



HAL
open science

Prospective quantitative des dynamiques urbaines: Enjeux, obstacles et leviers de la ville ” post-carbone ”

P. C. Allio, H. Waisman

► **To cite this version:**

P. C. Allio, H. Waisman. Prospective quantitative des dynamiques urbaines: Enjeux, obstacles et leviers de la ville ” post-carbone ”. 2012, pp.89. hal-00799918

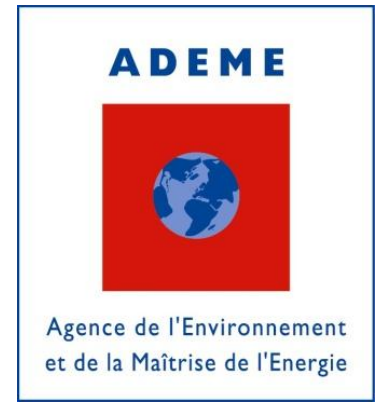
HAL Id: hal-00799918

<https://enpc.hal.science/hal-00799918>

Submitted on 12 Mar 2013

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

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



« Repenser les villes dans une société post-carbone »

***Prospective quantitative des dynamiques urbaines:
Enjeux, obstacles et leviers de la ville « post-carbone »***

Cédric Allio et Henri WAISMAN¹

*Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement
(CIREN, umr CNRS/EHESS & ParisTech/ENPC)
45bis avenue de la Belle Gabrielle, 94736 Nogent sur Marne CEDEX, France.*

¹ Contacts : Cedric Allio E-mail: allio@centre-cired.fr; Tel: +33 (0)1 4394 7379; Fax: +33 (0)1 43947 370.
Henri Waisman E-mail: waisman@centre-cired.fr; Tel: +33 (0)1 4394 7378

Table des matières

SYNTHESE	3
1. Description du projet	10
a. Généralités.....	10
b. Description de l'étude	12
2. Description du Modèle	14
a. IMACLIM-R, un modèle d'équilibre général	14
b. Le modèle spatial	16
c. Dynamique spatiale et bouclage avec IMACLIM-R	20
3. Calibration	23
a. Calibration d'IMACLIM-R	23
b. Calibration du modèle spatial.....	25
4. Les scénarios 1 et 2 : signaux-prix et transition post-carbone	32
a. Signaux-prix, innovation technique et choix énergétiques	32
b. Hypothèses des scénarios 1 et 2	35
c. Résultats des scénarios 1 et 2	42
d. Obstacles et limites.....	49
5. Les scénarios 3 et 4 : rôle du renouvellement des infrastructures	51
a. Hypothèses des scénarios 3 et 4	51
b. Résultats des scénarios 3 et 4	56
c. Obstacles et limites.....	62
6. Les scénarios 5 et 6 : le rôle des modes de vie	63
a. Hypothèses des scénarios 5 et 6	63
b. Résultats des scénarios 5 et 6	65
c. Obstacles et limites.....	68
7. Résumé et Conclusions	69
REFERENCES	71
ANNEXE 1 : Tarification du carbone dans IMACLIM-R	73
ANNEXE 2 : Détails des hypothèses spécifiques aux six scénarios	74
ANNEXE 3 : Variables clés des résultats pour les six scénarios	77

SYNTHESE

Le présent rapport étudie, d'ici 2050, les conditions de la division par quatre des émissions de gaz à effet de serre, de la transitions vers d'autres énergies que le pétrole, le charbon et le gaz, et de la mise en œuvre de mesures d'adaptation de nos sociétés aux impacts du changement climatique. Cette étude se place dans le contexte de la France et vise à analyser les modalités d'une transition vers des villes post-carbones.

Les systèmes urbains sont en effet un déterminant important des émissions de carbone à la fois *via* l'impact de leur organisation sur la mobilité et la consommation énergétique, et *via* l'attractivité respective de leur centre qui détermine les transformations de la géographie industrielle et les migrations de population. La dimension urbaine s'installe ainsi, peu à peu, au centre des réflexions sur les problématiques du réchauffement climatique, les villes se révélant un laboratoire pour les idées innovantes et les initiatives efficaces dans une optique de mitigation.

Les cheminements possibles pour affronter le défi du réchauffement climatique restent très incertains. Mais il est acquis que les transformations en jeu affecteront les modes de développement urbains et impliqueront une intégration des politiques nationales et locales. C'est pour explorer ces cheminements que la mission prospective du ministère du Développement Durable a engagé un exercice de construction de scénarios prospectifs. L'objectif de la présente étude est de fournir un cadrage de ces différents scénarios en intégrant dans une approche cohérente le contexte macro-économique et ses interactions avec les modes de développement urbain. Les scénarios ont été construits à l'aide d'un jeu d'hypothèses sur

- les déterminants du monde macro-énergétique dans lequel l'économie se développe. Ces déterminants incluent la disponibilité des ressources fossiles (notamment du pétrole), la nature des carburants alternatifs au pétrole (biocarburants, charbon liquéfié), la nature du changement technologique (disponibilité de technologies bas-carbone, rapidité et orientation du progrès technique) et les styles de développement.
- les déterminants des dynamiques urbaines. Parmi ces déterminants, on trouve notamment les politiques publiques envisagées au niveau local, adoptées pour modifier les comportements des agents et réorienter leurs choix de localisation.

Trois configurations, comprenant chacune deux variantes, sont ainsi envisagées (Figure A). Dans une première configuration, les marges de manœuvre pour des politiques de rupture à l'échelle des villes sont perçues comme faibles ; une seconde configuration envisage un renouvellement massif des infrastructures urbaines et énergétiques, mais reste prudente sur la possibilité de changer les modes d'occupation de l'espace ou les modes de vies ; une troisième configuration explore les conditions et les impacts attendus de mutations de forte ampleur dans ces deux domaines.

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

Figure A : Six sentiers de transition

L'utilisation d'une architecture innovante de modélisation qui couple un modèle spatial représentant les dynamiques urbaines à un modèle d'Equilibre Général (IMACLIM-R) conçu pour évaluer les politiques macro-économiques permet d'explorer les visions du monde dictées par ces 6 scénarios, grâce à une approche complémentaire entre dimensions locale et régionale, qui peut informer sur l'élaboration de politiques spatiales pour lutter contre les émissions de gaz à effet de serre.

Une telle étude nous permet d'analyser le rôle de politiques publiques menées à différentes échelles (nationale ou locale) sur la nature de la transition vers des villes post-carbone dans différents contextes macro-énergétiques (liés notamment au prix du baril du pétrole). A l'échelle locale, nous analysons principalement l'accroissement de la densité urbaine qui vise à optimiser l'utilisation du sol et les réseaux de desserte à travers une organisation spatiale plus efficace des activités et des agents. Ce type de mesure conduit à un changement des comportements individuels de transport (en particulier sur les trajets domicile-travail), et, en conséquence, à une modification des trajectoires de consommations énergétiques et d'émissions de carbone.

IMACLIM-R repose sur une description explicite de l'économie à la fois en valeurs monétaires et en quantités physiques, les deux étant liées par le jeu des prix relatifs. Grâce à cette représentation de variables physiques explicites (et pas seulement de variables « subrogées »), le modèle fournit une vision duale de l'économie permettant de vérifier si l'économie projetée repose sur une réalité technique plausible et à l'inverse si le système technique sous-jacent peut s'insérer dans un contexte économique cohérent, notamment avec le système de prix relatifs interdépendants. Les variables physiques du modèle permettent aussi de transcrire explicitement les informations sectorielles. Ces informations comprennent (i) les dires d'experts sur les économies d'échelle, les mécanismes d'apprentissage et les asymptotes de saturation du progrès technique, (ii) les connaissances empiriques sur l'efficacité des instruments économiques, les imperfections de marché, les contraintes institutionnelles et la rationalité limitée des comportements. Au final, il s'agit de représenter comment la demande finale et les systèmes techniques sont transformés par les signaux économiques et les politiques publiques, surtout dans des scénarios de bifurcation importante par rapport à un scénario de référence.

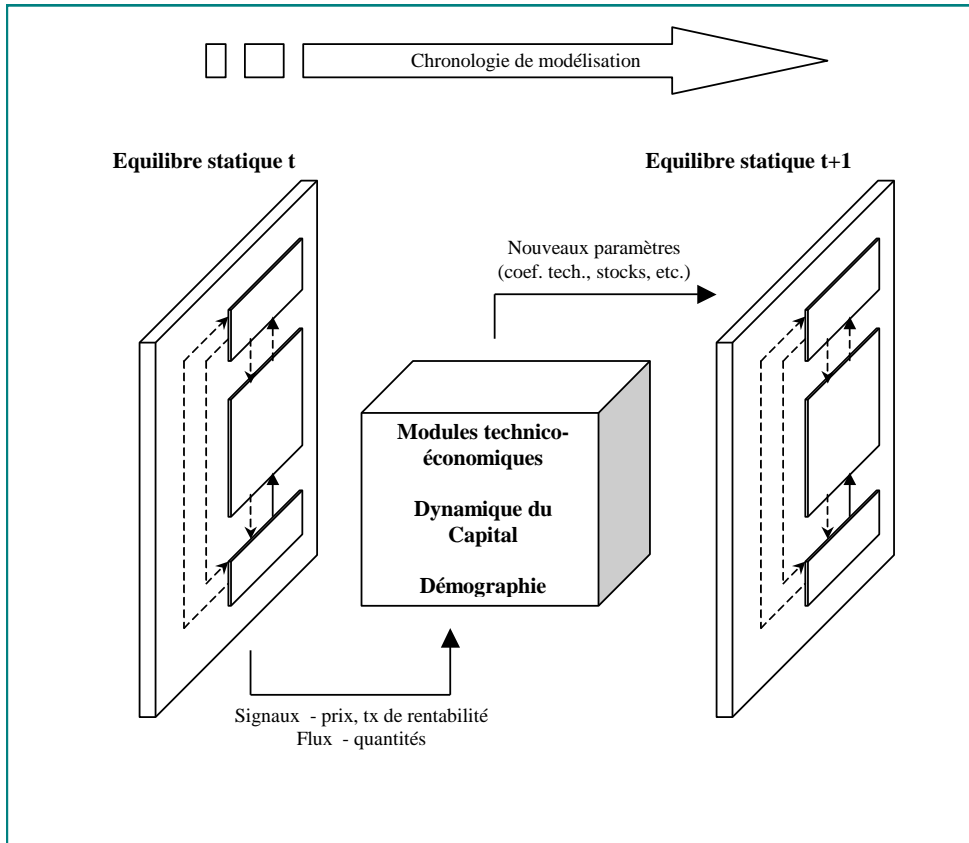


Figure B : l'architecture récursive et modulaire d'IMACLIM-R

Afin de représenter les dynamiques urbaines, nous utilisons un cadre analytique fondé sur les principes de l'Economie Urbaine (Alonso, 1964 ; Mills, 1967 ; Muth, 1969) et de la Nouvelle économie géographique (Krugman, 1991 ; Fujita et *al.*, 1999), dont l'approche a été étendue pour permettre de désagréger une économie nationale en un ensemble de multiples « villes » en interaction entourées d'une zone rurale. Ces interactions sont caractérisées par le commerce de biens et services, mais aussi par le mouvement de firmes et les migrations de population. Chacune de ces villes se caractérise par sa population, sa production, sa productivité du travail, son niveau de salaire, ses infrastructures de transport, et son prix de la terre et des logements. Le mouvement des firmes, dans ce modèle, est supposé à la base des dynamiques urbaines, et induit les migrations de population. Les firmes choisissent leurs localisations afin de maximiser leurs profits espérés. Elles ont à la fois des coûts et des bénéfices à choisir une ville donnée. D'une part, les travailleurs ne viennent s'installer dans la ville que si les firmes compensent les coûts externes (coûts du transport et du logement) en offrant des salaires plus élevés en zone urbaine. D'autre part, le rapprochement des agents économiques et la facilitation des échanges entre firmes se traduisent par des bénéfices associés aux économies d'agglomérations. Le premier effet augmente les coûts de production, tandis que le second les diminue.

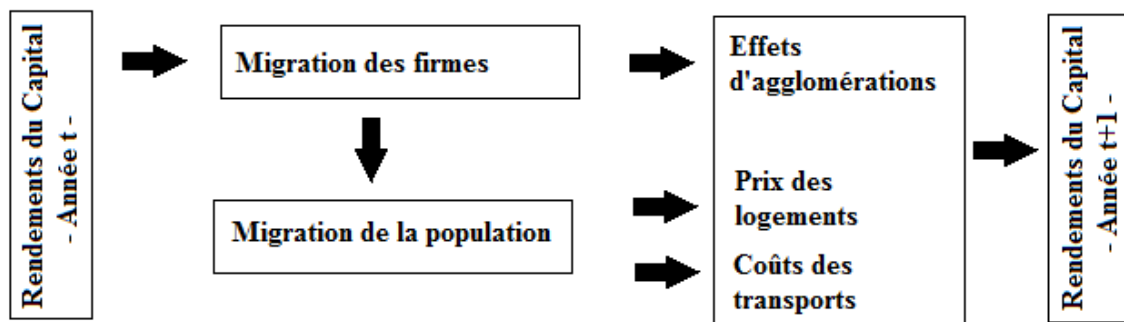


Figure C : Dynamique du modèle spatial

Le module urbain est intégré comme module dynamique du modèle d'équilibre général pour l'analyse de politiques publiques au niveau national ou international. Le modèle spatial permet de désagréger une économie nationale en un ensemble de multiples « villes » en interaction. Chaque année, IMACLIM-R calcule un équilibre macroéconomique qui est ensuite désagrégé par le modèle spatial. L'équilibre sur le marché de l'immobilier, sur le marché des biens et services et sur le marché du travail au niveau de chaque ville est contraint par l'équilibre macro-économique calculé par IMACLIM-R. IMACLIM-R fixe la population, le

nombre de travailleurs, le capital, la production totale, ainsi que le prix moyen, le salaire moyen et la productivité moyenne du secteur des biens composites et de l'ensemble des autres secteurs hors biens composites. Ces variables imposent la cohérence entre le modèle spatial et IMACLIM-R.

L'équilibre macro-économique est donc désagrégé en plusieurs équilibres urbains par le modèle spatial. Cette désagrégation modifie d'une année sur l'autre la structure urbaine, et renseigne alors l'équilibre macro-économique suivant en termes de besoin de transport, de gain de productivité et de besoin en investissements dans les infrastructures urbaines.

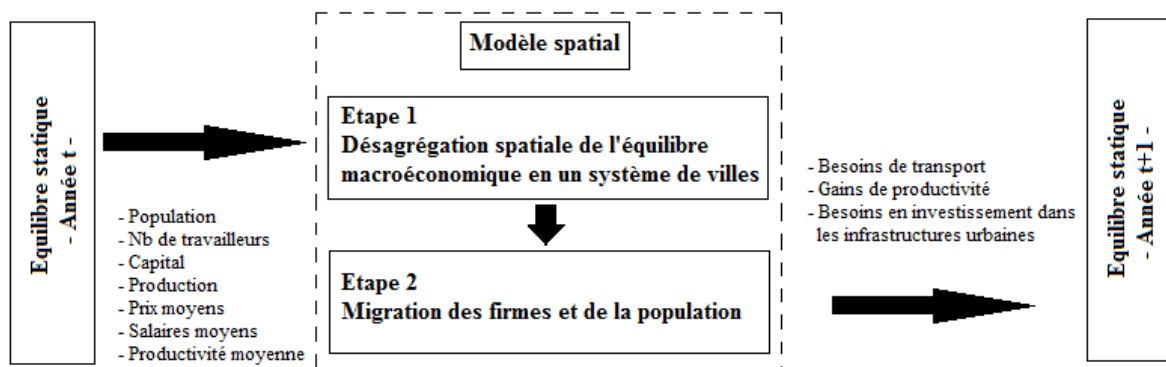


Figure D : Dialogue entre IMACLIM-R et le module spatial

L'équilibre macro-économique est donc calculé chaque année en fonction de l'évolution de la structure urbaine, évolution dictée à la fois par les équilibres macro-économiques qui servent de cohérence, et par le mouvement des firmes.

Afin d'avoir une représentation fidèle de l'économie à l'année de base, le modèle couplé (IMACLIM-R + modèle spatial) est calibré. Une valeur numérique est attribuée à l'ensemble des variables du modèle. Les données utilisées sont essentiellement dérivées des travaux de l'INSEE. Le modèle spatial est défini pour 12 aires, appelées aires métropolitaines : Paris, Lyon, Marseille, Lille, Toulouse, Bordeaux, Nice, Nantes, Strasbourg, Rennes, Grenoble et Montpellier. Ces aires se distinguent par leur rôle particulier joué dans la structuration du territoire et caractérisent le rayonnement économique des espaces. Elles accueillent chacune plus de 500 000 habitants et 20 000 cadres des fonctions métropolitaines liées à la conception/recherche, aux prestations intellectuelles, à la gestion, mais aussi aux éléments de rayonnement international comme le commerce inter-entreprises ou la culture et les loisirs. Elles concentrent 42% du PIB de la France.

Des hypothèses, définies pour chacun des scénarios envisagés, sont ensuite incorporées au modèle couplé et guident son évolution jusqu'en 2050. Les scénarios 1 et 2 privilégient la piste de l'innovation technique, en réponse à des signaux-prix. Le scénario montre une modification des comportements des agents suite à une augmentation brutale du prix du pétrole. Mais cette modification des comportements ne permet pas une réponse de grande ampleur, et les émissions ne diminuent que de 35% entre 2004 et 2050, loin du facteur 4 que la France s'est fixé en 2003. Le scénario 2 est un peu plus optimiste. Suite à des mesures prises par la France, notamment par l'instauration d'une taxe carbone, des technologies plus sobres en énergies fossiles et moins émettrices voient le jour et pénètrent petit à petit le marché. Mais cette « créativité carbone » ne permet pas non plus de réduire de manière substantielle les émissions. Les changements des modes de consommation restent à la marge des tendances, et les actions prises par l'Etat pour réduire les émissions restent modérées

Les scénarios 3 et 4 scénarios sont caractérisés par des investissements massifs dans les infrastructures. Les décisions de ces investissements se font soit au niveau de l'Etat central (scénario 3), soit au niveau des collectivités territoriales (scénario 4). Ces deux scénarios montrent qu'un investissement important dans les infrastructures peut amener à une diminution importante des émissions de gaz à effet de serre, en privilégiant les modes de déplacement sobres et les technologies propres. Le scénario 3 montre une baisse des émissions de l'ordre de 70% entre 2004 et 2050, tandis que le scénario 4 montre quant à lui une baisse des émissions de 64%.

Enfin, les scénarios 5 et 6 sont définis par des ruptures de modes de comportement permettant d'atteindre les objectifs de division par quatre des émissions nationales de CO2. Ils se caractérisent par une redéfinition des rapports des agents aux questions environnementales qui sont placées au cœur de l'agenda et imposent notamment une redéfinition du rapport au territoire. Ces scénarios qui peuvent paraître les plus désirables nécessitent une évaluation complémentaire pour en définir les contours du point de vue sociologique

	Scénario1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario5	Scénario 6
Croissance moyenne	1,47%	1,52%	1,47%	1,27%	1,44%	1,41%
Population urbaine en 2050 (en millions d'habitants)	30,5	33,8	39,7	12,8	57,6	29,7
Réduction des émissions de CO2	-41,5%	-59,4%	-48,2%	-58,3%	-72,1%	-76,8%

Figure E : Résumé des résultats pour les six scénarios

Les résultats obtenus pour les six scénarios illustrent la nécessité d'agir rapidement, pour faire face à l'inertie des systèmes urbains. Agir le plus rapidement possible permettra une réduction plus importante des émissions d'ici 2050, et une croissance plus élevée en moyenne sur les 50 prochaines années comme l'indique les scénarios 1 et 2. La mise en place d'une taxe carbone plus rapide dans le cas du scénario 2 par rapport au scénario 1 permet une diminution des émissions supérieure de près de 20 points. De plus, le taux de croissance dans le scénario 2 est au-dessus du scénario de 0.05 points.

Cependant, le tempo de l'action publique n'est pas la seule variable importante. Agir sur les seuls signaux-prix ne permet pas d'atteindre l'objectif de réduction des émissions d'un facteur 4 en 2050 par rapport à 1990. Les actions sur le prix du carbone doivent être accompagnées de mesures sur les infrastructures (logement, transport, production d'énergie) comme dans le scénario 3, mais aussi de normes qui agissent sur les formes urbaines (péages urbains, densification), comme dans le scénario 5.

Enfin, une remise en question de notre mode de développement semble nécessaire pour établir une société post-carbone. Les outils économiques tels qu'utilisés dans ce rapport permettent de mettre en évidence les objectifs à atteindre, mais peuvent difficilement tracer le chemin pour les atteindre. La transition vers une société post-carbone doit être guidée par l'ensemble de la communauté scientifique, que ce soit dans le domaine des technologies de pointe ou dans le domaine des sciences sociales.

1. Description du projet

a. Généralités

Les approches agrégées centrées sur une perspective nationale et internationale ont longtemps prévalu dans la modélisation et l'analyse du changement climatique. En revanche, les aspects touchant à l'organisation spatiale des économies ont été négligés, alors qu'ils sont au cœur de problématiques intimement liées au débat sur le changement climatique. Les systèmes urbains sont en effet un déterminant important des émissions de carbone à la fois *via* l'impact de leur organisation sur la mobilité et la consommation énergétique (Grazi et al., 2008), et *via* l'attractivité respective de leur centre qui détermine les transformations de la géographie industrielle et les migrations de population. La dimension urbaine s'installe ainsi, peu à peu, au centre des réflexions sur les problématiques du réchauffement climatique, les villes se révélant un laboratoire pour les idées innovantes et les initiatives efficaces dans une optique de mitigation.

Notre attention se portera sur une approche complémentaire entre dimensions locale et régionale, qui peut informer sur l'élaboration de politiques spatiales pour lutter contre les émissions de gaz à effet de serre. En particulier, l'analyse proposée dans cette étude pointe la nécessité d'analyser le rôle des politiques affectant l'organisation spatiale de l'économie dans un objectif de réduction des émissions de carbone dues aux activités urbaines. La pertinence de l'analyse de la structure urbaine en lien avec le changement climatique repose sur deux constatations. Premièrement, il y a une relation entre la structure urbaine et le changement climatique global à travers les émissions de CO₂ dues aux consommations énergétiques des activités économiques localisées dans les villes, elles-mêmes conditionnées par la nature du parc de bâtiments. Deuxièmement, la forme urbaine affecte l'activité de transport qui contribue à son tour au changement climatique (Greene and Schafer, 2003). Des approches analytiques sont requises pour éclairer la potentielle contribution de la dimension spatiale aux politiques de mitigation et d'adaptation, et donner un cadre à l'évaluation empirique ultérieure de scénarios de politiques climatiques incluant explicitement cette dimension et soucieuses d'en garantir l'acceptation par des populations conscientes de leur propre intérêt à leur réalisation.

Nous proposons une telle approche qui permettra de combler ce manque à travers une description endogène des relations entre l'organisation spatiale à l'échelon urbain, les interactions macroéconomiques internationales et le changement climatique. En particulier, nous représentons explicitement les dynamiques des systèmes de villes et leur impact sur la mobilité et la consommation énergétique associée. D'un point de vue technique, cela est réalisé *via* la désagrégation d'une économie nationale en un système d'économies urbaines spatialisées reliées entre elles par des échanges commerciaux. Cet exercice est rendu opérationnel grâce au développement d'une architecture de modélisation intégrée permettant l'analyse des conséquences sociales et économiques des dynamiques de long-terme des agglomérations urbaines, elles-mêmes soumises à un ensemble de politiques énergétiques spécifiques. Notre modèle permet en particulier l'étude de l'impact des économies urbaines sur le changement climatique à la fois au niveau micro- et macro-économique en produisant des scénarios urbains de long-terme qui prennent en considération les dynamiques de développement des villes et les mécanismes par lesquels elles impactent les trajectoires de consommation énergétique et d'émissions de carbone.

Un tel cadre nous permet d'analyser le rôle de politiques publiques menées à différentes échelles (nationale ou locale) sur la nature de la transition vers des villes post-carbone dans différents contextes macro-énergétiques (liés notamment au prix du baril du pétrole). A l'échelle locale, nous analysons principalement l'accroissement de la densité urbaine qui vise à optimiser l'utilisation du sol et les réseaux de desserte à travers une organisation spatiale plus efficace des activités et des agents. Ce type de mesure conduit à un changement des comportements individuels de transport (en particulier sur les trajets domicile-travail), et, en conséquence, à une modification des trajectoires de consommations énergétiques et d'émissions de carbone.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet doivent éclairer les mécanismes en jeu au cours de la transition vers des villes 'post-carbone'. On s'intéressera ainsi à la phase de transition nécessaire pour transformer la société en prenant en compte différents contextes macroéconomiques résultant de visions contrastées du futur énergétique, et en analysant le rôle des politiques spatiales au niveau urbain pour faciliter cette transition dans l'objectif de décrire le contexte de villes post-carbone.

b. Description de l'étude

La présente étude se place dans le contexte de la France et vise à analyser la transition vers des villes post-carbones. Il s'agit d'envisager, d'ici 2050, les conditions de la division par quatre des émissions de gaz à effet de serre, de la transitions vers d'autres énergies que le pétrole, le charbon et dans une moindre mesure le gaz, et de la mise en œuvre d'adaptation de nos sociétés futures aux impacts du changement climatique. Les cheminements possibles pour affronter ces trois défis restent très incertains. Mais il est acquis que les transformations en jeu affecteront les modes de développement urbains et impliqueront une intégration des politiques nationales et locales. C'est pour explorer ces cheminements que la mission prospective du ministère du Développement Durable a engagé un exercice de construction de scénarios prospectifs. L'objectif de la présente étude est de fournir un cadrage de ces différents scénarios en intégrant dans une approche cohérente le contexte macro-économique et ses interactions avec les modes de développement urbain. Les scénarios ont été construits à l'aide d'un jeu d'hypothèses sur

- les déterminants du monde macro-énergétique dans lequel l'économie se développe. Ces déterminants incluent la disponibilité des ressources fossiles (notamment du pétrole), la nature des carburants alternatifs au pétrole (biocarburants, charbon liquéfié), la nature du changement technologique (disponibilité de technologies bas-carbone, rapidité et orientation du progrès technique) et les styles de développement.
- les déterminants des dynamiques urbaines. Parmi ces déterminants, on trouve notamment les politiques publiques envisagées au niveau local, adoptées pour modifier les comportements des agents et réorienter leurs choix de localisation.

Trois configurations, comprenant chacune deux variantes, sont ainsi envisagées (Figure 1). Dans une première configuration, les marges de manœuvre pour des politiques de rupture à l'échelle des villes sont perçues comme faibles ; une seconde configuration envisage un renouvellement massif des infrastructures urbaines et énergétiques, mais reste prudente sur la possibilité de changer les modes d'occupation de l'espace ou les modes de vies ; une troisième configuration explore les conditions et les impacts attendus de mutations de forte ampleur dans ces deux domaines.

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

Figure 1 : Six sentiers de transition

2. Description du Modèle

Afin de donner un cadre analytique à l'évaluation empirique de scénarios de politiques climatiques locales et régionales, une architecture innovante de modélisation qui couple un modèle spatial représentant les dynamiques urbaines à un modèle d'Equilibre Général conçu pour évaluer les politiques macro-économiques est développée.

a. IMACLIM-R, un modèle d'équilibre général

IMACLIM-R repose sur une description explicite de l'économie à la fois en valeurs monétaires et en quantités physiques, les deux étant liées par le jeu des prix relatifs. Grâce à cette représentation de variables physiques explicites (et pas seulement de variables « subrogées »), le modèle fournit une vision duale de l'économie permettant de vérifier si l'économie projetée repose sur une réalité technique plausible et à l'inverse si le système technique sous-jacent peut s'insérer dans un contexte économique cohérent, notamment avec le système de prix relatifs interdépendants. Les variables physiques du modèle permettent aussi de transcrire explicitement les informations sectorielles. Ces informations comprennent (i) les dires d'experts sur les économies d'échelle, les mécanismes d'apprentissage et les asymptotes de saturation du progrès technique, (ii) les connaissances empiriques sur l'efficacité des instruments économiques, les imperfections de marché, les contraintes institutionnelles et la rationalité limitée des comportements. Au final, il s'agit de représenter comment la demande finale et les systèmes techniques sont transformés par les signaux économiques et les politiques publiques, surtout dans des scénarios de bifurcation importante par rapport à un scénario de référence.

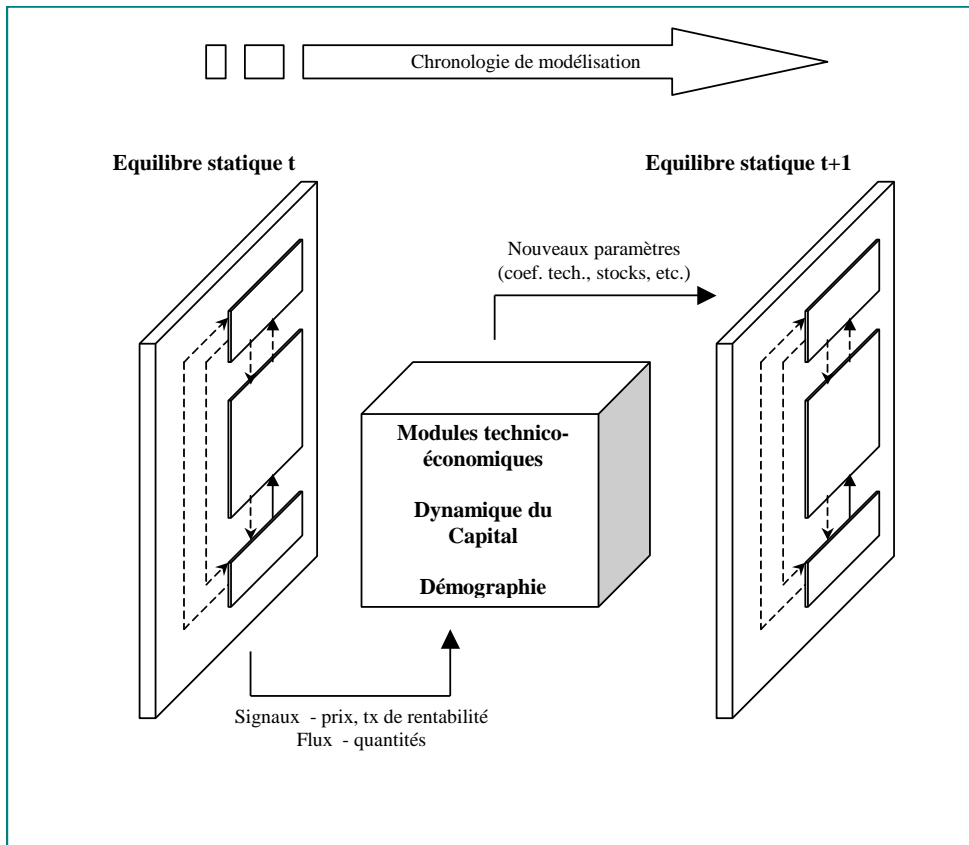


Figure 2 : l'architecture réursive et modulaire d'IMACLIM-R

La solution retenue dans IMACLIM-R est fondée sur la constatation qu'il est difficile de trouver des fonctions mathématiquement tractables qui permettent de représenter sur un siècle des écarts forts vis-à-vis de l'équilibre de référence et qui soient assez flexibles pour rendre compte de différents scénarios du changement structurel résultant de l'interaction entre styles de consommation, technologies et schémas de localisation (Hourcade, 1993). Au lieu de cela, les structures de coûts pour chaque secteur et à chaque date, ainsi que leur évolution entre t et $t+n$, dérivent de l'échange récursif d'information entre (Figure 2):

- *Un module d'équilibre statique annuel*, dans lequel les stocks d'équipements et les capacités de production sont fixes et où la seule flexibilité technologique est le taux d'utilisation de ces capacités. Résoudre cet équilibre à t fournit un « cliché » de l'économie à cette date : un ensemble de prix relatifs, les niveaux de production, les flux physiques, les taux de profit pour chaque secteur et l'allocation des investissements entre les secteurs ;
- *Des modules dynamiques*, incluant démographie, accumulation du capital, ainsi que des formes réduites de modèles sectoriels détaillés qui représentent les choix technologiques. Ces formes réduites calculent, en fonction des valeurs prises dans les

équilibres statiques précédents et des anticipations qu'elles permettent de formuler, la réaction des systèmes techniques et renvoient cette information au module statique sous la forme de nouveaux coefficients pour calculer l'équilibre suivant. Chaque année, les choix techniques incorporés dans les nouveaux équipements sont flexibles ; ils induisent une modification à la marge des coefficients input-output et de la productivité globale, en tenant compte des technologies déjà encapsulées dans les équipements existants, qui résultent des choix techniques passés. Cette hypothèse générale dite « putty-clay » est au centre des discussions sur l'inertie des systèmes techniques et le fait que l'économie s'adapte non seulement au niveau et à la direction des signaux économiques mais aussi à leur volatilité.

Le modèle IMACLIM-R est notamment utilisé pour des analyses prospectives des interactions entre économie, énergie et climat (voir (Waisman et al, 2012) pour une description détaillée des choix de modélisation, ainsi qu'une discussion des déterminants des coûts des politiques de mitigation à l'échelle mondiale). Ces politiques climatiques sont représentées dans le modèle par la combinaison de deux catégories d'instruments (a) les mesures sectorielles (normes, promotion de l'efficacité énergétique, pénétration de nouvelles technologies...) qui peuvent être rendues explicites grâce à la représentation détaillée explicite des principaux secteurs responsables des émissions de carbone (bâtiment, transport, électricité, industrie) ; (b) une mesure globale prenant la forme d'une tarification du carbone (on parlera indifféremment de « prix du carbone » ou de « taxe carbone »²) qui impose un surcoût à l'énergie fossile et affecte les trajectoires d'émissions de CO₂ *via* les changements de la consommation et la production courantes en réaction aux modifications de la structure des prix et les réorientations d'investissement induits par le signal-prix du coût du carbone.

b. Le modèle spatial

Afin de représenter les dynamiques urbaines, nous utilisons un cadre analytique fondé sur les principes de l'Economie Urbaine (Alonso, 1964 ; Mills, 1967 ; Muth, 1969) et de la Nouvelle économie géographique (Krugman, 1991 ; Fujita et *al.*, 1999), dont l'approche a été étendue pour permettre de désagréger une économie nationale en un ensemble de multiples

² Cf. Annexe I pour une discussion plus détaillée sur la tarification du carbone dans le modèle.

« villes » en interaction entourées d'une zone rurale. Ces interactions sont caractérisées par le commerce de biens et services, mais aussi par le mouvement de firmes et les migrations de population. Chacune de ces villes se caractérise par sa population, sa production, sa productivité du travail, son niveau de salaire, ses infrastructures de transport, et son prix de la terre et des logements. Au sein de chaque ville, les firmes sont regroupées au centre (centre d'activité) autour duquel les ménages/travailleurs se répartissent en fonction d'un arbitrage entre coût du transport et coût du logement. La ville est ainsi supposée mono-centrique, axisymétrique, et s'étale sur un espace à une dimension (Figure 3).

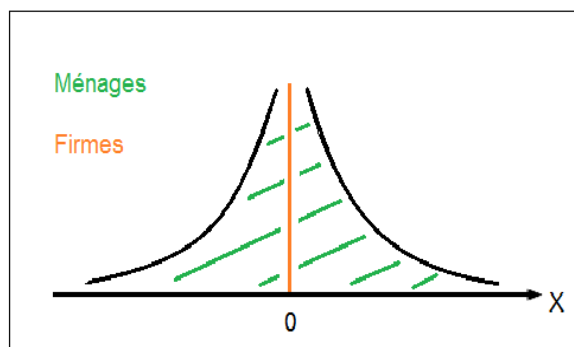


Figure 3 : Représentation spatiale d'une ville

Dans notre modèle, le choix de considérer toutes les villes comme monocentriques présente deux limites importantes : elle ne permet pas de représenter l'impact de la forme urbaine sur la congestion et sur les économies d'agglomérations. Pour une population et une longueur de réseau de transport données, la forme urbaine va avoir un rôle important dans l'engorgement des différents moyens de transports, et va donc expliquer en partie les parts modales des différents modes. Concernant les économies d'agglomérations, le fait qu'il y ait plusieurs centres au sein d'une même ville, avec une certaine distance entre ces centres modifie les économies d'agglomérations dont bénéficient les firmes.

Le mouvement des firmes, dans ce modèle, est supposé à la base des dynamiques urbaines, et induit les migrations de population. Les firmes choisissent leurs localisations afin de maximiser leurs profits espérés. Elles ont à la fois des coûts et des bénéfices à choisir une ville donnée. D'une part, les travailleurs ne viennent s'installer dans la ville que si les firmes compensent les coûts externes (coûts du transport et du logement) en offrant des salaires plus élevés en zone urbaine. D'autre part, le rapprochement des agents économiques et la facilitation des échanges entre firmes se traduisent par des bénéfices associés aux économies

d'agglomérations. Le premier effet augmente les coûts de production, tandis que le second les diminue.

Les interactions entre le marché de l'immobilier, le marché des biens et services et le marché du travail vont déterminer les économies urbaines et par conséquent les choix de localisations des firmes. Une brève description des différents marchés est donnée ci-dessous. Une description technique détaillée du modèle est fournie dans (Grazi et Waisman, 2009).

Marché de l'immobilier

Les choix de localisations des agents à l'intérieur de la ville sont déterminés par un arbitrage entre le coût des transports domicile-travail et le coût de l'immobilier. Chaque ménage contient un seul agent, et les choix de localisations des ménages sont faits en fonction de cet agent.

Le coût de transport dépend des infrastructures de transport de la ville, du prix des carburants et de la valeur du temps des travailleurs. Alors que la qualité des infrastructures de transport dans les villes est déterminé à la calibration de manière exogène, le prix des carburants et la valeur du temps des travailleurs sont déterminés de manière endogène par le modèle. La valeur du temps des agents est proportionnelle au salaire moyen dans la ville. Le coût des trajets domicile-travail croît avec la distance au centre, et il détermine la somme que les ménages sont prêts à payer pour leur logement. A ce titre, il représente le coût payé par l'utilisateur et non pas le coût total pour la collectivité³. Les promoteurs immobiliers vont, quant à eux, construire des logements en fonction des coûts de construction et du revenu qu'ils espèrent en retirer. Le processus de construction des logements a des rendements d'échelles décroissants : chaque nouveau mètre carré construit est plus cher que le mètre carré précédemment construit. La limite de la ville est fixée par la rente retirée d'un usage du sol autre que pour le logement. Un promoteur immobilier décide de construire un logement uniquement si le revenu retiré de sa location est supérieur à cette rente. En réalité, la limite de la ville est imposée par les plans d'urbanisme. Ces plans déterminent les terrains constructibles. Dans notre modèle, la rente retirée d'un usage du sol autre que celui du logement est calculée pour rendre compte de la taille des villes. Plus cette rente est élevée, et moins les promoteurs immobiliers construisent loin du centre. De la même manière que les plans d'urbanisme sont élaborés pour éviter la pression foncière en permettant la construction

³ Le coût total pour la collectivité est pris en compte au niveau macroéconomique dans IMACLIM-R, à travers les besoins de financement pour répondre à la demande.

de nouveaux logements, notre modèle prévoit la construction de logements en périphérie des villes lorsque le prix de l'immobilier augmente. La valeur de la rente retirée d'un usage des sols autre que celui du logement est ainsi un paramètre essentiel dans la définition de politiques publiques sur le foncier.

La densité et l'étendue spatiale d'une ville est donc déterminé par ses coûts de logement et ses coûts de transport. Une densification de la ville peut donc être réalisée en agissant sur le prix des transports ou sur le prix du foncier (comme une taxe immobilière, ou une taxe sur les terrains disponibles en limite de ville).

Le temps passé dans les transports joue également un rôle sur la production de biens et de services de la ville. En effet, le temps perdu par un travailleur dans ses trajets domicile-travail diminue sa productivité. Une densification de la ville permettra alors également de gagner en productivité.

Dans la zone rurale, il n'existe pas de marché de l'immobilier. Le prix de la terre est défini de manière exogène et permet de fixer la rente retirée d'un usage du sol autre que pour le logement.

Marché des biens et services

Dans notre modèle, les villes ne produisent que des biens du secteur composite, biens pour lesquels les effets d'agglomération sont les plus forts. Identifiés par Alfred Marshall dans les années 1960, les effets d'agglomérations sont responsables de la concentration des activités économiques à l'échelle urbaine. L'approche utilisée dans notre modèle revient à formaliser deux effets d'agglomérations différents : l'accès au marché et la diffusion des informations. L'accès au marché est modélisé en supposant que les producteurs font face à des rendements croissants (modèle de concurrence monopolistique à la Dixit-Stiglitz) et sont sujets à des coûts de transport. La diffusion des informations est, quant à elle, prise en compte à travers des gains de productivité du travail. La proximité géographique des entreprises permet la diffusion de bonnes pratiques et réduit les coûts du travail.

La production dans une ville donnée va donc être fixée par le travail disponible à l'intérieur de la ville, fixé par le nombre de travailleurs habitants la ville et par la forme de la ville (il a, en effet, été vu plus haut que le temps passé dans les transports modifie la productivité des travailleurs), et par la productivité intrinsèque des travailleurs, déterminé au niveau macro-économique par IMACLIM-R.

Dans la zone rurale, les producteurs sont en concurrence pure et parfaite et ne connaissent pas d'effets d'agglomérations.

Marché du travail

A chaque instant, les villes sont en équilibre. L'utilité d'un ménage est la même dans n'importe quelle ville considérée. Les coûts de transports et de logement supportés par les ménages variant en fonction de la ville étudiée, les travailleurs de la ville négocient leur salaire pour compenser ces coûts. Les salaires sont donc différenciés par ville.

Mais le salaire moyen est fixé à l'échelle macro-économique, par IMACLIM-R. Une courbe salaire-chômage permet de faire le lien entre salaire demandé et travail disponible. Si le travail disponible, c'est-à-dire le nombre de travailleurs disponibles, augmente, les salaires auront tendance à baisser. En effet, la concurrence entre travailleurs, et la difficulté à s'associer pour négocier, vont entraîner les salaires à la baisse. C'est principalement à travers ce mécanisme que la croissance de la population est prise en compte.

L'équilibre sur l'ensemble de ces marchés nous donne une image de l'économie, à la fois à l'échelle d'une ville et à l'échelle du pays. Cet équilibre est contraint par les sorties d'IMACLIM-R, notamment sur le marché du travail, et modifie certaines grandeurs, comme les besoins en transport ou la productivité des travailleurs, qui contraignent ensuite l'équilibre au niveau macro-économique. Cet échange d'informations permet d'analyser en détail des politiques climatiques complexes mises en œuvre à l'échelle locale et à l'échelle régionale.

c. Dynamique spatiale et bouclage avec IMACLIM-R

Le moteur de la dynamique spatiale

L'évolution de la structure urbaine est déterminée par les choix de localisations des firmes, qui s'orientent préférentiellement vers les aires urbaines offrant les meilleures perspectives d'investissement. Les firmes décident de se localiser là où les rendements du capital sont les plus élevés. L'inertie liée aux coûts de déménagement et à une information imparfaite impose que toutes les firmes ne se retrouvent pas en une seule localité. Les

relocalisations de l'activité économique qui découlent des choix des firmes se traduisent par la nécessité de déplacements démographiques visant à satisfaire les besoins de main d'œuvre pour la production locale. On assiste ainsi, en parallèle aux déplacements des firmes, à des migrations de population pour les ménages/travailleurs.

D'une part, la distribution de l'activité économique entre un ensemble de localisations accessibles (appartenant à un système de villes en interaction et correspondant à des agglomérations urbaines réelles existantes) résulte des arbitrages des firmes qui réagissent à des attractivités différenciées des villes considérées en termes de profitabilité des investissements. D'autre part, les caractéristiques physiques (population, densité) et économiques (prix, production) au niveau des villes résultent de l'adaptation de l'économie urbaine aux migrations (des firmes et de la population) imposées par la relocalisation de l'activité consécutive aux choix des firmes décrits ci-dessus. Les formes urbaines prennent notamment en compte les coûts externes subis par les ménages/travailleurs lors de l'entrée dans une ville (coût de transport domicile-travail, coût de logement).

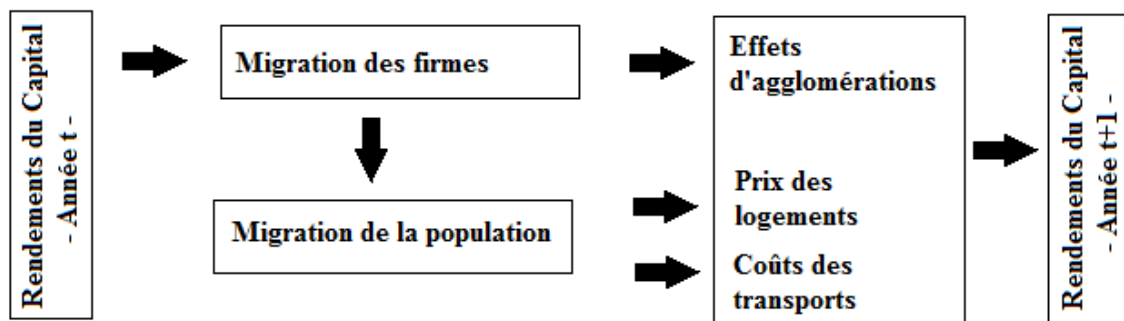


Figure 4 : Dynamique du modèle spatial

Dialogue entre le modèle spatial et IMACLIM-R

Pour étudier les liens entre économies urbaines et trajectoires de long-terme de l'économie globale en termes de croissance et d'émissions de carbone, le module urbain est intégré comme module dynamique du modèle d'équilibre général pour l'analyse de politiques publiques au niveau national ou international.

Le modèle spatial permet de désagréger une économie nationale en un ensemble de multiples « villes » en interaction. Chaque année, IMACLIM-R calcule un équilibre macroéconomique qui est ensuite désagrégé par le modèle spatial. L'équilibre sur le marché de l'immobilier, sur le marché des biens et services et sur le marché du travail au niveau de

chaque ville est contraint par l'équilibre macro-économique calculé par IMACLIM-R. IMACLIM-R fixe la population, le nombre de travailleurs, le capital, la production totale, ainsi que le prix moyen, le salaire moyen et la productivité moyenne du secteur des biens composites et de l'ensemble des autres secteurs hors biens composites. Ces variables imposent la cohérence entre le modèle spatial et IMACLIM-R.

L'équilibre macro-économique est donc désagrégé en plusieurs équilibres urbains par le modèle spatial. Cette désagrégation modifie d'une année sur l'autre la structure urbaine, et renseigne alors l'équilibre macro-économique suivant en termes de besoin de transport, de gain de productivité et de besoin en investissements dans les infrastructures urbaines.

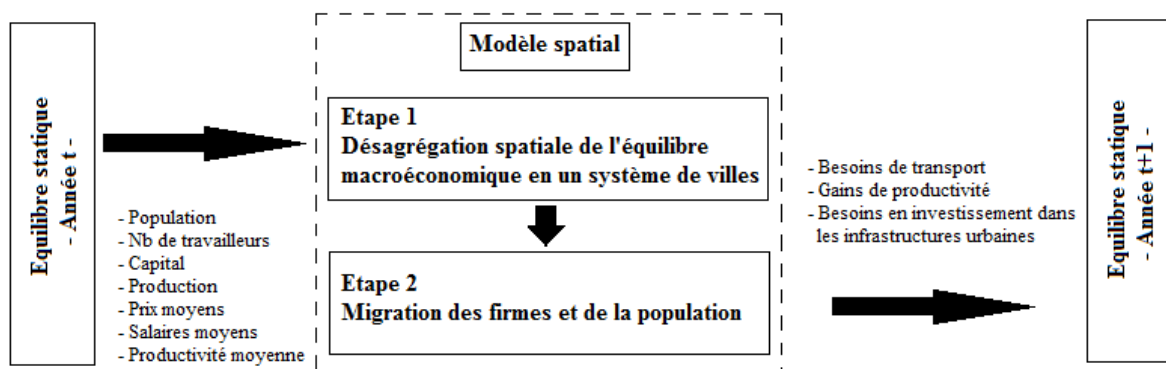


Figure 5 : Dialogue entre IMACLIM-R et le module spatial

L'équilibre macro-économique est donc calculé chaque année en fonction de l'évolution de la structure urbaine, évolution dictée à la fois par les équilibres macro-économiques qui servent de cohérence, et par le mouvement des firmes. La prise en compte des inerties sur les systèmes urbains joue donc un rôle important dans le modèle. Deux types d'inerties sont considérées : les inerties sur le mouvement des firmes et celles sur la construction de nouvelles infrastructures urbaines. Les inerties sur le mouvement des firmes sont prises en compte dans la dynamique du modèle spatial, tandis que les inerties sur les infrastructures urbaines sont considérées lors du dialogue entre IMACLIM-R et le modèle spatial. Les investissements en infrastructure nécessaires ne sont pas réalisés instantanément. Le niveau réalisé est calculé par l'équilibre macroéconomique, ce qui se répercute sur la structure urbaine via les prix.

3. Calibration

L'objectif de la phase de calibration est d'attribuer à l'ensemble des variables du modèle couplé (IMACLIM-R + modèle spatial) une valeur numérique qui permette au modèle d'être représentatif de la réalité à l'année de base (ici 2004). Les valeurs numériques attribuées aux variables du modèle spatial doivent ainsi être cohérentes avec les grandeurs macro-économiques issues de la calibration d'IMACLIM-R, et satisfaire les grandeurs empiriques observées à l'échelle des villes.

Notre étude se limite à l'étude de la France. La version d'IMACLIM-R utilisée est donc celle focalisée sur la France, IMACLIM-R France.

a. Calibration d'IMACLIM-R

Dans le cadre d'analyse de politiques climatiques ou énergétiques, pour lesquelles la nécessité de comptabiliser les flux physiques d'énergie est apparue très tôt, les modélisateurs utilisent des matrices dites hybrides qui incluent des tables input-output en valeur et des balances énergétiques en unités physiques qui sont harmonisées (voir Sands et al., 2005). Dans IMACLIM-R nous cherchons à étendre la comptabilité physique à tous les secteurs non-énergétiques pour lesquels cela a un sens tels que le transport (passager-kilomètres, tonnes-kilomètres) l'industrie (tonnes d'acier, aluminium, ciment) ou l'agriculture et l'usage des sols (tonnes, calories, hectares).

Les données économiques de calibrage sont dérivées de la base de données INSEE, qui fournit un détail des comptes nationaux en termes de production, consommation et flux internationaux. Ces matrices de comptes nationaux sont modifiées pour (i) les rendre compatibles avec la désagrégation sectorielle d'IMACLIM-R en 15 secteurs, (ii) les rendre cohérentes avec les balances énergétiques de l'AIE fournissant le détail des modes de production et de consommation de l'énergie exprimées en Mtep, et les données sur le transport de (Schäfer et Victor, 2001) exprimées en p-km.

Ce travail permet de calibrer IMACLIM-R France sur l'année 2004. Certaines de ces grandeurs sont ensuite réutilisées pour la calibration du modèle spatial, afin de garantir la cohérence entre le modèle spatial et les grandeurs macroéconomiques calculées par IMACLIM-R. Ces grandeurs sont listées dans le tableau ci-dessous (Figure 6):

Grandeurs Macroéconomiques en 2004		Unités	France
Niveau National	\overline{GDP}	10^9 €	1 656
	\overline{X}	10^9 €	3 650
	\overline{Pop}	10^6	62.45
Secteur Urbain	\overline{L}_M	10^6	8.20
	\overline{W}_M	10^3 €	42.97
	\overline{p}_M	\$	1
Secteur Rural	\overline{L}_F	10^6	12.19
	\overline{W}_F	10^3 €	44.39
	\overline{p}_F	\$	1

Figure 6 : Grandeurs assurant la cohérence entre IMACLIM-R et le modèle spatial lors de la calibration

La dynamique du modèle se fait sous une hypothèse de croissance de la population française donnée par l'INSEE selon laquelle la population française est supposée passer de 60,5 millions à 72,3 millions entre 2004 et 2050 (Figure 7).

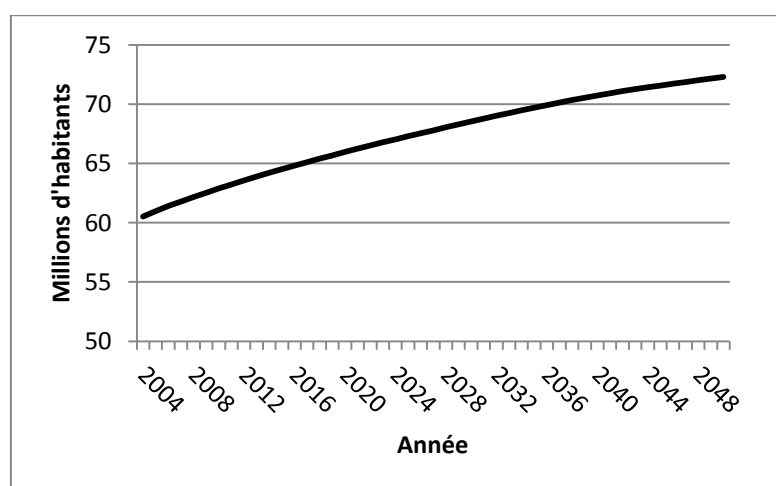


Figure 7 : Population française entre 2004 et 2050

Pour chacun des scénarios considérés, un grand nombre d'hypothèses macroéconomiques restent identiques, notamment concernant les mécanismes sous-jacents à

la croissance, à savoir les gains purs de productivité, ainsi que ceux régissant les échanges extérieurs. Les hypothèses propres à chaque scénario seront explicitées dans la suite du rapport.

b. Calibration du modèle spatial

Choix des agglomérations urbaines

Le processus de calibration adopté pour le modèle spatial nécessite dans un premier temps la définition d'agglomération urbaine et le choix des agglomérations considérées. Cette étape s'appuie sur une étude de l'INSEE⁴ qui liste les aires urbaines françaises en fonction de leur importance. Le territoire de France métropolitaine est composé de 354 aires urbaines. Une aire urbaine est un ensemble de communes d'un seul tenant et sans enclaves, constitué par un pôle urbain et par des communes rurales, ou unités urbaines, dont au moins 40% de la population résidente ayant un emploi travaille dans le pôle ou dans les communes attirées par celui-ci. Les plus grandes d'entre elles concentrent la population, et plus encore les emplois et davantage encore les cadres des fonctions dites métropolitaines. L'INSEE décrit le système productif à partir de la définition de 15 fonctions, par regroupement des professions et catégories socioprofessionnelles. Cinq fonctions sont qualifiées de « métropolitaines », parce qu'elles sont plus particulièrement présentes dans les grandes agglomérations. Ce sont la conception/recherche, les prestations intellectuelles, le commerce inter-entreprises, la gestion et enfin la culture et les loisirs. Les cadres des fonctions métropolitaines correspondent aux cadres et chefs d'entreprise de plus de dix salariés de ces cinq fonctions métropolitaines.

⁴ Brutel C., *Un maillage du territoire français*, INSEE PREMIERE, n°1333 – Janvier 2011

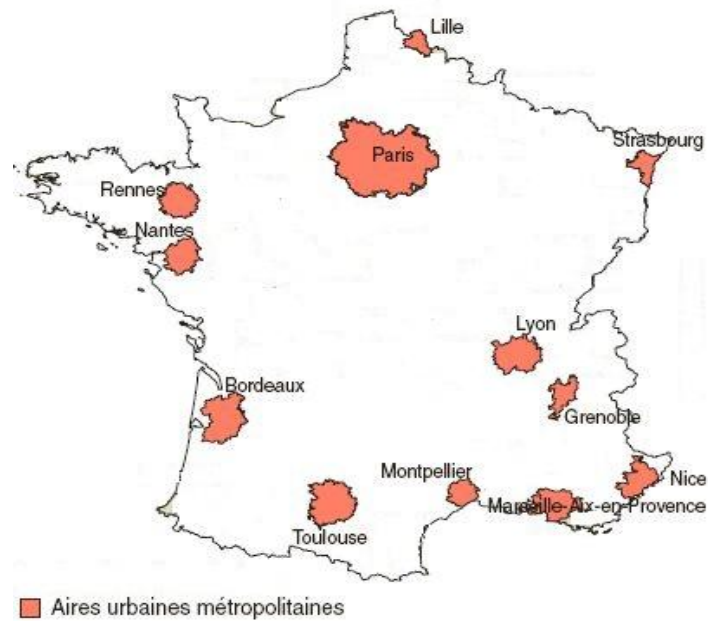


Figure 8 : Aires urbaines métropolitaines

La prise en compte de la population, des emplois et des cadres des fonctions métropolitaines via la loi « rang-taille »⁵ permet de distinguer 12 aires importantes, appelées les aires métropolitaines : Paris, Lyon, Marseille, Lille, Toulouse, Bordeaux, Nice, Nantes, Strasbourg, Rennes, Grenoble et Montpellier. Celles-ci jouent un rôle particulier dans la structuration du territoire et caractérisent le rayonnement économique des espaces. Elles accueillent chacune plus de 500 000 habitants et 20 000 cadres des fonctions métropolitaines.

	Population		Emploi total		Emploi des fonctions métropolitaines		Cadre des fonctions métropolitaines	
	Effectif (en milliers)	%	Effectif (en milliers)	%	Effectif (en millier)	%	Effectif (en milliers)	%
Aires métropolitaines	22 393	47,5	10 214	49,4	3 431	61,2	1 528	72

Figure 9 : Part de la population et de l'emploi dans les aires métropolitaines

Elles concentrent 42% du PIB de la France. Plus précisément, les 12 aires métropolitaines concentrent les fonctions métropolitaines supérieures liées à la

⁵ La dynamique économique d'une ville est fortement liée à l'effectif de sa population, à son nombre d'emplois et, plus particulièrement, au nombre d'emplois de cadres des fonctions métropolitaines. La relation entre la taille de la ville (pour chacune des trois variables) et son rang de classement est appelée loi « rang-taille ». Les courbes représentant la loi « rang-taille » pour la population, le nombre d'emplois et le nombre de cadres des fonctions métropolitaines mettent en évidence des ruptures, lesquelles permettent de déterminer 12 aires métropolitaines.

conception/recherche, aux prestations intellectuelles, à la gestion, mais aussi aux éléments de rayonnement international comme le commerce inter-entreprises ou la culture et les loisirs (cf. Figure 10). Elles ont toutefois chacune leur spécificité. Ainsi, Toulouse et Grenoble se distinguent par une présence très élevée d'emplois relevant des fonctions conception/recherche et prestations intellectuelles ; Lyon, Lille, Bordeaux et Nantes par une présence plus élevée qu'ailleurs de la fonction commerce inter-entreprises ; alors que les emplois liés à la fonction culture et aux loisirs sont davantage implantés à Paris.

Aire métropolitaine	Emploi Total (en milliers)	Part des cadres des FM dans l'emploi total (en %)	Part de l'emploi des FM dans l'emploi total (en %)	Indice de spécificité de chacune des fonctions métropolitaines				
				Gestion	Conception/ Recherche	Prestations intellectuelles	Commerce inter- Entreprises	Culture/ Loisirs
Paris	5 562	18,3	37,3	0,99	0,99	1,01	0,96	1,13
Lyon	811	12,1	31,7	1,00	1,01	0,99	1,20	0,70
Marseille	621	9,5	27,5	1,09	0,77	1,00	0,97	0,86
Lille	499	9,9	28,5	1,13	0,71	0,88	1,11	0,73
Toulouse	505	13,7	31,4	0,87	1,63	1,07	0,95	0,73
Nice	385	9,7	26,3	1,04	0,98	0,97	0,90	0,99
Bordeaux	449	9,5	27,4	1,07	0,82	0,93	1,13	0,78
Nantes	352	10,5	29,4	1,04	0,87	0,99	1,15	0,74
Strasbourg	294	10,1	28,5	1,07	0,82	0,95	1,09	0,81
Rennes	274	10,0	27,1	1,00	1,00	1,02	1,09	0,82
Grenoble	250	14,0	32,1	0,84	1,87	1,01	0,88	0,76
Montpellier	212	11,0	29,1	0,99	1,03	1,09	0,93	1,00

Figure 10 : Indice de spécificité⁶ des fonctions métropolitaines dans chacune des aires urbaines métropolitaines

Ces 12 villes représentent également près de 65% des émissions de CO₂ liées au transport de la France, alors que le secteur des transports représente plus du tiers des émissions totales de CO₂. Le rôle des villes dans la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre apparaît ainsi important. Une étude de l'INSEE daté de juin 2011 présente les émissions de dioxyde de carbone par aire urbaine. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous⁷.

⁶ Rapport entre la part de chacune des fonctions dans l'emploi de l'aire métropolitaine et cette même part dans l'ensemble des aires urbaines métropolitaines. Ainsi, par exemple, à Paris, la fonction de gestion est moins représentée que dans l'ensemble des aires métropolitaines.

⁷ Levy D., *Un habitant de pôle urbain émet deux fois moins de CO₂ que la moyenne pour se rendre à son lieu de travail ou d'études*. INSEE PREMIERE, n°1357 – Juin 2011

Aire urbaine	CO2 émis	
	Total (tonne/an)	Par personne (tonne/an/personne)
Paris	5 876 672	0,47
Lyon	851 122	0,53
Marseille	674 074	0,54
Lille	528 305	0,56
Toulouse	571 537	0,58
Nice	427 845	0,51
Bordeaux	488 846	0,58
Nantes	372 795	0,57
Strasbourg	314 818	0,51
Rennes	299 289	0,58
Grenoble	270 405	0,48
Montpellier	243 272	0,49
France	16 826 854	0,62

Figure 11 : Emissions de CO₂ liées au transport par aire urbaine

Notre modèle spatiale désagrège l'économie de la France en un ensemble de villes en interaction. Les villes considérées doivent être suffisamment grandes pour que les effets d'agglomérations y soient importants et donc que notre effort de modélisation soit cohérent. Nous avons fait le choix de nous limiter aux 12 aires métropolitaines, en construisant nos agglomérations sur la définition de l'INSEE d'une aire urbaine. Cependant, notre modèle ne nous permet pas de caractériser chaque ville en fonction des emplois relevant de fonctions métropolitaines spécifiques.

Choix des grandeurs caractéristiques des villes

La représentation des économies spatiales dans notre modèle est une description juste de la réalité si les variables socio-économiques qui caractérisent chaque agglomération et la zone rurale sont cohérentes avec les observations. Ces variables socio-économiques doivent permettre le calcul des équilibres sur le marché de l'immobilier, le marché des biens et services et le marché du travail pour une année donnée. Ces variables sont les suivantes, pour chacune des 12 aires urbaines considérées :

Pop_j population

L_j nombre de travailleurs

Y_j	part du PIB de la ville dans le PIB national
w_j	salaire moyen relatif ⁸
n_j	nombre d'entreprises ⁹
δ_j^H	part du logement dans les dépenses des ménages
t_j	temps moyen de transport entre le domicile et le travail
h_j	taille moyenne des logements
d_j	taille caractéristique des trajets domicile-travail

Les valeurs de ces variables sont issues de différents travaux de l'INSEE. La population, le nombre de travailleurs, le PIB, le salaire moyen relatif, le nombre d'entreprises proviennent des données localisées accessibles directement sur le site de l'INSEE. La part du logement dans les dépenses des ménages, ainsi que la taille moyenne du logement provient de l'enquête logement de 2006 de l'INSEE. Le temps moyen de transport entre le domicile et le travail provient de l'enquête transport de 2007 de l'INSEE. Afin de rendre les valeurs cohérentes avec notre modèle, la distance moyenne des trajets domicile-travail n'a pas été prise dans cette même enquête transport. En effet, les villes ne sont pas parfaitement mono centriques dans la réalité, et les emplois sont répartis dans l'ensemble de la structure urbaine. La calibration de notre modèle nécessite de connaître à l'année de base les coûts de transport dû aux trajets domicile-travail supportés par les travailleurs en n'importe quel point de l'agglomération urbaine. Les coûts de transport étant supposés linéaires avec la distance au centre de la ville, leurs calculs nécessitent de connaître la distance moyenne des trajets domicile-travail. Cette distance conditionnera la taille *in fine* de la ville. Il a donc été jugé plus pertinent de prendre comme distance moyenne des trajets domicile-travail la racine carré du rapport de la population avec la densité. Cette grandeur est appelée taille caractéristique des trajets domicile-travail.

⁸ Le salaire de référence étant le salaire à Paris

⁹ Une entreprise est prise au sens de l'établissement de l'INSEE. Un établissement est une unité de production géographiquement individualisée, mais juridiquement dépendante de l'entreprise. Un établissement produit des biens ou des services : ce peut être une usine, une boulangerie, un magasin de vêtements, un des hôtels d'une chaîne hôtelière, la « boutique » d'un réparateur de matériel informatique... L'établissement, unité de production, constitue le niveau le mieux adapté à une approche géographique de l'économie. En outre, La population des établissements est relativement stable dans le temps et est moins affectée par les mouvements de restructuration juridique et financière que celle des entreprises.

Agglomérations urbaines	Pop_j Population	L_j Travailleurs	Y_j Part PIB	w_j Salaire	n_j Firmes	δ_j^H Dépenses logement	t_j Temps transport	h_j Taille logement	d_j Distance transport
<i>Unités</i>	10^3	10^3	%	<i>Index</i>	10^3	%	<i>minutes</i>	m^2	<i>Km</i>
Paris	11 837	8 866	24.25	1.00	1 015	19.20	34.90	37.7	68.00
Lyon	1 757	1 265	3.00	0.85	138	18.99	30.50	49.2	32.45
Marseille	1 618	1 083	2.48	0.82	134	16.77	23.30	38.2	30.02
Lille	1 164	798	1.69	0.80	70	17.36	20.90	43.5	17.62
Toulouse	1 118	809	1.85	0.84	88	21.16	23.90	54.2	35.76
Bordeaux	1 009	717	1.62	0.80	79	20.20	19.70	49.1	35.13
Nice	999	709	1.82	0.80	112	21.26	21.40	35.8	26.87
Nantes	768	555	1.23	0.82	52	21.31	22.40	48.6	26.72
Strasbourg	642	458	1.03	0.80	46	18.60	24.20	54.5	20.75
Rennes	578	414	0.90	0.80	40	22.96	19.70	61.5	28.42
Grenoble	533	375	0.90	0.81	38	17.16	20.70	52.0	22.35
Montpellier	514	342	0.80	0.81	48	20.48	23.00	49.2	21.50

Figure 12 : Valeurs des variables socio-économiques caractérisant chaque agglomération à l'année de base

A partir de ces données et des équations de cohérence données par IMACLIM-R en termes de PIB total, de population, de nombre de travailleurs, de salaire moyen et de prix (cf. Figure 6), le modèle spatial calcule les équilibres sur les marchés de l'immobilier, des biens et services et du travail dans chaque agglomération urbaine. Ces équilibres nous donnent une représentation spatiale de l'économie à l'année de base. Nous avons confronté les résultats obtenus par le modèle spatial et la réalité en termes de densité. A partir du Répertoire Géographique des Communes fourni par l'IGN, des communes appartenant à une aire urbaine considéré et de leurs nombres d'habitants, nous avons tracé le nombre d'habitants en fonction de la distance au centre pour chaque aire urbaine considéré. Nous avons comparé ce résultat aux sorties du modèle (cf. Figure 13).

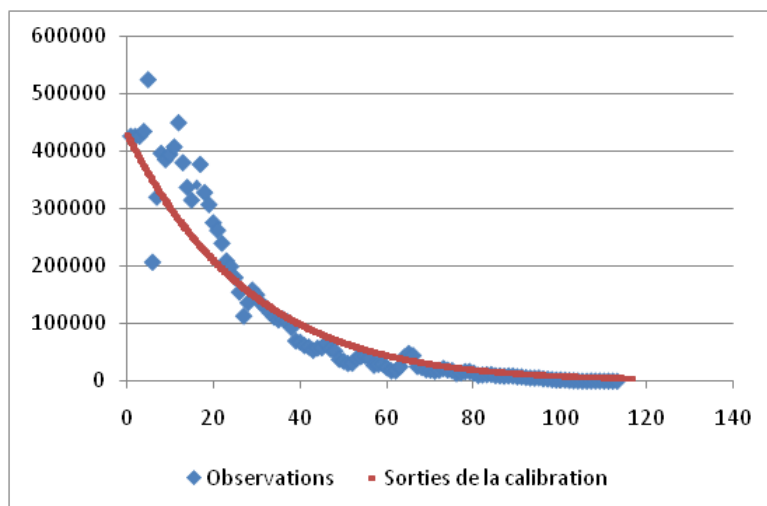


Figure 13 : Nombre d'habitants en fonction de la distance en km au centre dans l'aire urbaine de Paris

Les résultats obtenus sont relativement bons. Ils sont d'autant meilleurs que la ville est importante et que son organisation s'apparente à une structure mono centrique. Le cas de Paris est particulièrement bien représenté par notre modélisation.

4. Les scénarios 1 et 2 : signaux-prix et transition post-carbone

Les scénarios 1 et 2 reposent essentiellement sur le rôle des signaux-prix comme source de l'induction des changements techniques.

a. Signaux-prix, innovation technique et choix énergétiques

Les signaux-prix agissent sur la nature et l'intensité des modes de consommation énergétiques à travers la combinaison de leurs effets sur l'innovation technologique d'une part et sur les choix des utilisateurs finaux d'autre part.

L'indicateur pertinent pour mesurer l'incitation au changement technique est le coût total pour les utilisateurs des ressources fossiles, incluant le prix de la ressource brute et de son contenu carbone, comme source du changement technique. Pour donner un ordre de grandeur, une Tonne-Equivalent-Pétrole de carburants issus du pétrole (essence, gazole, kérosène) génère 3 tonnes d'émissions de CO₂, ce qui implique qu'une taxe carbone de 1 euro par tonne de CO₂ induit un coût additionnel d'environ 0.4 euros par baril. Or, le signal-prix donné par la taxe carbone n'aura un impact sur les comportements et les choix techniques des agents que si elle permet un renchérissement non négligeable du prix de la ressource ressenti par les consommateurs. La mise en place d'une taxe carbone stabilisée autour de 100€/tCO₂ conduit à un coût additionnel du baril de pétrole de l'ordre de 40\$/baril, soit une augmentation de 16% par rapport à une situation en l'absence de taxation du carbone.

Mais, plus que le niveau de moyen terme du signal prix, c'est la trajectoire temporelle qui compte pour évaluer les effets cumulés de l'impact des hausses de prix et de l'introduction d'une taxe carbone. En effet, quand on prend en compte à la fois les inerties (techniques et comportementales) et les anticipations imparfaites des agents sur les niveaux de prix futurs qui les conduisent à adopter, même pour les choix qui engagent le long terme, des décisions en fonction des signaux-prix courants, le signal-prix ne pourra sensiblement réorienter la situation technologique et comportementale de long-terme qu'à travers une succession de signaux orientés vers le haut. Ainsi, la temporalité des signaux-prix joue un rôle particulièrement important et une augmentation rapide est cruciale pour nourrir une prise de conscience rapide de l'importance d'un changement et donner l'impulsion vers une évolution d'ampleur des modes de consommation d'énergie.

Ces trajectoires de coût agissant comme signaux-prix agissent comme un déterminant important de l'innovation technique au travers de leur aspect incitatif sur l'amélioration de l'efficacité énergétique et la recherche de ruptures technologiques. Trois mécanismes essentiels gouvernent les processus d'innovation technique.

- *La recherche et le développement*

Les agents économiques orientent leurs politiques de R&D en tenant compte d'un arbitrage entre les coûts d'investissement amont et les bénéfices en termes de profits monétaires permis par les économies d'énergies obtenues en aval. Pour donner un ordre de grandeur des montants en jeu au niveau mondial, le tableau ci-dessous, tiré de « Energy Technology Perspective 2008 » de l'AIE résume les dépenses d'investissement mondiales nécessaires sur les principales nouvelles technologies du secteur énergétique dans l'objectif d'atteindre un objectif d'émissions de CO2 en 2050 égal à leur niveau de 2000 (scénario A) ou divisé par 2 par rapport au niveau de 2000 (scénario B). Les scénarios 1 et 2 sont plus proches de la fourchette estimée pour le scénario B.

Coûts des investissements sur les nouvelles technologies sur 2010-2050 (Milliards\$)		
	Scénario A	Scénario B
Secteur Electrique	3200-3760	3840-4470
Bâtiment	320-400	340-420
Transport	260-310	7600-9220
Industrie	700-900	1400-1700
TOTAL	4480-5370	13200-15810

Figure 14 : Estimation des dépenses d'investissements dans les nouvelles technologies nécessaires à la réduction des émissions en 2000 égale (scénario A) ou divisée par 2 (scénario B) par rapport à 2050

- *L'apprentissage par la pratique (learning-by-doing)*

La performance des technologies augmente et leur coût en capital décroît au fur et à mesure de l'accumulation des connaissances et des effets d'apprentissage liés à l'amélioration du processus de production, à la conception du produit et à la réduction des dépenses associées aux intrants. La nature du processus d'apprentissage est caractérisée par le taux d'apprentissage qui correspond au taux de réduction du coût d'une technologie associé à un doublement de sa production cumulée. Pour donner un ordre de grandeur, de nombreux auteurs mentionnent une règle empirique selon laquelle le taux d'apprentissage peut être

estimé à 20%.¹⁰ Il est néanmoins très important de noter que la réduction des coûts d'une technologie résultant de sa plus grande utilisation n'est pas systématique dans le secteur de l'énergie. Les technologies qui nécessitent un déploiement à grande échelle, des investissements considérables sur une courte période de temps et une maîtrise technique importante ne bénéficient pas toujours des réductions de coûts classiques liées à la standardisation, à la répétition d'expériences identiques ou à la production en grande séries. Le nucléaire, mais aussi la capture et la séquestration du carbone, semblent être de telles technologies¹¹.

- *Les externalités technologiques positives*

Une externalité technologique positive existe si un agent profite de gains de productivité grâce à des technologies développées par d'autres agents et pour lesquelles il ne fournit pas de contrepartie financière. La diffusion de ces externalités est favorisée par les échanges matériels ou immatériels et l'intégration du marché considéré aux marchés mondiaux est alors un élément essentiel de la diffusion du progrès technique

A court terme – c'est-à-dire à équipements et technologies fixés – le prix des énergies détermine le coût du service énergétique pour les ménages (mobilité, chauffage...) ou les producteurs (intensité énergétique de la production). L'impact de variations de prix sur la consommation effective d'énergie de la part des agents dépend alors des potentiels de substituabilité entre énergies (un même service énergétique peut-il être satisfait par différentes énergies ?) et des potentiels de réduction des besoins essentiels de ces services énergétiques. Sur le long terme, les prix agissent également sur les choix techniques et comportementaux des agents qui peuvent modifier les besoins unitaires d'énergie pour satisfaire un besoin énergétique donné.

L'ampleur de l'effet des signaux-prix sur les choix effectifs des agents est mesurée par l'élasticité-prix qui mesure le pourcentage de variation de la consommation pour une variation des prix de 1%. Vu que les deux scénarios considérés dans cette note n'impliquent pas de différences en termes de structure des choix des agents, il paraît raisonnable de prendre des hypothèses communes pour ces élasticités, les écarts en termes de consommations énergétiques résultant des différences dans les trajectoires de prix. La valeur de ces élasticités

¹⁰ Cette règle reste à manipuler avec précaution du fait de l'existence d'effets de saturation (le taux d'apprentissage diminue au fur et à mesure que les technologies deviennent matures), et de l'existence d'asymptotes sur les coûts de production qui s'opposent à la poursuite du processus d'apprentissage.

¹¹ Grubler A., *The cost of French nuclear scale-up: A case of negative learning by doing*, 2010, Energy Policy

dépend alors évidemment des secteurs considérés avec des effets prix de court terme très faibles pour le transport, faibles pour les usages non-électriques du résidentiel et potentiellement plus sensibles pour l'utilisation de l'électricité dans les usages commerciaux et résidentiels. Sur le long-terme, l'ampleur des effets attendus dépendra principalement des potentiels d'évolution technologiques et comportementaux considérés.

b. Hypothèses des scénarios 1 et 2

Prix des énergies et du carbone

Le scénario 1 est caractérisé par une hausse modérée des prix du pétrole pendant la période 2010-2020 et un affaiblissement des préoccupations liées à l'effet de serre. Du point de vue économique, cela se traduit par l'absence de régulation environnementale d'envergure nationale et notamment par l'abandon de l'idée d'une taxe carbone. Les trajectoires de prix sous-jacentes sont cohérentes avec un maintien à moyen terme des prix du pétrole à un niveau moyen. Nous prenons 80\$/baril comme valeur de référence à mi-chemin des niveaux extrêmes constatés au cours des dernières années, entre les 140\$/baril atteints au plus fort des tensions sur les marchés pétroliers et les 40\$/baril auxquels la crise a conduit les marchés. En effet, au-delà des fluctuations de court terme dues à des événements particuliers (montée brutale début 2008 due à la demande exponentielle des pays en développement, chute brutale des cours suite à la crise financière ou montée récente au-delà de 100\$/baril comme conséquence des événements politiques dans le monde arabe), le niveau de 80\$/baril apparaît comme un compromis « raisonnable » assurant des revenus importants aux principaux producteurs, une rentabilité intéressante de nombreux projets pour les investisseurs et un niveau supportable par les économies des pays importateurs. Le maintien d'un niveau de prix relativement stable autour de cette valeur sur 10-15 ans a alors pour contrepartie une montée sensible des cours sur le moyen/long-terme au moment de l'apparition de contraintes de déplétions sur les réserves de pétrole. Le prix du baril atteint alors 300 dollars US en 2030.

Le scénario 2 est caractérisé par une l'apparition brutale d'un choc sur les marchés pétroliers, tel qu'on peut imaginer qu'ils auraient eu lieu en l'absence d'une crise économique. Cette crise conduit à une hausse rapide des prix du pétrole jusqu'à 250 dollars US en 2020. La contrepartie est l'effet de ce signal-prix comme incitation à une mobilisation

plus active des adaptations économiques vers une modération de la demande qui permet de mieux anticiper les contraintes futures sur la disponibilité des ressources. La conséquence sur les marchés pétroliers est la stabilisation des cours du baril à moyen terme comme niveau d'équilibre entre une situation contrainte côté offre et une modération de la demande (résultant de la diffusion accélérée des mesures d'efficacité énergétique et de report vers les énergies non fossiles, moins chères). Dans ce contexte, le renchérissement du prix du baril va de pair avec des prix plus élevés du gaz, partiellement indexé sur le pétrole et, à partir du milieu des années 2020, on va donc avoir un prix international du gaz et des carburants issus du pétrole plus élevé dans le cas du scénario 1 que dans celui du scénario 2. Ces niveaux de prix élevés des énergies fossiles favorisent l'adoption de mesures de modération des émissions de gaz à effet de serre. Le scénario 2 suppose alors la mise en place d'une taxe carbone aux alentours de 2018 à une valeur de 32 euros la tonne, avec une augmentation jusqu'en 2030 pour atteindre une valeur de 100 euros la tonne. La mise en place de cette taxe au niveau européen va permettre de repousser les contraintes de déplétions et de limiter la hausse du prix du baril. Les revenus issus de cette taxe vont permettre de diminuer les charges imposées au marché du travail. Le coût du travail va donc diminuer.

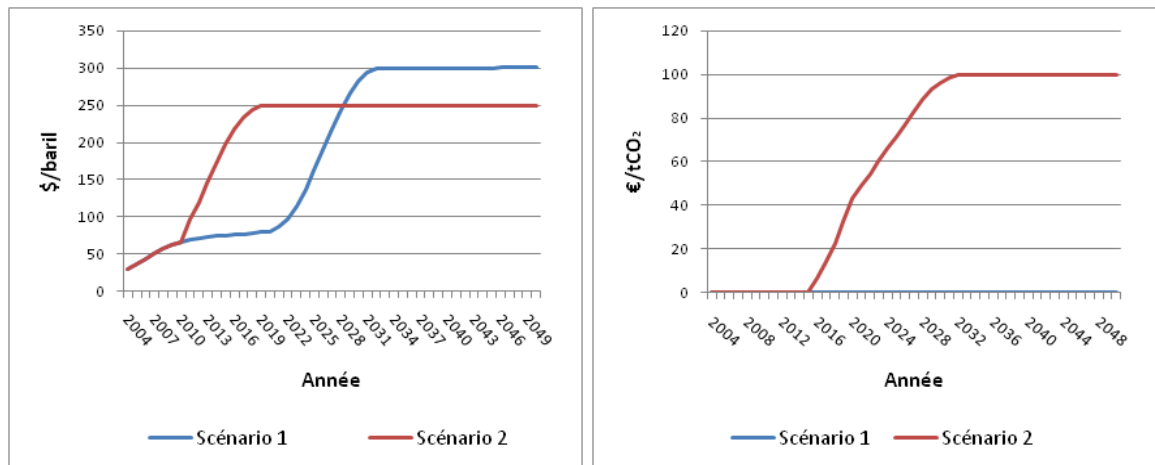


Figure 15 : Prix mondial du baril de pétrole (gauche) et valeur de la taxe carbone en France (droite)

Comme il a été dit précédemment, la temporalité des signaux-prix joue un rôle important. C'est ainsi notamment que dans le scénario 2, la réorientation importante des choix techniques et comportementaux nécessite un signal-prix rapide avec notamment une montée du prix du carbone dès la période 2010-2020. La figure 16 compare la forme des coûts totaux pour les utilisateurs dans les scénarios 1 et 2, et on peut constater que, si les niveaux de long-terme sont quasiment identiques, la forme de la courbe du coût total diffère sensiblement. En

effet, l'augmentation de ce coût intervient beaucoup plus tôt dans le scénario 2 que dans le scénario 1 et les niveaux de coût total sont sensiblement plus élevés pendant 20 ans.

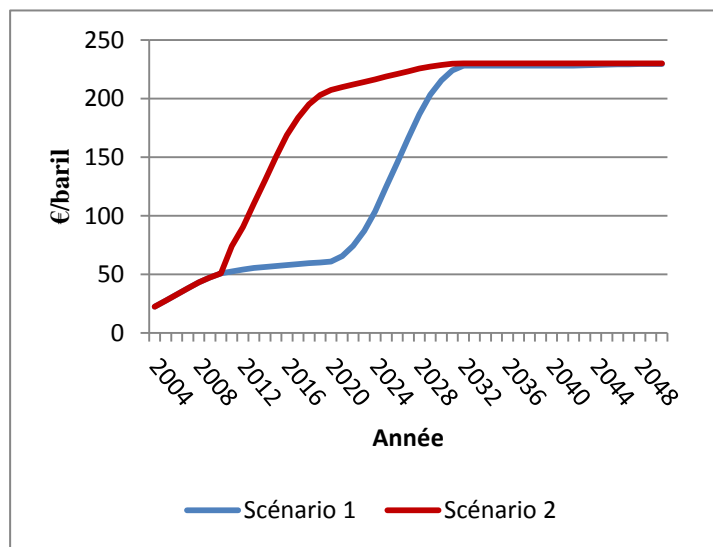


Figure 16 : Coût total des utilisateurs des ressources fossiles

Choix des technologies

Les scénarios 1 et 2, qui sont des scénarios caractérisés essentiellement par le rôle des signaux-prix comme source de l'induction des changements techniques, se différencient par les hypothèses retenues en termes de coûts d'investissements des politiques R&D et des taux d'apprentissages sur les nouvelles technologies. Ces hypothèses sont construites de manière à respecter la description des scénarios donnés. L'annexe 2 présente comment les différentes hypothèses des scénarios sont prises en compte de façon explicite dans le modèle.

	Scénario 1	Scénario 2
Transport	<ul style="list-style-type: none"> - Faible développement des véhicules électriques (5% du parc) et des véhicules hybrides - Réduction de l'utilisation des véhicules privés - Développement de carburants non issus du pétrole (10% de CTL et 10% de biocarburants) 	<ul style="list-style-type: none"> - Développement important des véhicules électriques (40% du parc) - Réduction de l'utilisation des véhicules privés - Développement de carburants non issus du pétrole (20% de biocarburants)
Logement	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction de la consommation énergétique totale des bâtiments (-25%) 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction de la consommation énergétique totale des bâtiments (-35%)
Energie	<ul style="list-style-type: none"> - Faible développement des énergies renouvelables (<20% du mix énergétique) 	<ul style="list-style-type: none"> - Développement de la filière nucléaire

Figure 17: Principales hypothèses des scénarios 1 et 2

Concernant le secteur des transports, nous adoptons une représentation explicite de trois catégories de technologies automobiles : les véhicules standards (moteur thermique), qui constituent plus de 99% du parc automobile en 2004, les véhicules hybrides, dont la part n'excède pas 1% l'année de base, et les véhicules électriques. La diffusion des technologies alternatives au moteur thermique est contrôlée par un arbitrage sur le coût total de la technologie, qui combine le coût en capital, décroissant avec les processus d'apprentissage, et les coûts en énergie résultant des arbitrages sur le coût relatif des carburants liquides et de l'électricité. Le scénario 1 se distingue par un faible développement des véhicules hybrides et des véhicules électriques, qui ne pénètrent sensiblement le marché qu'à partir de 2030, quand l'augmentation du coût du pétrole donne une marge de rentabilité à ces technologies par rapport à la technologie thermique dominante. En raison des inerties sur le renouvellement du parc mais aussi sur les processus comportementaux de choix des agents, ce démarrage relativement tardif ne permet pas une pénétration massive sur la période considérée et le moteur thermique reste dominant en 2050. Le scénario 2 se caractérise au contraire par un essor de la filière électrique, soutenu par une augmentation de la part des véhicules hybrides et électriques dans le parc automobile, qui conduisent à une quasi disparition du moteur thermique en 2050. Dans ce scénario, l'augmentation très rapide du coût des énergies fossiles utilisées majoritairement pour produire les carburants liquides donne une incitation rapide à la diffusion de technologies alternatives, véhicules électriques et hybrides. L'accumulation de l'apprentissage permet alors de diminuer rapidement les coûts relatifs de cette technologie (amélioration des processus de production permettant une décroissance des coûts et

l'apparition de véhicules produits plus efficaces) qui agit comme un facteur accélérant la diffusion des technologies. Dans ce scénario, l'innovation joue ainsi un rôle majeur et son accumulation au cours du temps en réaction aux décisions de consommation et de production induites par les signaux-prix permet une modification d'ampleur du type de technologies utilisées. Dans les deux scénarios, les véhicules hybrides gardent une marge de compétitivité par rapport aux véhicules électriques en raison d'hypothèses sur les structures de coût initiales et les taux d'apprentissage différenciés.

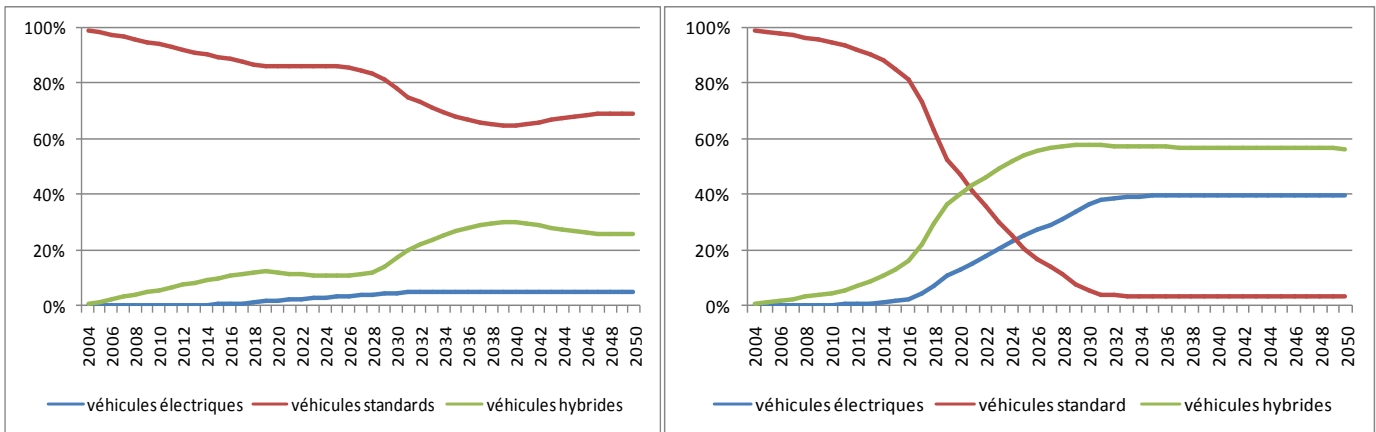


Figure 18: Evolution du parc automobile pour le scénario 1 (gauche) et 2 (droite)

Les deux scénarios prédisent que la part totale des carburants alternatifs au pétrole pour la production de carburants liquides est proche dans les deux scénarios (environ 20%), mais avec une répartition très différente entre les deux technologies considérées dans le modèle : les biocarburants de première et deuxième générations, d'une part, et la liquéfaction du charbon (Coal-To-Liquid), d'autre part. Le déploiement des biocarburants dépend directement des prix du pétrole qui mesure la compétitivité de cette source d'énergie: plus le prix du pétrole est élevé, plus il est profitable d'utiliser alternativement les biocarburants. Les contraintes liées à la compétition pour l'usage des sols (notamment avec l'agriculture) sont prises en compte *via* l'imposition d'asymptotes de production qui évoluent au cours du temps en fonction des investissements cumulés qui déterminent la productivité (quantité de biocarburants par unité de terre). C'est ainsi que, logiquement, les biocarburants se diffusent sensiblement plus fort dans le scénario 2 que dans le scénario 1 en réponse au prix plus élevé du pétrole pour atteindre 20% contre seulement 8% de la fourniture totale de carburants liquides dans le deuxième cas. Ces résultats peuvent paraître surprenants au vu des niveaux de coût total du pétrole en fin de période, mais résultent en fait de l'effet des trajectoires. En effet, la montée rapide des prix dans le scénario 2 donne rapidement un avantage compétitif

aux biocarburants sur lesquels les producteurs investissent dès le début de la période, leur permettant de développer les capacités de production et d'améliorer les processus de production en cumulant l'apprentissage, aboutissant à une productivité sensiblement plus élevée en fin de période permettant *in fine* un niveau de production plus forte malgré les contraintes sur l'usage des sols. La dynamique de diffusion du charbon liquéfié est très différente en raison du contenu carbone de cette technologie, beaucoup plus élevé que le raffinage du pétrole. Ainsi, l'introduction d'une taxe carbone dans le scénario 2 se fait au détriment du Coal-To-Liquid, qui n'est jamais compétitif et n'entre pas sur le marché. Au contraire, dans le scénario 1, le Coal-To-Liquid peut se diffuser sur les marchés, à partir du moment où le prix du pétrole est suffisamment élevé.

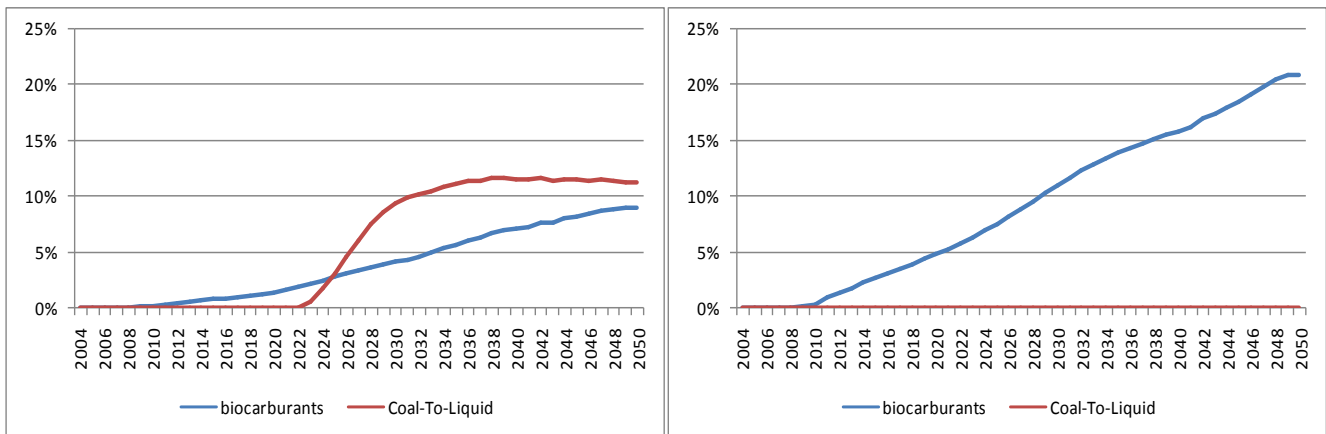


Figure 19: Part de marché des carburants alternatifs au pétrole pour le scénario 1 (gauche) et 2 (droite)

Dans notre modèle, le secteur du logement comprend deux types de bâtiments : les bâtiments usuels, dont la consommation énergétique au mètre carré évolue en fonction de l'isolation, et les bâtiments BC (Basse Consommation) dont la consommation énergétique est inférieure à 50 kWh. La consommation énergétique total du secteur du logement dépend donc de la composition du parc de bâtiment. L'évolution du parc de bâtiment dépend de trois mécanismes : la construction neuve, la rénovation autonome qui permet de limiter la dépréciation des anciennes installations, et la rénovation provoquée par les pouvoirs publics. La construction neuve et la rénovation autonome réagissent au prix des énergies. Dans un contexte où les énergies sont chères, il devient plus rentables de construire des bâtiments BC et d'augmenter l'isolation des bâtiments existants, qui deviennent à leur tour des bâtiments BC. La construction de bâtiments BC et la rénovation des logements anciens peuvent être mesurés de la même manière par la pénétration des bâtiments BC dans le parc existant.

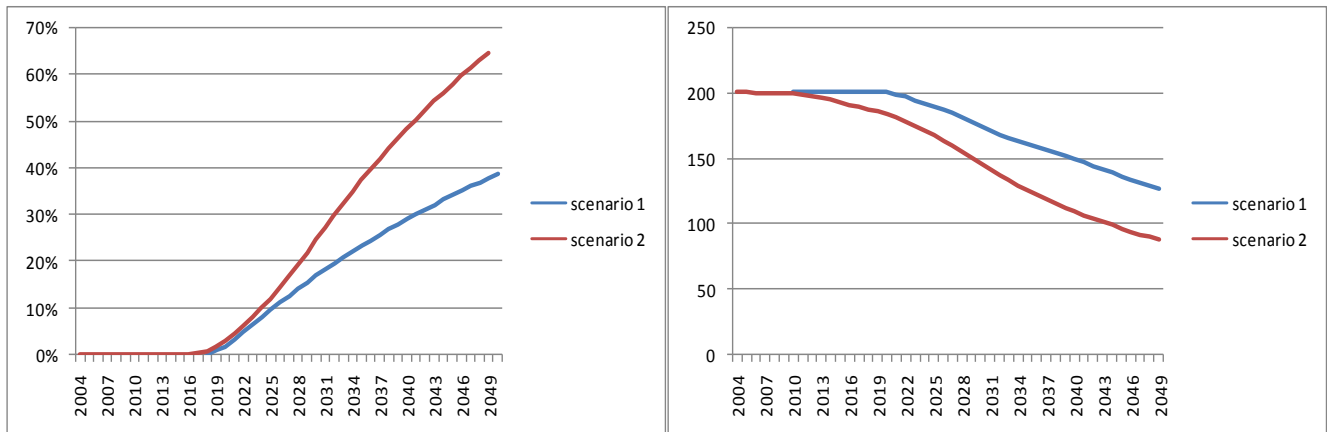


Figure 20: Part de marché des bâtiments BC (gauche) et consommation du parc en kWh/m2/an (droite)

Dans les deux scénarios, l'évolution du parc de bâtiment est déterminée par les prix des énergies, qui agissent sur la construction neuve et la rénovation comme une incitation pour les pouvoirs publics à mener des politiques d'efficacité énergétique. Nous représentons ces effets au travers de la pénétration de bâtiments BC, combinant la construction neuve et la promotion des bâtiments standards en bâtiments BC via la rénovation. Dans les deux scénarios, le contexte de tension sur les marchés énergétiques conduisent à des politiques importantes permettant une amélioration des performances énergétiques du parc de bâtiment *via* une pénétration progressive des bâtiments Basse Consommation. Cet effet est logiquement plus important dans le scénario 2 en raison de prix incitatifs plus élevés ; au vu des inerties importantes caractérisant le renouvellement du parc de bâtiments, les différences de temporalités des signaux prix jouent ici un rôle particulièrement important sur les résultats finaux, puisque les retards pris dans le scénario 1 à cause de signaux-prix faibles ne peuvent se compenser facilement. Ainsi, la pénétration des bâtiments BC dépasse 60% en 2050 dans le scénario 2, contre seulement 40% dans le scénario 1. En termes de consommation moyenne du parc, on obtient une valeur légèrement inférieure à 100kWh/m2/an (division par 2 des consommations unitaires par rapport à l'année de référence) contre une diminution limitée à 25 % sur la même période dans le scénario 1. Il est à noter que, même dans le cas le plus optimiste, on reste loin des objectifs affichés dans le Grenelle de l'Environnement ; ceci est logique car des objectifs très ambitieux d'efficacité énergétique requerraient la mobilisation d'instruments complémentaires à la seule réaction aux signaux-prix

A l'année de calibration, la production de l'électricité en France est essentiellement assurée par les centrales nucléaires, à plus de 70%, l'hydroélectricité et les autres énergies

renouvelables (solaire, éolien et biomasse) pour 14% de la production, le reste étant assuré par les énergies fossiles (gaz et charbon). L'évolution de ces technologies est guidée par les arbitrages sur les coûts complets des technologies suivant différents segments de la courbe de charge qui permet de distinguer les choix pour la production de base, de semi-pointe et de pointe. Il est important de noter que le nucléaire a bénéficié d'un soutien politique et institutionnel important, qui limite l'introduction de nouvelles technologies de production de l'énergie. La part des énergies renouvelables autres que l'hydroélectricité dans la production d'électricité dépend des investissements réalisés les premières années, ainsi que d'une volonté de la France de réduire la part du nucléaire dans la production. Les énergies fossiles (essentiellement le gaz) sont utilisées en semi-pointe et, éventuellement, pour compenser les intermittences des productions renouvelables. L'augmentation des prix des fossiles conduit à une poursuite de la prédominance de la filière nucléaire, particulièrement dans le scénario 2 où l'augmentation brutale du prix des énergies fossiles conduit à relancer un programme de construction de centrales nucléaires dès le début de la période. Ce choix se fait au détriment du développement des énergies renouvelables. Il est à noter que ce résultat est notamment la conséquence d'hypothèses n'intégrant pas un programme volontariste de sortie du nucléaire – la politique d'appui à la filière nucléaire restant identique –, seuls les signaux-prix sont considérés comme déterminant les choix énergétiques.

c. Résultats des scénarios 1 et 2

Organisation spatiale

Les tendances croissantes du coût du transport en parallèle de l'augmentation des cours des énergies fossiles (qui restent dominantes dans la fourniture de carburants) pousse à une densification des formes urbaines, moins consommatrices en transport. L'ampleur de cet effet est très sensible à la temporalité des signaux-prix à l'origine de ce processus, à cause de la forte inertie sur les infrastructures définissant ces formes urbaines. On observe ainsi une densification très modérée dans le scénario 1 qui atteint en moyenne 0.6% par an sur l'ensemble de la période. En effet, le transport reste longtemps trop peu cher pour réorienter les choix des agents urbains et quand les prix augmentent finalement, les inerties limitent le processus de densification. Dans le scénario 2, la montée rapide des prix favorise une

densification beaucoup plus sensible qui atteint 1.1% par sur l'ensemble de la période, grâce au signal prix poussant à une modération des besoins de transport.

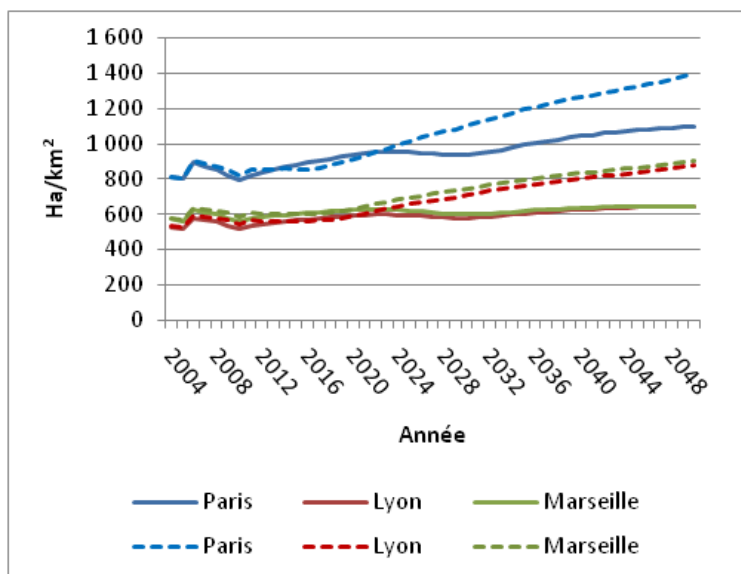


Figure 21 : Evolution de la densité pour les trois plus grandes villes françaises pour le scénario 1 (en traits pleins) et pour le scénario 2 (en pointillé)

Macroéconomie : énergie, émissions et croissance économique

L'influence des signaux-prix sur les choix technologiques et les comportements tels que décrits ci-dessus induisent des évolutions importantes des modes de consommation énergétiques tel que représenté dans les matrices énergétiques qui donnent une vision d'ensemble des processus de production, transformation et consommation finale d'énergie en 2050.

Scénario 1 (MTEp)		Charbon	Pétrole	Carburants	Gaz	Renouvelables	Nucléaire	Electricité
Energie Primaire	Production	0.00	0.00	0.00	0.00	23.87	233.59	0.00
	Consommation	15.05	36.41	5.06	25.95	23.87	233.59	-10.28
Transformation	Raffineries	-7.19	-36.41	44.32	0.00	-5.37	0.00	-0.38
	Centrales électriques	-3.85	0.00	-3.03	-9.29	-18.51	-233.59	84.87
Consommation Finale	Industrie	4.01	0.00	1.88	5.94	0.00	0.00	51.56
	Transport	0.00	0.00	44.42	0.02	0.00	0.00	1.95
	Résidentiel	0.00	0.00	0.01	10.71	0.00	0.00	19.50

Scénario 2 (MTEP)		Charbon	Pétrole	Carburants	Gaz	Renouvelables	Nucléaire	Electricité
Energie Primaire	Production	0.00	0.00	0.00	0.00	24.16	226.42	0.00
	Consommation	15.30	25.29	1.93	20.82	24.16	226.42	-9.07
Transformation	Raffineries	0.00	-25.29	30.87	0.00	-6.31	0.00	-0.26
	Centrales électriques	-9.47	0.00	-2.09	-3.26	-17.85	-226.42	80.55
Consommation Finale	Industrie	5.83	0.00	2.05	8.76	0.00	0.00	46.14
	Transport	0.00	0.00	28.63	0.02	0.00	0.00	6.32
	Résidentiel	0.00	0.00	0.00	8.79	0.00	0.00	17.60

Figure 22 : Matrice énergétique en 2050 du scénario 1 (haut) et 2 (bas)

Concernant les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du territoire, la montée des prix des énergies fossiles permet de réduire les émissions dans les deux scénarios, de 40% et 55% par rapport à leur niveau de 2004 dans les scénarios 1 et 2 respectivement. Entre le scénario 1 et le scénario 2, on a une différence d'émissions de 106 millions de tonnes de CO₂ en 2050, qui s'explique par la combinaison d'une montée plus rapide des prix des énergies fossiles et la mise en place d'une taxe carbone.

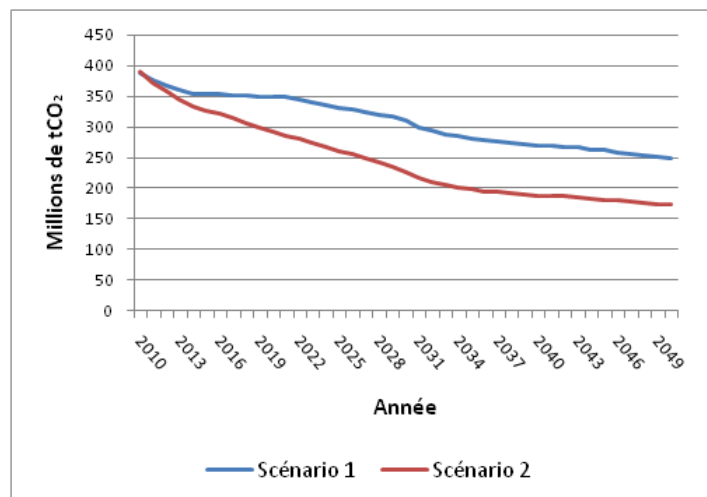


Figure 23: Emissions de CO2 nationales

Pour expliquer les différences agrégées, nous entrons plus en détail dans les réductions réalisées dans les secteurs les plus intensifs en émissions, à savoir la production d'électricité, la production de carburants, les usages stationnaires (industrie et résidentiel), et le transport.

La production des carburants connaît une différence qui a un impact important sur les émissions entre le scénario 1 et le scénario 2. Dans le scénario 2, la France empêche la production de charbon liquéfié (*Coal-to-Liquid*), la seule alternative aux carburants issus du pétrole étant les biocarburants. Cette politique va permettre de limiter les émissions au niveau national. En effet, dans le scénario 1, la montée des émissions est liée à la production de *Coal-*

to-Liquid. Cette différence explique plus de 16% de la réduction des émissions entre le scénario 1 et le scénario 2. En effet, les émissions de gaz à effet de serre liées aux biocarburants sont inférieures de 30% à plus de 90% selon la filière par rapport aux carburants fossiles de référence¹².

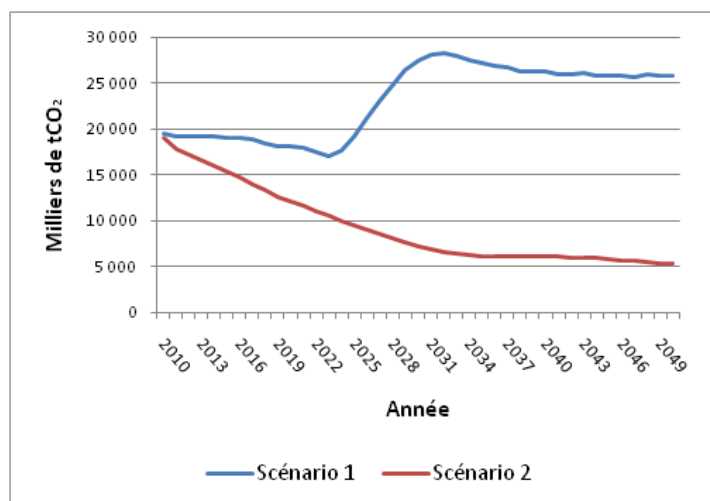


Figure 24: Emissions nationales de CO₂ liées à la production de carburants

Le secteur électrique est par nature relativement peu émetteur en raison de la prédominance de la production nucléaire. La décroissance globale des émissions dans les deux scénarios est liée à la modération d'ensemble de la consommation d'énergie. La différence entre les deux scénarios tient principalement à l'introduction de la taxe carbone dans le scénario 2, qui permet la pénétration des technologies de Captage et Stockage du carbone (CSC) permettant l'utilisation de carburants fossiles (principalement gaz) sans pour autant subir d'émissions effectives associées à l'utilisation de ces énergies. Ce n'est jamais le cas dans le scénario 1 en l'absence d'une taxe carbone, car le surcoût de l'introduction du CSC n'est pas compensé par la réduction des coûts du carbone qu'elles permettent et les technologies de production fossiles avec CSC ne sont donc jamais compétitives.

¹² *Analyses de cycle de vie appliquées aux biocarburants de 1^{ère} génération consommés en France*, Ademe, Février 2010

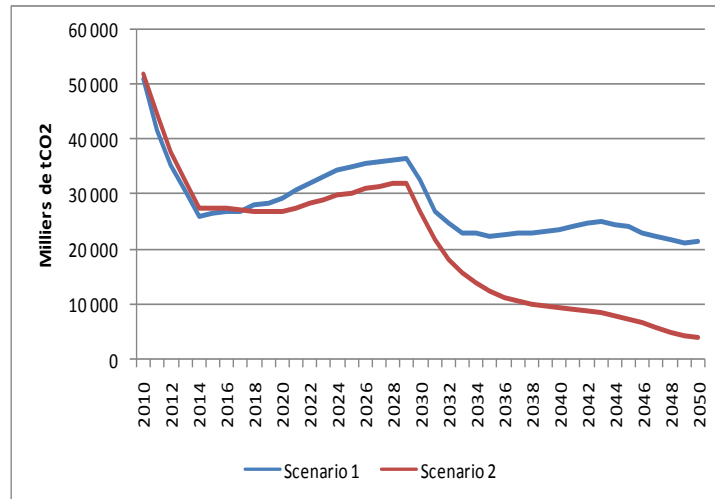


Figure 25: Emissions nationales de CO2 liées à la production d'électricité

Les usages stationnaires combinent les usages industriels et résidentiels. Pour les premiers, les trajectoires d'émissions sont infléchies en réaction aux variations de prix des énergies et de l'introduction de la taxe carbone dans le scénario 2. L'effet total observé résulte du double effet de l'efficacité énergétique sur les processus de production et du changement structurel vers les modes de production moins intensifs en énergie fossile. Logiquement, les effets sont particulièrement sensibles dès le début de la période dans le scénario 2, tandis que le scénario 1 est marqué par une première phase de légère augmentation des émissions sectorielles (tant que les prix de l'énergie fossile restent modérés), avant une deuxième phase de diminution en réaction à l'augmentation des prix. Dans le secteur résidentiel, la décroissance des émissions est principalement liée à la diffusion de l'efficacité énergétique permise par les politiques de construction neuves et de rénovation. De plus, les prix relatifs des énergies en défaveur des énergies fossiles conduisent à une redirection des usages vers les énergies moins carbonées pour satisfaire les usages non-spécifiques pour lesquels plusieurs énergies peuvent être utilisées (, chauffage).

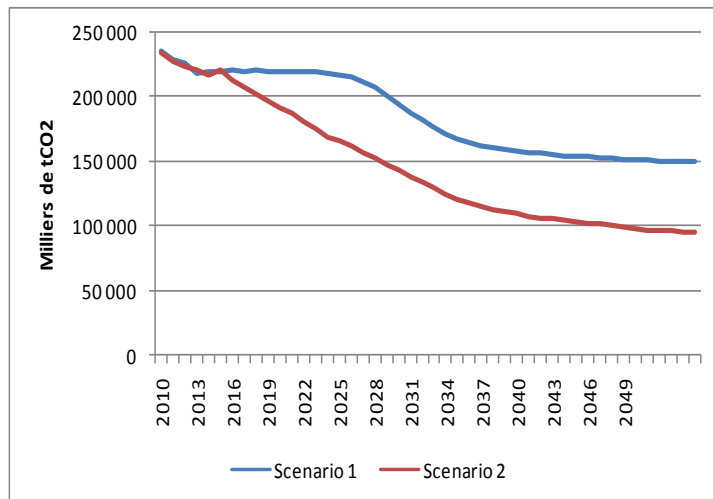


Figure 26: Emissions nationales de CO2 dans les usages stationnaires

Enfin, les émissions nationales du secteur des transports suivent des trajectoires sensiblement différentes dans les deux scénarios. Dans le scénario 1, les technologies automobiles peu intensives en carbone (hybride ou électrique) représentent une part modérée du parc et ne pénètrent significativement que dans la deuxième moitié de la période. Cette dimension technologique explique qu'en partie la diminution des émissions de ce secteur à moyen terme. Une composante complémentaire est le report modal de l'automobile vers les transports en commun favorisée par la montée du coût des carburants. La différence notable observée avec le scénario 2 en termes d'émissions sectorielles est dû à la combinaison de deux effets. Tout d'abord, les véhicules peu ou pas émetteurs diffusent beaucoup plus largement dans le parc automobile ; deuxièmement, le mode d'organisation des villes, plus dense, permet une diminution de la demande de mobilité des ménages et donc de leur consommation de transport.

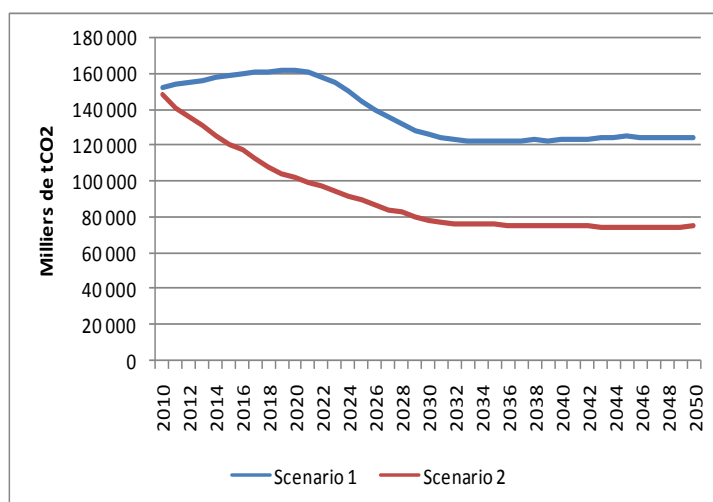


Figure 27: Emissions nationales de CO2 dans le secteur des transports

Pour finir, nous nous intéressons aux effets macroéconomiques agrégés de ces deux scénarios, mesurés par le taux de croissance du PIB. Il est important de noter que les fondamentaux de la croissance nationale (population totale et croissance de la productivité du travail moyenne) sont identiques, de sorte que les différences observées sont dues uniquement aux hypothèses contrastées sur les évolutions énergétiques et technologiques. Plusieurs phases peuvent être distinguées.

Dans un premier temps (2010-2020), le scénario 1 connaît une croissance sensiblement relativement forte (autour de 2% par an), permise par un prix des énergies plus modérés. Au contraire, le choc énergétique et l'introduction de la taxe carbone dans le scénario 2 y affectent négativement la croissance en induisant un renchérissement des coûts de production et en réduisant le pouvoir d'achat des ménages, qui se trouvent piégés dans des modes de consommation qui restent intensifs en énergie fossile en raison d'inerties techniques et comportementales.

Dans une deuxième phase (2020-2030), relativement longue, le scénario 2 est beaucoup plus profitable que le scénario 1 en termes de croissance. A ce moment, en effet, les contraintes sur les marchés fossiles viennent heurter fortement l'activité économique du scénario 1 et induisent un ralentissement sensible des taux de croissance qui tombent autour de 1% par an pendant plusieurs années. Au contraire, le scénario 2 connaît un rattrapage important malgré la taxe carbone qui a atteint son seuil de 100\$/tCO₂ et les prix des énergies qui restent élevés. A cet horizon, en effet, le cumul du changement technique permis par la première phase de prix élevés a conduit l'économie à s'adapter à une situation de prix élevés en en diminuant sensiblement la dépendance aux énergies fossiles. Cette adaptation de l'économie permet de retrouver des taux de croissance élevés durant une longue période, avec des taux dépassant les 2% par an.

Ces mécanismes d'adaptation apparaissent plus tardivement dans le scénario 1 et permettent une phase de rattrapage économique dans ce scénario pendant une troisième phase (2030-2045) au cours de laquelle les taux de croissance sont quasiment identiques dans les scénarios. Dans cette période, la légère décroissance observée dans les deux scénarios est due aux hypothèses de rattrapage macroéconomique, selon lesquels l'amélioration de la productivité du travail a tendance à stagner. Enfin, après 2045, on observe une tendance favorable au scénario 2 malgré des coûts totaux de l'énergie qui atteignent des niveaux similaires dans les deux scénarios. C'est l'effet du progrès technique, plus avancé dans ce scénario grâce au cumul du progrès technique qui y est plus avancé.

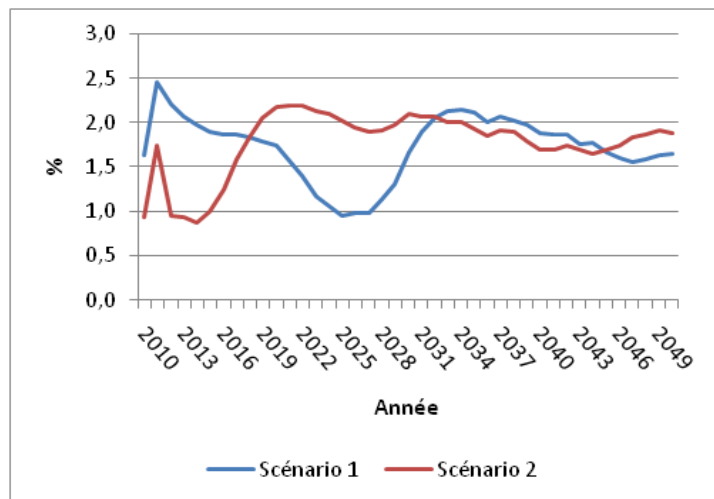


Figure 28: Taux de croissance du PIB

d. Obstacles et limites

Les scénarios 1 et 2 font l'hypothèse d'une modification des comportements des consommateurs qui vont s'orienter vers des produits plus efficace énergétiquement. Les scénarios doivent donc tenir compte des inerties de pénétration des nouvelles technologies sur le marché contraintes par la vitesse de déploiement de l'innovation et le rythme de renouvellement du capital installé.

Il convient également de tenir compte des inerties comportementales liées aux anticipations imparfaites des agents qui ont pour conséquence que les potentiels technologiques sans regret (c'est-à-dire offrant un bénéfice net à partir d'une pure analyse microéconomique) ne seront pas nécessairement adoptés si des mesures complémentaires d'accompagnement (normes, politiques d'information...) ne sont pas adoptées en complément des mesures de tarification.

De plus, les réductions de consommation énergétiques et d'émissions de carbone attendues à la suite de gains d'efficacité énergétique peuvent être réduites par un effet rebond favorisant une hausse de la demande des services énergétiques. Trois variantes de cet effet peuvent opérer:

- L'effet rebond direct : les gains d'efficacité énergétique pour un service énergétique donné induisent une baisse du prix effectif de ce service, ce qui conduit à une augmentation de la demande pour ce service.

- L'effet rebond indirect : des gains d'efficacité énergétique induisent une baisse des dépenses énergétiques pour un consommateur donné. Cette baisse de dépense s'associe à une augmentation de son niveau de consommation pour d'autres biens dont la production requiert aussi des émissions de CO₂.
- L'effet rebond global : la baisse du prix des services énergétiques modifie les prix des biens intermédiaires et finaux dans l'ensemble de l'économie, ce qui conduit à un réajustement général en prix et en quantité pouvant mener à une croissance économique plus élevée, sources de nouvelles émissions de CO₂.

Enfin, les dépenses de R&D mobilisées pour la recherche sur les technologies énergétiques sont prélevées sur le montant des ressources disponibles dans l'économie et les effets d'éviction (sur la consommation, l'investissement productif ou le budget global de R&D) constituent un point central pour l'analyse des coûts des politiques publiques et leur acceptabilité politique.

5. Les scénarios 3 et 4 : rôle du renouvellement des infrastructures

Les scénarios 3 et 4 reposent sur l'hypothèse d'investissements massifs dans le renouvellement des infrastructures urbaines (bâtiments et transports) et énergétiques visant à faire face à l'augmentation importante des prix des énergies fossiles.

Ces scénarios sont marqués par l'interventionnisme des puissances publiques qui ont les moyens d'agir au travers de leurs options d'investissement, de façon centralisée (scénario 3) ou décentralisée (scénario 4). Dans ce dernier cas, les investissements dans les infrastructures résultent plus d'un choix des collectivités locales sous la pression des habitants qui souhaitent sortir des villes dans un contexte où la crise de l'endettement des Etats n'est pas résolue et limite les potentiels d'investissement dans les infrastructures lourdes.

a. Hypothèses des scénarios 3 et 4

Prix des énergies et du carbone

Le scénario 3 est caractérisé par une hausse tendancielle des prix du pétrole sur le court terme, qui renforce les préoccupations des citoyens liées à l'effet de serre et pousse les pouvoirs publics à agir. La réaction des gouvernements européens est rapide, et bien qu'il n'y ait pas d'accords internationaux sur une régulation globale du pétrole, la plupart des pays européens mettent en place une taxe carbone. En France, l'Etat est volontaire, et la valeur de la taxe passe à 300 euros la tonne en 2020, puis elle est portée à 600 euros en 2050. On assiste alors, à partir de 2020, à la mise en place de mesures volontaristes de réorientation des investissements qui permet une modération de la hausse du pétrole dans une deuxième période. Les revenus issus de la taxe sont réutilisés afin de limiter les charges imposées au marché du travail, dans le but de soutenir la croissance et la ré-industrialisation de la France.

Le scénario 4 est lui aussi marqué par une augmentation tendancielle sensible du prix du baril sur le moyen terme. La succession des crises géopolitiques pétrolières est alors favorable au développement d'une gouvernance mondiale sur les émissions de gaz à effet de serre. Les pays tentent d'assurer leurs autonomies énergétiques. Dans un contexte de confirmation des objectifs européens de limitations des émissions de GES (avec l'adoption

d'un plan Kyoto II à partir de 2012), la France met en place une taxe carbone, dont le niveau est moins élevé grâce à la concertation internationale avec ses partenaires. La mise en place d'un système de gouvernance mondiale sur les questions du climat permet de limiter les besoins en ressources pétrolières, et limite donc la montée des prix, même dans un contexte de rareté. A long-terme, on assiste ainsi à une modération des prix des énergies fossiles.

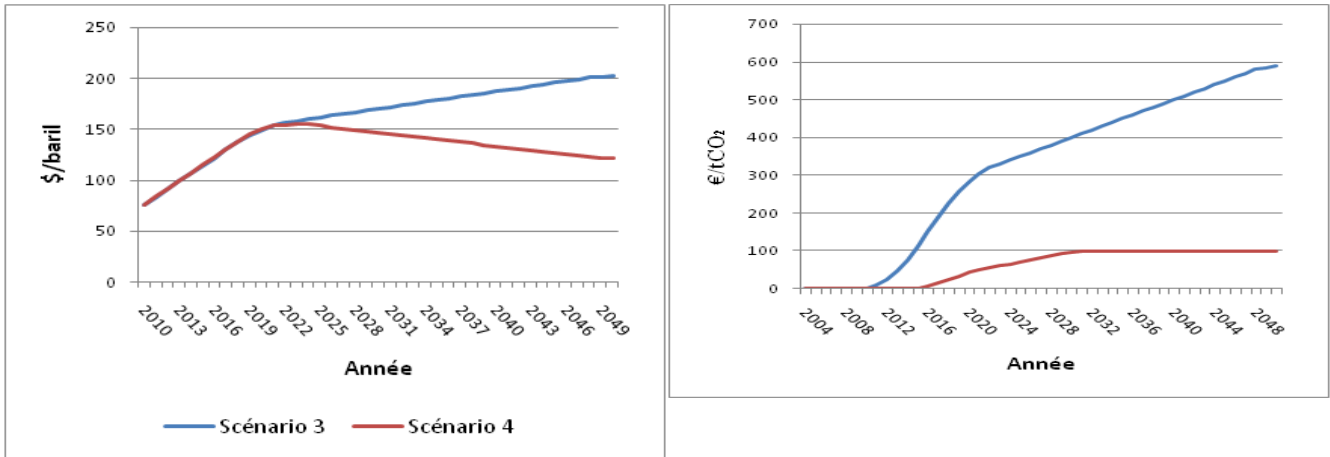


Figure 29: Prix mondial du baril de pétrole (gauche) et valeur de la taxe carbone en France (droite)

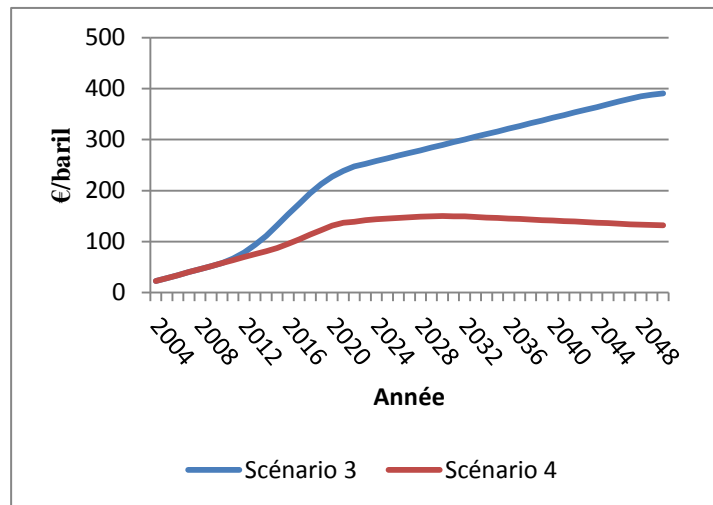


Figure 30: Coût total des utilisateurs des ressources fossiles

Choix des technologies

Les scénarios 3 et 4 sont caractérisés par un rôle important des autorités politiques, que ce soit au niveau local ou au niveau national. Les autorités publiques orientent et dirigent les investissements dans les secteurs du logement et des transports. Ces investissements ne sont pas seulement guidés par les signaux-prix (comme c'était le cas des scénarios 1 et 2),

mais résultent d'une volonté politique affichée. Les scénarios 3 et 4 se différencient néanmoins par le niveau de décision, dans un cas les décisions sont prises au niveau national, alors que dans l'autre cas les décisions sont prises au niveau local. Le scénario 3 privilégie les investissements dans les infrastructures très lourdes, le béton devenant la première arme contre le réchauffement climatique, tandis que le scénario 4 fait le choix d'un retour à la nature, délaissant les villes et les productions d'énergies centralisées. Ces différences sont prises en compte dans l'élaboration des hypothèses d'évolution technologique.

	Scénario 3	Scénario 4
Transport	<ul style="list-style-type: none"> - Développement faible des véhicules électriques (5% du parc) - Réduction de l'utilisation des véhicules privés en centre dense/augmentation en zones peu denses - Développement de carburants non issus du pétrole (20% de CTL et 10% de biocarburants) 	<ul style="list-style-type: none"> - Développement important des véhicules électriques (40% du parc) - Augmentation de l'utilisation des véhicules privés - Développement de carburants non issus du pétrole (30% de biocarburants)
Logement	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction de la consommation énergétique totale des bâtiments (-50%) 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction de la consommation énergétique totale des bâtiments (-50%)
Energie	<ul style="list-style-type: none"> - Développement des énergies renouvelables parallèlement au renforcement de la filière nucléaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Développement important des énergies renouvelables - Maintien du nucléaire pour 50% de la production

Figure 31: Principales hypothèses des scénarios 3 et 4

Concernant les technologies de transport, les deux scénarios marqués par des hausses tendanciennes des prix du pétrole et l'introduction d'une taxe carbone sont très défavorables au moteur thermique, dont la part décroît rapidement. Le scénario 3 est marqué par la diffusion massive et rapide des véhicules hybrides en réaction à l'augmentation tendancielle des prix des énergies fossiles et de l'introduction de la taxe carbone. Les véhicules électriques, principalement adaptés à des trajets courts, sont pénalisés car ils restent tributaires d'une refonte très importante du système de distribution d'énergie vers des structures décentralisées tout au long du parcours de l'utilisateur visant à lui offrir un nombre de prises et sites de recharge suffisant et des modalités de collecte des batteries. Les véhicules électriques se développent peu, n'atteignant que 5% du parc en 2050, en raison d'investissements localisés trop limités. Le scénario 4 offre au contraire des opportunités plus importantes dans ce domaine et

l'utilisation du véhicule électrique est favorisée par les évolutions de la mobilité vers de nombreux déplacements courts, usages pour lesquels ce type de technologie est adapté. Ces effets permettent de doubler la part du véhicule électrique en fin de période (40%).

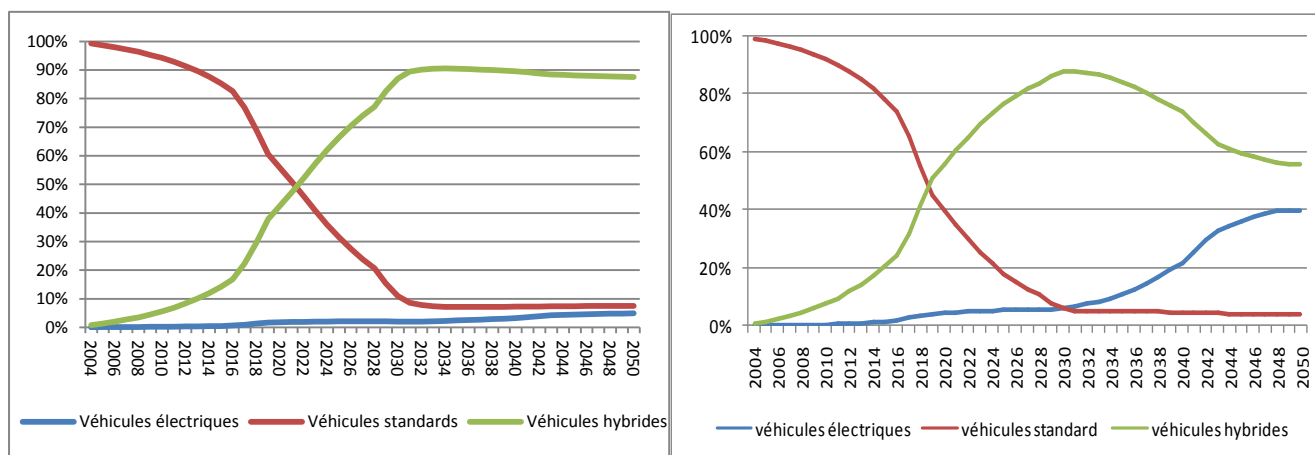


Figure 32: Evolution du parc automobile pour le scénario 3 (gauche) et 4 (droite)

Les deux scénarios offrent une vision similaire des parts de production totales des carburants alternatifs au pétrole (autour de 30% de la production totale), mais avec une répartition très différente entre les biocarburants et le Coal-To-Liquid. Le scénario 3 privilégie le recours aux investissements lourds dans des processus de production de carburants centralisés tel que le Coal-To-Liquid. Il convient de noter que, dans un contexte de taxation importante du carbone, la diffusion de cette technologie va de pair avec l'application de méthodes de Capture et Stockage du Carbone (CSC) permettant de limiter les émissions de carbone liées au processus de production. La contribution des biocarburants reste marginale. Au contraire, le scénario 4 favorise plus largement la diffusion des biocarburants, correspondant mieux à la logique d'une production décentralisée.

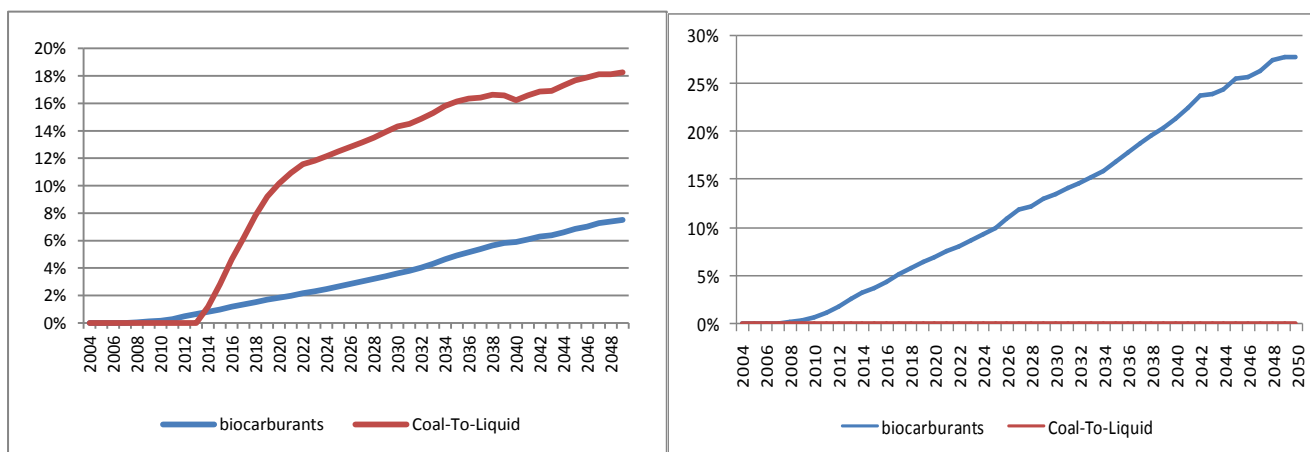


Figure 33: Part de marché des carburants alternatifs au pétrole pour le scénario 3 (gauche) et 4 (droite)

Les scénarios 3 et 4 sont caractérisés par une rénovation en profondeur du parc de logement, qui aboutit en 2050 à une consommation unitaire fortement réduite dans les deux cas, autour de 70 kWh/m²/an avec environ 80% du parc final constitué de bâtiments Basse Consommation. Cependant, si le parc final est similaire en termes de performances énergétiques, les trajectoires suivies diffèrent significativement en raison d’approches différentes. Dans le scénario 3, la politique de rénovation du bâti existant et de construction de nouveau logement est réalisée *via* la mobilisation d’investissements centralisés et donne lieu à deux phases distinctes. Jusqu’en 2030, le rythme des rénovations/construction est relativement faible, à hauteur de 0,6% par an, à cause des limites imposées par la faible capacité des entreprises françaises à mettre en place un chantier d’une telle envergure. La réalisation de travaux d’isolation est rendue obligatoire lors de transactions immobilières et la mise en place de ces normes permet une accélération sensible du rythme de rénovation qui est porté à 1,5% par an. Dans le scénario 4, les autorités locales mènent une politique de reconstruction de l’habitat qui permet aux logements d’être beaucoup plus sobres énergétiquement. Les mesures décentralisées reposent sur la mise en place de procédures plus faciles à mettre en place en raison d’une mobilisation moins importante d’investissements étatiques, de la constitution de filières de rénovation adaptées aux spécificités du bâti dans les différentes régions et de la construction de nouveaux logements hors des villes en accompagnement de la relocalisation des activités. Cette politique se traduit par une diminution continue de la consommation énergétique du parc de logement de 1,2% par an entre 2004 et 2050.

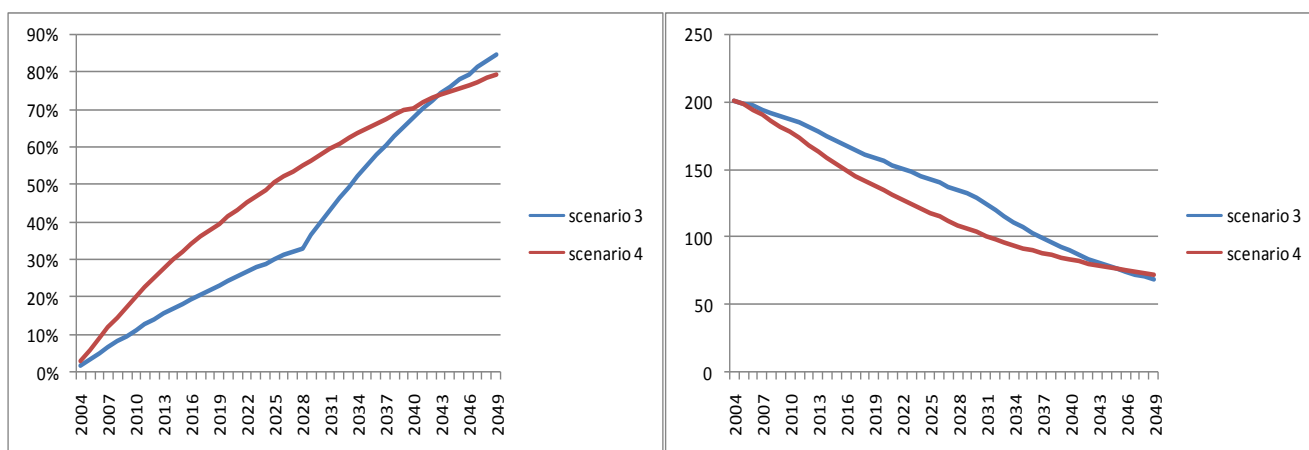


Figure 34: Part de marché des bâtiments BC (gauche) et consommation du parc en kWh/m²/an (droite)

Concernant la production d'électricité, les scénarios 3 et 4 présentent des différences, qui sont encore liées aux différents niveaux de la prise de décisions. Le scénario 3, très centralisé, prend le parti de continuer à développer l'énergie nucléaire, le parc des centrales nucléaires est progressivement rénové à partir de 2020 et la part du nucléaire dans la production totale reste stable autour de 75% au cours de la période. Quasiment l'intégralité du reste de la production est assurée par les énergies renouvelables qui se développent, essentiellement pour les énergies de pointe, sous une forme centralisée tel que des centrales de méthanisation, des fermes éoliennes ou solaires. Dans le scénario 4, le choix est fait de décentraliser la production d'énergie. En 2050, une grande partie de la production d'électricité sera assurée par les énergies renouvelables, même si près de 50% de la production reste centralisé dans des centrales nucléaires en raison de contraintes imposées par l'intermittence des modes de production renouvelables pour la base.

b. Résultats des scénarios 3 et 4

Organisation spatiale

Les scénarios 3 et 4 sont totalement opposés en termes de développement urbain. Dans le scénario 3, l'investissement de l'Etat se fait majoritairement dans les infrastructures urbaines, et les centres-villes sont repensés pour pouvoir limiter la dépendance à la voiture privée. Cependant, en périphérie des centres, l'habitation est peu dense, et l'offre de transport en commun limitée. Ceci se traduit par un processus continu d'étalement urbain. Ce processus s'accompagne d'une concentration des populations dans les grandes agglomérations, les douze plus grandes aires urbaines françaises voyant leur population augmenter globalement de 23 à 40 millions (avec notamment l'agglomération parisienne qui atteint la barre symbolique des 20 millions d'habitants). Au contraire, dans le scénario 4, la ville est délaissée au profit de la campagne. La population des douze principales aires urbaines tombe à 13 millions en 2050 et, par exemple, l'agglomération parisienne ne compte plus que 7 millions d'habitants. En parallèle, les modes de développement passent par une diminution de la densité des habitats qui décroît de 1.5% par an sur l'ensemble des aires urbaines et par une stabilisation des coûts du logement.

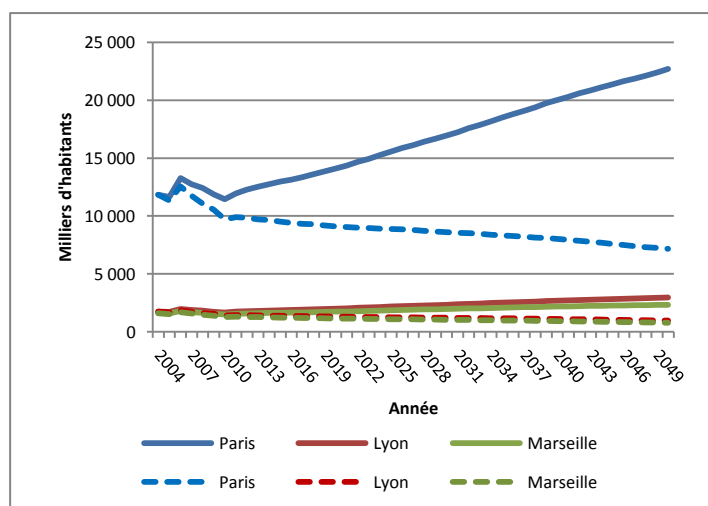


Figure 35: Population des trois plus grandes villes françaises pour le scénario 3 (en pointillé) et pour le scénario 4 (en traits pleins)

Macroéconomie : énergie, émissions et croissance économique

La combinaison des signaux-prix et des politiques d'infrastructure tels que décrits ci-dessus induisent des évolutions importantes des modes de consommation énergétique tel que représenté dans les matrices énergétiques qui donnent une vision d'ensemble des processus de production, transformation et consommation finale d'énergie en 2050.

Scénario 3 (MTep)		Charbon	Pétrole	Carburants	Gaz	Renouvelables	Nucléaire	Electricité
Energie Primaire	Production	0.00	0.00	0.00	0.00	30.67	183.22	0.00
	Consommation	15.64	27.77	4.60	16.69	30.67	183.22	-9.23
Transformation	Raffineries	-9.37	-27.77	36.21	0.00	-4.55	0.00	-0.29
	Centrales électriques	-0.27	0.00	-0.01	-1.88	-26.12	-183.22	80.98
Consommation Finale	Industrie		0.00	2.72	1.23	0.00	0.00	24.08
	Transport	2.00	0.00	35.75	7.44	0.00	0.00	24.31
	Résidentiel	0.00	0.00	0.00	5.82	0.00	0.00	14.49

Scénario 4 (MTep)		Charbon	Pétrole	Carburants	Gaz	Renouvelables	Nucléaire	Electricité
Energie Primaire	Production	0.00	0.00	0.00	0.00	56.29	130.13	0.00
	Consommation	7.37	30.14	-0.54	16.11	56.29	130.13	-8.68
Transformation	Raffineries	0.00	-30.14	40.35	0.00	-11.07	0.00	-0.31
	Centrales électriques	-2.35	0.00	-2.71	-2.28	-45.22	-130.13	71.46
Consommation Finale	Industrie	5.02	0.00	4.42	7.84	0.00	0.00	40.93
	Transport	0.00	0.00	32.66	0.01	0.00	0.00	6.60
	Résidentiel	0.00	0.00	0.00	5.98	0.00	0.00	14.31

Figure 36: Matrice énergétique en 2050 du scénario 3 (haut) et 4 (bas)

Concernant les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du territoire national, les scénarios 3 et 4 présentent une trajectoire d'émissions relativement similaire, conduisant à

une réduction très importante du montant d'émissions. Dans le scénario 3, les émissions sont réduites de près de 50%, tandis que dans le scénario 4, les émissions sont réduites de près de 60% par rapport à leur niveau à l'année de référence. Cependant, cette vision agrégée cache des déterminants fondamentalement différents des réductions d'émissions que nous analysons au travers d'une analyse plus détaillée des réductions d'émissions au niveau des principaux secteurs émetteurs.

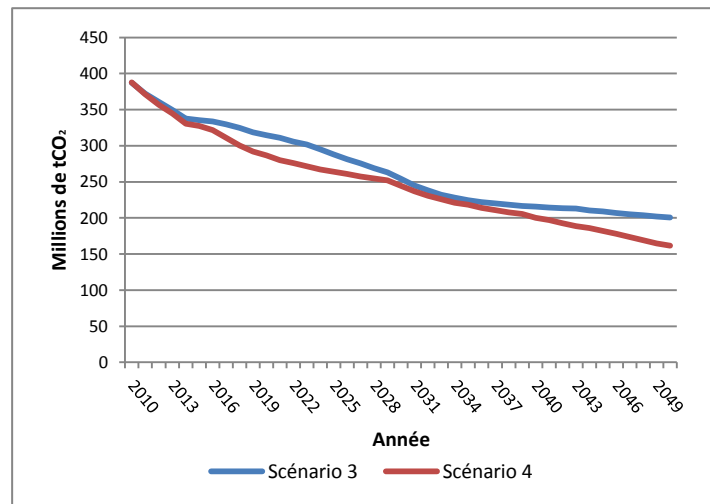


Figure 37: Emissions nationales de CO2

Les émissions nationales liées à la production de carburants connaissent une évolution très différente entre le scénario 3 et le scénario 4. Dans le scénario 3, la pénétration du *Coal-to-Liquid* induit un surplus d'émissions, en raison d'un processus de liquéfaction considéré comme moins efficace. Dans le scénario 3, au contraire, la prédominance des biocarburants, permet une forte décroissance des émissions.

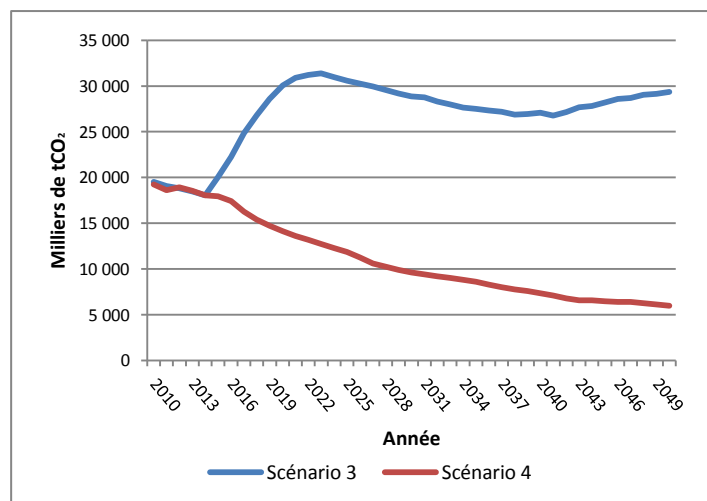


Figure 38: Emissions nationales de CO2 liées à la production de carburants

Dans un contexte de fort prix des énergies fossiles et d'introduction d'une taxe carbone favorisant les technologies renouvelables et nucléaire, la production d'électricité est très largement décarbonée dans les deux scénarios. En effet, la différence principale entre les scénarios 3 et 4 réside dans la répartition entre nucléaire et renouvelables, qui sont toutes deux non émettrices de carbone. Dans le scénario 4, les investissements dans les énergies renouvelables sont doublés par rapport à ceux du scénario 3. Pour une même différence de prix de production de l'électricité favorable pour les énergies renouvelables par rapport aux autres énergies, deux fois plus de capacités sont installées dans le scénario 4 que dans le scénario 3. En 2050, les énergies renouvelables représentent près de 30% de la production dans le scénario 3, contre plus de 50% dans le scénario 4.

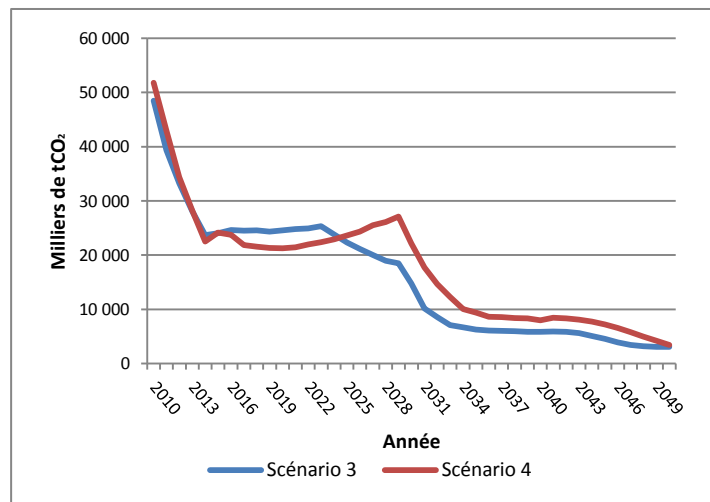


Figure 39: Emissions nationales de CO₂ liées à la production d'électricité

Pour ce qui concerne les usages stationnaires, on observe un léger surplus d'émissions dans le cas du scénario 3. Cet effet est principalement dû à un niveau d'activité plus élevé malgré un coût des énergies fossiles plus élevé. Ce coût des énergies fossiles permet néanmoins un changement technique vers des processus de production industriel plus efficaces et le changement structurel vers des secteurs moins intensifs en énergie fossile (manufacture, services). Les effets sur le secteur résidentiel sont beaucoup moins différenciés comme nous l'avons vu dans l'analyse du stock de bâtiments avec une pénétration des bâtiments Basse Consommation comparable dans les deux scénarios.

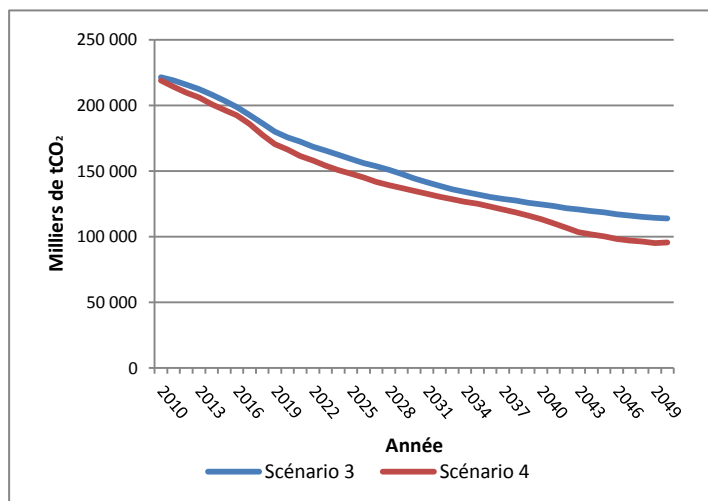


Figure 40: Emissions nationales de CO₂ dans les usages stationnaires

Le secteur du transport voit, quant à lui, un niveau d'émissions pour l'ensemble du territoire plus élevé dans le scénario 4. Dans le scénario 4, une part plus importante de la population se retrouve en zone rurale peu dense et, même en zone urbaine, les densités des agglomérations sont sensiblement plus faibles. Ces deux effets conduisent à un maintien d'une dépendance élevée à la mobilité, du point de vue des passagers à cause de l'étalement du résidentiel, et du point de vue du fret à cause de la difficulté des firmes à implanter des unités de production proches des lieux de consommations. De plus, une telle situation est défavorable au développement des transports en commun, dont on sait qu'ils sont peu rentables en zones peu denses. Ces effets se combinent pour augmenter la dépendance à la mobilité en voiture particulière, dont on a vu qu'elle restait partiellement dépendante des carburants fossiles au vu de l'importance des véhicules hybrides. Au contraire, dans le scénario 3, la politique d'infrastructure menée par l'Etat permet de réduire considérablement l'utilisation du véhicule privé en favorisant la diminution des distances de transport et le développement des transports en commun dans les agglomérations denses.

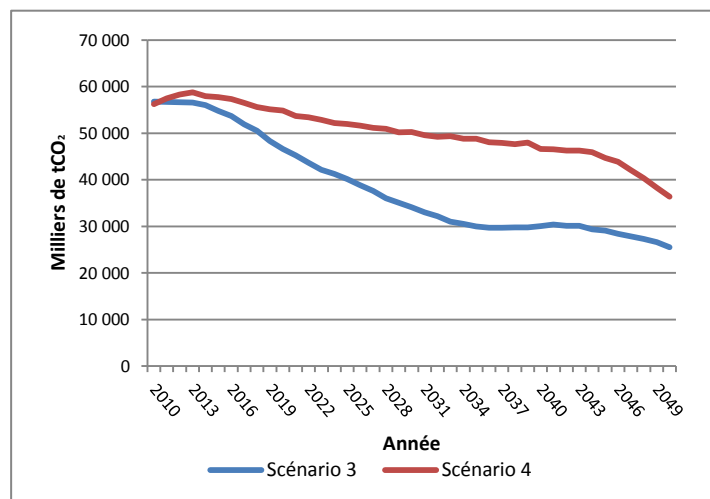


Figure 41: Emissions nationales de CO2 dans le secteur des transports

La croissance économique est plus élevée dans le scénario 3 tout au long de la période. En effet, l'organisation concentrée de l'économie sous formes de pôles urbains denses permet d'augmenter l'efficacité des entreprises, qui bénéficient d'externalités d'agglomération (partage de connaissances, large marché permettant un accès à la main d'œuvre spécialisée, accès facilité aux marchés). De plus, les investissements massifs entrent dans la composition du PIB et contribuent à une forme de relance keynésienne via des « grands travaux ». Ces effets d'agglomération et de relance par les investissements sont perdus dans le scénario 4. Cependant, certains aspects liés au bien-être sont par nature ignorés par cette mesure du PIB, qui n'intègre par exemple pas les effets positifs ressentis par les agents dans les modes de vie plus dispersés du scénario 4 offrant des aménités positives.

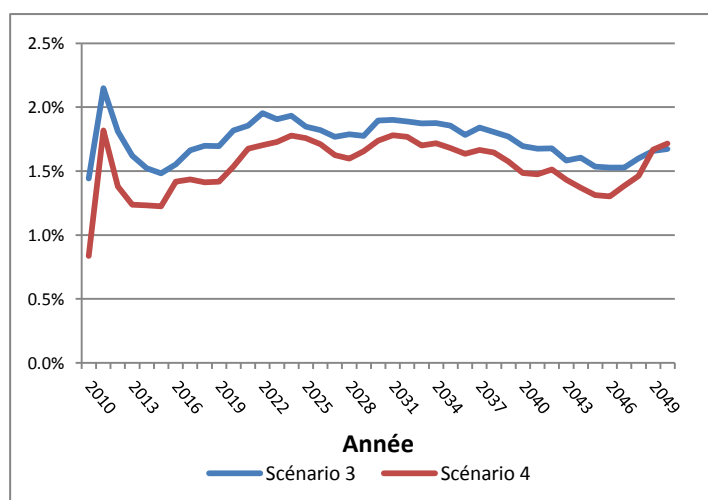


Figure 42: Taux de croissance du PIB

c. Obstacles et limites

Les principaux obstacles du scénario 3 résident tout d'abord dans la disponibilité des investissements massifs requis par les politiques ambitieuses d'infrastructure et ce d'autant plus dans un contexte de crise de la dette publique. Dans ce contexte de contrainte sur la disponibilité des ressources financières, se pose alors la question des effets d'éviction sur le montant total des investissements avec des effets potentiellement négatifs sur l'appareil productif. Ces effets ne sont pas directement pris en compte ici, car le modèle IMACLIM ne représente pas explicitement les effets de la dette. De plus, ce scénario suppose un interventionnisme important de l'Etat central, en rupture avec les tendances observées où la puissance publique a principalement un rôle d'incitations pour orienter les décisions d'opérateurs privés ou de collectivités locales. Enfin, les politiques d'infrastructure ambitieuses envisagées sont soumises à de fortes inerties et irréversibilités qui pourraient en limiter les potentiels d'application

Le scénario 4 considère quant à lui une rupture fondamentale dans les modes de développement avec un exode vers les zones rurales et un rôle déclinant des zones urbaines en rupture avec les tendances observées d'un rôle central des principales agglomérations. Les différentes étapes de la décentralisation se sont plus traduites en pratique par l'apparition de pôles régionaux où les développements urbains gardent une place centrale.

6. Les scénarios 5 et 6 : le rôle des modes de vie

Les scénarios 5 et 6 mettent l'individu au cœur de la transition vers des villes post-carbone. Les changements techniques ne seront pas dictés par les signaux-prix (scénarios 1 et 2) ou par un investissement massif dans les infrastructures (scénarios 3 et 4), mais par une modification du comportement des agents résultant d'une prise de conscience de la nécessité de vivre dans une société moins émettrice de Gaz à effet de serre. Cette modification du comportement des agents peut être accompagnée d'incitations par les pouvoirs publics, et facilitée par des investissements massifs dans les infrastructures de transport, de logement et d'énergie. Ces deux scénarios reprennent donc des éléments des quatre scénarios précédents.

a. Hypothèses des scénarios 5 et 6

Prix des énergies et du carbone

Les scénarios 5 et 6 supposent l'existence d'un contexte international favorable à la mise en place de politiques globales de lutte contre le réchauffement climatique. Ainsi, dans le scénario 5, des objectifs de maîtrise et de réduction des CO₂ sont définis par les différentes régions du monde entre 2010 et 2020. Ces objectifs sont fixés à la suite d'une forte hausse du pétrole, qui passe de 50 dollars le prix du baril en 2004 à 300 dollars en 2020. L'Union Européenne projette de réduire ses émissions de 80% en 2050. Ces objectifs, pris au niveau international, vont permettre, dans un contexte de rareté de la ressource pétrolière, de maintenir le prix du baril à un niveau constant après 2050. Une taxe carbone est mise en France dès 2010, va augmenter et se stabiliser à des niveaux très élevés susceptibles de changer les modes de vie de façon importante. Cette taxe va permettre d'orienter la consommation vers des produits plus respectueux de l'environnement, et ainsi donner un élan au changement des modes de vies.

Le scénario 6 bénéficie lui aussi d'un climat international favorable à la mise en place d'un développement « vert ». Mais ce développement sera plus initié pas les individus que par les pouvoirs publics. La prise de conscience de la population est favorable à la mise en place d'une taxe carbone dès 2012, la valeur de la taxe étant suffisamment haute pour permettre le développement de technologies sobres par les industriels. A partir de 2020, la taxe carbone

n'est plus augmentée, mais le prix du pétrole connaît une très forte augmentation. Il est multiplié par 6 entre 2015 et 2035. Ce choc, lié à la raréfaction de la ressource, va imposer à la fois aux ménages et aux industriels un changement radical de leurs modes de vie.

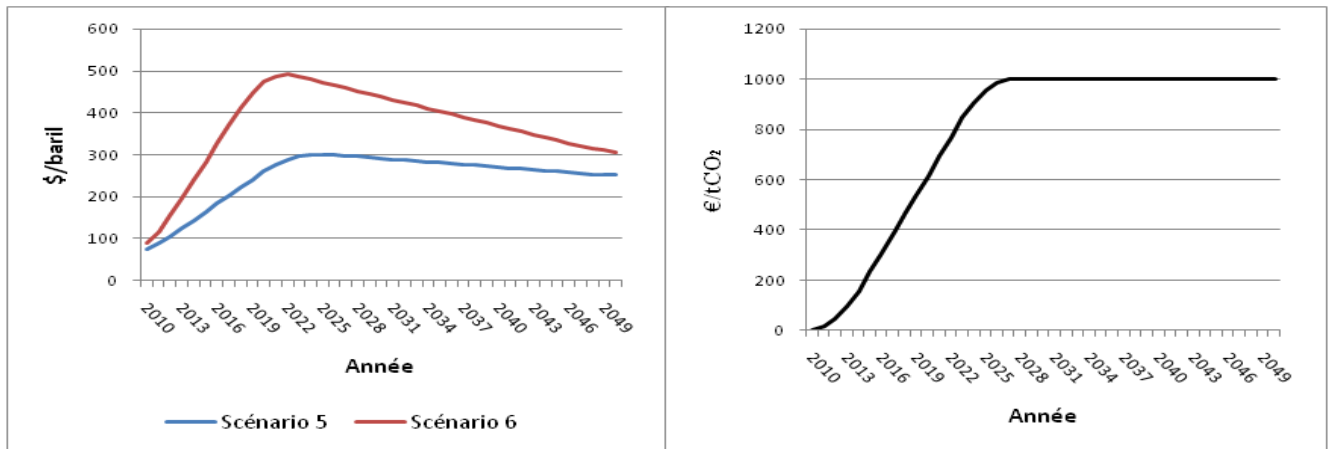


Figure 43: Prix mondial du baril de pétrole (gauche) et valeur de la taxe carbone en France (droite)

Choix des technologies

	Scénario 5	Scénario 6
Transport	<ul style="list-style-type: none"> - Développement moyen des véhicules électriques (25% du parc) - Réduction de l'utilisation des véhicules privés - Développement de carburants non issus du pétrole (20% de biocarburants) 	<ul style="list-style-type: none"> - Développement important des véhicules électriques (25% du parc) - Réduction de l'utilisation des véhicules privés - Développement de carburants non issus du pétrole (20% de biocarburants)
Logement	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction de la consommation énergétique totale des bâtiments (-50%) 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction de la consommation énergétique totale des bâtiments (-50%)
Energie	<ul style="list-style-type: none"> - Développement des énergies renouvelables parallèlement au maintien de la filière nucléaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Développement important des énergies renouvelables

Figure 44: Principales hypothèses des scénarios 5 et 6

Les scénarios 5 et 6 sont similaires en termes de technologies. Ce sont la manière dont les changements sont amenés qui présentent de grandes différences. Dans un cas, l'homme est à la source du changement (scénario 5), tandis que dans l'autre cas, ce sont les pouvoirs publics qui en sont à l'origine (scénario 6).

Les véhicules automobiles utilisés sont très similaires dans les deux scénarios, avec une disparition rapide des technologies standard en faveur des véhicules hybrides (70%) et électriques (25%). Les scénarios 5 et 6 supposent que les agents font le choix de modes de développement des carburants alternatifs au pétrole compatibles avec les préoccupations environnementales en refusant le Coal-To-Liquid. La forte montée du prix du baril, liée à la raréfaction de la ressource, va alors favoriser les biocarburants qui atteignent 18% et 22% dans les scénarios 5 et 6 respectivement.

Les mesures d'efficacité énergétique dans le bâtiment au travers de constructions très basses énergie et de rénovations de grande ampleur sont très importantes dans les scénarios 5 et 6. Elles sont initiées soit par les pouvoirs publics au travers de subventions (financées par les recettes de la taxe carbone) ou de mesures incitatives (scénario 5), ou directement par les ménages dans un but de sauvegarder l'environnement et de faire des économies (scénario 6). Les bâtiments Basse Consommation représentent 90% du parc en 2050 et la consommation unitaire moyenne est de l'ordre de 60kWh/m²/an.

Dans le secteur électrique, les scénarios 5 et 6 se traduisent tous les deux par une diffusion importante des énergies renouvelables qui représentent environ 50% de la production d'électricité.

b. Résultats des scénarios 5 et 6

Organisation spatiale

La transition post-carbone des scénarios 5 et 6 passe par une reconfiguration des territoires urbains. Les agglomérations doivent évoluer vers des centres plus compacts, mieux équilibrés, alliant mixité fonctionnelle et mixité sociale, et moins émetteurs de gaz à effet de serre, comme représentation d'une modification des modes de vie, soit impulsée par les collectivités locales, soit par les individus eux-mêmes. Ces changements doivent permettre d'aboutir à des sociétés à la fois plus urbaines et plus frugales.

Dans le scénario 5, la ville est beaucoup plus dense et compacte, avec des rythmes de densification plus importants que ceux expérimentés dans tous les autres scénarios, au-delà de 2% par an. Ce processus est déterminé par les incitations d'une augmentation forte des coûts de la mobilité qui orientent les choix de localisation des agents vers une diminution de leur

dépendance à la mobilité. Les agents se concentrent vers les plus grosses agglomérations dans un processus similaire à celui du scénario 3, mais amplifié par rapport à celui-ci. Dans cette vision contrastée extrême, une très large majorité de la population se concentre alors dans les plus importantes aires urbaines mais la volonté de contenir l'étalement urbain se traduit alors par une explosion parallèle de la densité. La conséquence est une exacerbation de la compétition foncière en milieu urbain, qui se traduit par une hausse continue des prix des logements, de l'ordre de +50% par rapport à l'année de référence en moyenne pour les douze plus importantes agglomérations. Dans cette vision, l'agglomération parisienne devient une mégalopole qui dépasse les 30 millions d'habitants en 2050.

Le scénario 6 correspond à une vision alternative de développement des villes moyennes de sorte que les plus importantes aires urbaines voient leur population n'augmenter que modérément, comme en témoigne les 16 millions d'habitants de l'agglomération parisienne en 2050. Dans ce contexte, la densité augmente en moyenne de 0.9% par an, à un rythme beaucoup plus en ligne avec les possibilités offertes par la poursuite des tendances observées sur des cas passés. La contrainte foncière reste maîtrisée et les prix des logements n'augmentent que de 25% en moyenne sur les douze plus grandes aires urbaines.

Macroéconomie : énergie, émissions et croissance économique

Les changements de modes de vie tels que décrits ci-dessus induisent des évolutions importantes des modes de consommation énergétiques tel que représenté dans les matrices énergétiques qui donnent une vision d'ensemble des processus de production, transformation et consommation finale d'énergie en 2050.

Scénario 5 (MTep)		Charbon	Pétrole	Carburants	Gaz	Renouvelables	Nucléaire	Electricité
Energie Primaire	Production	0.00	0.00	0.00	0.00	49.47	113.98	0.00
	Consommation	15.70	15.25	0.90	10.17	49.47	113.98	-8.32
Transformation	Raffineries	0.00	-15.25	17.96	0.00	-3.15	0.00	-0.16
	Centrales électriques	-9.85	0.00	-1.25	-0.88	-46.32	-113.98	73.52
Consommation Finale	Industrie	5.85	0.00	1.67	4.08	0.00	0.00	46.72
	Transport	0.00	0.00	15.90	0.00	0.00	0.00	3.61
	Résidentiel	0.00	0.00	0.00	5.22	0.00	0.00	13.63

Scénario 6 (MTEp)		Charbon	Pétrole	Carburants	Gaz	Renouvelables	Nucléaire	Electricité
Energie Primaire	Production	0.00	0.00	0.00	0.00	48.30	109.2	0.00
	Consommation	13.96	11.61	0.37	7.71	48.30	109.2	-8.08
Transformation	Raffineries	0.00	-11.61	14.41	0.00	-3.14	0.00	-0.12
	Centrales électriques	-8.31	0.00	-0.96	-0.57	-45.16	-109.2	71.41
Consommation Finale	Industrie	5.65	0.00	1.30	1.90	0.00	0.00	45.31
	Transport	0.00	0.00	12.50	0.00	0.00	0.00	3.41
	Résidentiel	0.00	0.00	0.00	5.23	0.00	0.00	13.55

Figure 45: Matrice énergétique en 2050 du scénario 5 (haut) et 6 (bas)

La réduction des émissions nationales de CO₂ permise par ces changements de paradigme de comportement est très importante dans les deux scénarios, de l'ordre de 75% par rapport au niveau de l'année de référence.

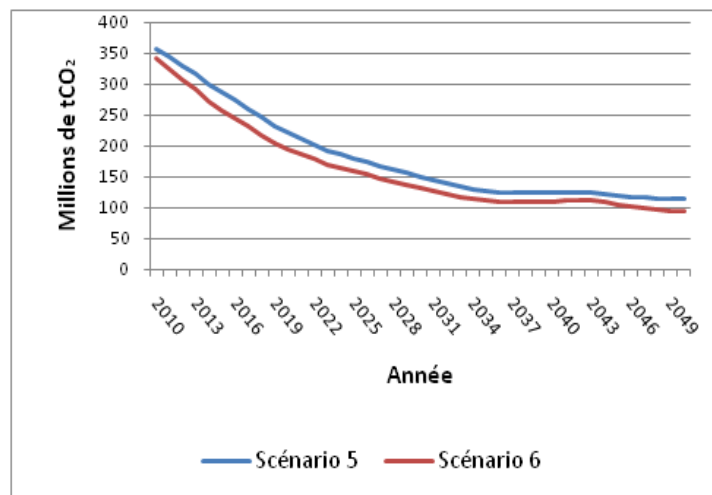


Figure 46: Emissions nationales de CO₂

L'électricité est totalement décarbonée et les usages résidentiels comptent pour moins de 10% des émissions restantes grâce à des bâtiments quasiment exclusivement de catégorie Basse Consommation. Les émissions nationales restantes en 2050 se répartissent ainsi entre la production industrielle et les transports.

La production industrielle connaît une décroissance forte de ses émissions. Dans le scénario 5, c'est la conséquence des hausses importantes de coût des énergies fossiles (prix élevés des énergies et taxe carbone) qui donne une incitation au progrès technique et à la réorientation structurelle de l'économie vers les types de production moins intensives en énergie. Dans le scénario 6, la réduction des émissions est due aux changements de modes de consommation, les agents se tournant vers des produits plus responsables et forçant une réorientation de l'appareil productif vers un changement des types de production.

Du côté des transports, les deux scénarios aboutissent à une division par deux des émissions sectorielles sur l'ensemble du territoire via des mécanismes sensiblement différents. Le scénario 5 est caractérisé par une densification des aires urbaines favorable à un déploiement d'ampleur des transports en commun pour les transports de passagers de sorte que l'utilisation des transports en commun augmente de 0,5% par an. La forte augmentation des coûts du transport dans les processus de production conduit les industriels à redéfinir leur organisation logistique pour une réduction du transport de marchandises de 25% en 25 ans grâce à une rationalisation des échanges et un report modal vers le rail d'ampleur. Dans le scénario 6, le déploiement d'un réseau de villes moyennes permet une diminution de la demande contrainte de mobilité au travers d'un raccourcissement des trajets domicile-travail. Les transports hors des villes diminuent fortement et se rapprochent des distances parcourues en ville. Ce scénario fait donc l'hypothèse d'un développement en transport en commun efficace sur l'ensemble du territoire.

c. Obstacles et limites

Ces scénarios se situent clairement à la limite de la modélisation économique puisqu'ils supposent d'inférer la source des changements de modes de vie au cœur de la logique de ces scénarios. Les modifications d'ampleur des préférences permettant les réductions ambitieuses des émissions se heurtent aux inerties comportementales puisqu'on suppose ici un retournement rapide et une rupture sur le long-terme des orientations personnelles des agents, qu'il s'agisse des pouvoirs publics ou des ménages individuels. Ceci suppose implicitement un rôle crucial de l'éducation et de l'information, mais aussi un changement de dogmes vers une appétence pour la résolution prioritaire des questions environnementales. Une telle approche relève de ruptures sociologiques dont la crédibilité effective et les conditions de réalisation restent à démontrer et dépassent le cadre d'une analyse économique.

7. Résumé et Conclusions

Cette étude présente les éléments de cadrage technologique, organisationnel et macroéconomique des 6 scénarios de transition vers des villes post-carbone tels que définis par la Mission prospective du Ministère du Développement Durable.

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

Figure 47: Six sentiers de transition

Les scénarios 1 et 2 privilégient la piste de l'innovation technique, en réponse à des signaux-prix. Le scénario montre une modification des comportements des agents suite à une augmentation brutale du prix du pétrole. Mais cette modification des comportements ne permet pas une réponse de grande ampleur, et les émissions ne diminuent que de 35% entre 2004 et 2050, loin du facteur 4 que la France s'est fixé en 2003. Le scénario 2 est un peu plus optimiste. Suite à des mesures prises par la France, notamment par l'instauration d'une taxe carbone, des technologies plus sobres en énergies fossiles et moins émettrices voient le jour et pénètrent petit à petit le marché. Mais cette « créativité carbone » ne permet pas non plus de réduire de manière substantielle les émissions. Les changements des modes de consommation restent à la marge des tendances, et les actions prises par l'Etat pour réduire les émissions restent modérées

Les scénarios 3 et 4 scénarios sont caractérisés par des investissements massifs dans les infrastructures. Les décisions de ces investissements se font soit au niveau de l'Etat central (scénario 3), soit au niveau des collectivités territoriales (scénario 4). Ces deux scénarios montrent qu'un investissement important dans les infrastructures peut amener à une diminution importante des émissions de gaz à effet de serre, en privilégiant les modes de déplacement sobres et les technologies propres. Le scénario 3 montre une baisse des

émissions de l'ordre de 70% entre 2004 et 2050, tandis que le scénario 4 montre quant à lui une baisse des émissions de 64%.

Enfin, les scénarios 5 et 6 sont définis par des ruptures de modes de comportement permettant d'atteindre les objectifs de division par quatre des émissions nationales de CO₂. Ils se caractérisent par une redéfinition des rapports des agents aux questions environnementales qui sont placées au cœur de l'agenda et imposent notamment une redéfinition du rapport au territoire. Ces scénarios qui peuvent paraître les plus désirables nécessitent une évaluation complémentaire pour en définir les contours du point de vue sociologique

	Scénario1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario5	Scénario 6
Croissance moyenne	1,47%	1,52%	1,47%	1,27%	1,44%	1,41%
Population urbaine en 2050 (en millions d'habitants)	30,5	33,8	39,7	12,8	57,6	29,7
Réduction des émissions de CO ₂	-41,5%	-59,4%	-48,2%	-58,3%	-72,1%	-76,8%

Figure 48: Résumé des résultats pour les six scénarios

Les résultats obtenus pour les six scénarios illustrent la nécessité d'agir rapidement, pour faire face à l'inertie des systèmes urbains. Agir le plus rapidement possible permettra une réduction plus importante des émissions d'ici 2050, et une croissance plus élevée en moyenne sur les 50 prochaines années comme l'indique les scénarios 1 et 2. La mise en place d'une taxe carbone plus rapide dans le cas du scénario 2 par rapport au scénario 1 permet une diminution des émissions supérieur de près de 20 points. De plus, le taux de croissance dans le scénario 2 est au-dessus du scénario de 0.05 points.

Cependant, le tempo de l'action publique n'est pas la seule variable importante. Agir sur les seuls signaux-prix ne permet pas d'atteindre l'objectif de réduction des émissions d'un facteur 4 en 2050 par rapport à 1990. Les actions sur le prix du carbone doivent être accompagnées de mesures sur les infrastructures (logement, transport, production d'énergie) comme dans le scénario 3, mais aussi de normes qui agissent sur les formes urbaines (péages urbains, densification), comme dans le scénario 5.

Enfin, une remise en question de notre mode de développement semble nécessaire pour établir une société post-carbone. Les outils économiques tels qu'utilisés dans ce rapport permettent de mettre en évidence les objectifs à atteindre, mais peuvent difficilement tracer le chemin pour les atteindre (cf. scénarios 5 et 6). La transition vers une société post-carbone doit être guidée par l'ensemble de la communauté scientifique, que ce soit dans le domaine des technologies de pointe ou dans le domaine des sciences sociales.

REFERENCES

- Alonso, W. 1964. *Location and Land Use*. Harvard University Press, Cambridge MA.
- Combet, E. Gherzi, F. Hourcade, J.Ch. Thubin, C. 2009. *Économie d'une fiscalité carbone en France Éléments d'un débat nécessaire*, CIRED, Paris
- Crozet Y. Mercier A. Ovtracht N. 2007. *L'accessibilité peut-elle se substituer à la mixité ?* Revue Territoires 2030, Paris.
- Devert B. 2008. *Alerte sur la crise du logement*, Conseil de Développement du Grand Lyon
- Fondation Abbé Pierre 2010. *L'état du mal-logement en France (15ème rapport annuel)*, Paris
- Fujita, M., P.R. Krugman, and A.J. Venables. 1999. *The Spatial Economy: Cities, Regions, and International Trade*. MIT Press, Cambridge MA
- Grazi F. et H. Waisman. 2009 'Urban Agglomeration Economies in Climate Policy: A Dynamic CGE Analysis'. 2009. Série Working Paper du CIRED, 17.09. Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement - CIRED, Paris.
- Grazi F., et J.C.J.M. van den Bergh. 2008. 'Spatial organization, transport, and climate change: Comparing instruments of spatial planning and policy.' *Ecological Economics* 67, 630-639
- Grazi F., J.C.J.M. van den Bergh, et J.N. van Ommeren. 2008. 'An Empirical Analysis of Urban Form, Transport and Global Warming.' *The Energy Journal* 29(4), 97-122.
- Greene, D.L. et A. Schafer, 2003. "Reducing Greenhouse Gas Emissions from U.S. Transportation", Pew Center on Global Climate Change, Arlington, Virginia.
- Heinberg, R. 2009. [Blackout: Coal, Climate and the Last Energy Crisis](#), New Society Publishers, Gabriola Island, Canada.
- Heinberg, R., 2005. *The Party's Over: Oil, War and the Fate of Industrial Societies*, New Society Publishers, Gabriola Island, Canada
- Hourcade, J.C., (1993). "Modelling long-run scenarios. Methodology lessons from a prospective Study on a low CO2 intensive country". *Energy Policy* 21(3): 309-326.
- INSEE. 2008. *Enquête Logement 2006*, Insee Première n°1020 (Castéran B. Dicroch L), INSEE, Paris

- Jackson, T., 2009. Prosperity without growth ? U.K. Sustainable Development Commission, London
- Krugman, P. 1991. 'Increasing Returns and Economic Geography'. *Journal of Political Economy* 99, 483-499.
- Mills, S.E. 1967. 'An aggregative model of resource allocation in a metropolitan area.' *American Economic Review* 57 (2), 197-210.
- Muth, R. F. 1969. *Cities and Housing -- The Spatial Pattern of Urban Residential Land Use*. The University of Chicago Press. Chicago IL.
- Rozenberg, J., Hallegatte, S., Vogt-Schilb, A., Sassi, O., Guivarch, C., Waisman, H., Hourcade, JC. 2010. "Climate policies as a hedge against the uncertainty on future oil supply", *à paraître dans Climatic Change Letters*.
- Sassi, O., Crassous, R., Hourcade, J-C., Gitz, V., Waisman, H. and Guivarch, C. 2010. 'IMACLIM- R: a modeling framework to simulate sustainable development pathways', *Int. J. Global Environmental Issues*, Vol. 10, Nos. 1/2, pp.5–24.
- Sands, R., D., Miller, S., Kim, .M.-K., (2005). "The second generation model: Comparison of SGM and GTAP approaches to data development", *Report for the US Environmental Protection Agency*, <http://www.epa.gov/oar/sgmdatadevelopment.pdf>

ANNEXE 1 : Tarification du carbone dans IMACLIM-R

Dans IMACLIM-R, les émissions de CO₂ issues de la combustion des énergies fossiles sont comptabilisées à partir de la double comptabilité physique et monétaire de l'utilisation et des échanges des biens énergétiques. Les sources d'émissions considérées sont les trois formes d'énergies finales (le charbon, le gaz et les carburants liquides) associées dans le modèle aux trois énergies fossiles primaires que sont le charbon, le pétrole brut et le gaz. Les émissions sont comptabilisées au stade où ces trois énergies finales sont brûlées, soit au niveau de la consommation finale d'énergie, soit dans le système de production et de transformation énergétique. Les émissions liées à la consommation de pétrole brut lors de son extraction sont comptabilisées séparément et les émissions liées aux procédés de transformation des énergies primaires fossiles non pétrolières en carburants liquides synthétiques sont attribuées au secteur de transformation énergétique qui permet la production de carburants liquides que nous avons nommé plus haut 'secteur carburants liquides'. Les émissions provoquées par la combustion de ces trois énergies finales sont obtenues à partir de la quantité physique d'énergie consommée via des coefficients qui reflètent leur contenu en carbone respectif. Nous considérons ici que le carbone contenu dans une unité d'énergie est totalement émis dans l'atmosphère sous forme de CO₂.

L'introduction d'un prix du carbone revient à attribuer une valeur à la consommation de carbone et donc à faire payer les émissions comptabilisées ci-dessus par l'utilisateur, les revenus étant prélevés par le gouvernement qui peut décider ensuite de leur mode de réallocation (chèque-vert, baisse des charges sur le travail...). Ce prix du carbone, qui peut s'appliquer à tout au parie de l'économie (certains secteurs ou agents peuvent, par exemple, être exemptés) peut être (a) exogène au modèle, pour modéliser une décision politique résultant d'un accord direct sur les niveaux de taxation, (b) endogène au modèle comme résultat d'une contrainte sur les niveaux d'émissions à atteindre. Dans les deux cas, le mécanisme suivant lequel ce prix du carbone émerge n'est pas rendu explicite et peut recouvrir l'introduction d'une taxe, d'un marché de quotas et/ou de tout autre mécanisme complémentaire. En ce sens, l'utilisation indifférente du terme de « taxe carbone » ou de « prix du carbone » dans ce rapport relève de la convention de langage pour refléter la nature prix de marché de cette variable, mais n'induit aucun présupposé sur la manière dont ce prix du carbone émerge.

ANNEXE 2 : Détails des hypothèses spécifiques aux six scénarios

SCÉNARIO 1	SCÉNARIO 2	SCÉNARIO 3	SCÉNARIO 4	SCÉNARIO 5	SCÉNARIO 6
MACROECONOMIE					
<i>Prix des énergies</i>					
Baril de pétrole : 300\$ en 2050	Baril de pétrole : 250\$ en 2050	Baril de pétrole : 200\$ en 2050	Baril de pétrole : 180\$ en 2050	Baril de pétrole : 275\$ en 2050	Baril de pétrole : 300\$ en 2050
Prix des carburants et du gaz harmonisés sur le prix du pétrole	Prix des carburants et du gaz harmonisés sur le prix du pétrole	Prix des carburants et du gaz harmonisés sur le prix du pétrole	Prix des carburants et du gaz harmonisés sur le prix du pétrole	Prix des carburants et du gaz harmonisés sur le prix du pétrole	Prix des carburants et du gaz harmonisés sur le prix du pétrole
<i>Taxe Carbone</i>					
Pas de taxe carbone	100€ en 2050	600€ en 2050	100€ en 2050	1000€ en 2050	1000€ en 2050
TECHNOLOGIES					
<i>Transport</i>					
Gain d'efficacité des moteurs thermiques purs par type de véhicule :1.3*[4.55E-11 ;3.18E-11 ;2.05E-11 ;1.06E-11]	Gain d'efficacité des moteurs thermiques purs par type de véhicule :[4.55E-11 ;3.18E-11 ;2.05E-11 ;1.06E-11]	Gain d'efficacité des moteurs thermiques purs par type de véhicule :1.1*[4.55E-11 ;3.18E-11 ;2.05E-11 ;1.06E-11]	Gain d'efficacité des moteurs thermiques purs par type de véhicule :1.3*[4.55E-11 ;3.18E-11 ;2.05E-11 ;1.06E-11]	Gain d'efficacité des moteurs thermiques purs par type de véhicule :[4.55E-11 ;3.18E-11 ;2.05E-11 ;1.06E-11]	Gain d'efficacité des moteurs thermiques purs par type de véhicule :[4.55E-11 ;3.18E-11 ;2.05E-11 ;1.06E-11]
Taux d'apprentissage sur la production des différents type de voiture :[0,2 ;0,2 ;0,001 ;0,001 ;0,4]	Taux d'apprentissage sur la production des différents type de voiture :[0,2 ;0,2 ;0,2 ;0,2 ;0,2]	Taux d'apprentissage sur la production des différents type de voiture :[0,2 ;0,2 ;0,2 ;0,2 ;0,2]	Taux d'apprentissage sur la production des différents type de voiture :[0,2 ;0,2 ;0,2 ;0,2 ;0,2]	Taux d'apprentissage sur la production des différents type de voiture :[0,2 ;0,2 ;0,2 ;0,2 ;0,2]	Taux d'apprentissage sur la production des différents type de voiture :[0,2 ;0,2 ;0,2 ;0,2 ;0,2]
Part maximale du véhicule électrique dans le parc automobile égal à 5%	Part maximale du véhicule électrique dans le parc automobile égal à 40%	Part maximale du véhicule électrique dans le parc automobile égal à 5%	Part maximale du véhicule électrique dans le parc automobile égal à 40%	Part maximale du véhicule électrique dans le parc automobile égal à 25%	Part maximale du véhicule électrique dans le parc automobile égal à 25%
<i>Carburants</i>					
Anticipation de la quantité de CTL produit selon le prix du pétrole et des biocarburants	Pas de CTL	Anticipation deux fois plus importante que dans le scénario 1	Pas de CTL	Pas de CTL	Pas de CTL

Quantité maximale de biocarburants produits égale à 25% de la quantité de carburants	Quantité maximale de biocarburants produits égale à 40% de la quantité de carburants	Quantité maximale de biocarburants produits égale à 17% de la quantité de carburants	Quantité maximale de biocarburants produits égale à 70% de la quantité de carburants	Quantité maximale de biocarburants produits égale à 20% de la quantité de carburants	Quantité maximale de biocarburants produits égale à 20% de la quantité de carburants
Production d'électricité					
Part maximale de la production d'électricité par les ENR égale à 10%	Part maximale de la production d'électricité par les ENR égale à 0,1%	Part maximale de la production d'électricité par les ENR égale à 20%	Part maximale de la production d'électricité par les ENR égale à 40%	Part maximale de la production d'électricité par les ENR égale à 50%	Part maximale de la production d'électricité par les ENR égale à 50%
Résidentiel					
Taux de pénétration des bâtiments BC dépend de la valeur de la taxe carbone et des prix des énergies	Taux de pénétration identique au scénario 1	Taux de pénétration identique au scénario 1 dans un premier temps, puis 2 fois plus important	Taux de pénétration 1,5 fois supérieur au scénario 1	Taux de pénétration indépendant de la taxe carbone et 2 fois supérieur au scénario 1	Taux de pénétration indépendant de la taxe carbone et 2 fois supérieur au scénario 1
ORGANISATION SPATIALE					
/	/	/	/	Diminution des marges des transporteurs de 25% en 25 ans Amélioration des taux de remplissage de 3% par an pendant 25 ans Partage route-rail pour le fret en 2050 égal à 60%-40%	Diminution des marges des transporteurs de 25% en 25 ans Amélioration des taux de remplissage de 3% par an pendant 25 ans Partage route-rail pour le fret en 2050 égal à 60%-40%
/	/	/	/	/	Diminution des besoins en transport de l'industrie de 40% entre 2004 et 2050 Diminution des besoins en transport dans le secteur urbain de 3% par an entre 2004 et 2050
Augmentation du prix du foncier en bordure de la ville de 1% par an	Augmentation du prix du foncier en bordure de la ville de 2% par an	Diminution du prix du foncier en bordure de la ville de 1% par an	Diminution du prix du foncier en bordure de la ville de 1% par an	Augmentation du prix du foncier en bordure de la ville de 4% par an	Augmentation du prix du foncier en bordure de la ville de 2% par an

/	an /	Augmentation de la préférence pour la ville de 0,5% par an	Diminution de la préférence pour la ville de 1% par an	an Augmentation de la préférence pour la ville de 0,5% par an	an Diminution de la préférence pour la ville de 0,1% par an
50% de trajet contraints en plus dans la zone rurale	50% de trajet contraints en plus dans la zone rurale	100% de trajet contraints en plus dans la zone rurale	100% de trajet contraints en plus dans la zone rurale	0% de trajet contraints en plus dans la zone rurale	0% de trajet contraints en plus dans la zone rurale
/	/	/	/	Réduction de 1% des trajets automobiles contraints par an	Réduction de 1% des trajets automobiles contraints par an
/	/	/	/	Augmentation de 0,5% par an des trajets contraints en transport en commun par an	Augmentation de 0,5% par an des trajets contraints en transport en commun par an

ANNEXE 3 : Variables clés des résultats pour les six scénarios

Données macroéconomiques - niveau national	
Indicateurs agrégés	
- Population	Nombre d'habitants en France métropolitaine chaque année (Million)
- PIB	Valeur totale de biens et services créés en France métropolitaine sur une année donnée (millions euros)
- Intensité énergétique de la production	consommation d'énergie primaire par unité de PIB (Mtep/euros)
- Conversion énergétique	énergie finale par unité d'énergie primaire (Mtep/Mtep)
- Intensité carbone de l'énergie	quantité de carbone émis par unité d'énergie finale (tCO2/Mtep)
Energie	
- Prix de l'énergie par type d'énergie	
charbon	Prix international (euros/Mtep)
pétrole	Prix international (euros/Mtep)
Gaz	Prix international (euros/Mtep)
électricité	Prix de production de l'électricité en France métropolitaine (euros/Mtep)
carburants	Prix de production des carburants en France métropolitaine (euros/Mtep)
- Energie primaire, par type d'énergie	Quantité d'énergie primaire par type d'énergie (Mtep)
- Energie finale, par énergie	Quantité d'énergie finale, par énergie (Mtep)
- Energie finale, par usage	Quantité d'énergie finale, par usage (Mtep)
Transport	
- Transport de passagers par mode	Volume de transport, par mode (passager-km)
Emissions de CO2	
- Emissions de CO2, par usage	Volume de Gaz à effet de serre émis par les activités économiques en France métropolitaine (tCO2)
Données locales - par aire urbaine	
Caractéristiques générales	
- Population	Nombre d'habitants (Million)
- Densité	Nombre d'habitants au km ² (hab/km ²)
Production	
- PIB	Valeur totale de biens et services produits (millions euros)
- Nombre de firmes	Nombre d'établissements (définition INSEE)
- Nombre d'emplois	Nombre d'emplois
- Salaire	Salaire horaire moyen (euros)
Consommation	
- Revenu	Revenu (salaire, patrimoine, transferts) moyen par ménage (euros)
- Indice des prix	Mesure des prix des biens et services consommés
- Prix de l'immobilier	Prix moyen au m ² (euros/m ²)
Coûts urbains	
- Dépenses de logement	Dépenses annuelles en logement par ménage (euros)
- Dépenses en transport contraint	Dépenses annuelles en transport contraint par ménage (euros)

SCÉNARIO 1		Années				
Variables de sorties		2010	2020	2030	2040	2050
Données macroéconomiques - niveau national						
- Population	France	6.29E+07	6.60E+07	6.85E+07	7.07E+07	7.23E+07
- PIB	France	1.59E+06	1.93E+06	2.17E+06	2.66E+06	3.15E+06
- Intensité énergétique de la production	France	1.59E-04	1.39E-04	1.50E-04	1.31E-04	1.17E-04
- Conversion énergétique	France	4.04E-01	4.12E-01	3.52E-01	3.36E-01	3.32E-01
- Intensité carbone de l'énergie	France	3.92E+06	3.27E+06	3.06E+06	2.56E+06	2.26E+06
- Prix de l'énergie charbon	Monde	1.65E+02	2.01E+02	2.33E+02	2.90E+02	2.90E+02
pétrole	Monde	4.89E+02	5.86E+02	2.07E+03	2.19E+03	2.21E+03
gaz	Monde	2.84E+02	2.57E+02	7.07E+02	7.56E+02	7.56E+02
électricité	France	7.71E+02	7.55E+02	8.91E+02	7.98E+02	7.04E+02
carburants	France	6.27E+02	7.47E+02	2.37E+03	2.39E+03	2.37E+03
- Energie primaire charbon	France	1.28E+01	3.85E+00	1.35E+01	1.50E+01	1.48E+01
pétrole	France	8.17E+01	7.74E+01	5.10E+01	4.27E+01	4.15E+01
gaz	France	3.64E+01	4.06E+01	3.98E+01	3.19E+01	2.56E+01
nucléaire	France	1.07E+02	1.27E+02	1.68E+02	2.05E+02	2.26E+02
hydro	France	6.01E+00	5.89E+00	5.87E+00	5.89E+00	5.88E+00
renouvelables	France	1.50E+00	5.27E+00	1.04E+01	1.37E+01	1.84E+01
Total	France	2.46E+02	2.60E+02	2.89E+02	3.14E+02	3.32E+02
- Energie finale charbon	France	3.06E+00	2.86E+00	3.60E+00	3.88E+00	3.80E+00
gaz	France	3.01E+01	2.84E+01	2.58E+01	2.14E+01	1.63E+01
électricité	France	3.63E+01	4.29E+01	5.41E+01	6.49E+01	7.39E+01
carburants	France	6.96E+01	6.97E+01	5.20E+01	4.67E+01	4.64E+01
Total	France	1.39E+02	1.44E+02	1.36E+02	1.37E+02	1.40E+02
- Energie finale résidentiel	France	3.93E+00	4.20E+00	3.86E+00	4.11E+00	4.36E+00
transport	France	4.76E+01	4.99E+01	5.10E+01	5.21E+01	5.22E+01
industrie	France	2.95E+00	3.14E+00	3.16E+00	3.16E+00	3.50E+00
autre	France	4.49E+01	4.99E+01	4.36E+01	4.62E+01	5.01E+01
Total	France	1.39E+02	1.44E+02	1.35E+02	1.37E+02	1.40E+02
- Transport de passagers automobile	France	6.97E+11	7.55E+11	6.57E+11	7.22E+11	7.27E+11
TC	France	1.23E+11	1.42E+11	1.42E+11	1.67E+11	1.94E+11
aérien	France	8.59E+09	1.01E+10	7.40E+09	1.03E+10	1.28E+10
transport non motorisé	France	6.15E+10	6.17E+10	7.54E+10	6.77E+10	6.35E+10
- Emissions de CO2 résidentiel	France	6.75E+07	5.56E+07	4.23E+07	3.10E+07	2.56E+07
transport	France	5.65E+07	5.37E+07	4.76E+07	3.76E+07	2.64E+07
industrie	France	1.53E+08	1.62E+08	1.26E+08	1.23E+08	1.25E+08
autre	France	1.12E+08	7.90E+07	9.45E+07	7.86E+07	7.23E+07
Total	France	3.89E+08	3.50E+08	3.10E+08	2.70E+08	2.49E+08

SCÉNARIO 1		Années				
Variables de sorties		2010	2020	2030	2040	2050
Données locales - par aire urbaine						
- Population	Paris	1.12E+07	1.37E+07	1.41E+07	1.61E+07	1.74E+07
	Lyon	1.63E+06	1.95E+06	1.96E+06	2.18E+06	2.29E+06
	Marseille	1.47E+06	1.69E+06	1.65E+06	1.77E+06	1.81E+06
- Densité	Paris	7.95E+02	9.36E+02	9.40E+02	1.04E+03	1.10E+03
	Lyon	5.21E+02	5.95E+02	5.82E+02	6.30E+02	6.46E+02
	Marseille	5.58E+02	6.24E+02	5.98E+02	6.36E+02	6.40E+02
- PIB	Paris	3.79E+05	4.68E+05	4.89E+05	6.17E+05	7.38E+05
	Lyon	4.61E+04	5.54E+04	5.63E+04	6.91E+04	8.04E+04
	Marseille	3.73E+04	4.31E+04	4.22E+04	4.99E+04	5.60E+04
- Nombre de firmes	Paris	9.74E+05	1.22E+06	1.50E+06	1.81E+06	2.19E+06
	Lyon	1.30E+05	1.58E+05	1.88E+05	2.21E+05	2.60E+05
	Marseille	1.23E+05	1.44E+05	1.65E+05	1.86E+05	2.11E+05
- Nombre d'emplois	Paris	8.38E+06	1.02E+07	1.06E+07	1.21E+07	1.30E+07
	Lyon	1.18E+06	1.40E+06	1.41E+06	1.57E+06	1.65E+06
	Marseille	9.83E+05	1.13E+06	1.10E+06	1.19E+06	1.21E+06
- Salaire	Paris	5.33E+04	5.46E+04	6.45E+04	6.80E+04	7.63E+04
	Lyon	4.03E+04	4.12E+04	4.86E+04	5.11E+04	5.72E+04
	Marseille	3.11E+04	3.17E+04	3.72E+04	3.90E+04	4.35E+04
- Revenu	Paris	3.39E+04	3.42E+04	3.46E+04	3.84E+04	4.25E+04
	Lyon	2.82E+04	2.84E+04	2.87E+04	3.17E+04	3.51E+04
	Marseille	2.54E+04	2.54E+04	2.56E+04	2.82E+04	3.10E+04
- Indice des prix	Paris	1.18E+00	7.09E-01	5.15E-01	3.46E-01	2.46E-01
	Lyon	1.21E+00	7.29E-01	5.30E-01	3.56E-01	2.53E-01
	Marseille	1.20E+00	7.23E-01	5.26E-01	3.53E-01	2.51E-01
- Prix de l'immobilier	Paris	4.03E+03	4.39E+03	4.74E+03	5.09E+03	5.47E+03
	Lyon	2.57E+03	2.76E+03	2.94E+03	3.11E+03	3.30E+03
	Marseille	2.81E+03	2.97E+03	3.12E+03	3.26E+03	3.42E+03
- Dépenses de logement	Paris	8.68E+03	8.77E+03	8.87E+03	9.83E+03	1.09E+04
	Lyon	7.44E+03	7.50E+03	7.56E+03	8.37E+03	9.26E+03
	Marseille	6.36E+03	6.38E+03	6.41E+03	7.06E+03	7.78E+03
- Dépenses en transport contraint	Paris	1.31E+04	1.35E+04	1.59E+04	1.68E+04	1.89E+04
	Lyon	9.15E+03	9.41E+03	1.11E+04	1.18E+04	1.32E+04
	Marseille	5.98E+03	6.12E+03	7.20E+03	7.56E+03	8.44E+03

SCÉNARIO 2		Années				
Variables de sorties		2010	2020	2030	2040	2050
Données macroéconomiques - niveau national						
- Population	France	6.29E+07	6.60E+07	6.85E+07	7.07E+07	7.23E+07
- PIB	France	1.59E+06	1.82E+06	2.23E+06	2.70E+06	3.22E+06
- Intensité énergétique de la production	France	1.58E-04	1.64E-04	1.47E-04	1.26E-04	1.03E-04
- Conversion énergétique	France	3.99E-01	3.41E-01	2.93E-01	3.02E-01	3.22E-01
- Intensité carbone de l'énergie	France	3.99E+06	3.23E+06	2.56E+06	2.01E+06	1.75E+06
- Prix de l'énergie charbon	Monde	7.51E+01	8.89E+01	9.39E+01	7.73E+01	5.85E+01
pétrole	Monde	4.89E+02	1.83E+03	1.83E+03	1.83E+03	1.83E+03
gaz	Monde	1.97E+02	6.52E+02	4.58E+02	6.16E+02	3.30E+02
électricité	France	7.27E+02	8.64E+02	7.68E+02	7.11E+02	6.59E+02
carburants	France	6.28E+02	2.14E+03	2.06E+03	1.99E+03	1.92E+03
- Energie primaire charbon	France	1.35E+01	7.87E+00	1.00E+01	1.34E+01	1.59E+01
pétrole	France	7.98E+01	5.18E+01	3.19E+01	2.75E+01	2.74E+01
gaz	France	3.87E+01	4.16E+01	3.58E+01	2.52E+01	2.05E+01
nucléaire	France	1.07E+02	1.53E+02	2.07E+02	2.25E+02	2.19E+02
hydro	France	6.01E+00	5.85E+00	5.88E+00	5.86E+00	5.91E+00
renouvelables	France	1.37E+00	5.83E+00	9.21E+00	1.26E+01	1.87E+01
Total	France	2.46E+02	2.66E+02	3.00E+02	3.09E+02	3.07E+02
- Energie finale charbon	France	3.24E+00	5.86E+00	7.09E+00	6.95E+00	5.75E+00
gaz	France	3.15E+01	3.04E+01	2.41E+01	2.01E+01	1.74E+01
électricité	France	3.69E+01	4.90E+01	6.21E+01	6.73E+01	7.09E+01
carburants	France	6.88E+01	4.79E+01	3.17E+01	2.93E+01	3.10E+01
Total	France	1.40E+02	1.33E+02	1.25E+02	1.24E+02	1.25E+02
- Energie finale résidentiel	France	3.95E+00	3.49E+00	3.61E+00	3.92E+00	4.24E+00
transport	France	4.82E+01	4.88E+01	4.73E+01	4.96E+01	5.10E+01
industrie	France	2.98E+00	3.16E+00	3.09E+00	3.23E+00	3.89E+00
autre	France	4.30E+01	3.51E+01	3.40E+01	3.66E+01	3.98E+01
Total	France	1.41E+02	1.32E+02	1.21E+02	1.19E+02	1.21E+02
- Transport de passagers automobile	France	7.21E+11	6.99E+11	7.88E+11	7.91E+11	7.77E+11
TC	France	1.24E+11	1.17E+11	1.40E+11	1.63E+11	2.02E+11
aérien	France	8.93E+09	6.71E+09	8.11E+09	1.06E+10	1.24E+10
transport non motorisé	France	5.86E+10	6.96E+10	6.12E+10	5.78E+10	5.12E+10
- Emissions de CO2 résidentiel	France	7.29E+07	6.39E+07	4.27E+07	2.80E+07	2.06E+07
transport	France	5.70E+07	5.70E+07	4.63E+07	4.51E+07	4.07E+07
industrie	France	1.48E+08	1.02E+08	7.85E+07	7.50E+07	7.51E+07
autre	France	1.13E+08	6.97E+07	5.77E+07	3.96E+07	3.65E+07
Total	France	3.91E+08	2.92E+08	2.25E+08	1.88E+08	1.73E+08

SCÉNARIO 2		Années				
Variables de sorties		2010	2020	2030	2040	2050
Données locales - par aire urbaine						
- Population	Paris	1.13E+07	1.28E+07	1.53E+07	1.75E+07	1.93E+07
	Lyon	1.65E+06	1.82E+06	2.12E+06	2.37E+06	2.54E+06
	Marseille	1.48E+06	1.58E+06	1.78E+06	1.93E+06	2.00E+06
- Densité	Paris	8.17E+02	9.12E+02	1.10E+03	1.27E+03	1.40E+03
	Lyon	5.40E+02	5.91E+02	7.08E+02	8.03E+02	8.77E+02
	Marseille	5.80E+02	6.25E+02	7.42E+02	8.33E+02	9.01E+02
- PIB	Paris	3.83E+05	4.05E+05	5.18E+05	6.34E+05	7.76E+05
	Lyon	4.66E+04	4.80E+04	5.96E+04	7.11E+04	8.47E+04
	Marseille	3.76E+04	3.73E+04	4.47E+04	5.14E+04	5.91E+04
- Nombre de firmes	Paris	9.74E+05	1.24E+06	1.47E+06	1.79E+06	2.16E+06
	Lyon	1.30E+05	1.61E+05	1.84E+05	2.19E+05	2.57E+05
	Marseille	1.23E+05	1.47E+05	1.62E+05	1.85E+05	2.09E+05
- Nombre d'emplois	Paris	8.46E+06	9.56E+06	1.14E+07	1.31E+07	1.44E+07
	Lyon	1.19E+06	1.31E+06	1.52E+06	1.70E+06	1.83E+06
	Marseille	9.92E+05	1.06E+06	1.19E+06	1.29E+06	1.34E+06
- Salaire	Paris	5.28E+04	5.94E+04	5.84E+04	6.19E+04	6.78E+04
	Lyon	3.99E+04	4.48E+04	4.39E+04	4.64E+04	5.07E+04
	Marseille	3.08E+04	3.44E+04	3.37E+04	3.54E+04	3.85E+04
- Revenu	Paris	3.39E+04	3.18E+04	3.40E+04	3.62E+04	4.03E+04
	Lyon	2.82E+04	2.64E+04	2.82E+04	3.00E+04	3.33E+04
	Marseille	2.54E+04	2.36E+04	2.51E+04	2.67E+04	2.95E+04
- Indice des prix	Paris	1.17E+00	7.52E-01	4.83E-01	3.19E-01	2.22E-01
	Lyon	1.20E+00	7.73E-01	4.97E-01	3.28E-01	2.29E-01
	Marseille	1.19E+00	7.67E-01	4.92E-01	3.25E-01	2.27E-01
- Prix de l'immobilier	Paris	4.03E+03	4.42E+03	4.72E+03	5.09E+03	5.48E+03
	Lyon	2.57E+03	2.79E+03	2.94E+03	3.14E+03	3.35E+03
	Marseille	2.82E+03	3.01E+03	3.14E+03	3.32E+03	3.49E+03
- Dépenses de logement	Paris	8.68E+03	8.14E+03	8.70E+03	9.29E+03	1.03E+04
	Lyon	7.45E+03	6.97E+03	7.43E+03	7.91E+03	8.79E+03
	Marseille	6.36E+03	5.92E+03	6.30E+03	6.68E+03	7.40E+03
- Dépenses en transport contraint	Paris	1.30E+04	1.46E+04	1.44E+04	1.52E+04	1.67E+04
	Lyon	9.03E+03	1.01E+04	9.91E+03	1.05E+04	1.14E+04
	Marseille	5.89E+03	6.57E+03	6.36E+03	6.65E+03	7.18E+03

SCÉNARIO 3		Années				
Variables de sorties		2010	2020	2030	2040	2050
Données macroéconomiques - niveau national						
- Population	France	6.29E+07	6.60E+07	6.85E+07	7.07E+07	7.23E+07
- PIB	France	1.58E+06	1.86E+06	2.24E+06	2.69E+06	3.15E+06
- Intensité énergétique de la production	France	1.60E-04	1.45E-04	1.33E-04	1.15E-04	9.75E-05
- Conversion énergétique	France	4.09E-01	3.76E-01	3.34E-01	3.39E-01	3.63E-01
- Intensité carbone de l'énergie	France	3.88E+06	3.38E+06	2.79E+06	2.29E+06	2.05E+06
- Prix de l'énergie charbon	Monde	1.65E+02	2.01E+02	2.33E+02	2.90E+02	2.90E+02
pétrole	Monde	5.56E+02	1.10E+03	1.25E+03	1.37E+03	1.49E+03
gaz	Monde	3.24E+02	4.83E+02	4.26E+02	4.74E+02	5.08E+02
électricité	France	7.76E+02	8.64E+02	7.13E+02	6.91E+02	6.20E+02
carburants	France	7.06E+02	1.34E+03	1.49E+03	1.57E+03	1.66E+03
- Energie primaire charbon	France	1.26E+01	1.34E+01	1.51E+01	1.48E+01	1.56E+01
pétrole	France	8.19E+01	5.46E+01	3.86E+01	3.39E+01	3.23E+01
gaz	France	3.58E+01	3.70E+01	3.00E+01	2.17E+01	1.62E+01
nucléaire	France	1.06E+02	1.26E+02	1.65E+02	1.81E+02	1.75E+02
hydro	France	6.01E+00	5.89E+00	5.85E+00	5.89E+00	5.88E+00
renouvelables	France	1.98E+00	1.06E+01	1.78E+01	2.08E+01	2.53E+01
Total	France	2.44E+02	2.47E+02	2.72E+02	2.78E+02	2.70E+02
- Energie finale charbon	France	3.10E+00	2.77E+00	2.63E+00	2.36E+00	1.90E+00
gaz	France	3.01E+01	2.69E+01	2.32E+01	1.81E+01	1.40E+01
électricité	France	3.64E+01	4.51E+01	5.61E+01	6.00E+01	6.35E+01
carburants	France	6.99E+01	5.43E+01	4.17E+01	3.86E+01	3.85E+01
Total	France	1.40E+02	1.29E+02	1.24E+02	1.19E+02	1.18E+02
- Energie finale résidentiel	France	3.87E+00	3.65E+00	3.70E+00	3.93E+00	4.08E+00
transport	France	4.75E+01	4.54E+01	4.56E+01	4.65E+01	4.72E+01
industrie	France	2.93E+00	3.08E+00	3.09E+00	3.20E+00	3.48E+00
autre	France	4.55E+01	4.10E+01	3.86E+01	4.07E+01	4.32E+01
Total	France	1.40E+02	1.29E+02	1.24E+02	1.19E+02	1.18E+02
- Transport de passagers automobile	France	7.65E+11	7.55E+11	8.14E+11	8.05E+11	7.86E+11
TC	France	1.20E+11	1.23E+11	1.38E+11	1.57E+11	1.70E+11
aérien	France	8.48E+09	7.25E+09	8.10E+09	9.87E+09	1.19E+10
transport non motorisé	France	5.43E+10	6.38E+10	5.85E+10	5.73E+10	5.65E+10
- Emissions de CO2 résidentiel	France	6.75E+07	5.19E+07	3.61E+07	2.09E+07	1.34E+07
transport	France	5.68E+07	4.66E+07	3.41E+07	3.00E+07	2.55E+07
industrie	France	1.54E+08	1.24E+08	1.08E+08	1.04E+08	1.00E+08
autre	France	1.09E+08	9.26E+07	7.56E+07	6.13E+07	6.12E+07
Total	France	3.87E+08	3.15E+08	2.54E+08	2.16E+08	2.01E+08

SCÉNARIO 3		Années				
Variables de sorties		2010	2020	2030	2040	2050
Données locales - par aire urbaine						
- Population	Paris	1.15E+07	1.41E+07	1.69E+07	2.00E+07	2.27E+07
	Lyon	1.67E+06	2.00E+06	2.34E+06	2.69E+06	2.97E+06
	Marseille	1.50E+06	1.74E+06	1.97E+06	2.19E+06	2.34E+06
- Densité	Paris	7.78E+02	8.59E+02	9.46E+02	1.03E+03	1.08E+03
	Lyon	4.99E+02	5.18E+02	5.42E+02	5.61E+02	5.61E+02
	Marseille	5.30E+02	5.30E+02	5.36E+02	5.35E+02	5.16E+02
- PIB	Paris	3.86E+05	4.62E+05	5.91E+05	7.47E+05	9.14E+05
	Lyon	4.69E+04	5.45E+04	6.77E+04	8.31E+04	9.87E+04
	Marseille	3.79E+04	4.24E+04	5.07E+04	6.00E+04	6.87E+04
- Nombre de firmes	Paris	9.76E+05	1.24E+06	1.49E+06	1.79E+06	2.16E+06
	Lyon	1.30E+05	1.60E+05	1.86E+05	2.18E+05	2.56E+05
	Marseille	1.23E+05	1.46E+05	1.63E+05	1.84E+05	2.08E+05
- Nombre d'emplois	Paris	8.59E+06	1.06E+07	1.27E+07	1.50E+07	1.70E+07
	Lyon	1.20E+06	1.44E+06	1.69E+06	1.94E+06	2.14E+06
	Marseille	1.01E+06	1.17E+06	1.32E+06	1.46E+06	1.56E+06
- Salaire	Paris	5.37E+04	5.81E+04	6.09E+04	6.52E+04	7.28E+04
	Lyon	4.07E+04	4.39E+04	4.60E+04	4.92E+04	5.49E+04
	Marseille	3.14E+04	3.38E+04	3.53E+04	3.76E+04	4.18E+04
- Revenu	Paris	3.37E+04	3.27E+04	3.49E+04	3.73E+04	4.03E+04
	Lyon	2.81E+04	2.72E+04	2.89E+04	3.09E+04	3.32E+04
	Marseille	2.52E+04	2.43E+04	2.58E+04	2.74E+04	2.94E+04
- Indice des prix	Paris	1.19E+00	7.44E-01	4.96E-01	3.38E-01	2.41E-01
	Lyon	1.22E+00	7.65E-01	5.10E-01	3.48E-01	2.48E-01
	Marseille	1.21E+00	7.59E-01	5.06E-01	3.45E-01	2.46E-01
- Prix de l'immobilier	Paris	4.07E+03	4.52E+03	4.94E+03	5.39E+03	5.90E+03
	Lyon	2.58E+03	2.81E+03	3.01E+03	3.24E+03	3.48E+03
	Marseille	2.82E+03	3.02E+03	3.18E+03	3.36E+03	3.56E+03
- Dépenses de logement	Paris	8.63E+03	8.39E+03	8.94E+03	9.57E+03	1.03E+04
	Lyon	7.40E+03	7.17E+03	7.62E+03	8.14E+03	8.76E+03
	Marseille	6.32E+03	6.10E+03	6.46E+03	6.87E+03	7.37E+03
- Dépenses en transport contraint	Paris	1.33E+04	1.44E+04	1.51E+04	1.62E+04	1.82E+04
	Lyon	9.31E+03	1.02E+04	1.08E+04	1.17E+04	1.31E+04
	Marseille	6.11E+03	6.70E+03	7.10E+03	7.64E+03	8.58E+03

SCÉNARIO 4		Années				
Variables de sorties		2010	2020	2030	2040	2050
Données macroéconomiques - niveau national						
- Population	France	6.29E+07	6.60E+07	6.85E+07	7.07E+07	7.23E+07
- PIB	France	1.56E+06	1.79E+06	2.12E+06	2.50E+06	2.89E+06
- Intensité énergétique de la production	France	1.61E-04	1.45E-04	1.26E-04	1.00E-04	8.43E-05
- Conversion énergétique	France	4.11E-01	3.98E-01	3.73E-01	4.05E-01	4.26E-01
- Intensité carbone de l'énergie	France	3.88E+06	2.99E+06	2.59E+06	2.08E+06	1.64E+06
- Prix de l'énergie charbon	Monde	8.60E+01	7.95E+01	1.08E+02	2.25E+02	2.36E+02
pétrole	Monde	5.56E+02	1.10E+03	1.07E+03	9.75E+02	8.88E+02
gaz	Monde	2.98E+02	8.87E+02	5.02E+02	4.47E+02	5.78E+02
électricité	France	7.61E+02	9.42E+02	8.50E+02	7.56E+02	6.98E+02
carburants	France	7.05E+02	1.32E+03	1.28E+03	1.16E+03	1.07E+03
- Energie primaire charbon	France	1.34E+01	7.35E+00	1.17E+01	1.15E+01	6.88E+00
pétrole	France	8.08E+01	6.01E+01	4.34E+01	3.57E+01	3.00E+01
gaz	France	3.59E+01	2.87E+01	2.50E+01	1.79E+01	1.56E+01
nucléaire	France	1.06E+02	1.31E+02	1.49E+02	1.31E+02	1.21E+02
hydro	France	6.03E+00	5.88E+00	5.90E+00	5.81E+00	5.93E+00
renouvelables	France	1.51E+00	7.78E+00	1.77E+01	3.61E+01	5.16E+01
Total	France	2.43E+02	2.41E+02	2.53E+02	2.38E+02	2.31E+02
- Energie finale charbon	France	3.18E+00	5.47E+00	8.52E+00	7.82E+00	4.63E+00
gaz	France	2.90E+01	2.29E+01	1.58E+01	1.40E+01	1.35E+01
électricité	France	3.57E+01	4.34E+01	5.12E+01	5.64E+01	6.31E+01
carburants	France	6.97E+01	5.46E+01	4.43E+01	4.01E+01	3.75E+01
Total	France	1.38E+02	1.26E+02	1.20E+02	1.18E+02	1.19E+02
- Energie finale résidentiel	France	3.81E+00	3.44E+00	3.47E+00	3.71E+00	3.87E+00
transport	France	4.67E+01	4.70E+01	4.70E+01	4.74E+01	4.88E+01
industrie	France	2.90E+00	2.88E+00	2.79E+00	2.96E+00	3.03E+00
autre	France	4.65E+01	4.25E+01	4.10E+01	4.21E+01	4.29E+01
Total	France	1.38E+02	1.26E+02	1.19E+02	1.16E+02	1.14E+02
- Transport de passagers automobile	France	7.51E+11	7.75E+11	8.44E+11	8.59E+11	8.65E+11
TC	France	1.18E+11	1.13E+11	1.25E+11	1.43E+11	1.56E+11
aérien	France	8.23E+09	7.58E+09	8.05E+09	9.90E+09	1.22E+10
transport non motorisé	France	5.62E+10	6.27E+10	5.62E+10	5.11E+10	4.57E+10
- Emissions de CO2 résidentiel	France	6.31E+07	4.16E+07	2.58E+07	1.79E+07	1.41E+07
transport	France	5.62E+07	5.49E+07	5.02E+07	4.66E+07	3.64E+07
industrie	France	1.56E+08	1.25E+08	1.09E+08	9.55E+07	8.15E+07
autre	France	1.12E+08	6.54E+07	5.95E+07	4.03E+07	2.97E+07
Total	France	3.88E+08	2.86E+08	2.44E+08	2.00E+08	1.62E+08

SCÉNARIO 4		Années				
Variables de sorties		2010	2020	2030	2040	2050
Données locales - par aire urbaine						
- Population	Paris	9.71E+06	9.10E+06	8.60E+06	8.02E+06	7.17E+06
	Lyon	1.42E+06	1.31E+06	1.22E+06	1.11E+06	9.78E+05
	Marseille	1.29E+06	1.15E+06	1.04E+06	9.29E+05	7.94E+05
- Densité	Paris	6.80E+02	5.99E+02	5.44E+02	4.85E+02	4.15E+02
	Lyon	4.44E+02	3.77E+02	3.33E+02	2.88E+02	2.40E+02
	Marseille	4.75E+02	3.95E+02	3.41E+02	2.89E+02	2.35E+02
- PIB	Paris	3.49E+05	3.51E+05	3.88E+05	4.20E+05	4.45E+05
	Lyon	4.26E+04	4.20E+04	4.55E+04	4.82E+04	5.00E+04
	Marseille	3.46E+04	3.31E+04	3.47E+04	3.58E+04	3.60E+04
- Nombre de firmes	Paris	7.54E+05	4.59E+05	2.80E+05	1.70E+05	1.03E+05
	Lyon	1.01E+05	6.00E+04	3.57E+04	2.12E+04	1.26E+04
	Marseille	9.62E+04	5.54E+04	3.20E+04	1.84E+04	1.06E+04
- Nombre d'emplois	Paris	7.27E+06	6.81E+06	6.44E+06	6.01E+06	5.37E+06
	Lyon	1.03E+06	9.43E+05	8.76E+05	8.02E+05	7.04E+05
	Marseille	8.62E+05	7.72E+05	6.97E+05	6.22E+05	5.31E+05
- Salaire	Paris	5.73E+04	6.82E+04	7.54E+04	8.62E+04	1.03E+05
	Lyon	4.27E+04	5.06E+04	5.59E+04	6.38E+04	7.58E+04
	Marseille	3.34E+04	3.95E+04	4.35E+04	4.95E+04	5.86E+04
- Revenu	Paris	3.59E+04	3.86E+04	4.51E+04	5.24E+04	6.20E+04
	Lyon	2.99E+04	3.21E+04	3.74E+04	4.33E+04	5.11E+04
	Marseille	2.69E+04	2.87E+04	3.33E+04	3.85E+04	4.53E+04
- Indice des prix	Paris	1.89E+00	4.19E+00	8.68E+00	1.88E+01	4.25E+01
	Lyon	1.94E+00	4.29E+00	8.89E+00	1.92E+01	4.36E+01
	Marseille	1.94E+00	4.29E+00	8.90E+00	1.92E+01	4.36E+01
- Prix de l'immobilier	Paris	3.91E+03	4.07E+03	4.13E+03	4.23E+03	4.32E+03
	Lyon	2.50E+03	2.56E+03	2.57E+03	2.61E+03	2.64E+03
	Marseille	2.74E+03	2.77E+03	2.75E+03	2.76E+03	2.75E+03
- Dépenses de logement	Paris	9.21E+03	9.89E+03	1.16E+04	1.34E+04	1.59E+04
	Lyon	7.89E+03	8.45E+03	9.86E+03	1.14E+04	1.35E+04
	Marseille	6.74E+03	7.19E+03	8.36E+03	9.65E+03	1.14E+04
- Dépenses en transport contraint	Paris	1.41E+04	1.68E+04	1.87E+04	2.14E+04	2.55E+04
	Lyon	9.72E+03	1.16E+04	1.29E+04	1.48E+04	1.77E+04
	Marseille	6.45E+03	7.71E+03	8.54E+03	9.78E+03	1.17E+04

SCÉNARIO 5		Années				
Variables de sorties		2010	2020	2030	2040	2050
Données macroéconomiques - niveau national						
- Population	France	6.29E+07	6.60E+07	6.85E+07	7.07E+07	7.23E+07
- PIB	France	1.59E+06	1.79E+06	2.16E+06	2.60E+06	3.12E+06
- Intensité énergétique de la production	France	1.50E-04	1.28E-04	1.07E-04	8.90E-05	7.50E-05
- Conversion énergétique	France	4.13E-01	3.98E-01	3.67E-01	3.76E-01	3.94E-01
- Intensité carbone de l'énergie	France	3.72E+06	2.86E+06	2.11E+06	1.68E+06	1.46E+06
- Prix de l'énergie charbon	Monde	7.51E+01	5.42E+01	6.00E+01	5.27E+01	4.48E+01
pétrole	Monde	5.52E+02	1.91E+03	2.13E+03	1.98E+03	1.84E+03
gaz	Monde	2.24E+02	7.85E+02	6.50E+02	7.32E+02	3.71E+02
électricité	France	7.27E+02	1.03E+03	7.28E+02	6.30E+02	6.45E+02
carburants	France	7.01E+02	2.25E+03	2.43E+03	2.18E+03	1.97E+03
- Energie primaire charbon	France	1.14E+01	4.39E+00	1.06E+01	1.45E+01	1.63E+01
pétrole	France	7.64E+01	4.16E+01	2.24E+01	1.67E+01	1.63E+01
gaz	France	3.19E+01	3.15E+01	1.98E+01	1.22E+01	1.04E+01
nucléaire	France	9.86E+01	8.81E+01	9.84E+01	1.06E+02	1.07E+02
hydro	France	6.00E+00	5.87E+00	5.85E+00	5.86E+00	5.92E+00
renouvelables	France	7.26E+00	2.35E+01	3.61E+01	4.01E+01	4.41E+01
Total	France	2.32E+02	1.95E+02	1.93E+02	1.95E+02	2.00E+02
- Energie finale charbon	France	3.12E+00	3.27E+00	5.36E+00	6.88E+00	5.76E+00
gaz	France	2.87E+01	2.30E+01	1.50E+01	1.07E+01	9.42E+00
électricité	France	3.58E+01	4.33E+01	5.34E+01	5.92E+01	6.47E+01
carburants	France	6.53E+01	3.77E+01	2.14E+01	1.72E+01	1.78E+01
Total	France	1.33E+02	1.07E+02	9.52E+01	9.41E+01	9.77E+01
- Energie finale résidentiel	France	3.86E+00	3.03E+00	2.80E+00	3.04E+00	3.38E+00
transport	France	4.69E+01	3.92E+01	3.40E+01	3.34E+01	3.48E+01
industrie	France	2.91E+00	3.02E+00	3.07E+00	3.20E+00	3.48E+00
autre	France	4.20E+01	3.23E+01	3.11E+01	3.38E+01	3.73E+01
Total	France	1.33E+02	1.07E+02	9.35E+01	9.20E+01	9.56E+01
- Transport de passagers automobile	France	6.94E+11	5.64E+11	6.15E+11	6.34E+11	6.33E+11
TC	France	1.19E+11	9.31E+10	9.56E+10	1.13E+11	1.35E+11
aérien	France	7.82E+09	5.30E+09	5.36E+09	6.26E+09	7.02E+09
transport non motorisé	France	6.23E+10	8.45E+10	8.42E+10	8.23E+10	7.71E+10
- Emissions de CO2 résidentiel	France	6.22E+07	4.01E+07	2.41E+07	1.61E+07	1.22E+07
transport	France	5.59E+07	4.56E+07	3.46E+07	3.49E+07	3.09E+07
industrie	France	1.42E+08	7.90E+07	5.22E+07	4.37E+07	4.25E+07
autre	France	9.59E+07	5.70E+07	3.86E+07	2.90E+07	2.99E+07
Total	France	3.56E+08	2.22E+08	1.49E+08	1.24E+08	1.16E+08

SCÉNARIO 5		Années				
Variables de sorties		2010	2020	2030	2040	2050
Données locales - par aire urbaine						
- Population	Paris	1.21E+07	1.52E+07	2.00E+07	2.60E+07	3.29E+07
	Lyon	1.77E+06	2.16E+06	2.77E+06	3.50E+06	4.32E+06
	Marseille	1.59E+06	1.87E+06	2.32E+06	2.83E+06	3.37E+06
- Densité	Paris	9.04E+02	1.17E+03	1.64E+03	2.25E+03	3.01E+03
	Lyon	6.04E+02	7.83E+02	1.11E+03	1.56E+03	2.13E+03
	Marseille	6.53E+02	8.42E+02	1.20E+03	1.70E+03	2.34E+03
- PIB	Paris	3.90E+05	4.10E+05	5.22E+05	6.76E+05	8.76E+05
	Lyon	4.74E+04	4.85E+04	6.01E+04	7.57E+04	9.56E+04
	Marseille	3.83E+04	3.77E+04	4.50E+04	5.46E+04	6.64E+04
- Nombre de firmes	Paris	9.70E+05	1.24E+06	1.45E+06	1.73E+06	2.09E+06
	Lyon	1.29E+05	1.60E+05	1.82E+05	2.12E+05	2.49E+05
	Marseille	1.23E+05	1.46E+05	1.60E+05	1.78E+05	2.02E+05
- Nombre d'emplois	Paris	9.10E+06	1.14E+07	1.50E+07	1.95E+07	2.46E+07
	Lyon	1.28E+06	1.55E+06	1.99E+06	2.52E+06	3.11E+06
	Marseille	1.07E+06	1.25E+06	1.55E+06	1.90E+06	2.25E+06
- Salaire	Paris	5.04E+04	5.37E+04	5.01E+04	4.81E+04	4.81E+04
	Lyon	3.79E+04	4.03E+04	3.75E+04	3.59E+04	3.58E+04
	Marseille	2.93E+04	3.10E+04	2.87E+04	2.74E+04	2.72E+04
- Revenu	Paris	3.21E+04	2.70E+04	2.61E+04	2.60E+04	2.66E+04
	Lyon	2.68E+04	2.25E+04	2.17E+04	2.16E+04	2.21E+04
	Marseille	2.41E+04	2.01E+04	1.94E+04	1.93E+04	1.97E+04
- Indice des prix	Paris	1.12E+00	6.85E-01	4.21E-01	2.60E-01	1.66E-01
	Lyon	1.15E+00	7.03E-01	4.32E-01	2.67E-01	1.70E-01
	Marseille	1.15E+00	7.05E-01	4.33E-01	2.68E-01	1.71E-01
- Prix de l'immobilier	Paris	4.08E+03	4.57E+03	4.97E+03	5.45E+03	6.00E+03
	Lyon	2.61E+03	2.90E+03	3.14E+03	3.42E+03	3.75E+03
	Marseille	2.86E+03	3.14E+03	3.37E+03	3.64E+03	3.96E+03
- Dépenses de logement	Paris	8.23E+03	6.92E+03	6.69E+03	6.66E+03	6.83E+03
	Lyon	7.06E+03	5.93E+03	5.73E+03	5.70E+03	5.84E+03
	Marseille	6.03E+03	5.05E+03	4.86E+03	4.83E+03	4.94E+03
- Dépenses en transport contraint	Paris	1.24E+04	1.32E+04	1.22E+04	1.17E+04	1.16E+04
	Lyon	8.54E+03	8.99E+03	8.21E+03	7.73E+03	7.56E+03
	Marseille	5.56E+03	5.79E+03	5.20E+03	4.81E+03	4.61E+03

SCÉNARIO 6		Années				
Variables de sorties		2010	2020	2030	2040	2050
Données macroéconomiques - niveau national						
- Population	France	6.29E+07	6.60E+07	6.85E+07	7.07E+07	7.23E+07
- PIB	France	1.57E+06	1.68E+06	2.10E+06	2.53E+06	3.07E+06
- Intensité énergétique de la production	France	1.50E-04	1.44E-04	1.11E-04	8.97E-05	7.16E-05
- Conversion énergétique	France	4.02E-01	3.74E-01	3.43E-01	3.52E-01	3.82E-01
- Intensité carbone de l'énergie	France	3.74E+06	2.80E+06	2.05E+06	1.68E+06	1.32E+06
- Prix de l'énergie charbon	Monde	7.51E+01	5.42E+01	6.00E+01	5.27E+01	4.48E+01
pétrole	Monde	6.58E+02	3.46E+03	3.20E+03	2.70E+03	2.24E+03
gaz	Monde	2.67E+02	1.42E+03	9.76E+02	9.99E+02	4.51E+02
électricité	France	7.44E+02	1.21E+03	7.76E+02	6.30E+02	6.48E+02
carburants	France	8.25E+02	3.98E+03	3.51E+03	2.80E+03	2.28E+03
- Energie primaire charbon	France	1.14E+01	5.40E+00	1.19E+01	1.57E+01	1.42E+01
pétrole	France	7.16E+01	3.26E+01	1.66E+01	1.19E+01	1.22E+01
gaz	France	3.18E+01	3.02E+01	1.68E+01	9.33E+00	7.86E+00
nucléaire	France	9.87E+01	8.90E+01	9.98E+01	1.05E+02	1.03E+02
hydro	France	6.01E+00	5.87E+00	5.85E+00	5.86E+00	5.90E+00
renouvelables	France	7.25E+00	2.36E+01	3.56E+01	3.85E+01	4.31E+01
Total	France	2.27E+02	1.87E+02	1.87E+02	1.86E+02	1.86E+02
- Energie finale charbon	France	3.13E+00	4.01E+00	6.60E+00	8.23E+00	5.33E+00
gaz	France	2.86E+01	2.21E+01	1.25E+01	8.27E+00	7.23E+00
électricité	France	3.58E+01	4.37E+01	5.28E+01	5.66E+01	6.31E+01
carburants	France	6.09E+01	2.96E+01	1.62E+01	1.29E+01	1.41E+01
Total	France	1.28E+02	9.94E+01	8.82E+01	8.60E+01	8.98E+01
- Energie finale résidentiel	France	3.82E+00	2.47E+00	2.43E+00	2.56E+00	2.80E+00
transport	France	4.61E+01	3.85E+01	3.11E+01	2.92E+01	2.99E+01
industrie	France	2.92E+00	2.96E+00	2.96E+00	3.15E+00	3.27E+00
autre	France	3.85E+01	2.59E+01	2.76E+01	3.05E+01	3.52E+01
Total	France	1.29E+02	9.91E+01	8.66E+01	8.40E+01	8.77E+01
- Transport de passagers automobile	France	6.03E+11	4.21E+11	5.11E+11	5.81E+11	6.37E+11
TC	France	1.18E+11	6.86E+10	7.73E+10	8.94E+10	1.07E+11
aérien	France	7.12E+09	4.31E+09	4.24E+09	4.37E+09	4.77E+09
transport non motorisé	France	7.11E+10	9.83E+10	9.58E+10	9.27E+10	8.65E+10
- Emissions de CO2 résidentiel	France	6.22E+07	3.96E+07	2.37E+07	1.61E+07	1.22E+07
transport	France	5.56E+07	4.61E+07	3.37E+07	3.51E+07	2.47E+07
industrie	France	1.29E+08	5.67E+07	3.92E+07	3.18E+07	3.28E+07
autre	France	9.47E+07	5.28E+07	3.48E+07	2.66E+07	2.42E+07
Total	France	3.42E+08	1.95E+08	1.31E+08	1.10E+08	9.39E+07

SCÉNARIO 6		Années				
Variables de sorties		2010	2020	2030	2040	2050
Données locales - par aire urbaine						
- Population	Paris	1.11E+07	1.09E+07	1.34E+07	1.52E+07	1.69E+07
	Lyon	1.63E+06	1.55E+06	1.86E+06	2.06E+06	2.23E+06
	Marseille	1.46E+06	1.35E+06	1.56E+06	1.68E+06	1.75E+06
- Densité	Paris	8.08E+02	7.82E+02	9.87E+02	1.14E+03	1.27E+03
	Lyon	5.34E+02	5.08E+02	6.40E+02	7.32E+02	8.09E+02
	Marseille	5.75E+02	5.38E+02	6.74E+02	7.64E+02	8.38E+02
- PIB	Paris	3.70E+05	3.18E+05	4.17E+05	5.14E+05	6.48E+05
	Lyon	4.50E+04	3.76E+04	4.80E+04	5.77E+04	7.08E+04
	Marseille	3.64E+04	2.93E+04	3.60E+04	4.17E+04	4.93E+04
- Nombre de firmes	Paris	9.69E+05	1.25E+06	1.41E+06	1.68E+06	2.03E+06
	Lyon	1.29E+05	1.61E+05	1.78E+05	2.05E+05	2.42E+05
	Marseille	1.22E+05	1.47E+05	1.56E+05	1.73E+05	1.96E+05
- Nombre d'emplois	Paris	8.34E+06	8.17E+06	1.00E+07	1.14E+07	1.26E+07
	Lyon	1.17E+06	1.12E+06	1.34E+06	1.49E+06	1.61E+06
	Marseille	9.78E+05	9.03E+05	1.04E+06	1.12E+06	1.17E+06
- Salaire	Paris	5.29E+04	6.86E+04	6.25E+04	6.43E+04	6.94E+04
	Lyon	3.97E+04	5.13E+04	4.66E+04	4.79E+04	5.15E+04
	Marseille	3.12E+04	4.02E+04	3.63E+04	3.72E+04	3.98E+04
- Revenu	Paris	3.32E+04	2.91E+04	3.11E+04	3.37E+04	3.84E+04
	Lyon	2.77E+04	2.42E+04	2.58E+04	2.80E+04	3.18E+04
	Marseille	2.49E+04	2.17E+04	2.30E+04	2.49E+04	2.82E+04
- Indice des prix	Paris	1.18E+00	8.64E-01	5.47E-01	3.66E-01	2.51E-01
	Lyon	1.21E+00	8.88E-01	5.62E-01	3.77E-01	2.58E-01
	Marseille	1.21E+00	8.87E-01	5.62E-01	3.76E-01	2.58E-01
- Prix de l'immobilier	Paris	4.02E+03	4.40E+03	4.61E+03	4.91E+03	5.26E+03
	Lyon	2.56E+03	2.78E+03	2.88E+03	3.04E+03	3.23E+03
	Marseille	2.81E+03	3.00E+03	3.08E+03	3.21E+03	3.38E+03
- Dépenses de logement	Paris	8.51E+03	7.46E+03	7.97E+03	8.65E+03	9.85E+03
	Lyon	7.30E+03	6.39E+03	6.81E+03	7.38E+03	8.38E+03
	Marseille	6.24E+03	5.43E+03	5.77E+03	6.23E+03	7.06E+03
- Dépenses en transport contraint	Paris	1.30E+04	1.69E+04	1.53E+04	1.58E+04	1.70E+04
	Lyon	8.99E+03	1.16E+04	1.05E+04	1.07E+04	1.15E+04
	Marseille	5.96E+03	7.65E+03	6.83E+03	6.91E+03	7.34E+03