en 2008, est que la principale réponse apportée par les ménages à la hausse du coût du carburant est... de réaliser des travaux d'amélioration thermique de leur logement (DESJARDINS *et alii* 2008) !

Les réelles difficultés que rencontrent les ménages qui vivent dans les zones peu denses pour accéder aux ressources territoriales (emploi, éducation, loisir, commerces, services, etc.) quand ils perdent leur mobilité, créent des inquiétudes qui sont fondées dans le système territorial actuel. Celui-ci est marqué par la polarisation – en diminution, mais néanmoins forte – des emplois dans les métropoles ainsi que par la concentration continue des services commerciaux comme publics dans les plus grandes villes. Dans un contexte de cherté durable de l'énergie, on peut imaginer le développement d'autres formes de commerce, une réouverture des services publics de proximité, le développement de circuits plus courts pour la distribution de produits alimentaires ou de matériaux nécessaires au bâtiment, une revitalisation des bourgs et des villes moyennes, le développement du covoiturage, une polarisation du développement résidentiel sur les communes desservies par des lignes de transport collectif. Les tendances actuelles et les politiques menées vont quasiment toutes dans la direction strictement inverse. Peut-être la question énergétique amènera-t-elle à refaire ce que l'on s'acharne à défaire...

Dans ces conditions, si la hausse du coût de l'énergie peut avoir un impact particulièrement douloureux pour les ménages pauvres des périphéries urbaines et des campagnes et favoriser une organisation différente du territoire, on ne peut pas prédire une relation mécanique entre la hausse du coût du carburant et les localisations des ménages et des activités.

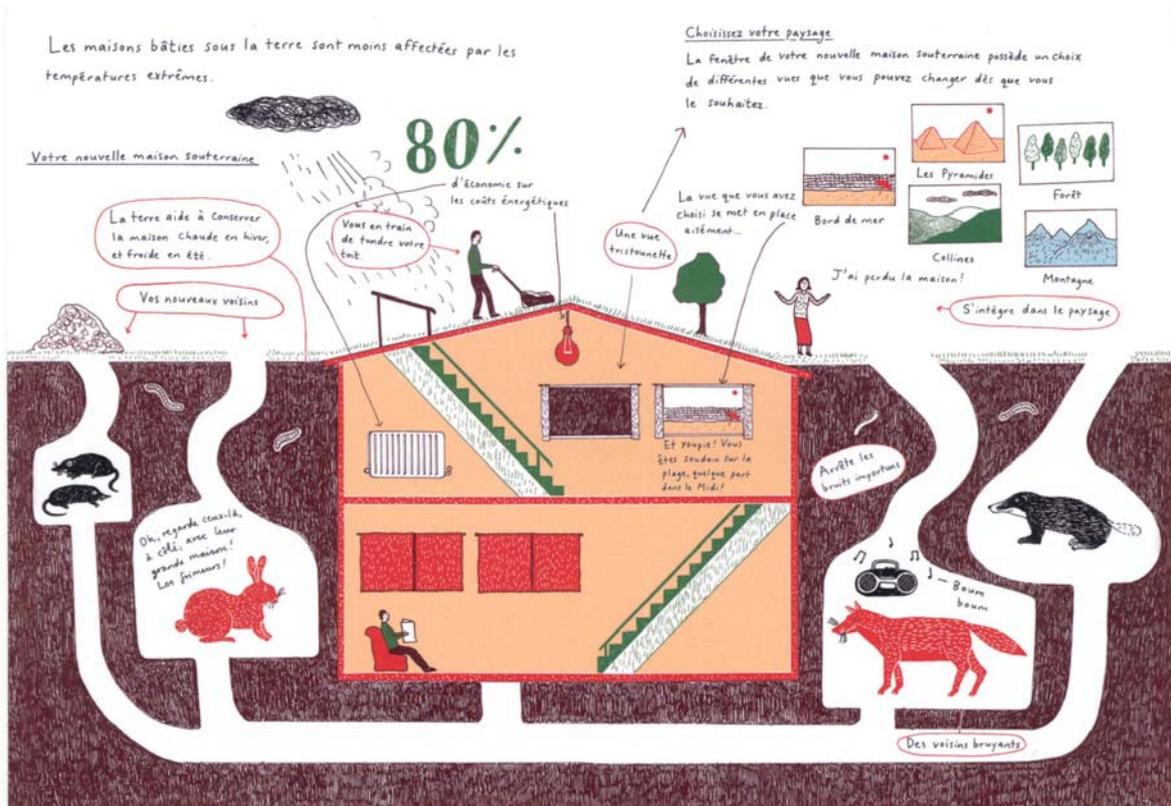
III.1.2- La voiture électrique : solution ou problème de demain ?

Les évolutions technologiques vont-elles permettre de se déplacer demain sans utiliser d'énergie fossile ? En matière de mobilité, beaucoup pensent pouvoir trouver dans l'électricité un substitut efficace au pétrole. La production électrique émet peu de gaz à effet de serre en France, principalement en raison de l'importance du parc nucléaire. Les moteurs électriques sont aujourd'hui adaptés aux véhicules automobiles. De plus, le prix de l'électricité pourrait devenir compétitif par rapport à l'essence traditionnelle.

Toutefois, les véhicules électriques ou hybrides sont encore très chers, notamment les véhicules hybrides qui ont des équipements coûteux pour fonctionner aussi bien à l'électricité qu'à l'essence. De plus, leur fabrication ne concerne encore que des séries limitées. Si les véhicules hybrides dans les années qui viennent, les véhicules électriques à plus long terme, deviennent

d'usage courant, les économies d'échelle apparaîtront. Enfin, il faudrait implanter des points de recharge, d'autant plus nombreux que l'autonomie des moteurs est limitée. Les garages privés peuvent aisément être équipés mais, pour les véhicules qui n'y ont pas accès, il faut imaginer un investissement massif, financé ou encouragé par les pouvoirs publics, en bornes de recharge sur la voie publique.

Le fétichisme écologique



Les apories d'une vision purement technique de l'objectif de réduction des consommations énergétiques.

Source : Harriet Russell, *Votre nouvelle maison souterraine*, extrait de « Une espèce en danger » commandée par le centre canadien d'architecture pour le catalogue d'exposition « 1973 : désolé, plus d'essence »

Le problème important pour le développement des véhicules électriques est celui de leur autonomie. Avec les batteries traditionnelles au plomb, elle est seulement de l'ordre de 100 kilomètres. Cela paraît suffisant pour les véhicules qui effectuent des trajets quotidiens peu importants, comme les véhicules internes à une entreprise, les voitures postales, les bennes à

ordures etc. mais, pour les particuliers, cela constitue une contrainte forte. Pour améliorer l'autonomie offerte, on expérimente des accumulateurs plus performants, tels que les accumulateurs au cadmium-nickel. La réponse à ce problème pourrait venir du développement de la pile à combustible. Celle-ci devrait assurer légèreté, réactivité et autonomie. Mais elle fonctionne à l'hydrogène et il faut beaucoup d'énergie pour le fabriquer. Au total, un véhicule électrique offrant des performances et un coût comparables à celui d'un véhicule à essence, ne semble pas pouvoir se banaliser avant plusieurs décennies. Néanmoins, pourront d'ici là se développer des véhicules à accumulation, et, surtout, des véhicules hybrides qui économisent actuellement 20 % de carburant, et réduisent d'autant les émissions de polluants et de gaz à effet de serre.

Bref, si cette voie est possible, elle n'est sérieusement envisageable qu'à long terme et, pour Pierre Merlin (MERLIN, 2008), elle repose nécessairement sur un renforcement du parc nucléaire. La consommation actuelle du secteur des transports représente près de 50 millions de tep par an en France. La production d'énergie nucléaire actuelle est de près de 120 millions de tep et celle des énergies renouvelables de près de 3. La consommation d'énergie électrique issue de la filière nucléaire pourrait donc progresser très fortement si l'on imagine un passage à l'énergie électrique de l'ensemble du parc automobile.

Par ailleurs, si l'automobile électrique peut apporter des réponses intéressantes dans le cadre de la réduction des émissions de GES, rappelons qu'elle ne résout en rien les différents problèmes posés par la généralisation de l'automobile en milieu urbain, à savoir sa consommation importante d'espace pour le stationnement, la sécurité des personnes, les problèmes d'accessibilité à son usage pour des raisons de coût, de santé ou encore d'âge.

III.2- Les réponses a-territoriales sont déterminantes

Dans le cadre d'une politique urgente de réduction des émissions de GES, avec dans le cas français, l'engagement de diminuer les émissions par quatre, d'ici à 2050, les principaux moyens d'action ne se trouvent pas dans l'aménagement et l'urbanisme (WIEL, 2009). Plusieurs raisons conduisent à cette conclusion :

- les politiques d'aménagement du territoire au sens strict, qui jouent sur l'agencement des formes bâties et des flux, n'ont que peu d'impacts sur les principaux postes émetteurs de gaz à effet de serre que sont l'industrie, l'agriculture, et pour une large part le bâtiment. Dans ces différents secteurs, les progrès dépendent principalement de l'amélioration des

processus de fabrication industrielle ou agricole, d'une meilleure isolation des bâtiments, de l'amélioration des moteurs, etc. L'efficacité des actions dans ces domaines est indiscutablement, beaucoup plus sûre et rapide que celle de l'aménagement du territoire ;

- les « effets de stock » en matière territoriale sont extrêmement puissants : les formes urbaines sont le résultat de l'histoire longue et la capacité d'action sur les tissus urbains est limitée. Si la densification des espaces périurbains est souhaitable en certains lieux, celle-ci ne pourra qu'être un processus de très longue durée ... ;
- en matière de mobilité des personnes, la diminution des émissions de gaz à effet de serre par un « *transfert modal* » en direction des transports collectifs ou la marche ou par la diminution des distances parcourues en automobile grâce à un meilleur agencement urbain ne peut être obtenue qu'à long terme et restera marginale. Comme le rappelle Jean-Pierre Orfeuil (ORFEUIL, 2008), en 1973, les Français parcouraient en moyenne 6 300 kilomètres par an en voiture. En 2008, ce sont 12 200 kilomètres qui sont parcourus. Alors que les véhicules sont beaucoup plus puissants, la consommation kilométrique a baissé de 25 % entre 1973 et 2005. Si cette baisse n'avait pas eu lieu, nous consommerions 140 litres d'essence de plus par personne et par an. Le trafic de tous les types de transport ferroviaire est passé de 51 à 90 milliards de voyageurs-kilomètres, soit, à peu près, de 1000 à 1500 kilomètres par personne et par an entre 1970 et 2005. Si ces 500 kilomètres supplémentaires avaient été effectués en automobile, la consommation supplémentaire de carburant n'aurait été que de 18 litres par personne et par an. On conçoit bien, par ce simple rappel, que le principal gisement de réduction des émissions de gaz de serre (et ceci à un coût nettement moindre) est beaucoup plus l'amélioration des véhicules que la planification des villes ;
- les décisions en matière de politique énergétique auront un impact majeur, assez indépendant des politiques d'aménagement du territoire. L'étude citée plus haut sur les métropoles américaines a montré que les émissions de gaz à effet de serre sont très liées aux modes locaux de production d'énergie, et notamment d'électricité (et le plus ou moins fort développement de celle-ci dans le secteur résidentiel). Dans le cas français, si nous avons souligné l'inconstance des politiques en matière de réduction des consommations énergétiques, notamment dans le domaine du transport et du bâtiment, il faut souligner qu'en matière de production énergétique, les choix effectués au lendemain du choc pétrolier de 1973 ont été suivis avec détermination et les prévisions alors formulées en matière de production pour l'an 2000 se sont révélées globalement justes,

notamment parce que la part du nucléaire a augmenté dans les proportions prévues, ce qui a permis une diminution massive des importations d'hydrocarbures. Bref, la réussite de la politique de réduction des émissions de GES passe d'abord par les choix énergétiques : quelle place pour les différentes formes de production, et notamment celles du nucléaire, potentiellement la plus prometteuse en termes de capacité de production ? Quel recours à l'électricité dans les bâtiments et les transports ? Quel développement des énergies renouvelables ?

III.3- Aménager les territoires pour renforcer des accessibilités peu consommatrices d'énergie et peu émettrices de GES

Si l'urbanisme et l'aménagement ne sont pas des leviers majeurs pour une réduction rapide des émissions de GES, ils peuvent toutefois jouer un rôle non négligeable. Leur contribution, même à long terme, ne peut être négligée pour atteindre les objectifs très ambitieux de réduction des émissions de GES.

Quel pourrait être le principe d'un aménagement et d'un urbanisme soucieux de participer à l'objectif de lutte contre le changement climatique ?

Pour les urbanistes, souvent fascinés par la forme, il a semblé naturel de privilégier des morphologies urbaines qui leur semblent plus favorables, notamment à travers les modèles de villes compactes ou d'« *urban villages* ». Or, nous avons vu qu'il n'y a pas de relations simples et directes entre formes urbaines et consommation d'énergie, puisque la répartition des fonctions au sein d'une ville ainsi que les caractéristiques du système de transport sont également importantes. Aussi, le concept d'accessibilité nous permet-il de dépasser les limites d'une vision strictement « *spatialiste* » du lien entre transport et urbanisme. L'accessibilité peut être définie comme la plus ou moins grande facilité avec laquelle un lieu ou une fonction urbaine attractive (emplois, commerces, services...) peuvent être atteints à partir d'un ou de plusieurs autres lieux, à l'aide de tout ou partie des moyens de transport existants. Comme le rappelle Robert Cervero « *Il y a des déplacements parce que les gens veulent aller quelque part, au travail, chez eux, à l'église, au supermarché, etc. Ce sont ces lieux et ces gens qui importent, pas les transports* » : l'objectif pour l'aménagement est de penser d'abord les accessibilités. Il est préférable d'agir sur la demande de déplacement plutôt que d'agir sur l'offre de transport comme variable d'ajustement des déséquilibres territoriaux. L'intégration de la préoccupation énergétique conduit à intégrer l'objectif d'amélioration des accessibilités

faiblement émettrices de GES et peu consommatrices d'énergie dans les politiques d'aménagement et d'urbanisme.

Ce principe pourrait être un outil d'aide à la décision en matière d'urbanisme et de politique de déplacement ainsi qu'un instrument d'évaluation des politiques territoriales.

En matière d'occupation et d'utilisation du sol, cela se traduit par une estimation du coût potentiel en GES selon le lieu concerné par un permis de construire ou d'aménager. Selon la localisation d'une construction, l'accessibilité aux services et emplois est bien sûr différente (Voir, pour leur évaluation énergétique, les travaux d'ANTONI et *alii*, 2009). Pour un logement par exemple, on peut également partir de modèles très simples en prenant une famille-type de quatre personnes avec deux actifs et deux enfants : on prend par convention l'idée que les deux adultes doivent parcourir pour leur travail une distance égale à la distance moyenne parcourue par les résidents actuels de la commune, puis on ajoute les distances nécessaires pour l'école, les activités de loisir et les achats. On aboutit à un nombre de kilomètres en automobile et, là où cet usage est possible, en transport collectif, auxquels ce ménage-type est contraint, donc à un coût monétaire et à une quantité d'énergie. Ce modèle manque beaucoup de finesse dans la mesure où les ménages-types n'existent pas et où les pratiques ne sont jamais réductibles aux moyennes. Néanmoins, une telle estimation permet en quelques minutes de voir lors d'un débat sur les zones à ouvrir à l'urbanisation, si certaines se révèlent *a priori* plus ou moins énergivores. Sans surprise, les zones proches des commerces et services et des arrêts de transports collectifs se révéleront alors plus intéressantes, mais remarquons que ce ne sont pas toujours celles qui sont choisies pour l'urbanisation future...

En matière de gestion des déplacements, ce principe de renforcement des accessibilités « *peu carbonées* » peut également servir de guide, non seulement pour l'implantation de nouvelles lignes de transports collectifs, mais aussi pour définir, là où cela paraîtrait pertinent, des mesures de réduction des accessibilités automobiles pour les rendre moins compétitives par aux autres (à travers des péages, des limitations du stationnement, une réduction des vitesses ou autres instruments existants pour modérer la circulation automobile, voir ORFEUIL, GALLET, 1997). En effet, comme le rappelle Gabriel Dupuy, la dépendance automobile est d'abord liée au différentiel d'accessibilité entre l'automobiliste et le non-automobiliste (DUPUY, 2002) : la réduction de ce différentiel est un outil plus sûr que la recherche de la seule densité.

Cette notion pourrait également servir de critères d'évaluation d'une politique territoriale. Il s'agirait alors de calculer les accessibilités à un « coût carbone » donné en un certain nombre de

minutes depuis différents points. Il ne s'agit pas seulement de mesurer la quantité d'espace accessible en un certain nombre de minutes (ce qui serait simplement l'effet d'une augmentation des vitesses) mais de comparer l'évolution des « paniers de services » accessibles (nombre de commerces, services, emplois, etc.) en un temps donné et en une quantité donnée d'énergie. Cette évaluation par les accessibilités permettrait, dans le cadre d'un bilan climatique territorial, d'évaluer la part respective de l'urbanisme et des autres politiques sectorielles (bâtiment, transport, agriculture, industrie etc.) dans l'évolution des émissions de GES.

L'urbanisme ne peut pas avoir une influence directe sur les émissions de GES (dans la mesure où les individus peuvent avoir des comportements de gaspillage manifeste, même au cœur d'une grande ville avec un réseau de transport collectif très développé et dans un logement bien isolé...), mais peut jouer sur l'élasticité potentielle de la demande en énergie. Il n'existe pas de solutions de ville idéale sur le plan énergétique ; il y a un ensemble de solutions qui nous semblent pouvoir contribuer à faciliter des accessibilités peu émettrices de CO₂ aux ressources du territoire, qui tiennent autant à la planification de l'usage des sols qu'à la gestion de la mobilité.

Les possibles contributions de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire aux enjeux énergétiques et climatiques ont un coût élevé, par les politiques foncières qu'elles exigent, les investissements massifs dans les transports en commun qu'elles impliquent, etc. Trop élevé, dira l'économiste qui cherche le coût marginal de réduction de la tonne de carbone (PRUDHOMME, DIDIER, 2007). Evaluer ces investissements à la seule réduction monétarisable des externalités environnementales ne permet pas de prendre en compte tous leurs atouts, dira l'urbaniste, soucieux d'abord de qualité urbaine. En effet, les principes d'aménagement qui découlent des observations en matière de consommations énergétiques (renforcement des liaisons piétonnières, amélioration des réseaux de transports collectifs, plus grande imbrication des logements et des activités etc.) ont aussi des vertus dans les domaines social, environnemental ou économique.

Ainsi, si l'urbanisme et l'aménagement du territoire peuvent contribuer, modestement, à l'objectif de réduction des émissions, on ne peut réduire le débat sur la ville souhaitable à la seule question des externalités environnementales, encore moins à celle du seul carbone. Si la question climatique réinterroge la manière dont vivent les territoires, c'est l'occasion de repenser leur aménagement, non simplement pour renforcer leur efficacité environnementale, mais surtout pour contribuer à leur urbanité et au plaisir d'y vivre.

Bibliographie générale

AGUILERA, Anne, MADRE, Jean-Loup, MIGNOT, Dominique, « Métropolisation, formes urbaines et mobilité », *Les cahiers scientifiques du transport*, n°45, 2004, pp. 5-14.

ANTONI, Jean-Philippe, FLETY, Yann, VUIDEL, Gilles, SEDE-MARCEAU (de) Marie-Hélène, *Vers des indicateurs locaux de performance énergétique : les Étiquettes Énergétiques Territoriales*, Rapport de recherche ADEME, Laboratoire THÉMA UMR 6049 CNRS, Besançon, 2009, 48p.

ASCHER, François, « Effet de serre, changement climatique et capitalisme *cleantech* », *Esprit*, Février 2008, pp. 150-164.

ASSOCIATION DES ETUDES FONCIERES, *Où produire les énergies renouvelables ? Les prochaines compétitions pour l'espace*, Actes du colloque tenu à Paris le 23 octobre 2007, np.

ATELIER PARISIEN D'URBANISME, *Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes*, décembre 2007, 44 p.

BACCINI, Peter BRUNNER, Paul-H, *Metabolism of the Anthroposphere*, Berlin: Springer Verlag, 1991, 212 p.

BARLES, Sabine., *Mesurer la performance écologique des villes et des territoires : le métabolisme de Paris et de l'Île-de-France*, Rapport de recherche final pour le compte de la ville de Paris, 2007, 98 p

BEAUCIRE, Francis, « Le modèle de la ville compacte est-il importable en France ? », in *Le sens du mouvement*, Belin/Institut pour la ville en mouvement, 2004.

BEAUCIRE, Francis, *Enquête sur la notion et les pratiques d'écologie urbaine*, 1985, PIREN-CNRS, 1985.

BEAUVAIS, Jean-Marie « Prix réel des carburants et transports collectifs urbains : évolution 1970-2005 », *Transports Urbains*, mars 2008, n°112, pp. 3-8

BERTAUD, Alain, The spatial organization of the cities: deliberate outcome or unforeseen consequence?, Working Papers, World Bank, May 2004

BREHENY, Michael, The compact city and the transport energy consumption, *Transactions of the institute of British Geographers*, New series, Vol. 20, n° 1, 1995, pp. 81-101

BROUANT, Jean-Philippe, “Aménagement et sobriété énergétique”, in MARCOU, Gérard, WOLLMANN, Hellmut (dir.), *Les collectivités locales et l'énergie*, Annuaire des collectivités locales, 2007, pp. 49-62.

BROWN, Marilyn A., SOUTHWORTH, Franck, SARZYNSKI, Andréa, “The geography of metropolitan carbon footprints”, *Policy and Society*, 27, 2009, pp. 285-304

CAMAGNI, Roberto, *Principes et modèles de l'économie urbaine*, Paris, Economica, 1996, 382 p.

CASTEL Jean-Charles., 2005, « Existe-t-il des lois de la croissance urbaine ? », *note du CERTU*, http://www.observation-urbaine.certu.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/partie_2_cle57c9be.pdf, version du 04-11-2005

CENTRE DE RECHERCHE D'URBANISME, AGENCE POUR LES ECONOMIES D'ENERGIE, *L'énergie et la ville*, Colloque de Marly-le-Roi, 8-11 décembre 1975, Paris, CRU, 1976, 139 p.

CENTRE DE RECHERCHE D'URBANISME, AGENCE POUR LES ECONOMIES D'ENERGIE, *L'énergie et la ville*, Colloque de Marly-le-Roi, 8-11 décembre 1975, Paris, CRU, 1976, 139 p.

CERVERO, ROBERT, *Paradigm Shift: from Automobility to Accessibility Planning*, Working Paper, n° 677, University of California at Berkeley, October 1996

CHALINE, Claude, DUBOIS-MAURY, Jocelyne, *Energie et urbanisme*, PUF, Que-sais-Je ?, 1983, 127 p.

CLARK, Brett, YORK, Richard, « Carbon metabolism: Global capitalism, climate change and the biospheric risk? », *Theory and Society*, 2005, n°34, pp. 391-428.

COCHET, YVES, *Pétrole Apocalypse*, Fayard, 2008, 355 p.

COMMISSION EUROPEENNE, Livre vert sur l'environnement urbain, 1990

COUTARD, Olivier, « Imaginaire et développement des réseaux techniques. Les apports de l'histoire de l'électrification rurale en France et aux Etats-Unis », *Réseaux*, 2001, Vol. 19, n° 109, pp. 75-94

DARD, Philippe, Quand l'énergie se domestique ... Observations sur dix ans d'expériences et d'innovations thermiques dans l'habitat, Plan Construction, 1986, 175 p.

DE BOISSIEU, Christian, *Rapport du Groupe de travail « Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050 »*, Ministère de l'Economie, des Finances, de l'Industrie, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2006, 77 p.

DEREVELL, William, HISE, Greg (edited by), *Land of Sunshine, Environmental History of Metropolitan Los Angeles*, University of Pittsburgh Press, 2006, 350 p.

DESJARDINS, Xavier « Les chiffres des effets de la hausse du prix des carburants sur la mobilité des Américains. Le prix de l'essence, révélateur de tendances lourdes ? », *Transports Urbains*, décembre 2008, n° 114, pp. 34-35.

DESJARDINS, Xavier, « Peut-on habiter au vert quand le pétrole devient cher ? », *POUR*, février 2009, pp. 116-122

DEVALIERE, Isolde, « Comment prévenir la précarité énergétique ? », *Annales de la recherche urbaine*, 2007, n° 103, pp. 139-145.

DEYMIER, Ghislaine, NICOLAS, Jean-Pierre, 2005, « Modèles d'interaction entre transport et urbanisme : état de l'art et choix du modèle pour le projet SIMBAD », *Rapport intermédiaire n°1 du projet Simbad SIMuler les MoBilités pour une Agglomération Durable*, pour le compte de la DRAST.

DODMAN, David, « Blaming cities for climate change? An analysis of urban greenhouse gas emissions inventories » *Environment and Urbanization*, 2009, vol. 21, n° 1, 185-201.

DODSON, Jago, SIPE, Neil, "Oil vulnerability in the Australian City: Assessing socio-economic risks from higher urban fuel prices", *Urban Studies*, 2007, 44, pp. 37-62

DUPUY, Gabriel, « Cities and Automobile Dependence revisité : les contrariétés de la densité », *Revue d'économie régionale et urbaine*, n° 1, 2002, pp. 141-156.

DURET, Benoit, *et alii*, « Ecologie territoriale. Une aide à la définition d'une politique énergétique », *Annales de la recherche urbaine*, 2007, n° 103, pp. 73-78

EUROSTAT, *Economy wide material flow accounts and derived indicators - A methodological guide*, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 2001.

EWING, Reid, CERVERO, Robert, « Travel and the Built Environment – synthesis », *Transportation Research Record*, n° 1780, 2001, pp. 87-114.

FAUCHEUX, Sylvie, JOUMNI, Haitham, *Economie et politique des changements climatiques*, La Découverte, Coll. Repères, 128 p.

FOUCHIER, Vincent, *Les densités urbaines et le développement durable. Le cas de l'Ile-de-France et des villes nouvelles*, Editions du Secrétariat général du groupe central des villes nouvelles, 1997, 212 p.

FOUCHIER, Vincent, *Maîtriser l'étalement urbain : Une première évaluation des politiques menées dans quatre pays. (Angleterre, Norvège, Pays Bas, Hong Kong)*, 2001 Plus, Centre de prospective et de veille scientifique, Ministère de l'Équipement, du Transport et du Logement, 2001, 59 p.

FUJITA, Mahasisa, THISSE Jean-François, *Economics Agglomeration. Cities, Industrial Location and Regional Growth*, Cambridge University Press, Cambridge, 2002, 466 p.

GALLEZ, Caroline, HIVERT, Laurent, « Qui pollue où ? Analyse de terrain des consommations d'énergie et des émissions polluantes de la mobilité urbaine », *Transports Urbains*, n° 89, octobre-décembre 1995, pp. 15-22.

GALLEZ, Caroline, HIVERT, Laurent, *Mode d'emploi, synthèse méthodologique pour les études « budget-énergie-environnement des déplacements »*, Rapport INRETS, 1998, 85 p.

GIDDENS, Anthony, *The politics of climate change, National responses to the challenge of global warming*, Policy Network Paper, September 2008.

GILLI, Frédéric, « Pôles nourriciers et pôles spécialisés ; les transferts d'établissements dans la Région Urbaine de Paris », in D. Pumain et M.-F. Mattei (eds), *Données Urbaines, Tome 5*, 2007

GORDON, Peter, RICHARDSON, Harry W., “Are compact cities a desirable planning goal?”, *Journal of American Planning Association*, vol. 63, n° 1, 1997, pp. 95-106.

GRAZI, Fabio, VAN DEN BERGH, Jeroen C.J.M., "Spatial organization, transport and climate change: comparing instruments of spatial planning policy", *Ecological Economics*, 2008.

HALBERT L., 2004, "The intrametropolitan decentralization of business services in the Paris Region: Patterns, interpretation, Consequences", *Economic Geography*, 80, n°4, pp. 381-405.

HOLDEN, Erling, NORLAND, Ingrid, "Three challenges for the compact city as a sustainable urban form: household consumption of energy and transport in eight residential areas in Greater Oslo region", *Urban Studies*, Vol. 42, n° 12, Nov. 2005, pp. 2145-2166.

HUBBERT, King, « Nuclear Energy and the Fossil Fuels », American Petroleum Institute of Drilling and Production Practice, *Proceedings*, San Antonio, Texas, 1956, pp. 7-25

HURIOT, Jean-Marie, BOURDEAU-LEPAGE, Lise, *Economie des villes contemporaines*, Economica, 2009, 366 p.

HURIOT, Jean-Marie., 2004, « Concentration and dispersal of employment in French Cities », in RICHARDSON H. W., BAE C.H.C., *Urban Sprawl in Western Europe and United States*, Aldershot, Burlington, pp. 159-184.

ILlich, Ivan, *Energie et équité*, Le Seuil, Deuxième édition, 1976, 88 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, *Key World Energy Statistics*, 2008, 81 p.

LEFEVRE, Benoit, « Un modèle au service de l'articulation urbanisme-transport. Application à Bangalore, Inde », *Transports urbains*, n° 112, mars 2008, pp. 28-32.

LEFEVRE, Benoit, La soutenabilité environnementale des transports urbains dans les villes du Sud : le couple "transport-usage des sols" au cœur des dynamiques urbaines, Thèse, ENSPM, 2007, 429 p.

LEVINSON, David, M., KUMAR, Ajay, "Density and the journey to work", *Growth and change*, 1997, vol. 28, n° 2, pp. 147-172.

LEVY, Jacques, Urbanité et européanité, mesures, configurations et dynamiques de la ville en Europe, Paris, VILLEUROPE, 1995, 178 p.

MAIZIA, Mindjid, « L'énergétique urbaine et la morphologie des villes, L'analyse du bâti parisien », *Annales de la recherche urbaine*, n° 103, 2007, pp. 79-85

MARCOU, Gérard, WOLLMANN, Hellmut (dir.), *Les collectivités locales et l'énergie*, Annuaire des collectivités locales, 2007, 666 p.

MASSON, Sophie, « Interactions entre système de transport et système de localisation : De l'héritage des modèles traditionnels à l'apport des modèles interactifs de transport et d'occupation des sols », *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, n°33/98, 1998, 29 p.

MASSON, Sophie, « Principes et enseignements d'un modèle interactif de transport et d'urbanisation. Application à l'agglomération lyonnaise », *Recherche, transports, sécurité*, n° 82, 2004, pp. 65-83.

MATHIEU, Hervé, TILMONT, Michèle, *Etude sur les relations entre problèmes énergétiques et aménagement urbain*, Paris, CRU, 1978, 156 p.

MEEDDAT, « CO2 et Energie, France et monde », *Chiffres clés, Repères*, Edition 2009.

MERLIN Pierre, *Energie et environnement*, La Documentation Française, 2008, 188 p.

MEUNIE, André, POUYANNE, Guillaume, « Existe-t-il une courbe de Kuznets urbaine ? », Emissions polluantes dues aux déplacements dans 37 villes, *Les cahiers du GREThA*, n° 2007-04, avril 2007.

MICHEAU, Michel, « Etalement urbain et densité : état (provisoire) du débat », in IAURIF, *Les apports de la recherche urbaine, Aménagement et projet urbain*, 2003, pp. 29-57.

MORCHEOINE, Alain, BRESSE, Bernard, ORFEUIL, Jean-Pierre « Energie, environnement et déplacements urbains : quelques points de repère », *Transports urbains*, n° 89, octobre-décembre 1995, pp. 5-13.

MOTTE-BAUMVOL, Benjamin, MASSOT, Marie-Hélène, BYRD, Andrew, « Escaping car dependence in the outer suburbs of Paris », *Urban Studies* (article accepté, à paraître).

NAIZOT, Florence, GREGOIRE, Patrice, « Les ménages acteurs des émissions de gaz à effet de serre », *IFEN*, Les 4 pages, Novembre-décembre 2006, numéro 115.

NEUMAN, Michael, "The compact city Fallacy", *Journal of Planning Education and Research*, 2005, pp. 11-25.

NEWMAN, Peter, KENWORTHY, Jeffrey, *Cities and Automobile Dependence: a sourcebook*, Gower, Adelshot and Brookfields, Victoria, 1989.

NEWMAN, Peter, KENWORTHY, Jeffrey, VINTILA, Peter, « Can we overcome automobile dependence? Physical Planning in an Age of Urban Cynism? », *Cities*, vol. 12, n° 1, février 1995, pp. 53-65.

NGHIEM, Thanh, « Métabolisme territorial et développement durable », *Territoires 2030*, décembre 2005, n°2, pp. 35-46

NICOLAS, Jean-Pierre, LEDUC, Delphine, VERRY, Damien, « L'empreinte écologique de la mobilité des lyonnais : avantages et limites de l'outil appliqué à la mobilité des habitants d'une agglomération », *Communication lors du colloque EMUE*, 18-19 mai 2006, UTC et UMR AUS.

OGAWA H., FUJITA M. « Equilibrium land use patterns in a non-monocentric city », *Journal of Regional Science* n°20, 1980, pp. 455-475.

ORFEUIL Jean-Pierre, POLACCHINI Annarita, « Les dépenses des ménages franciliens pour le logement et pour les déplacements », *Recherche Transport Sécurité*, n° 63, avril-juin 1999, pp. 31-46.

ORFEUIL, Jean-Pierre, « Déplacements, contrainte énergétique et effets de serre : quelques repères pour un débat », *Note de recherche du CRETEIL*, Université Paris 12, 2008.

ORFEUIL, Jean-Pierre, GALLEZ, Caroline, Politiques locales et maîtrise des déplacements en automobile, une analyse des potentiels de régulation, INRETS, décembre 1997.

ORFEUIL, Jean-Pierre, MASSOT, Marie-Hélène, « La consommation énergétique doit-elle réguler la ville ou les véhicules ? Mobilités urbaines et réalisme écologique », *Annales de la recherche urbaine*, 2007, n° 103, pp. 18-29

ORSELLI, Jean, *Economies et substitutions d'énergie dans les bâtiments*, Conseil général des Ponts et Chaussées, Rapport n° 004831-01, février 2008.

PAQUOT, Thierry, « La ville comme énergie, philosophie et littérature, 1880-1920 », *Les Annales de la recherche urbaine*, n° 103, 2007, pp.198-204

PELLETIER Philippe, *Amélioration énergétique du parc de logements existants*, Rapport, ANAH, Tome 1, 2007, 101 p.

PERMANA, A.S., PERERA, R., KUMAR, S. “Understanding energy consumption pattern of households in different development forms: A comparative study in Bandung City, Indonesia”, *Energy Policy*, 36 (2008), pp. 4287-4297.

PETERSON, Thomas D., ROSE Adam Z, “Reducing conflicts between climate policy and energy policy in the US: the important role of the states”, *Energy Policy*, 34, 2006, pp. 619-631.

PLATEAU, Claire, « Localisation résidentielle et émission des gaz à effet de serre en Ile-de-France », *Les cahiers de l'institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France*, 2008, n°147, pp. 169-173

PLATT, Harold P., *Shock Cities, The Environmental Transformation and Reform of Manchester and Chicago*, The Chicago University Press, 2005, 628 p.

POUYANNE, Guillaume, “Des avantages comparatifs de la ville compacte à l'interaction forme urbaine- mobilité. Méthodologie et premiers résultats », *Les Cahiers scientifiques du Transport*, n° 45, 2004, pp. 49-82.

PRUD'HOMME, Rémy, DIDIER, Michel, *Infrastructures de transport, mobilité et croissance*, La Documentation française, 2007, 241 p.

QUETELARD, Bernard, « Du nouveau dans le partage modal », *Transports urbains*, n°112, mars 2008, pp. 9-12

RAUX, Charles, TRAISNEL, Jean-Pierre, « Habitat et déplacements dans les aires urbaines », *Annales de la recherche urbaine*, n° 103, 2007, pp. 30-41

ROCARD, Michel (coord.), *Rapport de la conférence des experts et de la table ronde sur la contribution Climat et Energie*, MEEDDM, MEIE, juillet 2009, 83 p.

ROMERO LANKAO, Patricia, « Are we missing the point? Particularities of urbanization sustainability and carbon emissions in Latin American cities », *Environment and Urbanization*, 2007, Vol. 19, pp. 159-175.

ROSA, Eugene E., MACHLIS, Gary, E., KEATING, Kenneth M., "Energy and society", *Annual Review of Sociology*, 1988, 14, pp. 149-72.

ROUDIL, Nadine, « Artisans et énergies renouvelables », *Annales de la recherche urbaine*, n° 103, 2007, pp. 102-113

ROUX, Jean-Michel, « Éloge de la densité : leçon de morale ou projet urbain ? », *Urbanisme*, 2008, n° 361

SENECAL, G., HAF, R., HAMEL, P.J., POITRAS, C., VACHON, N., "Forme urbaine, qualité de vie, environnements naturels et construits. Éléments de réflexion et test de mesure pour la région métropolitaine de Montréal », *Cahiers de géographie du Québec*, Volume 49, numéro 136, avril 2005, pp. 19-43

SOCOLOW, R. H., *Saving energy in the Home: Princeton's Experiment at Twin Rivers*, Cambridge, Mass: Ballinger, 1978

SOUAMI, Taoufik, « L'intégration des technologies énergétiques dans l'action urbaine », *Annales de la recherche urbaine*, n° 103, 2007, pp. 6-17.

STEEMERS, Koen, "Energy and the City: density, building and transport", *Energy and Building*, n° 35, 2003, pp. 3-14

SYROTA, Jean, *Les perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050*, Rapport d'orientation, Centre d'analyse stratégique, 2007, 130 p.

TALLEN, Emily, CLIFF, Elis, "Beyond Relativism: Reclaiming the Search for Good City Form", *Journal of Planning Education and Research*, 2000, pp. 36-49

THEYS, Jacques, « Scénarios pour une ville post-carbone », *Constructif*, n° 23, juillet 2009.

TRAISNEL, Jean-Pierre, « Habitat et développement durable, Bilan rétrospectif et prospectif », Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement, *Les Cahiers du CLIP*, Numéro 13, Avril 2001.

WEGENER, M., 1994, « Operational Urban Models : state of the art », *Journal of the American Planning Association*, Vol. 60, N°1, Winter, pp. 17-29

WEGENER, M., 2004, « Overview of land-use transport models », Chapter 9 in D. A. HENSHER and K. BUTTON (Eds.), *Transport Geography and Spatial Systems, Handbook 5 of the Handbook in Transport*. Pergamon/Elsevier Science, Kidlington, UK, pp. 127-146

WIEL, Marc, « Comment construire une ville cohérente ? », *Etudes foncières*, mars-avril 2009, pp. 12-17.

WIEL, Marc, *Pour planifier les villes autrement*, L'Harmattan, coll. Villes et Entreprises, 2007, 242 p.

WILLIAMS, Katie, BURTON, Elizabeth, JENKS, Mike, *Achieving sustainable Urban Form*, Londres, Spon Press, 2000, XII-388 p.

WOLKOWITSCH, Maurice, « Transport et énergie », *Annales de géographie*, n° 501, sept-oct. 1981, pp. 535-559

Bibliographie par partie

Bibliographie de l'Introduction

ASSOCIATION DES ETUDES FONCIERES, *Où produire les énergies renouvelables ? Les prochaines compétitions pour l'espace*, Actes du colloque tenu à Paris le 23 octobre 2007, np.

COCHET, YVES, *Pétrole Apocalypse*, Fayard, 2008, 355 p.

COUTARD, Olivier, « Imaginaire et développement des réseaux techniques. Les apports de l'histoire de l'électrification rurale en France et aux Etats-Unis », *Réseaux*, 2001, Vol. 19, n° 109, pp. 75-94

DE BOISSIEU, Christian, *Rapport du Groupe de travail « Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050 »*, Ministère de l'Economie, des Finances, de l'Industrie, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2006, 77 p.

FAUCHEUX, Sylvie, JOUMNI, Haitham, *Economie et politique des changements climatiques*, La Découverte, Coll. Repères, 128 p.

HUBBERT, King, « Nuclear Energy and the Fossil Fuels », American Petroleum Institute of Drilling and Production Practice, *Proceedings*, San Antonio, Texas, 1956, pp. 7-25

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, *Key World Energy Statistics*, 2008, 81 p.

MAIZIA, Mindjid, « L'énergétique urbaine et la morphologie des villes, L'analyse du bâti parisien », *Annales de la recherche urbaine*, n° 103, 2007, pp. 79-85

MEEDDAT, « CO2 et Energie, France et monde », *Chiffres clés, Repères*, Edition 2009.

MERLIN Pierre, *Energie et environnement*, La Documentation Française, 2008, 188 p.

MORCHEOINE, Alain, BRESSE, Bernard, ORFEUIL, Jean-Pierre « Energie, environnement et déplacements urbains : quelques points de repère », *Transports urbains*, n° 89, octobre-décembre 1995, pp. 5-13.

NAIZOT, Florence, GREGOIRE, Patrice, « Les ménages acteurs des émissions de gaz à effet de serre », *IFEN*, Les 4 pages, Novembre-décembre 2006, numéro 115.

ORSELLI, Jean, *Economies et substitutions d'énergie dans les bâtiments*, Conseil général des Ponts et Chaussées, Rapport n° 004831-01, février 2008.

PELLETIER Philippe, *Amélioration énergétique du parc de logements existants*, Rapport, ANAH, Tome 1, 2007, 101 p.

SOUAMI, Taoufik, « L'intégration des technologies énergétiques dans l'action urbaine », *Annales de la recherche urbaine*, n° 103, 2007, pp. 6-17.

SYROTA, Jean, *Les perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050*, Rapport d'orientation, Centre d'analyse stratégique, 2007, 130 p.

TRAISNEL, Jean-Pierre, « Habitat et développement durable, Bilan rétrospectif et prospectif », Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement, *Les Cahiers du CLIP*, Numéro 13, Avril 2001.

Bibliographie de la 1^{ère} partie

ATELIER PARISIEN D'URBANISME, *Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes*, décembre 2007, 44 p.

BACCINI, Peter BRUNNER, Paul-H, *Metabolism of the Anthroposphere*, Berlin: Springer Verlag, 1991, 212 p.

BARLES, Sabine., *Mesurer la performance écologique des villes et des territoires : le métabolisme de Paris et de l'Île-de-France*, Rapport de recherche final pour le compte de la ville de Paris, 2007, 98 p

BEAUCIRE, Francis, *Enquête sur la notion et les pratiques d'écologie urbaine*, 1985, PIREN-CNRS, 1985.

DODMAN, David, « Blaming cities for climate change? An analysis of urban greenhouse gas emissions inventories » *Environment and Urbanization*, 2009, vol. 21, n° 1, 185-201.

DURET, Benoit, *et alii*, « Ecologie territoriale. Une aide à la définition d'une politique énergétique », *Annales de la recherche urbaine*, 2007, n° 103, pp. 73-78

EUROSTAT, *Economy wide material flow accounts and derived indicators - A methodological guide*, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 2001.

GALLEZ, Caroline, HIVERT, Laurent, Mode d'emploi, synthèse méthodologique pour les études « budget-énergie-environnement des déplacements », Rapport INRETS, 1998, 85 p.

NICOLAS, Jean-Pierre, LEDUC, Delphine, VERRY, Damien, « L'empreinte écologique de la mobilité des lyonnais : avantages et limites de l'outil appliqué à la mobilité des habitants d'une agglomération », *Communication lors du colloque EMUE*, 18-19 mai 2006, UTC et UMR AUS.

NGHIEM, Thanh, « Métabolisme territorial et développement durable », *Territoires 2030*, décembre 2005, n°2, pp. 35-46

ROCARD, Michel (coord.), *Rapport de la conférence des experts et de la table ronde sur la contribution Climat et Énergie*, MEEDDM, MEIE, juillet 2009, 83 p.

Bibliographie de la 2^{ème} partie

➤ Sciences sociales, territoire et énergie

BROUANT, Jean-Philippe, "Aménagement et sobriété énergétique", in MARCOU, Gérard, WOLLMANN, Hellmut (dir.), *Les collectivités locales et l'énergie*, Annuaire des collectivités locales, 2007, pp. 49-62.

CENTRE DE RECHERCHE D'URBANISME, AGENCE POUR LES ECONOMIES D'ENERGIE, *L'énergie et la ville*, Colloque de Marly-le-Roi, 8-11 décembre 1975, Paris, CRU, 1976, 139 p.

CHALINE, Claude, DUBOIS-MAURY, Jocelyne, *Énergie et urbanisme*, PUF, Que-sais-Je ?, 1983, 127 p.

CLARK, Brett, YORK, Richard, « Carbon metabolism: Global capitalism, climate change and the biospheric risk? », *Theory and Society*, 2005, n°34, pp. 391-428.

COMMISSION EUROPEENNE, Livre vert sur l'environnement urbain, 1990

DARD, Philippe, Quand l'énergie se domestique ... Observations sur dix ans d'expériences et d'innovations thermiques dans l'habitat, Plan Construction, 1986, 175 p.

DEREVELL, William, HISE, Greg (edited by), *Land of Sunshine, Environmental History of Metropolitan Los Angeles*, University of Pittsburgh Press, 2006, 350 p.

DEVALIERE, Isolde, « Comment prévenir la précarité énergétique ? », *Annales de la recherche urbaine*, 2007, n° 103, pp. 139-145.

FAUCHEUX, Sylvie, JOUMNI, Haitham, *Economie et politique des changements climatiques*, La Découverte, Coll. Repères, 128 p.

GIDDENS, Anthony, The politics of climate change, National responses to the challenge of global warming, Policy Network Paper, September 2008.

ILLICH, Ivan, *Energie et équité*, Le Seuil, Deuxième édition, 1976, 88 p.

LEVY, Jacques, Urbanité et européanité, mesures, configurations et dynamiques de la ville en Europe, Paris, VILLEUROPE, 1995, 178 p.

MAIZIA, Mindjid, « L'énergétique urbaine et la morphologie des villes, L'analyse du bâti parisien », *Annales de la recherche urbaine*, n° 103, 2007, pp. 79-85

MARCOU, Gérard, WOLLMANN, Hellmut (dir.), *Les collectivités locales et l'énergie*, Annuaire des collectivités locales, 2007, 666 p.

MATHIEU, Hervé, TILMONT, Michèle, Etude sur les relations entre problèmes énergétiques et aménagement urbain, Paris, CRU, 1978, 156 p.

NEWMAN, Peter, KENWORTHY, Jeffrey, *Cities and Automobile Dependence: a sourcebook*, Gower, Adelshot and Brookfields, Victoria, 1989.

NEWMAN, Peter, KENWORTHY, Jeffrey, VINTILA, Peter, « Can we overcome automobile dependence? Physical Planning in an Age of Urban Cynism? », *Cities*, vol. 12, n° 1, février 1995, pp. 53-65.

PAQUOT, Thierry, « La ville comme énergie, philosophie et littérature, 1880-1920 », *Les Annales de la recherche urbaine*, n° 103, 2007, pp.198-204

PLATT, Harold P., Shock Cities, The Environmental Transformation and Reform of Manchester and Chicago, The Chicago University Press, 2005, 628 p.

PETERSON, Thomas D., ROSE Adam Z, "Reducing conflicts between climate policy and energy policy in the US: the important role of the states", *Energy Policy*, 34, 2006, pp. 619-631.

POUYANNE, Guillaume, «Des avantages comparatifs de la ville compacte à l'interaction forme urbaine- mobilité. Méthodologie et premiers résultats », *Les Cahiers scientifiques du Transport*, n° 45, 2004, pp. 49-82.

ROMERO LANKAO, Patricia, « Are we missing the point? Particularities of urbanization sustainability and carbon emissions in Latin American cities », *Environment and Urbanization*, 2007, Vol. 19, pp. 159-175.

ROSA, Eugene E., MACHLIS, Gary, E., KEATING, Kenneth M., «Energy and society», *Annual Review of Sociology*, 1988, 14, pp. 149-72.

ROUDIL, Nadine, « Artisans et énergies renouvelables », *Annales de la recherche urbaine*, n° 103, 2007, pp. 102-113

ROUX, Jean-Michel, « Éloge de la densité : leçon de morale ou projet urbain ? », *Urbanisme*, 2008, n° 361

SOCLOW, R. H., *Saving energy in the Home: Princeton's Experiment at Twin Rivers*, Cambridge, Mass: Ballinger, 1978

- Modélisation économique et modélisation du lien entre organisation territoriale, énergie et GES

CASTEL Jean-Charles., 2005, « Existe-t-il des lois de la croissance urbaine ? », *note du CERTU*, http://www.observation-urbaine.certu.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/partie_2_cle57c9be.pdf, version du 04-11-2005

CAMAGNI, Roberto, *Principes et modèles de l'économie urbaine*, Paris, Economica, 1996, 382 p.

DEYMIER, Ghislaine, NICOLAS, Jean-Pierre, 2005, « Modèles d'interaction entre transport et urbanisme : état de l'art et choix du modèle pour le projet SIMBAD », *Rapport intermédiaire n°1 du projet Simbad SIMuler les MoBilités pour une Agglomération Durable*, pour le compte de la DRAST.

FUJITA, Mahasisa, THISSE Jean-François, *Economics Agglomeration. Cities, Industrial Location and Regional Growth*, Cambridge University Press, Cambridge, 2002, 466 p.

GILLI, Frédéric, « Pôles nourriciers et pôles spécialisés ; les transferts d'établissements dans la Région Urbaine de Paris », in D. Pumain et M.-F. Mattei (eds), *Données Urbaines, Tome 5*, 2007

GRAZI, Fabio, VAN DEN BERGH, Jeroen C.J.M., "Spatial organization, transport and climate change: comparing instruments of spatial planning policy", *Ecological Economics*, 2008.

HALBERT L., 2004, "The intrametropolitan decentralization of business services in the Paris Region: Patterns, interpretation, Consequences", *Economic Geography*, 80, n°4, pp. 381-405.

HURIOT, Jean-Marie., 2004, « Concentration and dispersal of employment in French Cities», in RICHARDSON H. W., BAE C.H.C., *Urban Sprawl in Western Europe and United States*, Aldershot, Burlington, pp. 159-184.

HURIOT, Jean-Marie, BOURDEAU-LEPAGE, Lise, *Economie des villes contemporaines*, Economica, 2009, 366 p.

LEFEVRE, Benoit, « Un modèle au service de l'articulation urbanisme-transport. Application à Bangalore, Inde », *Transports urbains*, n° 112, mars 2008, pp. 28-32.

LEFEVRE, Benoit, La soutenabilité environnementale des transports urbains dans les villes du Sud : le couple "transport-usage des sols" au cœur des dynamiques urbaines, Thèse, ENSPM, 2007, 429 p.

MASSON, Sophie, « Interactions entre système de transport et système de localisation : De l'héritage des modèles traditionnels à l'apport des modèles interactifs de transport et d'occupation des sols », *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, n°33/98, 1998, 29 p.

MASSON, Sophie, « Principes et enseignements d'un modèle interactif de transport et d'urbanisation. Application à l'agglomération lyonnaise », *Recherche, transports, sécurité*, n° 82, 2004, pp. 65-83.

MEUNIE, André, POUYANNE, Guillaume, Existe-t-il une courbe de Kuznets urbaine ?", Emissions polluantes dues aux déplacements dans 37 villes, Les cahiers du GREThA, n° 2007-04, avril 2007.

OGAWA H., FUJITA M. « Equilibrium land use patterns in a non-monocentric city », *Journal of Regional Science* n°20, 1980, pp. 455-475.

WEGENER, M., 1994, « Operational Urban Models : state of the art », *Journal of the American Planning Association*, Vol. 60, N°1, Winter, pp. 17-29

WEGENER, M., 2004, « Overview of land-use transport models », Chapter 9 in D. A. HENSHER and K. BUTTON (Eds.), *Transport Geography and Spatial Systems, Handbook 5 of the Handbook in Transport*. Pergamon/Elsevier Science, Kidlington, UK, pp. 127-146

➤ Grands résultats

AGUILERA, Anne, MADRE, Jean-Loup, MIGNOT, Dominique, “Métropolisation, formes urbaines et mobilité », *Les cahiers scientifiques du transport*, n°45, 2004, pp. 5-14.

BERTAUD, Alain, The spatial organization of the cities: deliberate outcome or unforeseen consequence?, Working Papers, World Bank, May 2004

BREHENY, Michael, The compact city and the transport energy consumption, *Transactions of the institute of British Geographers*, New series, Vol. 20, n° 1, 1995, pp. 81-101

BROWN, Marilyn A., SOUTHWORTH, Franck, SARZYNSKI, Andréa, “The geography of metropolitan carbon footprints”, *Policy and Society*, 27, 2009, pp. 285-304

EWING, Reid, CERVERO, Robert, « Travel and the Built Environment – synthesis », *Transportation Research Record*, n° 1780, 2001, pp. 87-114.

FOUCHIER, Vincent, *Les densités urbaines et le développement durable. Le cas de l’Ile-de-France et des villes nouvelles*, Editions du Secrétariat général du groupe central des villes nouvelles, 1997, 212 p.

FOUCHIER, Vincent, Maîtriser l'étalement urbain : Une première évaluation des politiques menées dans quatre pays. (Angleterre, Norvège, Pays Bas, Hong Kong), 2001 Plus, Centre de prospective et de veille scientifique, Ministère de l'Équipement, du Transport et du Logement, 2001, 59 p.

GALLEZ, Caroline, HIVERT, Laurent, « Qui pollue où ? Analyse de terrain des consommations d'énergie et des émissions polluantes de la mobilité urbaine », *Transports Urbains*, n° 89, octobre-décembre 1995, pp. 15-22.

GORDON, Peter, RICHARDSON, Harry W., “Are compact cities a desirable planning goal?”, *Journal of American Planning Association*, vol. 63, n° 1, 1997, pp. 95-106.

HOLDEN, Erling, NORLAND, Ingrid, “Three challenges for the compact city as a sustainable urban form: household consumption of energy and transport in eight residential areas in Greater Oslo region”, *Urban Studies*, Vol. 42, n° 12, Nov. 2005, pp. 2145-2166.

LEVINSON, David, M., KUMAR, Ajay, “Density and the journey to work”, *Growth and change*, 1997, vol. 28, n° 2, pp. 147-172.

MICHEAU, Michel, « Etalement urbain et densité : état (provisoire) du débat », in IAURIF, *Les apports de la recherche urbaine, Aménagement et projet urbain*, 2003, pp. 29-57.

NEUMAN, Michael, “The compact city Fallacy”, *Journal of Planning Education and Research*, 2005, pp. 11-25.

NEWMAN, Peter, KENWORTHY, Jeffrey, *Cities and Automobile Dependence: a sourcebook*, Gower, Adelshot and Brookfields, Victoria, 1989.

NEWMAN, Peter, KENWORTHY, Jeffrey, VINTILA, Peter, « Can we overcome automobile dependence? Physical Planning in an Age of Urban Cynism? », *Cities*, vol. 12, n° 1, février 1995, pp. 53-65.

ORFEUIL Jean-Pierre, POLACCHINI Annarita, « Les dépenses des ménages franciliens pour le logement et pour les déplacements », *Recherche Transport Sécurité*, n° 63, avril-juin 1999, pp. 31-46.

PERMANA, A.S., PERERA, R., KUMAR, S. “Understanding energy consumption pattern of households in different development forms: A comparative study in Bandung City, Indonesia”, *Energy Policy*, 36 (2008), pp. 4287-4297.

PLATEAU, Claire, « Localisation résidentielle et émission des gaz à effet de serre en Ile-de-France », *Les cahiers de l'institut d'aménagement et d'urbanisme de la région Ile-de-France*, 2008, n°147, pp. 169-173

RAUX, Charles, TRAISNEL, Jean-Pierre, « Habitat et déplacements dans les aires urbaines », *Annales de la recherche urbaine*, n° 103, 2007, pp. 30-41

SENECAL, G., HAF, R., HAMEL, P.J., POITRAS, C., VACHON, N., “Forme urbaine, qualité de vie, environnements naturels et construits. Éléments de réflexion et test de mesure pour la région métropolitaine de Montréal », *Cahiers de géographie du Québec*, Volume 49, numéro 136, avril 2005, pp. 19-43

STEEMERS, Koen, “Energy and the City: density, building and transport”, *Energy and Building*, n° 35, 2003, pp. 3-14

TALLEN, Emily, CLIFF, Elis, "Beyond Relativism: Reclaiming the Search for Good City Form", *Journal of Planning Education and Research*, 2000, pp. 36-49

THEYS, Jacques, « Scénarios pour une ville post-carbone », *Constructif*, n° 23, juillet 2009.

WIEL, Marc, *Pour planifier les villes autrement*, L'Harmattan, coll. Villes et Entreprises, 2007, 242 p.

WILLIAMS, Katie, BURTON, Elizabeth, JENKS, Mike, *Achieving sustainable Urban Form*, Londres, Spon Press, 2000, XII-388 p.

Bibliographie de la 3^{ème} Partie

ANTONI, Jean-Philippe, FLETY, Yann, VUIDEL, Gilles, SEDE-MARCEAU (de) Marie-Hélène, *Vers des indicateurs locaux de performance énergétique : les Étiquettes Énergétiques Territoriales*, Rapport de recherche ADEME, Laboratoire THÉMA UMR 6049 CNRS, Besançon, 2009, 48p.

ASCHER, François, « Effet de serre, changement climatique et capitalisme *cleantech* », *Esprit*, Février 2008, pp. 150-164.

BEAUCIRE, Francis, « Le modèle de la ville compacte est-il importable en France ? », in *Le sens du mouvement*, Belin/Institut pour la ville en mouvement, 2004.

BEAUVAIS, Jean-Marie « Prix réel des carburants et transports collectifs urbains : évolution 1970-2005 », *Transports Urbains*, mars 2008, n°112, pp. 3-8

CENTRE DE RECHERCHE D'URBANISME, AGENCE POUR LES ECONOMIES D'ENERGIE, *L'énergie et la ville*, Colloque de Marly-le-Roi, 8-11 décembre 1975, Paris, CRU, 1976, 139 p.

CERVERO, ROBERT, *Paradigm Shift: from Automobility to Accessibility Planning*, Working Paper, n° 677, University of California at Berkeley, October 1996

DE BOISSIEU, Christian, *Rapport du Groupe de travail « Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050 »*, Ministère de l'Economie, des Finances, de l'Industrie, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 2006, 77 p.

DESJARDINS, Xavier « Les chiffres des effets de la hausse du prix des carburants sur la mobilité des Américains. Le prix de l'essence, révélateur de tendances lourdes ? », *Transports Urbains*, décembre 2008, n° 114, pp. 34-35.

DESJARDINS, Xavier, «Peut-on habiter au vert quand le pétrole devient cher ? », *POUR*, février 2009, pp. 116-122

DODSON, Jago, SIPE, Neil, “Oil vulnerability in the Australian City: Assessing socio-economic risks from higher urban fuel prices”, *Urban Studies*, 2007, 44, pp. 37-62

DUPUY, Gabriel, « Cities and Automobile Dependence revisité : les contrariétés de la densité », *Revue d'économie régionale et urbaine*, n° 1, 2002, pp. 141-156.

MATHIEU, Hervé, TILMONT, Michèle, Etude sur les relations entre problèmes énergétiques et aménagement urbain, Paris, CRU, 1978, 156 p.

MERLIN Pierre, *Energie et environnement*, La Documentation Française, 2008, 188 p.

MOTTE-BAUMVOL, Benjamin, MASSOT, Marie-Hélène, BYRD, Andrew, « Escaping car dependance in the outer suburbs of Paris », *Urban Studies* (article accepté, à paraître).

ORFEUIL, Jean-Pierre, MASSOT, Marie-Hélène, « La consommation énergétique doit-elle réguler la ville ou les véhicules ? Mobilités urbaines et réalisme écologique », *Annales de la recherche urbaine*, 2007, n° 103, pp. 18-29

ORFEUIL, Jean-Pierre, « Déplacements, contrainte énergétique et effets de serre : quelques repères pour un débat », *Note de recherche du CRETEIL*, Université Paris 12, 2008.

ORFEUIL, Jean-Pierre, GALLET, Caroline, Politiques locales et maîtrise des déplacements en automobile, une analyse des potentiels de régulation, INRETS, décembre 1997.

PRUD'HOMME, Rémy, DIDIER, Michel, *Infrastructures de transport, mobilité et croissance*, La Documentation française, 2007, 241 p.

QUETELARD, Bernard, « Du nouveau dans le partage modal », *Transports urbains*, n°112, mars 2008, pp. 9-12

WIEL, Marc, « Comment construire une ville cohérente ? », *Etudes foncières*, mars-avril 2009, pp. 12-17.

WOLKOWITSCH, Maurice, « Transport et énergie », *Annales de géographie*, n° 501, sept-oct. 1981, pp. 535-559

Liste des entretiens réalisés

➤ Collectivités :

Nantes Métropole : **Alban MALLET**, Chargé de mission développement durable

Metro de Grenoble : Hélène POIMBOEUF, Responsable du pôle environnement

Ville de Lille : **Alban AUBERT** et **Richard JULIAN** - chargés de mission, Direction Développement Durable

➤ Bureau d'étude :

Explicit : **Fouzi BENKHELIFA** et **Sébastien FENET** - directeurs associés, **Damien HUET** - ingénieur d'études

➤ Chercheurs :

Laurent HIVERT - INRETS, **Marc Wiel** - Urbaniste

➤ Autres échanges dans le cadre de l'animation d'un séminaire « *Forme urbaine, politique d'aménagement et énergie* » de l'IHEDATE :

- **Franck FAUCHEUX**, adjoint au chef du bureau de l'aménagement opérationnel durable à la sous-direction de l'aménagement durable du MEEDDAT;
- **Thierry ARCHAMBAULT**, président délégué de la Chambre syndicale internationale de l'automobile et du motorcycle
- **Guy ROBIN**, chargé de mission, bureau de la planification urbaine et rurale et du cadre de vie, sous-direction de la qualité du cadre de vie, MEEDDAT
- **Jonathan SEBBANE**, adjoint au chef du bureau des grandes opérations d'urbanisme, sous-direction de l'aménagement durable, MEEDDAT

Annexe : les modalités de calcul des émissions selon les types de source

Cette annexe est principalement réalisée d'après le document « Etude sur l'observation des gaz à effet de serre » réalisée avec le soutien de la région Nord-Pas-de-Calais¹²

Le calcul des émissions énergétiques

Le calcul des émissions liées à la production d'énergie (exemple de l'électricité)

Le calcul des émissions liées à l'énergie se déduit de la consommation énergétique par type de combustible que l'on multiplie par des facteurs de conversion. Les facteurs de conversion sont en général issus de la bibliographie internationale sauf pour l'électricité puisqu'en fonction du type de production du pays, les émissions par KWh diffèrent.

Pour le calcul des émissions issues de la consommation d'électricité, deux méthodes peuvent être employées. La première prend en compte les combustibles utilisés pour la production d'électricité, la deuxième utilise le facteur moyen de contenu en CO₂ par KWh par secteur pour le calcul. En France, par exemple le fait que 80% de la production soit issue du nucléaire donne un contenu moyen en CO₂ pour l'électricité plus faible (120 gCO₂/kWh) que pour la moyenne européenne (environ 340 gCO₂/kWh) où l'utilisation de centrales thermiques approvisionnées en combustibles fossiles est plus répandue.

Pour la deuxième méthode, les chiffres ci-dessous peuvent être utilisés en France pour calculer par secteur, les émissions liées à la consommation d'électricité par secteur.

¹² <http://www.fedarene.org/publications/Projects/GHG-Observatories/home.htm>

**Indicateurs de contenu en CO₂ de l'électricité consommée en France
(en g de CO₂/kWh_e)**

indicateurs détaillés	Référence (valeur moyenne)	à titre indicatif : plages de variation	indicateurs simplifiés	
chauffage+ pompes de circ.	180	129 à 261	180	Chauffage
éclairage résidentiel	116	93 à 151	100	Eclairage
éclairage tertiaire	80	64 à 88		
éclairage publique et industriel	109	85 à 134		
usages résidentiels : cuisson	82	66 à 93	60	Usages intermittents
usages résidentiels : lavage	79	63 à 88		
usages résidentiels : produits bruns	62	50 à 81		
usages tertiaires : autres	52	41 à 77		
usages industriels (hors éclairage)	55	38 à 86		
usages résidentiels : ECS	40	20 à 72	40	Usages "en base"
usages résidentiels : froid	40			
usages résidentiels : autres	39			
usages tertiaires : climatisation	37			
agriculture-transport	38			
autres (BTP, recherche, armée, etc.)	35			

Source : ADEME, EDF, 2004

Comme on l'a vu dans la première partie du présent rapport, deux approches peuvent être utilisées (consommateur/producteur) et quand elles le sont en général, elles portent sur les production/consommation d'énergie. Ainsi par exemple, lorsque l'on calcule les émissions selon la deuxième méthode (par secteur de consommation) il est plus facile ensuite d'appliquer l'approche consommateur, sauf si on utilise les données de production que l'on désagrégé pour obtenir la répartition des consommations.

Un exemple de calcul des émissions suivant l'approche consommateur, et les différences entre cet inventaire Carbon Trust et l'inventaire national des émissions atmosphériques (NAEI) réalisé par NETCEN pour l'Angleterre, le Pays de Galles, l'Ecosse et le Pays de Galles : Dans ce rapport, les émissions sont attribuées au consommateur final notamment pour tout ce qui concerne l'énergie. En effet, les émissions de l'électricité exportée ne sont pas attribuées au Pays de Galles par exemple mais à l'Angleterre. Cependant contrairement au WWF, il n'est pas précisé ce qu'il en est des marchandises. Il semble qu'ils n'attribuent cela qu'au producteur et non au consommateur. Cela représente donc un compromis entre les deux approches.

L'étude Carbon Trust attribue le CO₂ associé à l'électricité au point de consommation plutôt qu'au point de génération. Bien qu'attribuer au point de génération soit cohérent avec la directive IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control / Prévention et contrôle intégrés de la pollution), il est reconnu que cela ne reflète pas vraiment la contribution réelle des Pays de Galles aux émissions de GES du Royaume-Uni. Il y environ 2 Mt CO₂eq de différence entre cette étude et le NAEI (cf. figure ci-dessous).

Au sein des inventaires et selon les secteurs, certaines émissions sont supérieures pour l'étude Carbon Trust, d'autres supérieures pour le NAEI. Mais globalement, elles sont plus grandes pour le NAEI de 2.1 Mt CO₂éq, reflétant principalement les approches différentes prises pour traiter les émissions liées à l'électricité.

De plus si on incluait au NAEI :

- une plus grande contribution positive de l'UTCF
- le CO₂ énergétique du transport maritime et aérien (Le NAEI n'a attribué aux différentes régions ni d'énergie consommée, ni d'émissions de CO₂ à l'aviation civile et au transport maritime),
- une augmentation des émissions des procédés industriels pour refléter leur sous-estimation
- une augmentation de la contribution du méthane et protoxyde d'azote pour inclure la part que le NAEI laisse non attribuée,

Alors le bilan NAEI serait de 48-49 Mt CO₂éq au lieu de 46.41 Mt CO₂éq, ce qui représente une différence encore plus importante.

Comparaison des émissions entre l'étude Carbon Trust et le NAEI

GHG Source	potency	WECE		NAEI	
		Mt of GHG	Mt CO ₂ equiv	Mt of GHG	Mt CO ₂ equiv
CO ₂ from solid fuel	1	4.45	4.45	21.56	21.56
CO ₂ from gas	1	8.42	8.42		
CO ₂ from oil/petrol	1	9.30	9.30		
CO ₂ from refineries	1	2.94	2.94	2.95	2.95
CO ₂ from electricity	1	9.59	9.59	12.68 ⁵	12.68
LUCF	1	-0.07	-0.07	-0.07	-0.07
Other non-energy CO ₂	1	1.60	1.60	1.40	1.40
		As kt		As kt	
Methane	21	191	4.01	188	3.95
H ₂ O	310	10.86	3.37	10.76	3.34
HFC	1800(e)	0.23	0.41	0.23	0.41
PFC	7000(e)	0.011	0.08	0.011	0.08
SF ₆	23,900	0.004	0.11	0.004	0.11
Total			44.28		46.41

Source : Carbon Trust

Le calcul des émissions du secteur des transports routiers

Compte tenu de l'importance des émissions liées au transport, il est utile de présenter les méthodes de calcul. En l'occurrence, il existe plusieurs méthodes pour estimer la consommation énergétique puis les émissions du secteur des transports :

L'approche par livraisons de carburants

Cette approche est préconisée dans les cahiers techniques du RARE (Réseau des Agences Régionales de l'Energie) et est décrite ci-dessous.

Tous les types de transports (transports routiers, transports ferroviaires, transports maritimes et fluviaux, transports aériens y compris ceux qui relèvent de l'industrie, de l'agriculture, des commerces et des ménages) sont pris en compte. La réalisation du bilan s'appuie sur les livraisons de carburants publiées dans le rapport "Pétrole, éléments statistiques" du Comité Professionnel du Pétrole (CPDP) et par les ventes d'électricité pour le transport ferroviaire. Ces dernières données sont disponibles auprès de l'Observatoire de l'Énergie.

Bundesländer Luftschadstoff-Inventur" en Autriche (Inventaire des polluants atmosphérique des Länder) soulève une des limites de cette approche :

Les calculs de consommation d'énergie du transport routier sont basés sur les ventes de carburants en Autriche. Dans le cadre de l'inventaire national, l'Autriche se doit de prendre en compte tous les carburants utilisés dans le secteur du transport indépendamment du fait qu'ils soient consommés en Autriche ou non. Ainsi dans les émissions attribuées au secteur du transport sont aussi incluses les émissions provenant de carburants achetés en Autriche, mais utilisés à l'étranger. Une des études à ce sujet montre que presque 30% des émissions du transport en 2003 reviennent au « Tanktourismus » ou tourisme de réservoir.

La part du tourisme de réservoir dans la consommation de carburants en Autriche s'élève environ à 30% pour le diesel, et environ à 20% pour l'essence. Les voitures particulières en sont évidemment en partie responsables mais les camions qui transportent des marchandises à l'international contribuent certainement à une part importante de ce tourisme de réservoir. Celui-ci s'explique par un prix des carburants plus bas en Autriche que dans certains de ses pays limitrophes.

La part des émissions dues au tourisme de réservoir a été évaluée dans le cadre d'une étude réalisée pour l'Autriche entière. Elle sera prochainement déterminée pour chacun des Länder.

L'approche par parc où les consommations énergétiques sont déduites des statistiques régionales sur le parc automobile et sur le transit.

Cette approche était celle choisie par l'APCEDE en 2004 (avant le bilan des émissions de GES effectué par le CITEPA) et décrite ci-dessous.

L'estimation des consommations d'énergie du transport routier se fait en deux étapes :

1ère étape : estimer la consommation engendrée par le parc régional de véhicules et de poids lourds

On évalue les consommations du secteur des transports routiers en combinant des données relatives à :

- La structure du parc (type de véhicule et type de motorisation),
- Les distances annuelles moyennes parcourues par les différents types de véhicules (exprimées en kilomètre annuel moyen),
- Les consommations unitaires par type de véhicules (exprimées en litres/km).

La figure ci-dessous présente les sources de données nécessaires à l'estimation des consommations annuelles des différents types de véhicules.

Les sources de données nécessaires à une approche par parc

Données	Types de véhicules	Sources	Période de disponibilité
Structure du parc (valeurs absolues et relatives)	Véhicules particuliers	Office régional du transport : données annuelles	1991 à 2003
	Poids lourds et véhicules utilitaires		1990 à 2003
Distances annuelles moyennes parcourues (km/années)	Véhicules particuliers	Ademe Valbonne : Données annuelles issues du panel Secodip	1990 à 2002
	Poids lourds et véhicules utilitaires		
Consommations unitaires (litres/km)	Véhicules particuliers	Ademe Valbonne : Données annuelles issues du panel Secodip	1990 à 2002
	Poids lourds et véhicules utilitaires		1990 – 2002

Source : APCEDE – Tableau de bord régional des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre

Dans le cas des véhicules particuliers et commerciaux, il est nécessaire de faire la distinction entre le parc statique et le parc roulant. En effet, les différents systèmes de comptabilisation du parc (immatriculations, cartes grises...) prennent mal en compte les sorties de véhicules du parc roulant.

Par l'intermédiaire de différentes études réalisées (essentiellement ADEME et INREST), on suppose que seul 89% des véhicules comptabilisés sont effectivement utilisés. Ces mêmes études montrent une stabilité de ce coefficient dans le temps.

De plus, le degré de décomposition des données (type de motorisation, type de véhicules...) permet d'obtenir des données indispensables à l'aide à la décision dans le domaine des transports.

2ème étape : prendre en compte le transit routier de marchandises et de voyageurs

La deuxième étape conduit à comptabiliser des consommations non directement générées par les activités régionales. Les consommations d'énergie engendrées par le transit et le trafic routier de marchandises et de passagers prennent en compte :

- les marchandises de transit (hors import – export),
- les marchandises d'import – export,
- les passagers de transit,
- les passagers de vacances (hors vacanciers étrangers),
- les visiteurs étrangers,
- les autres passagers longue distance.

L'ensemble des données utilisées dans cette partie sont issues de l'étude ADEME – ENERDATA : «spatialisation des flux de transport routier dans les régions françaises et niveau d'encombrement des infrastructures ».

L'approche par parc est imparfaite pour de nombreuses raisons : absence d'un système d'information complet sur le parc régional, peu de données sur les distances parcourues par région... Toutefois, cette démarche permet une décomposition de l'information particulièrement intéressante en termes d'aide à la décision : données par catégorie de véhicules, possibilité de faire des analyses en vue de différents scénarii.

De même, l'utilisation d'indicateurs d'efficacité énergétique pour estimer les consommations du transit routier de marchandises et de passagers se heurte au manque d'information continue dans le temps. En effet, la plupart de ces informations sont tirées d'études ponctuelles et fournissent donc des données à un instant t. Or, l'évolution des comportements, des technologies et des modes d'utilisation laisse penser que ces indicateurs évoluent sensiblement dans le temps.

En comparant ses résultats aux données du CPDP (Comité Professionnel Du Pétrole), l'écart entre les deux sources d'informations n'excédant pas 8%, l'APCEDE a admis que « l'approche par parc » était pertinente.

L'approche trafic

Cette approche a pour réalisation ultime des modèles tels que le modèle COPERT, actuellement COPERT III, qui est utilisé dans les inventaires nationaux par exemple mais qui peut être utilisée à l'échelle régionale. On peut prendre comme exemple la Lombardie après avoir brièvement explicité la méthodologie COPERT III.

Il faut savoir que plusieurs logiciels pour le calcul des émissions sont utilisés. Ces logiciels se basent sur les facteurs d'émissions définis par COPERT III et souvent sur tout ou partie de la méthodologie pour proposer des interfaces de calculs notamment qui lient ces calculs à un système de SIG pour réaliser un cadastre.

Les particularités régionales peuvent être prises en compte par cette approche top-down via la composition du parc de véhicules, les conditions de conduite et la température. Il est donc possible d'appliquer une approche bottom-up si les données sont suffisamment précises, par exemple si des procédures de comptage de trafic ont été mises en place.

En Lombardie, avec le projet INEMAR (INventario EMissioni Aria), c'est cette amélioration qui a été apportée à la méthodologie CORINAIR. Le but était en effet d'avoir un inventaire spatialisé et de disposer des chiffres d'émissions au niveau communal.

Une énorme quantité de données de trafic pour la région Lombardie a été récoltée et analysée pour la période 1995-2001. Une des méthodes d'estimation du trafic est par exemple le relevé des kilomètres parcourus sur le réseau autoroutier grâce aux péages.

Des données précises ont été recueillies pour 9000 sections routières, 4 catégories de véhicules, (véhicules légers < 3.5 t, véhicules lourds > 3.5 t, autobus, motos > 50 cm³).

Les profils de distribution temporelle des véhicules ont été considérés pour quatre saisons, trois types de jours, (jour ouvrable, samedi et dimanche) et différentes périodes du jour. Toutes les données disponibles ont été traitées par un modèle d'assignation du trafic afin de calculer les flux de trafic ainsi que la vitesse de conduite sur le réseau routier sur environ 45.000 brins (parties de réseau), comprenant toutes les routes principales, et en excluant les routes avec un trafic au caractère très local.

Pour l'estimation des émissions de particuliers, la méthodologie proposée dans la dernière édition du *Guidebook* prenant en compte l'usure de freins, pneus et manteau routier été utilisée.

Autres types de transports

Il faut savoir que des méthodologies de calcul sont développées également pour les autres types de transport tels que le transport aérien, le transport maritime et fluvial et le transport ferroviaire, que nous ne développons pas ici, cette annexe n'ayant pas vocation à l'exhaustivité.

Le calcul des émissions des secteurs résidentiel et tertiaire

Il est souvent difficile de sectoriser les émissions de ces deux secteurs par manque de données précises sur l'emploi des combustibles.

Les organismes essaient alors de séparer les deux secteurs en utilisant des statistiques d'emploi dans le tertiaire, de surface et volumes de bureaux, d'enquêtes dans les hôpitaux, lycées, d'enquêtes dans les ménages pour déterminer les types de chauffage... Cela demande évidemment beaucoup de temps et de main d'œuvre, ce qui explique le fait que certains inventaires ne distinguent pas les deux secteurs.

Dans le secteur résidentiel, comme dans le secteur tertiaire, deux approches sont complémentaires :

- l'approche top-down qui permet d'obtenir les données de ventes de combustibles mais ne permet pas de savoir précisément les émissions résultantes puisqu'elle ne prend pas en compte les caractéristiques des logements (isolation, type de combustibles de chauffage,..)
- l'approche bottom-up, il est possible de compléter les informations en utilisant les caractéristiques des logements (taille, âge), leur énergie de chauffage et leur taux d'équipement. Toutefois ceci nécessite la collecte et le traitement de nombreuses données.

Pour le tertiaire, de la même façon, deux méthodes sont utilisées : les enquêtes et la reconstitution des consommations à partir d'éléments statistiques. Vu l'insuffisance de données, il s'avère souvent nécessaire de réaliser des enquêtes sur le terrain afin par exemple d'inventorier le nombre d'équipement au niveau régional (lycées, collèges, écoles, supermarchés, hôpitaux, restaurants,..). D'autant que ce secteur est mal connu d'un point de vue énergétique puisqu'il comprend de toutes petites entreprises (artisans par exemple) comme des bâtiments qui ont des consommations plus proches de l'industrie (hôpitaux, hypermarchés)

Le calcul des émissions de gaz fluorés

Le calcul de ces émissions au niveau régional, lorsqu'elles y figurent, est presque exclusivement issu de la désagrégation des données du niveau national au niveau régional. Certaines régions ont commandé des études pour préciser ces émissions : la Wallonie et un des inventaires du Pays de Galles.

Le calcul des émissions non énergétiques

On ne mentionnera ici que les émissions liées aux déchets, d'autant que l'autre poste (émissions liées à l'agriculture) est moins pertinent en milieu urbain. En outre, le fait que certains inventaires régionaux ne prennent pas en compte les émissions d'origine non énergétique s'expliquent de deux manières : d'une part, ces émissions dans le total des émissions de GES représentent souvent bien moins de 30% et parfois même moins de 20%, d'autre part ces émissions sont relativement difficiles à calculer et, de ce fait, soumises à de nombreuses incertitudes (sources diffuses, études nécessaires pour de nombreuses sources, données non aisément accessibles...)

Les émissions liées aux déchets

Le GIEC propose deux méthodes pour calculer les émissions de méthane issues des décharges. La décomposition anaérobie de matières organiques entraîne en effet un dégagement de méthane dans l'atmosphère.

La méthode de décomposition de premier ordre

Cette méthode produit un profil d'émissions qui reflète le processus de dégradation dans le temps. Cette méthode requiert cependant des données sur plusieurs décennies sur la production et les méthodes de gestion des déchets qui sont rarement disponibles pas forcément au niveau régional.

La méthode par défaut

Cette méthode utilise l'hypothèse de l'émission de la totalité du CH₄ potentiellement contenu dans les déchets pendant l'année d'élimination des déchets. Selon le GIEC, cette méthode donne *« une estimation annuelle raisonnable des émissions réelles si la quantité et la composition des déchets dans les décharges ont été constantes ou n'ont varié que lentement sur plusieurs décennies »*.

Etant plus simple que la précédente, cette méthode est couramment utilisée dans les régions.

Certaines régions mènent des études plus spécifiques :

- la région Midi-Pyrénées a confié à SOLAGRO une étude sur les décharges de manière à repreciser pour la région des émissions qui étaient entachées d'une grande incertitude ;
- la région Nord-Pas de Calais a effectué des enquêtes dans les décharges pour savoir lesquelles sont dotées d'un système de captage du biogaz afin également de préciser les données à la fois actuelles mais aussi au cours du temps.