



20, rue Rosenwald
75015 PARIS

Tél. : 01 53 68 14 94

Fax : 01 53 68 14 93

E mail : smash@wanadoo.fr

Les transports et le Facteur 4

Entre diversification des signaux et réforme fiscale

Emmanuel Combet

Frédéric Gherzi

Céline Guivarch

PREDIT GO n°11 Politique des transports

Rapport final

26 juin 2009

Table des matières

Table des matières.....	5
Introduction.....	7
I. Transports et carbone : un couple difficile à séparer.....	9
I.1. Transports : des émissions de carbone continument croissantes.....	9
I.2. Politiques climatiques et transports : l'aporie du prix unique.....	11
I.3. De quelques pré-requis pour garantir la pertinence d'une analyse	13
II. IMACLIM-R : un outil d'analyse dédié à la prospective énergie-transports	15
II.1. Un MEGC hybride avec déséquilibres.....	15
II.2. La représentation des transports dans l'architecture IMACLIM-R	17
II.2.1. Dans l'équilibre statique.....	17
II.2.2. Dans les modules dynamiques.....	19
II.3. Données.....	23
III. Résultats : entre pessimisme et optimisme	25
III.1. Protocole d'expériences numériques.....	25
III.1.1. Présentation des hypothèses de scénarios.....	26
III.1.2. Description du scénario de référence REF	28
III.2. Scénarios F4 : des résultats en demi-teinte	31
III.2.1. Atteindre un F4 par une taxe recyclée forfaitairement (F4-tC) :	31
un coût prohibitif	31
III.2.2. Vers des politiques transports plus complexes	34
III.3. Pourquoi la fiscalité comme lubrifiant ?	37
III.3.1. Et le double dividende ?	38
Conclusion.....	41
Annexe : L'architecture IMACLIM-R	43
Choix méthodologiques et structure du modèle.....	43
Une vision duale de l'économie pour faciliter le dialogue	43
entre ingénieurs et économistes.....	43
Un moteur de la croissance permettant des écarts entre croissance potentielle et réelle ...	46
Description technique.....	47
Données	47

Equilibre statique	48
Liens dynamiques : moteur de la croissance et changement technique	55
Moteur de la croissance : démographie, productivité et investissement	55
Changement technique lié à l'énergie.....	56
Bibliographie	59

Introduction

L'histoire des politiques de lutte contre le changement climatique est traversée par un débat sur la nature des instruments économiques à utiliser. L'alternative principale oppose l'usage de signaux prix d'une part, et des politiques de régulation d'autre part. La controverse comprend deux dimensions : l'efficacité incitatrice, et l'évaluation des coûts sociaux nets liés à l'instrument adopté.

Paradoxalement, on constate que sur ces questions des consensus assez larges ont vu le jour au sein de la communauté des économistes. Parmi ces convictions se trouve l'accord sur le fait que les meilleurs systèmes du point de vue de la maximisation du bien-être sont de deux types : un système de taxation, dont le produit est recyclé, ou un système d'échange de permis d'émissions de gaz à effet de serre. On sait la résistance sociale que rencontrent ces mesures, notamment celles du premier type. D'une part les réflexes anti-fiscaux, et d'autre part la crainte plus objective des effets redistributifs négatifs qu'une politique type taxe carbone peut provoquer, constituent le cœur des réticences.

Le grand écart persistant entre les recommandations des économistes, et la timidité des actions politiques entreprises, laisse le champ libre à la croissance des déplacements. En 2006 les transports représentent 36% des émissions de CO₂ en France. C'est de plus le secteur où les émissions croissent le plus rapidement. Plusieurs facteurs ont déterminé l'augmentation des flux de déplacement dans le temps : une croissance démographique et économique, ainsi que le développement d'infrastructures, ont provoqué des mutations profondes dans les pratiques de la mobilité. Le mouvement de fond a été caractérisé par un changement de logique dans la perception des déplacements qui a élargi les choix de localisation résidentielle.

Cette impression dissimule une réalité constituée par l'obligation pour les agents d'arbitrer entre transport et logement lorsqu'ils choisissent leurs lieux de résidence et de travail. La disponibilité de la ressource foncière contraint physiquement les localisations des activités, ainsi que les déplacements. L'ensemble des décisions économiques est impacté, ce qui rend tous les éléments du tissu urbain fortement interdépendants. Le poids du logement est allé croissant dans le budget des ménages, et les mutations des systèmes de transport ont été accompagnées de changements dans le bâti résidentiel urbain, et la localisation des agents.

C'est dans l'articulation de ces problématiques que peuvent être compris les enjeux d'une politique environnementale dans les transports urbains, son efficacité, et ses effets pervers. L'analyse des dynamiques propres aux interfaces entre logement et accessibilité nourrira la réflexion sur la conception des structures fiscales incitatives. L'importance du logement et des effets de localisation suggère la possibilité de concevoir des outils économiques plus fins et plus complets, agissant en parallèle dans plusieurs secteurs, dans le but d'éviter les effets indésirables d'une politique environnementale ciblée sur les transports.

La réalisation d'un objectif de 'Facteur 4' (diminution par 4 des émissions de carbone, Boissieu, 2006) pose trois types de problèmes :

- la déclinaison intersectorielle de cet objectif : appliquer un F4 de façon homogène sur l'ensemble des secteurs pourrait conduire à une inefficacité économique de grande ampleur tant les possibilités de 'décarbonisation' sont hétérogènes.

- Si l'émergence d'un prix du carbone (sous forme de taxes ou de PEN) est nécessaire pour accompagner toute politique climatique, il n'en reste pas moins que dans certains secteurs et principalement dans les transports le prix du carbone, donc de l'énergie n'est pas le seul paramètre de commande à envisager.
- Un tel objectif ne pourra, sauf optimisme technologique outrancier, s'effectuer sans de fortes tensions sur l'appareil de production, sur les modes de vie et sur les relations sociales au-delà des secteurs de l'énergie.

C'est pourquoi tout volet « transport » des politiques climatiques ne saurait être développé indépendamment d'une réflexion sur les réformes des systèmes fiscaux comme outil d'accompagnement d'une mutation majeure qui touche à la notion même de mobilité.

On testera grâce au modèle IMACLIM quelle est la part quantitative attribuée aux transports dans une politique F4. L'intérêt de disposer d'un modèle d'équilibre général calculable en économie ouverte est en particulier d'intégrer l'ensemble des contraintes liées à la compétitivité internationale. Il s'agit en effet de sortir de l'impasse dans laquelle, d'un côté, le secteur transport peut arguer de sa faible flexibilité pour demander des taux modestes de décarbonisation, et de l'autre, le secteur industriel peut arguer des contraintes de compétition internationale pour demander, lui aussi, des contraintes laxistes. On mettra en lumière les éléments de discussion sur l'arbitrage transports/autres secteurs, non pas sur la base de courbes de coût marginal sectoriel, mais sur la base de la maximisation de la croissance une fois introduits les effets d'équilibre général inter-sectoriels.

I. Transports et carbone : un couple difficile à séparer

I.1. Transports : des émissions de carbone continuent croissantes

Indissociables d'un mode de développement fondé sur l'ouverture et l'échange, les transports agrégés, conventionnellement mesurés en passagers-kilomètres et en tonnes-kilomètres, sont en constante progression dans le monde entier. La France, au cœur d'une vaste zone économique de libre circulation des hommes et des marchandises, ne fait pas exception à cette règle : de 1990 à 2004 ses transports de passagers, en particulier, progressent de 58% (Tableau 1), ce qui correspond à une croissance annuelle moyenne de 3,1%, très supérieure aux 2% de croissance annuelle du PIB enregistrés sur la même période. Les transports de marchandises progressent quant à eux de 27% (Tableau 2), soit de 1,6% en moyenne annuelle, donc opèrent un léger décrochage par rapport au PIB, mais continuent malgré tout de croître à peu près linéairement.

Mode	1990		2005		Variation 1990-2004
	pkm	part du total	pkm	part du total	
Voitures particulières	80,8	80,8%	131,2	83,2%	+63%
Autobus, autocars	6,9	6,9%	8,0	5,1%	+15%
Transports ferroviaires	11,3	11,3%	16,2	10,3%	+43%
Transports aériens	1,0	1,0%	2,3	1,5%	+143%
Ensemble	100,0	100%	157,8	100%	+58%

*pkm : passagers-kilomètres, indice 100 = total tous modes en 1990.
Champ : France métropolitaine.
Source : ministère des Transports, DAEI-SESP ; RATP ; SNCF ; DGAC.*

Tableau 1 Transports de passagers en France, 1990-2005

Mode	1990		2005		Variation 1990-2004
	Gtkm	part du total	Gtkm	part du total	
Transport ferroviaire	46,6	19,0%	35,6	11,4%	-24%
Transport routier	171,8	70,1%	248,5	79,6%	+45%
Navigation intérieure	7,1	2,9%	7,8	2,5%	+10%
Oléoducs	19,6	8,0%	20,3	6,5%	+3%
Ensemble	245,1	100,0%	312,2	100,0%	+27%

*Gtkm : milliards de tonnes-kilomètres.
Champ : hors transit et sur le territoire français.
Source : ministère des Transports, DAEI-SESP ; SNCF ; Minefi, OE.*

Tableau 2 Transports de marchandises en France, 1990-2005

Ce développement continu se fait en outre au profit de l'ensemble des modes carbonés (transport aérien, par voie d'eau, et routier), dont la part agrégée passe de 88,7% à 89,7% du transport de passagers (Tableau 1), et surtout de 73% à 82,1% du transport de fret (Tableau 2), et au détriment du seul mode ferroviaire, aujourd'hui largement électrifié : de 1990 à 2004 la contribution du rail ne

décroche certes que de 11,3% à 10,3% du transport de passagers (Tableau 1), grâce au développement du TGV, mais chute de 19% à 11,4% du transport de fret (Tableau 2).

En conséquence, la part du transport dans les émissions totales progresse de 3 points en 15 ans (Tableau 3). Une diminution marquée de l'intensité en carbone des services de transport permet toutefois de contenir la hausse des émissions à +16% entre 1990 et 2005—cependant le contraste avec les secteurs de l'industrie ou de l'agriculture, dont les émissions sont en forte diminution, demeure.

Source	Emissions 1990		Emissions 2005		Variation 1990-2005
	MtCO ₂	part du total	MtCO ₂	part du total	
Transformation de l'énergie	69	18%	68	17%	-1,4%
Industrie manufacturière	113	29%	101	25%	-10,6%
Résidentiel, tertiaire	83	21%	95	23%	+14,5%
Agriculture, sylviculture	9,4	2%	8,1	2%	-13,8%
Transports	116,6	30%	135,2	33%	+16,0%

MtCO₂ : millions de tonnes de CO₂.
Source : CITEPA / CORALIE / format SECTEN, mai 2009.

Tableau 3 Emissions de CO₂ françaises en 5 grands postes, 1990-2005

La seule source d'émissions à connaître une progression équivalente est le secteur résidentiel et tertiaire. Mais les flexibilités énergétiques des deux sources sont peu comparables. On imagine ainsi sans peine les consommations énergétiques résidentielles et tertiaires basculer vers une électrification totale, et reporter sur la production d'électricité, où les solutions sans carbone existent (ENR, nucléaire, à terme capture et stockage sur sites thermiques), le poids de réductions d'émissions amoindries par des gains d'efficacité moins sensibles à d'éventuels 'effets-rebonds'¹.

Dans les transports, en revanche, il semble exclu qu'un report modal, même soutenu par une politique massive de développement d'infrastructures, parvienne à remettre en cause la prépondérance du transport routier. Or, le développement de véhicules routiers sans émissions marque le pas, confronté à des difficultés techniques (logistique amont de l'hydrogène, stockage dans les véhicules de l'hydrogène comme de l'électricité). L'innovation sur les moteurs thermiques est quant à elle de plus en plus absorbée, d'une part par la croissance du poids des véhicules (nouveaux équipements, montées en gamme, taille moyenne des segments)², d'autre part par celle du kilométrage moyen—où l'on peut voir une manifestation d'un effet-rebond.

La croissance tendancielle des émissions du secteur des transports semble donc à la fois robuste, et difficile à infléchir dans le court terme du fait du manque d'alternatives techniques réellement matures.

¹ Entendus ici comme la propension des agents, en cas de gains d'efficacité énergétique, à augmenter leurs consommations de services énergétiques donc le bien-être qui en découle, à consommations d'énergie finale constantes, plutôt que de diminuer ces consommations.

² Pour le moins tendancielle. Il est intéressant d'observer, sur le point des tailles et poids des véhicules, l'impact du mécanisme de bonus-malus mis en place à l'hiver 2007.

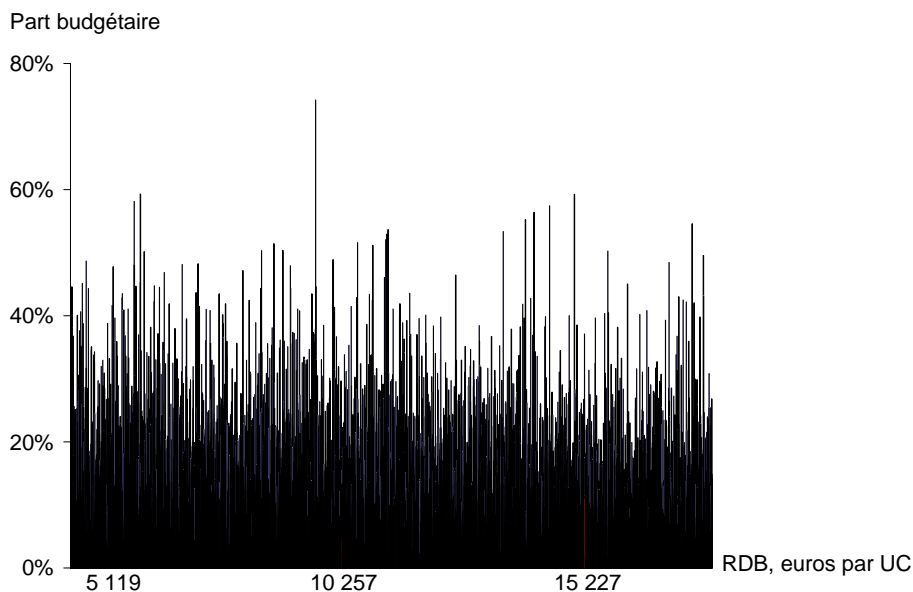
I.2. Politiques climatiques et transports : l'aporie du prix unique

En matière de politiques climatiques le principe économique de minimisation des coûts se traduit, en première analyse, par la préconisation d'un prix unique et généralisé du carbone. Un tel signal incite en effet à entreprendre toute réduction d'émissions dont le coût lui est inférieur, quelle que soit la source d'émissions considérée, ce qui permet *in fine* d'atteindre un objectif de réductions donné au moindre coût possible. Cependant cette préconisation théorique ne tient pas toujours lorsqu'elle est confrontée aux réalités des comportements et des marchés, ce notamment dans le cas particulier des transports.

D'une part, en négligeant les conséquences distributives de l'instauration d'un signal unique, elle fait l'hypothèse d'une séparabilité systématique entre les critères d'efficacité (minimisation du coût agrégé) et d'équité (juste distribution de ce coût entre les agents). Cette hypothèse repose sur la capacité de la puissance publique à organiser une politique distributive, indépendamment de ses autres objectifs de politique publique, *via* par exemple une fiscalité des revenus progressive ou un ensemble de transferts sociaux. Or, la forte variabilité des parts budgétaires consacrées par les ménages français à l'énergie n'est que faiblement corrélée à leur niveau de vie (Figure 1)—elle dépend plutôt de facteurs comme le type d'habitat, la localisation résidentielle, la distance de cette localisation au lieu travail et la desserte en transports en commun du trajet correspondant, *etc.* La compensation des effets distributifs d'une taxe carbone sur les transports suppose donc, quel que soit son degré, des politiques publiques sans lien avec celles opérant des transferts indiscriminés à destination des bas revenus. En conséquence la séparabilité des critères ne va plus de soi : il peut être politiquement plus aisé de mettre en œuvre une politique moins simpliste que celle d'un prix unique, qui combine les objectifs de l'efficacité et de l'équité.

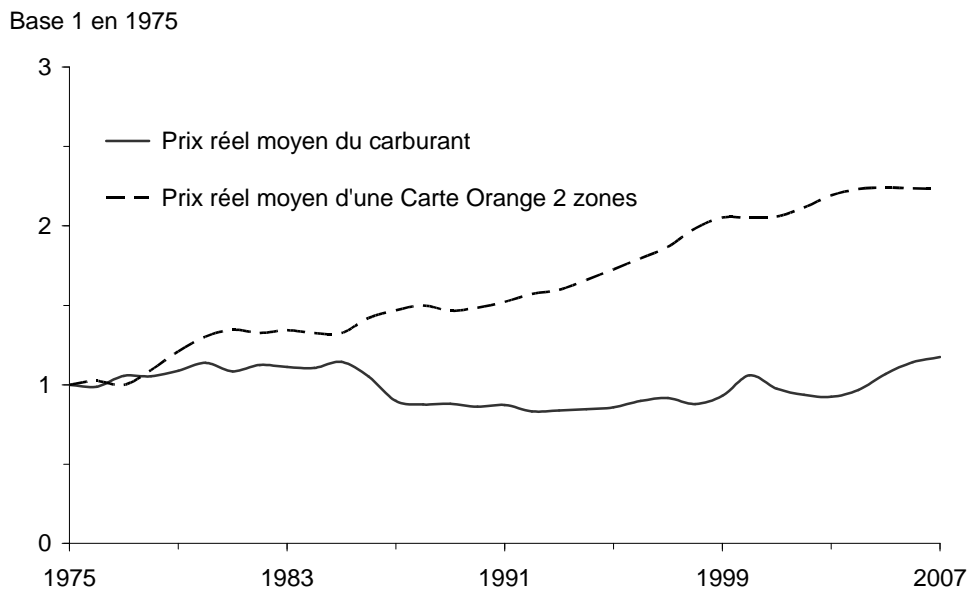
D'autre part, la supériorité d'un prix unique sur d'autres politiques se démontre aisément dans un cadre de statique comparative, mais un tel cadre évacue la question de l'articulation dynamique d'objectifs successifs.

Le secteur des transports est ainsi moins sensible que la plupart des autres sources d'émissions à une tarification du carbone, pour un ensemble de raisons. Comme nous l'avons évoqué, les alternatives techniques font défaut à infrastructures constantes, et les infrastructures sont caractérisées par une forte inertie. En outre les carburants supportent d'ores et déjà une forte fiscalité, qui amortit mécaniquement l'impact de toute taxe supplémentaire. Enfin, un prix unique renchérit effectivement les transports par rapport à un indice général des prix, mais pas nécessairement par rapport aux 'consommations' qui lui sont effectivement substituables : ce sont fondamentalement les prix du foncier, de la construction, ainsi que l'évolution des loyers, ou encore les prix des transports en commun, qui détermineront si la tendance à l'extension urbaine, donc la croissance des besoins de mobilité, va se poursuivre ; si des hausses substantielles de ces prix accompagnent la mise en œuvre du prix unique, quelles qu'en soient les raisons, son impact sera fortement diminué. Ainsi, une comparaison des évolutions des prix des carburants et du coût d'une Carte Orange 2 zones n'est pas sans éclairer la forte croissance de l'usage de l'automobile en Ile-de-France ces trente dernières années (Figure 2).



Source : Combet (2007) sur données de l'enquête Budget des familles 2000-2001, INSEE. Le 'niveau de vie' d'un ménage est égal à son revenu disp. brut (RDB) par unité de consommation (UC, 1 pour le premier adulte + 0,5 par personne de plus de 14 ans + 0,3 par enfant).

Figure 1 Part de l'énergie dans le budget de 10 305 ménages français selon leur niveau de vie



Source : CPDP, RATP

Figure 2 Evolution des prix réels moyens du carburant et d'une carte orange mensuelle deux zones

En conséquence de ces facteurs de rigidité, un objectif même assez ambitieux de réductions d'émissions, s'il est poursuivi par la mise en œuvre d'un prix unique, sera de peu d'effet sur les émissions des transports et se traduira surtout par de fortes réductions des émissions des autres

sources. Le risque est alors que les transports se figent dans un mode de développement intensif en carbone, et que la réalisation d'objectifs de long terme plus ambitieux se heurte à leur inertie, les autres sources de réductions d'émissions ayant été très largement épuisées.

I.3. De quelques pré-requis pour garantir la pertinence d'une analyse

Il ressort de ce qui précède qu'une analyse prospective des émissions des transports et de leur contrôle ou de leur diminution doit reposer sur une représentation des déterminants de la demande de transport qui aille au-delà du coût d'usage statique, pour tenter de prendre en compte les jeux de prix relatifs à l'œuvre dans la formation de comportements 'captifs', liés à l'étalement urbain (donc induits par l'état des marchés de l'immobilier et du foncier), aux infrastructures en place, à l'organisation des chaînes logistiques de production et de distribution, *etc.*

L'outil mis en œuvre dans les travaux présentés ici, le modèle IMACLIM-R, est de fait dédié à la simulation de ces différentes liaisons, par la mise en cohérence d'une expertise sectorielle sur les réalités propres aux transports, et d'un cadre d'équilibre général, relativement désagrégé, apte à prendre en compte l'insertion de ce secteur clé dans l'économie pour modéliser les effets de diffusion des politiques envisagées.

Il n'est pas inutile de souligner que le bouclage d'équilibre général opéré par IMACLIM-R ne doit pas être interprété comme résultant d'un choix idéologique sur le caractère nécessairement équilibré, sinon optimal, d'une économie de marché en tous points du temps : il s'agit avant tout d'un équilibre comptable des flux agrégés de valeur et de biens, cohérent avec une certaine vision des liaisons entre variables économiques, mais qui n'interdit pas des déséquilibres sur certains marchés, ni dans les comptes de tel ou tel agent. La cohérence sur les flux de biens et de valeurs n'est ni plus ni moins qu'une double règle de 'conservation de la masse'.

IMACLIM-R n'est donc pas attaché à une vision partisane particulière, et peut au contraire aider à traduire diverses conjectures ou préférences, pour examiner comment une prospective énergétique est affectée par différentes 'visions du monde' (par exemple, plus ou moins grand optimisme sur l'efficacité énergétique, conception du fonctionnement du marché du travail, *etc.*). Bien évidemment les résultats numériques au cœur des travaux rapportés ici reposent sur un ensemble d'hypothèses formant une telle 'vision du monde'—documentées autant que faire se peut au chapitre suivant. Une analyse de sensibilité exhaustive sur le corps de ces hypothèses outrepasserait très largement notre propos, c'est pourquoi les simulations devront être interprétées, plutôt que dans le détail de leurs nombres, comme des supports à la réflexion quant à l'évolution potentielle des transports dans un monde 'Facteur 4' (F4).

II. IMACLIM-R : un outil d'analyse dédié à la prospective énergie-transports

II.1. Un MEGC hybride avec déséquilibres

IMACLIM-R est un modèle d'équilibre général calculable (MEGC) développé pour la prospective appliquée aux domaines énergétique et environnemental dans le cadre de la recherche sur le changement climatique. Comme tout modèle d'équilibre général conventionnel, IMACLIM-R fournit un cadre macroéconomique permettant d'étudier les relations entre économie et énergie. Il représente les interactions entre les secteurs et les régions dans le temps à travers l'équilibre du marché des biens et simule l'impact économique des changements qui surviennent dans le secteur énergétique aussi bien au niveau macroéconomique (modification du bien être, gains ou pertes de compétitivité) qu'au niveau microéconomique (poids de l'énergie dans la structure de coûts de production ou dans la dépense des ménages).

Des efforts ont été faits pour construire une architecture de modélisation permettant d'incorporer aisément dans les simulations des avis d'experts et/ou des résultats de modèles sectoriels. IMACLIM-R est un modèle hybride dans la mesure où il 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, 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) des 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.

Une spécificité centrale du modèle, liée à cette description duale de l'économie, réside dans l'abandon des fonctions de production conventionnelles KLE ou KLEM, censées reproduire de manière agrégée l'ensemble des techniques disponibles et les contraintes techniques sur une économie. 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). À chaque date, les caractéristiques techniques de l'économie, ainsi que leur évolution entre t et $t + n$, dérivent de l'échange récursif d'informations (Figure 3) entre :

- 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 en 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 des secteurs et d'équipement des ménages. 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 sur le fait que l'économie s'adapte non seulement au niveau et à la direction des signaux économiques mais aussi à leur volatilité.

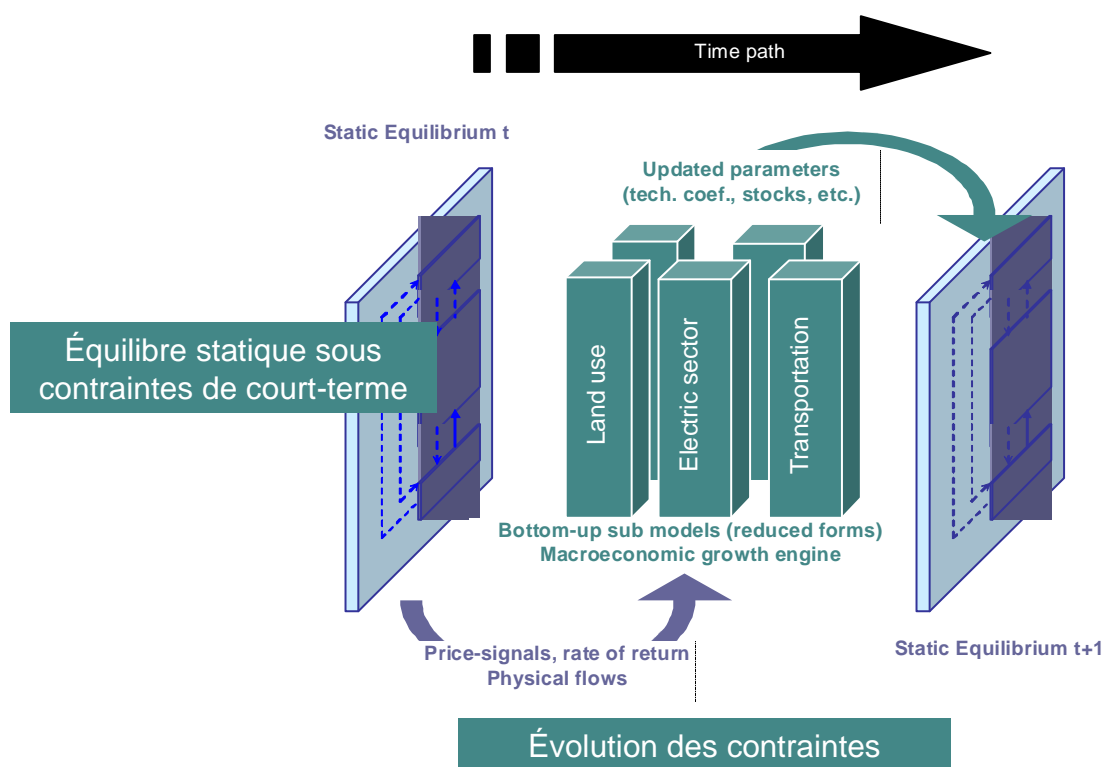


Figure 3 Architecture réursive et modulaire du modèle IMACLIM-R

Cette architecture permet de décrire des équilibres de second rang qui intègrent les inerties dans la dynamique d'équipement et les possibilités de sous emploi des facteurs de production (capital et travail).

II.2. La représentation des transports dans l'architecture IMACLIM-R

Les transports sont représentés dans le modèle IMACLIM-R France à travers quatre secteurs productifs : le transport aérien, le transport maritime et fluvial, le transport terrestre de marchandises et le transport terrestre de passagers. À ces secteurs s'ajoutent les services de transport autoproduits, à savoir la mobilité des véhicules particuliers et les modes de transport non-motorisés tels que la marche à pied, le vélo, *etc.*

Dans chaque équilibre statique, *i.e.* chaque année de la période sur laquelle s'étend l'exercice de prospective, la confrontation entre la demande de mobilité des ménages découlant du programme de maximisation de l'utilité et l'offre de transport détermine les productions des secteurs de transport de passagers. La production de transport de marchandises est quant à elle déterminée par les consommations intermédiaires de transport de la part des secteurs productifs.

Au sein de l'équilibre statique, les caractéristiques techniques des offres de transport sont fixes (rigidité de court-terme) ; elles évoluent dans les modules dynamiques (flexibilité de long-terme).

II.2.1. Dans l'équilibre statique

Dans l'équilibre statique, les transports de passagers et de marchandises sont caractérisés par les paramètres suivants :

- le niveau d'équipement des ménages en véhicules particuliers,
- l'efficacité de la flotte de véhicules particuliers,
- les capacités des différents modes de transport,
- les coefficients de consommations intermédiaires d'énergie dans les secteurs transports,
- les coefficients de consommations intermédiaires des quatre transports dans tous les secteurs.

Fonction d'utilité

Les arguments de la fonction d'utilité U sont (i) les biens C_i produits par les secteurs de l'agriculture, l'industrie et les services, (ii) le service de mobilité $S_{mobility}$ (en kilomètres-passagers pkm), (iii) les services d'habitat $S_{housing}$ (en mètres carrés). Les besoins fondamentaux pour chaque bien et service sont notés bn .

$$U = \prod_{\substack{\text{goods } i \\ (\text{agriculture,} \\ \text{industry,} \\ \text{services})}} (C_i - bn_i)^{\xi_i} \cdot (S_{housing} - bn_{housing})^{\xi_{housing}} \cdot (S_{mobility} - bn_{mobility})^{\xi_{mobility}} \quad (1.1)$$

Notons d'abord que l'énergie est considérée seulement comme facteur de production des services d'habitat et de mobilité : elle n'est pas directement explicitée dans la fonction d'utilité, mais les dépenses correspondantes affecteront l'équilibre et le bien-être à travers la facture énergie qui pèse sur le revenu disponible. La consommation d'énergie pour l'habitat est déduite du stock physique de

logements et de coefficients d'efficacité caractérisant le stock existant d'équipements utilisateurs d'énergie par mètre carré.

Le lien entre les services de mobilité et la demande d'énergie est plus complexe : il prend en compte non seulement l'efficacité énergétique des véhicules, mais aussi l'accessibilité différente de quatre modes de transport : le transport terrestre collectif, le transport aérien, les véhicules privés et le transport non-motorisé. Du fait des différences d'aménités fournies par chaque, les modes de transport sont supposés être des substituts imparfaits. Les quantités de passagers-kilomètres pkm_{mode} dans les différents modes sont agrégées dans un seul indice de service de mobilité, *via* une fonction à élasticité de substitution constante (CES).

$$S_{mobility} = \left(\left(\frac{pkm_{air}}{b_{air}} \right)^\eta + \left(\frac{pkm_{public}}{b_{public}} \right)^\eta + \left(\frac{pkm_{cars}}{b_{cars}} \right)^\eta + \left(\frac{pkm_{nonmotorized}}{b_{nonmotorized}} \right)^\eta \right)^{-1/\eta} \quad (1.2)$$

L'avantage de ne pas faire figurer l'énergie dans la fonction d'utilité est de permettre une représentation explicite des équipements, des demandes induites par ces équipements, et de l'inertie des consommations. Les demandes en énergie finale directement supportées par les ménages sont dérivées des niveaux de $S_{housing}$ et pkm_{cars} à travers l'équation :

$$C_{Ei} = pkm_{cars} \alpha_{Ei}^{cars} + S_{housing} \alpha_{Ei}^{m^2} \quad (1.3)$$

Dans cette équation, α^{cars} décrit la consommation d'énergie moyenne pour transporter un passager-kilomètre avec le stock existant de voitures privées et α^{m^2} est la consommation de chaque type d'énergie par mètre carré de logement. Ces paramètres sont maintenus constants pendant la résolution de l'équilibre statique et sont ensuite ajustés dans les modules dynamiques « transports » et « résidentiel », qui décrivent les évolutions des stocks d'équipements utilisateurs d'énergie, et des besoins unitaires en énergie attachés à ces stocks.

Programme de maximisation

Pour capturer les liens entre la demande finale et la disponibilité en infrastructures et équipements, les consommateurs représentatifs sont supposés maximiser leur utilité sous deux contraintes :

- une **contrainte de revenu disponible** qui impose que la somme des achats de biens et services non-énergétiques C_i et des dépenses d'énergie (induites par le transport en véhicule particulier et par les usages finaux dans l'habitat) soit égale au revenu disponible pour la consommation (équation 1.4), pour un ensemble donné de prix au consommateur pC_i ,

$$ptc \cdot Income = \sum_i pC_i \cdot C_i + \sum_{Energies\ E_i} pC_{E_i} \cdot \left(pkm_{cars} \cdot \alpha_{E_i}^{cars} + S_{housing} \cdot \alpha_{E_i}^{m^2} \right) \quad (1.4)$$

- Une **contrainte de budget temps** qui impose un plafond supérieur au temps moyen quotidien que les gens consacrent au transport. Elle repose sur la loi empirique dite « de Zahavi » (Zahavi et Talvitie, 1980), qui met en évidence que le temps moyen de transport quotidien des ménages reste à peu près constant depuis plusieurs décennies dans un large éventail de zones urbanisées, malgré les substitutions de modes réalisées. Le choix entre différents modes de transport dépend

en fait non seulement de leurs prix relatifs mais aussi des efficacités marginales en temps de transport τ_{T_j} , c'est-à-dire le temps requis pour parcourir un kilomètre additionnel avec chaque mode T_j . Chaque mode est ainsi caractérisé par une *efficacité en temps de déplacement* spécifique qui décroît avec le taux d'utilisation de ses infrastructures. Plus on approche de la limite de capacité $Captransport_{T_j}$ de ces infrastructures (exprimée en kilomètres de route ou de rail, ou en siège-kilomètre), moins le mode considéré sera efficace à cause de la congestion (Figure 5). La contrainte de budget temps s'écrit³ :

$$Tdisp = \sum_{\text{means of transport } T_j} \int_0^{pkm_{T_j}} \tau_{T_j} \left(\frac{u}{Captransport_{T_j}} \right) du \quad (1.5)$$

Naturellement, la capacité maximale des infrastructures change dans le temps selon la quantité d'investissement affecté à chaque type d'infrastructure.

II.2.2. Dans les modules dynamiques

Le module transport organise l'évolution des paramètres caractérisant les transports au sein de l'équilibre statique. Il modifie les contraintes portant sur la formation de la demande et de l'offre de transport dans l'équilibre statique : infrastructures de transport, équipements des ménages en véhicules, rendements, et évolution des besoins de fret engendrés par l'activité économique.

Véhicules particuliers : stock et intensité énergétique

L'évolution du taux de motorisation est fortement liée à l'évolution du revenu moyen par habitant et à l'évolution de la distribution des revenus au sein de la population, mais peu sensible aux variations de prix des carburants (*cf.* Storchmann, 2005). La représentation de ce lien dans IMACLIM-R est calquée sur le modèle *SMP*, un modèle sectoriel de la consommation d'énergie du secteur des transports conjointement développé par l'Agence Internationale de l'Energie et le World Energy Council (Fulton et Eads, 2004). La particularité du modèle *SMP* est qu'il utilise une élasticité-revenu du taux de motorisation qui est variable en fonction du taux de motorisation, ce qui revient, en pratique, à une élasticité variant avec le revenu. Un effet de saturation sur la possession de véhicules particuliers apparaît ainsi. Dans IMACLIM-R, le taux de motorisation est lié à l'évolution du revenu disponible par habitant selon l'équation suivante :

$$CARS_pc(t+1) = CARS_pc(t) \cdot \left(1 + \alpha(CARS_pc(t)) \cdot \frac{Income_pc(t)}{Income_pc(t-1)} \right) \quad (1.6)$$

L'élasticité revenu α est reliée au taux de motorisation selon une formule adaptée du modèle *SMP* (Figure 4). Pour ce qui concerne la France, l'élasticité revenu est donc déjà relativement faible, ce qui signifie que la période d'équipement massif est déjà passée et que l'effet de saturation se fait d'ores et déjà sentir.

³ En supposant un déplacement de 1,1 heure par jour, le temps total annuel affecté au déplacement est donné par $Tdisp_k = 1,1 \cdot 365 L_k$, avec L_k la population totale.

En multipliant $CARS_{pc}$ par la population totale on obtient naturellement la taille du parc total, notée $CARS$. La taille de la flotte de véhicules particuliers conditionne ensuite la capacité de transport associée au mode automobile, paramètre pris en compte dans la contrainte de budget temps des ménages dans l'équilibre statique.

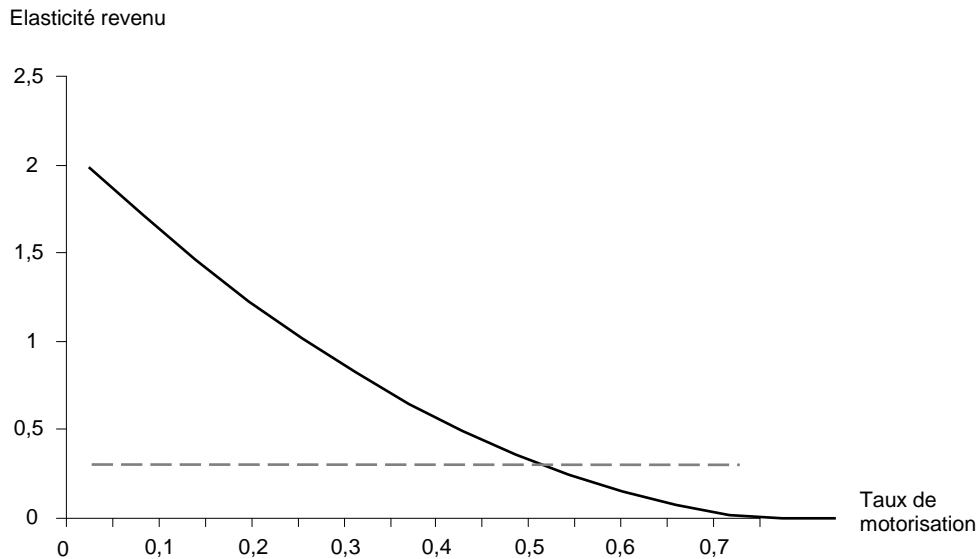


Figure 4 Evolution de l'élasticité-revenu α en fonction du taux de motorisation

L'efficacité de la flotte de véhicules particuliers dépend des choix technologiques des ménages lors de l'acquisition des véhicules et du progrès technique. La flotte automobile est détaillée en générations de véhicules, selon leur année de mise en circulation, et selon 5 types de véhicules : conventionnels ou hybrides, avec deux déclinaisons en technologie standard ou technologie améliorée, et véhicules électriques. Cette représentation schématique inclut des caractéristiques contrastées pour ces cinq types de véhicules—prix d'achat, efficacité énergétique, coûts de maintenance fixes et variables—calibrées à partir des données de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE, 2006), et évoluant dans le temps en fonction du progrès technique.

À chaque date, la **composition technologique de la nouvelle génération de véhicules** résulte d'un choix des agents parmi les cinq technologies explicites. Cet arbitrage s'effectue en comparant, pour chaque technologie disponible, le coût moyen actualisé associé à la production d'un véhicule.kilomètre avec le type de véhicule considéré. Ce coût moyen est calculé à partir des caractéristiques technologiques des différents types de véhicules. Pour cela les ménages formulent des anticipations myopes sur les futurs prix finaux des énergies, c'est-à-dire qu'ils considèrent que les prix futurs sont égaux à ceux de l'équilibre statique précédent. En cas de mise en place d'une politique carbone explicite, les ménages anticipent parfaitement les futures valeurs de la taxe et l'ajoutent à leur scénario myope de prix des énergies. Le coût moyen actualisé de production d'un véhicule.kilomètre à partir d'une technologie identifiée, notée $TECH$ dans ce qui suit, s'obtient selon l'équation 1.7 en sommant les coûts fixes et les coûts variables liés respectivement à la possession et à l'utilisation du véhicule. Les coûts fixes sont constitués du coût d'achat (noté $CINV_{carSTECH}$) actualisé et des coûts fixes annuels liés à la possession du véhicule (par exemple l'assurance), tous deux ramenés au kilomètre parcouru à partir d'une hypothèse effectuée sur le parcours annuel moyen des véhicules (noté $average_km_per_year$). Les coûts variables rassemblent les coûts en carburant qui dépendent à

la fois des scénarios de prix finaux anticipés (notés $p_{fuel_anticip_taxed_cars}$) et de la consommation du véhicule considéré par véhicule.kilomètre (notée $\alpha_{ENER}^{CAR,TECH}$). Dans tous ces calculs, le taux d'actualisation adopté par les ménage, noté $disc_{k,CAR}$, est fixé comme une hypothèse de scénario ; par défaut, il est de 0,13.

$$LC_{TECH} = \frac{CRF_cars_{TECH} \cdot CINV_cars_{TECH} + OM_fixed_cars_{TECH}}{average_km_per_year} + CRF_cars_{TECH} \cdot \sum_{i=1}^{life_time_{CAR}} \left(\frac{p_{fuel_anticip_taxed_cars}(t+i) \cdot \alpha_{ENER}^{CAR,TECH}}{(1+disc_cars_{TECH})^i} \right) + OM_var_cars_{TECH} \quad (1.7)$$

avec :

$$CRF_cars_{TECH} = \frac{disc_cars_{TECH}}{1 - (1+disc_cars_{TECH})^{-life_time_{CAR}}} \quad (1.8)$$

Les parts de marché de chaque technologie sur l'ensemble des nouveaux véhicules produits à la période courant s'obtiennent ensuite par une fonction de part qui permet de prendre en compte les hétérogénéités des choix des ménages et la coexistence sur le marché de plusieurs types de véhicules différents, à la manière de Clarke et Edmonds (1993) :

$$MS_cars_{TECH} = \frac{LC_{TECH}^{-\gamma_{CARS}}}{\sum_{TECH_j} (LC_{TECH_j}^{-\gamma_{CARS}})} \quad (1.9)$$

Ces parts sont ensuite appliquées à la nouvelle génération de véhicules CAR_{new} , obtenue par différence entre la nouvelle taille totale du parc $CARS$ et l'ancien parc déprécié.

Finalement, la **nouvelle intensité énergétique moyenne du transport automobile** (exprimée en MTEP par passager.kilomètre) est obtenue en tenant compte de la composition du parc et des niveaux d'utilisation des différentes générations et types de véhicules :

$$\alpha_{ENER}^{CARS}(t+1) = \frac{\sum_{TECH} \left(\sum_{j=1}^{life_time_{CARS}} CARS_{TECH}^{vintage}(t+j) \cdot \frac{\alpha_{ENER}^{vintage,CARS}(t+j) \cdot on_road_gap_factor}{occupancy} \right)}{\sum_{TECH} \left(\sum_{j=1}^{life_time_{CARS}} CARS_{TECH}^{vintage}(t+j) \right)} \quad (1.10)$$

Cette équation inclut deux paramètres comportementaux tirés du modèle SMP et nécessaires pour passer des consommations théoriques des types de véhicules à l'intensité énergétique moyenne du parc : le taux d'occupation moyen des véhicules, noté $occupancy$, et le rapport entre la consommation théorique des véhicules et la consommation réelle effectivement observée, noté $on_road_gap_factor$.

Pour le transport de passager, **l'évolution des paramètres de capacité de transport** intégrés dans le calcul du budget temps de l'équilibre statique est directement liée à l'évolution des infrastructures de transport, selon des routines de décision publiques et privées. Par défaut ces décisions financent des capacités suivant l'augmentation tendancielle de la demande, soit explicitement à travers la dépense de l'état en infrastructures routières, soit *via* les décisions d'investissement des secteurs transport. L'évolution des niveaux de capacité modifie ensuite l'efficacité-temps des transports dans le calcul du budget-temps (Figure 5).

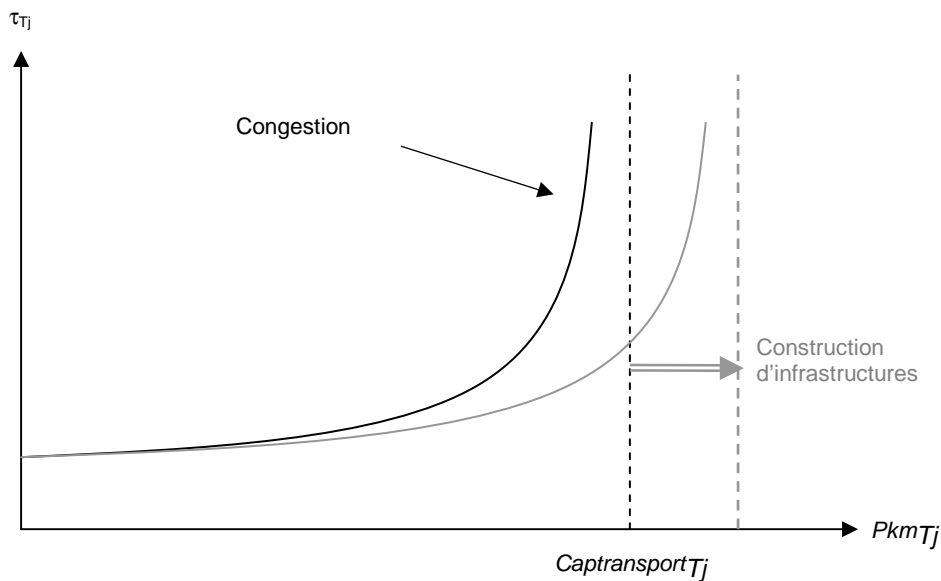


Figure 5 Effet de l'extension des capacités sur l'efficacité marginale en temps des transports

Les **consommations intermédiaires d'énergie des transports** répondent à des formes réduites simples de gains d'efficacité :

- dans le secteur aérien, les consommations intermédiaires d'énergie suivent une tendance autonome à la décroissance de 0,7% par an, qui reflète à la fois les avancées effectuées sur la conception des avions pour diminuer leur consommation et l'amélioration du remplissage moyen des avions *via* des mesures d'organisation du trafic et des dessertes.
- Dans le secteur maritime, les consommations intermédiaires d'énergie par unité transportée restent inchangées.
- Dans les secteurs des transports terrestres de fret et de passagers, la consommation moyenne de carburants liquides évolue en fonction d'une élasticité aux prix des carburants $elast_Et_OT_k$, fixée à -0,4, avec une asymptote fixée à 25% de la valeur initiale de ces paramètres. Cette représentation agrégée est une étape préliminaire vers une représentation plus détaillée du secteur en sous-secteurs. Ce niveau d'agrégation résulte directement du format de la comptabilité nationale INSEE sur laquelle s'appuie le calibrage du modèle. L'évolution

dynamique des consommations intermédiaires énergétiques de ces secteurs rassemble donc à la fois des progrès technologiques sur les véhicules, des transferts modaux (en particulier pour le fret entre la route et le rail) et des modifications de la composition structurelle de ce secteur qui découlent de changements dans les poids relatifs des sous-secteurs qui le composent.

$$IC_{new_{Et,Other\ Trans}} = \max \left(IC_{Et,Other\ Trans,k}(1) \cdot \left(\frac{pIC_{Et,Other\ Trans}(t)}{pIC_{Et,Other\ Trans}(1)} \right)^{elast_{Et_OT}}, IC_{Et,Other\ Trans}(1) \cdot Asympt_{Et_OT} \right) \quad (1.11)$$

Evolution de la demande de transport par les autres secteurs

Le contenu en fret de la croissance économique est directement relié, dans le modèle, à l'évolution des coefficients de consommation intermédiaire de transport de tous les autres secteurs productifs de l'économie. La forme de la structure des coûts de production du transport de fret permet d'amortir significativement l'impact d'une variation des prix des énergies sur le prix final du transport facturé aux secteurs productifs. Compte tenu de l'importance de l'incertitude qui pèse sur l'évaluation de la réaction des entreprises à des variations, assez minimes, des prix du transport dans leur décision d'organisation de la production, nous avons décidé de fixer l'évolution de ces paramètres de façon exogène comme des variables de scénario. Ainsi, dans la spécification de référence, conformément aux tendances historiquement observées, ces coefficients de consommation intermédiaire suivent l'évolution du progrès technique. Dans les scénarios de réduction des émissions, les hypothèses de réorganisation des activités ou des zones urbaines peuvent nous conduire à supposer un découplage des activités de transport.

II.3. Données

Le calibrage et l'initialisation des variables économiques et physiques du modèle sont réalisés à partir de deux tableaux de données distincts : la matrice de données économiques d'une part et celle de données physiques de l'autre. L'année de calibrage choisie est 2004. Les données économiques sont basées sur la Comptabilité Nationale (Tableau des Entrées-Sorties) de l'INSEE ; les données énergétiques (Balance Énergétique et prix des énergies) proviennent des bases de données de la société ENERDATA et du Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) du MEEDDAT (http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/f1e_stats.htm).

Les données spécifiques aux transports, notamment pour le calibrage des mobilités par modes, du taux de motorisation des ménages, du taux de remplissage moyen des véhicules, *etc.*, proviennent du service Economie et statistiques du MEEDDAT (http://www.statistiques.equipement.gouv.fr/rubrique.php3?id_rubrique=95).

III. Résultats : entre pessimisme et optimisme

À l'aide de l'outil présenté dans la partie précédente de ce rapport et pour répondre à la problématique exposée dans la partie inaugurale, nous réalisons un certain nombre d'expériences numériques, ou 'scénarios', que nous décrivons ci-dessous.

III.1. Protocole d'expériences numériques

Les scénarios se divisent en deux types : les scénarios 'de référence', *i.e.* sans politique climatique, et les scénarios 'Facteur 4' (F4), *i.e.* des scénarios avec une politique climatique visant en 2050 une division par quatre des émissions de gaz à effet de serre (GES) par rapport à leur niveau de 1990. La comparaison en un scénario Facteur 4 et son scénario de référence permet de quantifier les coûts de l'atteinte de l'objectif de politique climatique, notamment en comparant les PIB ou leurs croissances.

Pour les scénarios F4, nous forçons les émissions à suivre une trajectoire prédéfinie. Techniquement, le modèle ajuste la taxe carbone à chaque date pour que les émissions correspondent à l'objectif imposé. Ceci assure une comparabilité des scénarios F4 entre eux. Nous nous inscrivons ici dans une approche 'coût-efficacité', c'est-à-dire que nous comparerons les coûts de politiques alternatives pour atteindre un objectif fixé.

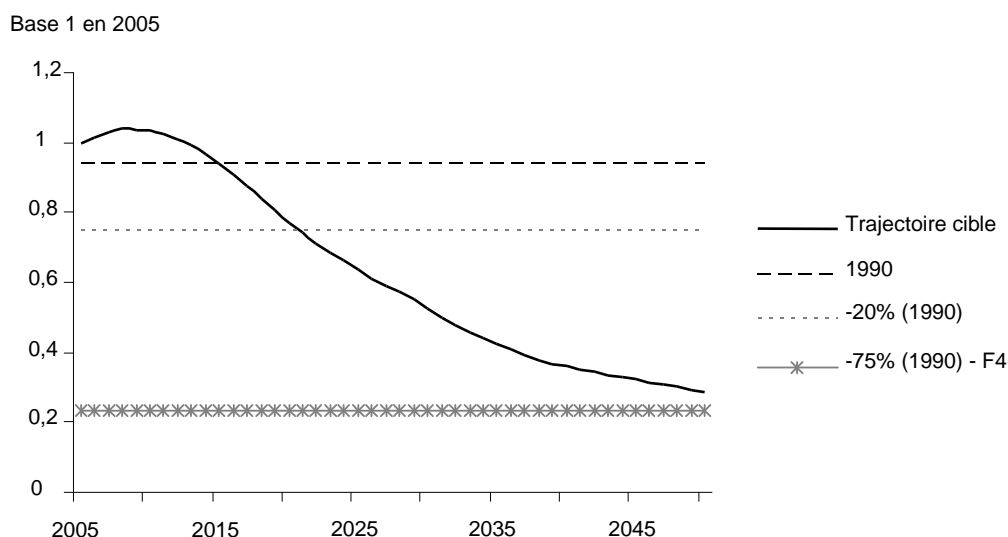


Figure 6 Trajectoire cible d'émissions de CO₂ énergétique (périmètre de Kyoto)

La trajectoire cible d'émissions (Figure 6) est compatible avec l'objectif d'un F4 pour l'ensemble des gaz à effet de serre⁴.

III.1.1. Présentation des hypothèses de scénarios

Un jeu d'hypothèses communes

Les neuf scénarios reposent sur un jeu d'hypothèses communes portant à la fois sur les paramètres macroéconomiques et les paramètres technologiques, qui correspondent à la projection d'une vision du monde futur.

Les hypothèses macroéconomiques regroupent :

- une projection de la démographie française à l'horizon 2050 : projection centrale INSEE (Figure 7, panneau gauche) ;
- une projection de la croissance de la productivité du travail, qui s'appuie sur des travaux d'analyses des tendances passées de croissance de la productivité du travail (Maddison, 1995) et des travaux prospectifs (Oliveira Martins *et al.*, 2005) : sur l'horizon 2004-2050, la trajectoire de croissance de la productivité du travail est légèrement inférieure à 2% par an ;
- une représentation de l'ouverture au commerce extérieur dont les paramètres sont tirés de Erkel-Rousse et Mirza (2002) ;
- une trajectoire des prix mondiaux, en particulier des prix des énergies fossiles (Figure 7, panneau droit), tirée des résultats du modèle IMACLIM-R monde pour un scénario de politique climatique à l'échelle mondiale visant une stabilisation de la concentration de GES à 450 ppm CO₂eq en 2050. Notons que les prix du pétrole connaissent deux envolées. La première correspond à la période récente de tensions sur les marchés internationaux du pétrole, largement dues à la pression de la demande émanant des grands pays émergents, tels que la Chine et l'Inde, qui pousse à l'exploitation de ressources plus chères tandis que les investissements dans les nouvelles capacités d'extraction ne s'adaptent que partiellement au changement de contexte. La seconde envolée correspond à l'arrivée du '*peak-oil*' lorsque les producteurs sont contraints par la déplétion des ressources. Le prix du gaz, partiellement indexé sur le prix du pétrole mais dont les contraintes liées à la déplétion des ressources sont moins fortes, suit le même type de trajectoire que le prix du pétrole, avec une deuxième envolée beaucoup moins marquée. Le prix du charbon quant à lui n'est pas marqué par des contraintes de déplétion avant l'horizon 2050.

⁴ Le modèle ne prenant en compte que les émissions de CO₂ énergétique, et les potentiels de réduction des gaz hors CO₂ (méthane notamment) étant légèrement supérieurs à ceux pour le CO₂ seul.

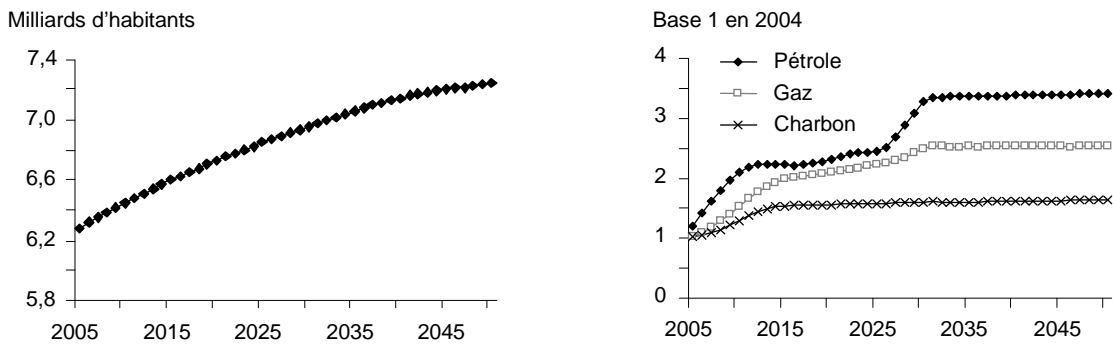


Figure 7 Projections de population (gauche) et de prix mondiaux des énergies fossiles (droite) données exogènes d'IMACLIM-R

Les hypothèses technologiques recouvrent l'ensemble des hypothèses de coût d'investissement et d'efficacité des technologies de transformation (génération d'électricité en particulier, mais aussi raffinage et offre de carburants alternatifs tels que les agro-carburants) et d'utilisation de l'énergie (que ce soit les procédés industriels ou les flottes de véhicules). Ces hypothèses sont calibrées sur les données du modèle POLES (Criqui, 2001) pour le secteur de l'électricité et sur les données de l'AIE (AIE, 2006) pour les autres secteurs.

Quatre axes de différenciation

Les scénarios se différencient selon quatre dimensions, (i) l'instauration ou non d'une taxe carbone à compter de 2008 ; (ii) l'utilisation des revenus de la taxe carbone si elle est instaurée ; (iii) la mise en œuvre ou non de politiques 'transports' spécifiques et (iv) la représentation du marché du travail.

Les Simulations 1 et 8, par opposition à l'ensemble des autres, fournissent deux 'références' de développement en l'absence de taxe carbone.

Par défaut (Simulations 2, 3, 4 et 5), les revenus de la taxe carbone sont reversés forfaitairement aux ménages. Alternativement (Simulations 6, 7 et 9), ils sont utilisés pour diminuer la fiscalité sur le travail, à revenus fiscaux constants pour l'Etat.

Pour ce qui est des politiques « transports », elles consistent à jouer sur un certains nombre de leviers, hors prix du carbone, afin d'agir sur la mobilité individuelle d'une part (Simulations 3, 5 et 9) et sur le transport de fret d'autre part (Simulations 4, 5 et 9) : investissements d'infrastructure en faveur des transports en commun afin d'inciter le report modal de la voiture particulière vers les modes collectifs, report d'une partie du fret routier vers le fret ferroviaire, politiques de remplissage des camions et de limitation du kilométrage à vide, organisation de la chaîne logistique de production et de distribution pour réduire le 'contenu transport' des produits à la consommation... Ces politiques et leur schématisation dans le modèle seront détaillées section III.2.2.

La représentation des imperfections du marché du travail, dans le modèle, passe par la spécification d'une courbe 'salaire-chômage' qui donne une relation décroissante entre le niveau des salaires et le niveau de chômage (plus le niveau de chômage est élevé, plus le niveau des salaires est faible). Cette représentation s'appuie sur les modèles de négociations salariales (Layard et Nickell, 1986) et de salaire d'efficacité (Shapiro et Stiglitz, 1984). L'élasticité de la courbe salaire-chômage

est prise égale à -0,1, la valeur ressortant de la plupart des analyses économétriques (Blanchflower et Oswald, 1995). Par défaut (Simulations 1 à 7), c'est le salaire réel, *i.e.* le salaire déflaté du niveau des prix à la consommation, qui entre dans la spécification de la courbe salaire-chômage. Alternativement (Simulations 8 et 9), nous prenons une spécification dans laquelle c'est le salaire nominal, *i.e.* non déflaté du niveau des prix, qui est relié au niveau de chômage. Cette spécification alternative correspond en quelque sorte à un monde dans lequel le pouvoir de négociation des salariés dans la fixation du salaire est affaibli.

Le détail des simulations dont nous allons exploiter les résultats dans la suite est donné dans le Tableau 4.

Simulations	Description	Abréviations
1	Référence (hors politique climatique)	REF
2	F4 – taxe carbone seule recyclée forfaitairement aux ménages	F4-tC
<i>Avec des politiques transports spécifiques</i>		
3	F4 – taxe carbone recyclée forfaitairement aux ménages plus politiques visant le transport de passagers	F4-tC-pass
4	F4 – taxe carbone recyclée forfaitairement aux ménages plus politiques visant le transport de marchandises	F4-tC-fret
5	F4 – taxe carbone plus politiques transports (à la fois passagers et marchandises)	F4-tC-Trans
<i>Avec la fiscalité comme « lubrifiant »</i>		
6	F4 – taxe carbone plus politiques transports (à la fois passagers et marchandises) et recyclage des revenus de la taxe carbone en baisse de la fiscalité sur le travail	F4-tC-Trans-recycl
7	F4 – taxe carbone seule et recyclage des revenus de la taxe carbone en baisse de la fiscalité sur le travail	F4-tC –recycl
<i>Variante sur la spécification de la courbe « salaire-chômage »</i>		
8	Scénario hors politique climatique avec spécification de la courbe salaire-chômage prenant en compte le salaire nominal	REF-nom
9	F4 avec spécification de la courbe salaire-chômage prenant en compte le salaire nominal – taxe carbone plus politiques transports (à la fois passagers et marchandises) et recyclage des revenus de la taxe carbone en baisse de la fiscalité sur le travail	F4-nom-tC-Trans-recycl

Tableau 4 Nomenclature des simulations numériques

III.1.2. Description du scénario de référence REF

Commençons par décrire brièvement le scénario de référence REF (Simulation 1), *i.e.* hors politique climatique, par rapport auquel nous présenterons les résultats des scénarios Facteur 4, notamment en termes de perte de PIB. Dans ce scénario de référence, en 45 ans le PIB réel est multiplié par 2,2 (Figure 8), ce qui correspond à un taux de croissance annuel moyen de 1,8%.

Base 1 en 2005

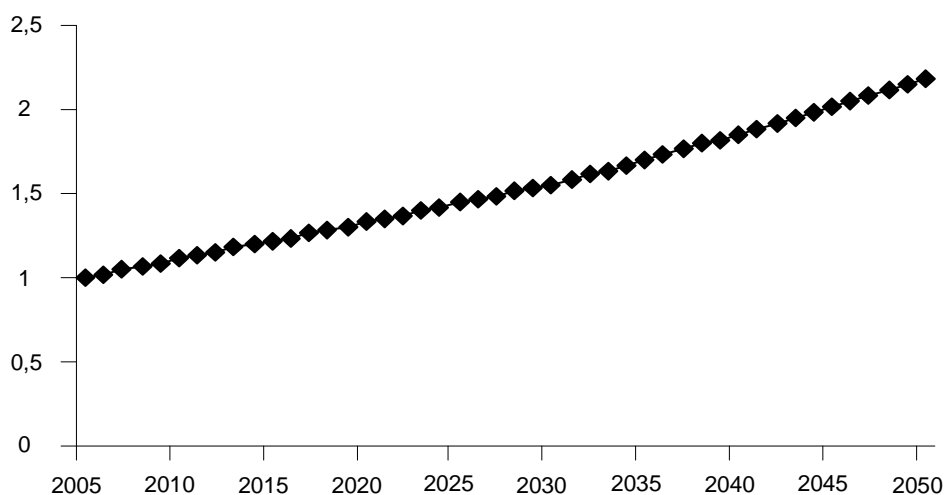


Figure 8 PIB réel sur la période 2005-2050 dans le scénario de référence (Simulation 1)

La croissance du PIB s'accompagne d'une réduction modérée des émissions de CO₂ (dans le périmètre du protocole de Kyoto, c'est-à-dire excluant l'aviation et les transports maritimes internationaux), après un pic en 2013⁵. Cette 'décarbonisation' de l'économie est due au changement structurel de l'économie (tertiarisation) et à un gain d'efficacité énergétique autonome mais aussi induit par les prix élevés de l'énergie. Notamment, le 'peak-oil' de 2030 marque une rupture de pente dans les émissions.

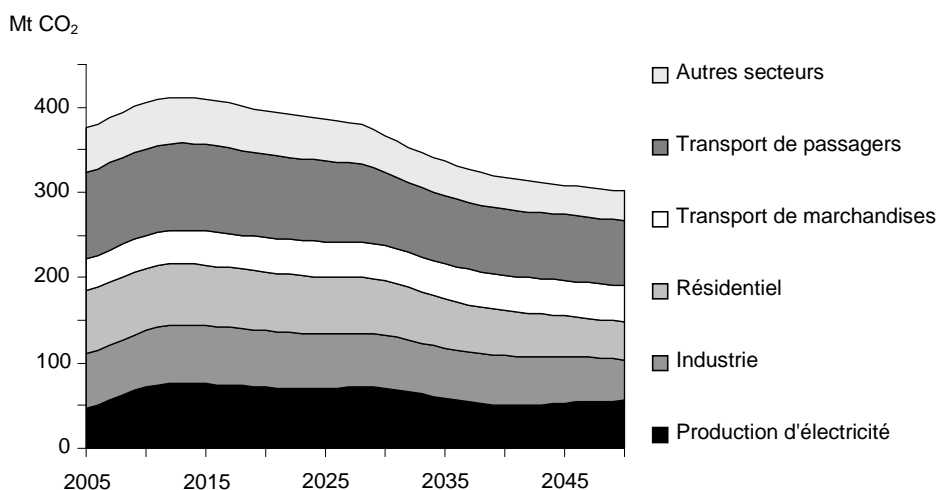


Figure 9 Emissions de CO₂ par secteur pour la période 2005-2050 dans le scénario de référence (Simulation 1)

⁵ Notons que ce scénario est un scénario de référence, donc hors toute politique climatique et en particulier ne prenant en compte ni le protocole de Kyoto, ni le système européen de permis d'émission négociables (EU-ETS). Il ne s'agit donc pas d'un scénario 'tendanciel', et il ne faut pas s'étonner que la trajectoire d'émissions ne satisfasse pas les objectifs du protocole de Kyoto pour la période 2008-2012, ni ne corresponde aux émissions observées pour les premières années, en particulier pour le secteur électrique.

Remarquons que les émissions dues au transport continuent d'occuper une place importante dans les émissions de CO₂ énergétique : elles représentent déjà 36% des émissions de CO₂ énergétique en 2004, et atteignent 39,5% en 2050. Ce maintien est dû à une augmentation de la mobilité d'une part et au trafic de marchandises entraîné par l'activité économique d'autre part qui compensent, au moins partiellement, les gains d'efficacité énergétique effectués sur les véhicules. La tendance est cependant contrastée entre le transport de passagers qui voit ses émissions en absolu et en part des émissions totales diminuer, tandis que les émissions du transport de fret augmentent tant en absolu qu'en part.

En effet, la croissance de la mobilité individuelle en voiture ralentit (Figure 10) du fait de (i) une saturation du taux de motorisation des ménages, qui croît lentement d'un taux d'équipement de 480 véhicules pour 1000 habitants en 2004, à 600 en 2050 et (ii) le report modal, notamment vers l'aérien⁶. En parallèle le progrès technique sur les voitures et le choix de voitures de plus en plus efficaces par les ménages du fait des prix élevés des carburants conduisent à une amélioration de l'efficacité de la flotte de véhicule : les émissions moyennes du parc sont d'un peu moins de 100 grammes de CO₂ par km (gCO₂/km) en 2050, inférieures à celles des voitures actuelles les plus performantes.

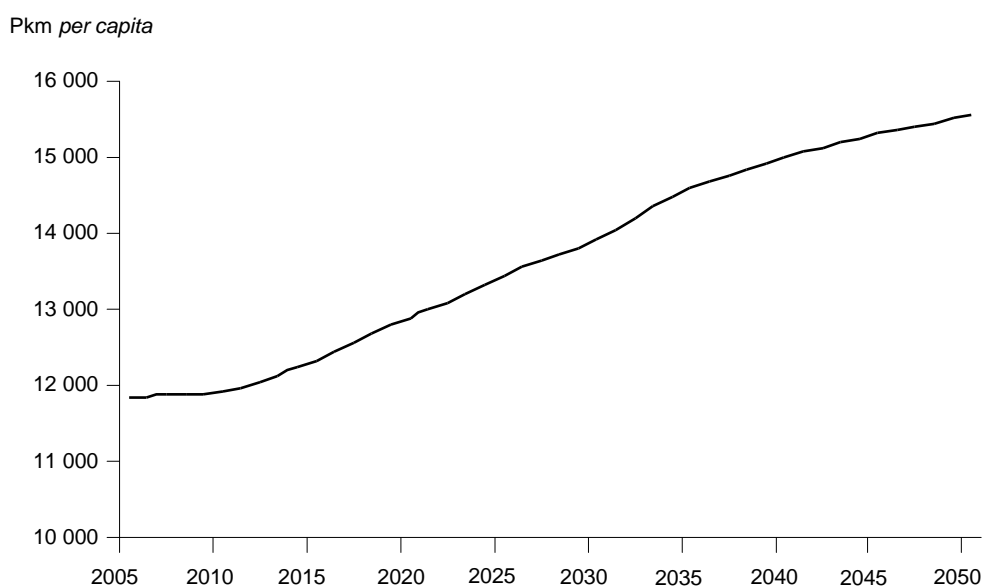


Figure 10 Evolution de la mobilité en voiture particulière dans le scénario de référence (Simulation 1)

Pour ce qui est du transport de marchandises, le léger découplage observé sur la période historique récente (*cf.* section I.1) s'accélère : le *contenu fret de la croissance*, *i.e.* la croissance des tonnes.kilomètres transportées rapportée à la croissance du PIB, est de 0,63 sur la période 2005-2050, contre 0,84 pour la période 1990-2005. Mais ce découplage ne suffit pas à inverser la tendance à l'accroissement des tonnes.kilomètres transportées, qui fait plus que compenser l'amélioration de l'efficacité des véhicules.

⁶ Ce report modal vers les modes les plus rapide intervient dans le modèle du fait de l'accroissement de la richesse des ménages et de la spécification de la maximisation de l'utilité sous double contrainte de revenu et de temps.

III.2. Scénarios F4 : des résultats en demi-teinte

III.2.1. Atteindre un F4 par une taxe recyclée forfaitairement (F4-tC) : un coût prohibitif

Le respect de l'ambitieuse trajectoire F4 cible de nos scénarios contraints (*cf.* Figure 6 *supra*) par la seule instauration d'une taxe carbone dont le produit est reversé aux ménages (Simulation 2) se traduit par une taxe fortement croissante, qui atteint 77 euros par tonne de CO₂ (€/tCO₂) dès 2010, croît à peu près linéairement jusqu'en 2020 (260€/tCO₂), puis accélère pour atteindre 1520€/tCO₂ en 2050 (Figure 11). L'ampleur d'un tel signal peut être mesurée en considérant que 100€/tCO₂ provoquent *ex ante* une hausse de 27% du coût moyen des carburants en 2004 (année de calibrage du modèle).

Les conséquences sur le PIB d'un tel bouleversement des prix relatifs des énergies carbonées sont marquées : le décrochage par rapport à la trajectoire de référence (Simulation 1) croît de 1,5% en 2010 à 3,7% en 2020, et atteint 8,1% en 2050 (Figure 12). Pour relativiser ces résultats, notons qu'ils se traduisent en un taux de croissance annuel moyen plus faible de 0,2 points par rapport au scénario de référence, ou encore qu'ils n'introduisent qu'un délai de 5 ans dans l'atteinte, en 2050, du niveau de richesse de 2045 du scénario sans politique climatique—niveau de richesse tout de même deux fois supérieur à celui de 2005 (*cf.* Figure 8). Cependant le coût d'ensemble de la réforme demeure substantiel.

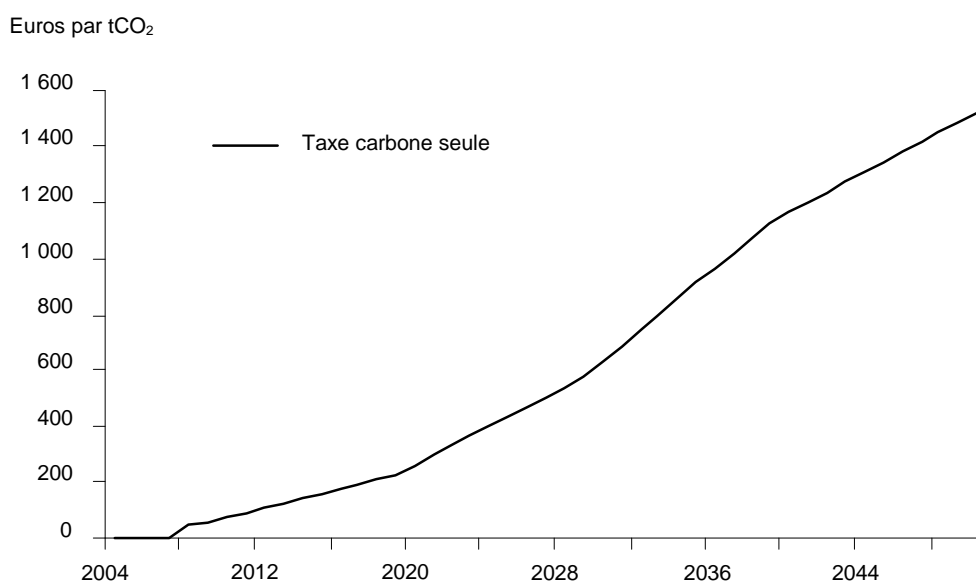


Figure 11 Profil temporel de taxe carbone, Simulation 2

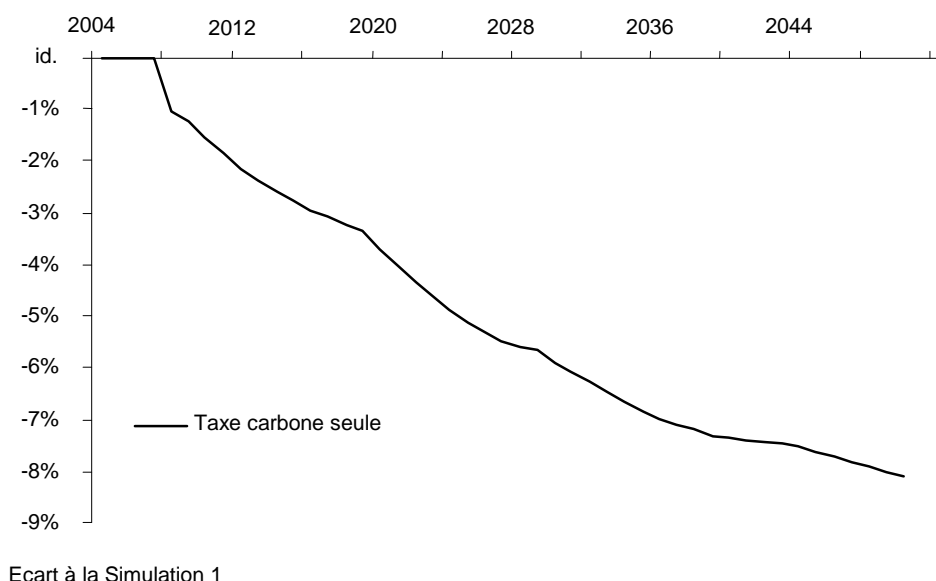


Figure 12 Pertes de PIB, Simulation 2 (écart au scénario de référence Simulation 1)

Les raisons de ce coût substantiel sont notamment à chercher, comme nous en avons présenté l’intuition dans notre première section, dans la forte différenciation des effets prix induits par une taxe pourtant unique. Ainsi, à la date où elle atteint le niveau symbolique de 100€/tCO₂ (en 2012), l’impact de la taxe sur le prix des produits pétroliers est plus du double dans l’industrie de ce qu’il est pour les ménages ou les transports ; celui sur le prix du gaz y est supérieur de 50% ; celui sur le prix du charbon, enfin, y est quadruplé (Tableau 5). En cause, les fiscalités très contrastées supportées par ces différentes dépenses énergétiques, et notamment le poids de la TIPP sur les carburants, qui mécaniquement minimise celui de la taxe—dans la mesure où elle est une accise sur les contenus carbone plutôt qu’une taxation *ad valorem*.

Agent économique	Prix des produits pétroliers	Prix du gaz	Prix du charbon
Industrie	+69%	+73%	+282%
Entreprises de transports	+31%	n.a.	n.a.
Ménages	+31%	+46%	+70%

n.a. : non applicable

Tableau 5 Hausse des prix des énergies par rapport au scénario de référence lorsque la taxe carbone atteint 100€/tCO₂ (2012), Simulation 2

Ces effets prix directs se répercutent dans les structures de coût des productions pour finir par affecter les différents agents, qui y font face avec plus ou moins de flexibilité, selon l’inertie caractérisant leurs consommations. Les ménages, dont les consommations d’énergie sont relativement peu flexibles, voient en conséquence la part de leur budget consacrée à l’énergie et aux transports croître significativement dès les premières années de la réforme (+16% par rapport à la référence en 2012), puis se stabiliser aux alentours de 11% en 2050, avec certes une légère tendance à la baisse, mais nettement moins marquée que celle enregistrée en référence—où la part budgétaire n’est plus que

légèrement supérieure à 7% au même horizon (Figure 13). Ce maintien d'une part budgétaire élevée réduit d'autant, bien évidemment, les consommations de biens non-énergétiques.

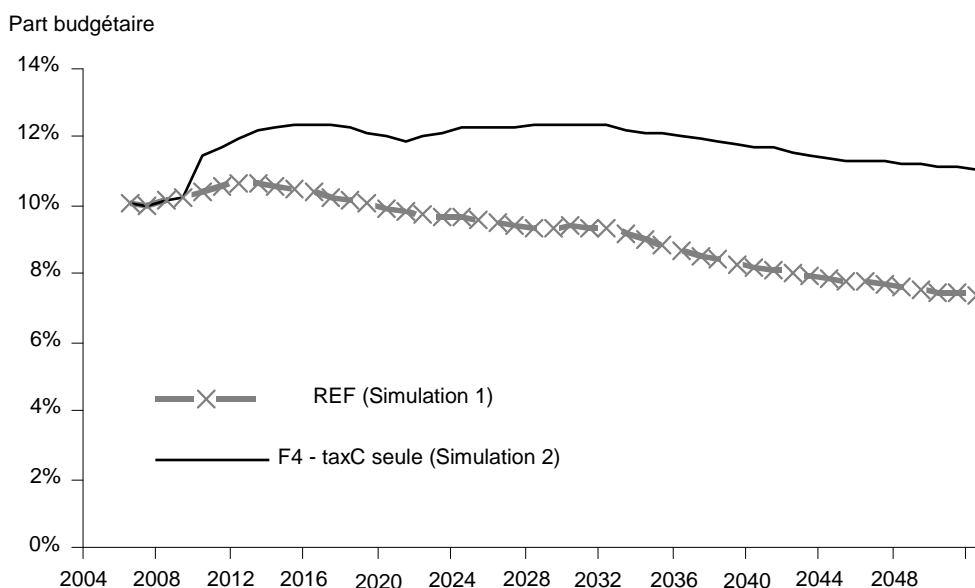


Figure 13 Part de l'énergie et des transports dans le budget des ménages, Simulations 1 et 2

Les disparités d'impact se traduisent aussi très significativement en comparant l'effort de réduction d'émissions des activités de transport à celui des autres sources : les réductions sous le niveau d'émissions de 2005 (grossièrement équivalent à celui de 1990) atteintes en 2050 ne sont que de 27% pour le transport de marchandises et de 65% pour le transport de passagers. Il s'opère en conséquence un report de contrainte sur les autres sources, dont les émissions en 2050 sont divisées par 5 par rapport à leur niveau de 2005.

Source d'émissions	Réduction sous le niveau de 2005 en 2050
Transport de marchandises	26,8%
Transport de passagers	64,6%
Autres sources	81,0%

Tableau 6 Efforts comparés de réduction d'émissions des transports, Simulation 2

En somme, les résultats macroéconomiques traduisent une prise en tenaille entre deux effets :

- la nécessité, du fait d'inerties techniques fortes, de pousser la taxe carbone à des niveaux démesurés susceptibles de déclencher les réductions d'émissions à coût marginal extrêmement élevé dont l'exploitation est rendue nécessaire par l'ampleur de la contrainte F4 ;
- la propagation de cette taxe dans les coûts de production qui, dans le cadre d'une économie ouverte, provoque de fortes pertes de compétitivité sur les marchés internationaux.

Les potentiels techniques modélisés en 2050 sont pourtant loin d'être pessimistes. Les émissions des véhicules particuliers, tout d'abord, découlent (i) d'un module technico-économique de choix de type de véhicule, qui détermine l'évolution du parc automobile, et débouche pour la Simulation 2 sur des émissions moyennes de 64 grammes de CO₂ par km (gCO₂/km) ; (ii) côté macroéconomique, de la fonction d'utilité sous double contrainte décrite en section II.2.1, qui calcule une diminution de la mobilité en véhicules particuliers de 15% en 2050 par rapport à la référence.

Du côté du fret, l'hypothèse retenue est celle que les consommations intermédiaires unitaires de services de transport par les secteurs productifs bénéficient du progrès technique général. Ceci conduit *ex-post* à un contenu fret de la croissance de 0,35 entre 2005 et 2050, soit 29 points en-dessous de celui enregistré en référence—cependant ce décrochage massif est calculé en termes relatifs, ainsi qu'en témoigne le maintien relatif des émissions du fret (Tableau 6).

En outre, les émissions du secteur électrique s'annulent dès 200€/tCO₂, par recours au nucléaire, mais aussi du fait du développement des énergies renouvelables et de premières mises en œuvre des techniques de capture et stockage de carbone sur solutions thermiques.

Enfin, les émissions du secteur résidentiel chutent de 73% sous leur niveau de 2005 à l'horizon 2050, par la rénovation du parc immobilier existant, et la pénétration progressive de bâtiments à très grande efficacité énergétique dans le neuf.

III.2.2. Vers des politiques transports plus complexes

Considérons maintenant des politiques agissant spécifiquement sur les transports. Pour ce qui est de la mobilité individuelle, nous introduisons deux types de politiques dans le modèle :

- une politique d'investissements en faveur des transports en commun : en pratique, cela consiste, dans le module « dynamique » sur les transports, à remplacer la routine d'investissement dans les capacités des modes de transports suivant la tendance de la demande (Figure 5) par une routine qui ne suit plus l'augmentation de la demande du mode routier (et crée donc de la congestion sur ce mode), et utilise le volume d'investissement dégagé pour accroître les augmentations de capacité des transports en commun. Cette politique va décroître l'efficacité marginale en temps du mode routier et favoriser le choix des transports en commun étant donnée la contrainte de budget-temps alloué à la mobilité.
- Un urbanisme visant à réduire les besoins de mobilité quotidienne : une représentation très fruste consiste à progressivement diminuer les besoins fondamentaux de mobilité en véhicule particulier, soit le paramètre b_{cars} qui symbolise les trajets contraints du type domicile-travail. Nous faisons l'hypothèse que ces besoins sont réduits de 30% à l'horizon 2050 par rapport à leur niveau de 2004.

Les politiques visant le transport de fret que nous introduisons dans le modèle sont de trois types :

- des politiques d'efficacité ayant pour objectif d'améliorer le remplissage des camions, de limiter le kilométrage à vide, *etc.* Dans l'architecture de modélisation ces politiques se traduisent par une diminution du paramètre représentant la consommation intermédiaire de carburants par le secteur des transports terrestres de marchandises, venant s'ajouter à son évolution due au

progrès technique autonome et induit par les prix. On fait l'hypothèse que le potentiel de diminution de ce paramètre est de 1% par an pendant 25 ans.

- Des politiques organisant le report modal du fret routier vers le fret ferroviaire. Les deux modes étant agrégés dans le secteur de transport terrestre de marchandises dans le modèle, ces politiques se traduisent par une diminution de la consommation intermédiaire de carburants de ce secteur allant de paire avec une augmentation de sa consommation intermédiaire d'électricité. On fait l'hypothèse que ces politiques permettent, à l'horizon 2030, de revenir au partage 20%-80% du fret rail-route (ce qui correspond au partage de 1992), à partir des 13%-87% observés en 2005.
- Des politiques de réorganisation des chaînes logistiques de production et de distribution visant à réduire le 'contenu transport' des consommations finales. En pratique, nous représentons ces réorganisations, de façon stylisée, par un découplage de 1% par an des besoins en transport des secteurs productifs, découplage venant s'ajouter à l'évolution par défaut⁷ des consommations intermédiaires de transport par les secteurs productifs.

Il convient d'attirer l'attention sur le fait que la représentation de ces politiques transports dans le modèle est extrêmement fruste et a une visée purement démonstrative, sans ambition de quantification. Notamment, faute de données claires, nous faisons l'hypothèse simplificatrice que toutes nos alternatives ont la même intensité capitalistique. Ceci reste une des limitations majeure de l'exercice de modélisation présenté dans ce rapport et méritera des approfondissements futurs.

Nous présentons dans ce qui suit les résultats de trois nouveaux scénarios Facteur 4 intégrant les représentations stylisées des politiques transports :

- Simulation 3 : Taxe carbone et politiques visant le transport de passagers,
- Simulation 4 : Taxe carbone et politiques visant le transport de marchandises,
- Simulation 5 : Taxe carbone et l'ensemble des politiques transports envisagées.

Le Tableau 6 présente les efforts comparés de réduction des émissions entre les secteurs de transport et les autres sources d'émission, à savoir l'industrie, le secteur résidentiel, les transformations d'énergie et l'agriculture, dans les simulations intégrant les politiques de transport (Simulations 3 à 5). Les résultats du scénario sans politique de transport spécifique sont rappelés dans la première colonne, afin de permettre les comparaisons. Nous voyons clairement que les politiques de transport permettent d'alléger la contrainte de réduction des émissions qui pèse sur les secteurs hors transport. Il faut toutefois noter que même dans le cas de politiques de transport volontaristes, les réductions d'émission du secteur transport restent en deçà de la division par quatre : il apparaît que le facteur 4 à l'échelle de la France n'est pas un facteur 4 homothétiquement transposé à chacun des secteurs. Le secteur du transport de marchandises se dégage ici comme le point de blocage majeur puisque ses émissions peinent à passer sous la barre du facteur 2.

⁷ Dans le modèle, par défaut, les consommations intermédiaires de transport par les secteurs productifs suivent le progrès technique, conformément aux tendances historiques observées.

Source d'émissions	Simulation 2	Simulation 3	Simulation 4	Simulation 5
Transport de marchandises	26,8%	22,9%	47,0%	44,6%
Transport de passagers	64,6%	72,4%	62,4%	71,3%
Autres sources	81,0%	78,3%	78,8%	75,4%

Les pourcentages indiquent la réduction sous le niveau de 2005 opérée à l'horizon 2050

Tableau 7 Efforts comparés de réduction d'émissions des transports, Simulation 2 à 5

Le report de contrainte d'émission vers les secteurs de transport autorisé par les actions spécifique sur la mobilité et le transport de fret permet d'une part de limiter l'envolée de la taxe carbone (Figure 14) nécessaire à atteindre l'objectif du facteur 4 et par là-même de baisser les coûts macroéconomiques associés (Figure 15). En effet, la taxe carbone dans la simulation 5 est de 300€/tCO₂ en 2030 et 700€/tCO₂ en 2050, ce qui correspond environ à une division par deux de ce signal prix par rapport au scénario « taxe seule ».

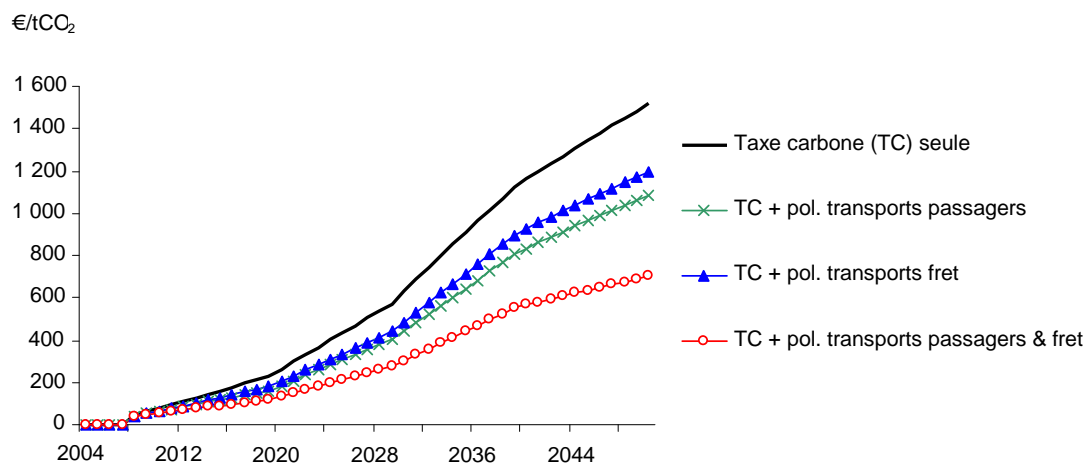


Figure 14 Profil temporel de taxe carbone, Simulations 2 à 5

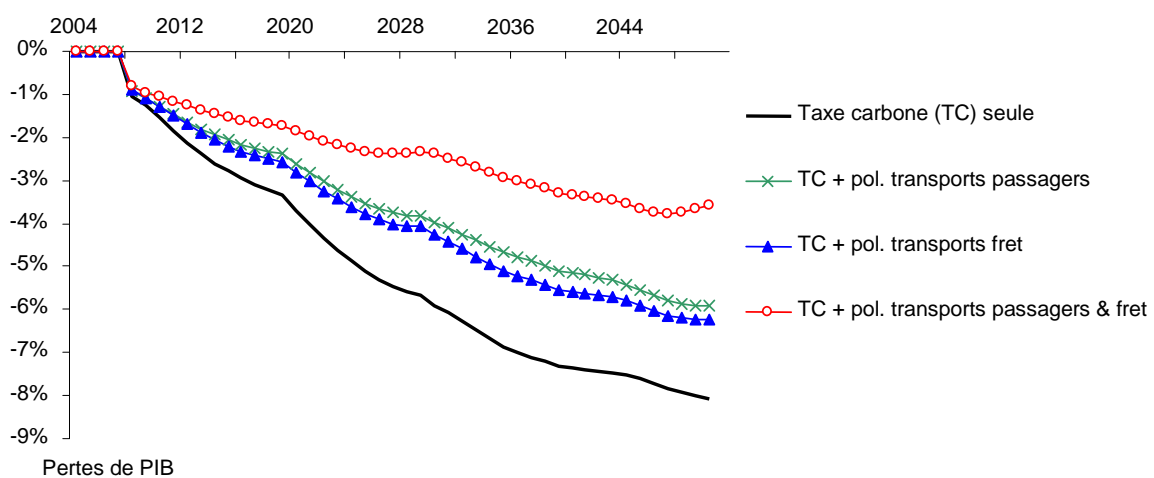


Figure 15 Pertes de PIB, Simulations 2 à 5 (écart au scénario de référence Simulation 1)

Les pertes de PIB associées sont ramenées à 2,7% en 2030 et 3,5% en 2050, soit environ 18 mois de croissance de retard à cet horizon.

Il n'en demeure pas moins que ces pertes macroéconomiques restent significatives. Nous allons voir dans la partie suivante pourquoi et comment une réforme fiscale associée à l'introduction de la fiscalité carbone permet de faciliter la transition vers l'atteinte du Facteur 4.

III.3. Pourquoi la fiscalité comme lubrifiant ?

Les résultats précédents mettent en évidence que des politiques précoces visant les transports permettent de réduire le coût macroéconomique du Facteur 4 sans pour autant parvenir à le contenir totalement.

Ces résultats, s'ils peuvent paraître pessimistes, sont en définitive peu surprenants. En effet, ils rappellent simplement le fait que le Facteur 4 est un objectif ambitieux, qui implique un taux de découplage sans précédent entre croissance et consommation d'énergie, un rythme inédit de basculement des systèmes énergétiques, un renversement des tendances récentes en matière d'urbanisation et d'organisation de la production. Ces transformations profondes font apparaître une combinaison probable de multiples 'coûts de transaction' pour renégocier des 'contrats sociaux' implicites. Nos résultats précédents confirment que cela ne pourra se faire sans heurts, si l'on se place 'à système d'incitation constant' fors le prix du carbone.

Or, la taxe carbone offre l'opportunité d'un effet de levier sur la fiscalité. D'influents travaux antérieurs sur la notion de double dividende (Bovenberg et de Mooij, 1994) ont mis en évidence qu'en Europe, utiliser les revenus de la taxe carbone pour baisser la fiscalité sur le travail permettait de réduire les effets économiques négatifs de cette taxe carbone (double dividende au sens faible) voire, dans des conditions restrictives, d'avoir des gains économiques par rapport à la situation sans fiscalité carbone (double dividende au sens fort). Nous testons donc une politique de recyclage des revenus de la taxe carbone en baisse de la fiscalité sur le travail, à budget de l'Etat constant, dans la Simulation 6.

La réforme fiscale envisagée permet de contenir les coûts macroéconomiques : jusqu'en 2030 ils sont très limités (moins de 0,7% de perte de PIB par rapport au scénario de référence) puis ils augmentent jusqu'à 2,1% en 2050 (Figure 16). Le bénéfice du recyclage de la taxe en baisse de la fiscalité sur le carbone est ainsi essentiellement un bénéfice de moyen terme, ou un 'lubrifiant' au moment de la transition. En effet, sur le plus long terme, la base fiscale de la taxe carbone s'érode (le but premier de cette taxe est bien de réduire les émissions de GES, donc de réduire sa propre base fiscale), c'est pourquoi l'effet de report de fiscalité s'amenuise au cours du temps.

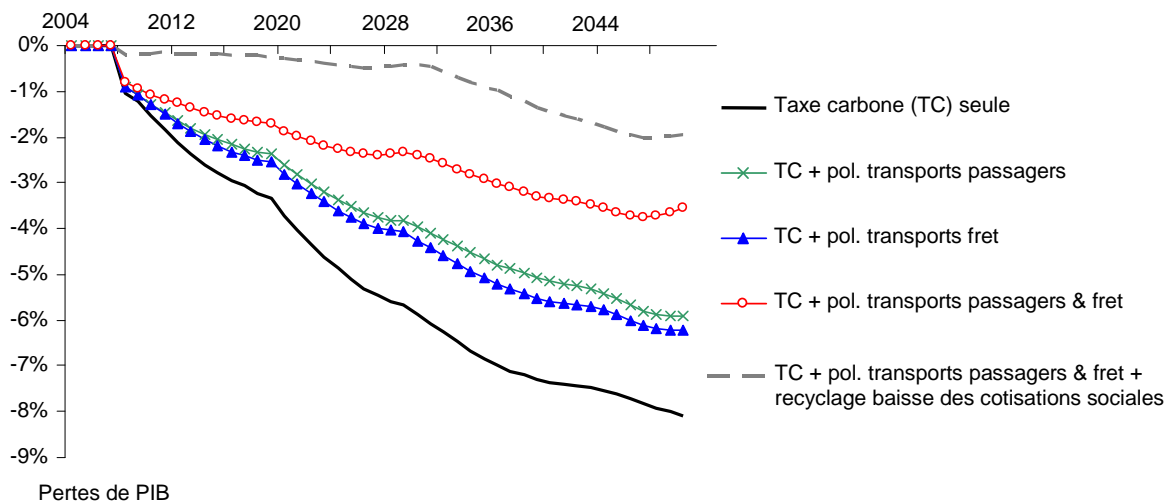


Figure 16 Pertes de PIB, Simulations 2 à 6 (écart au scénario de référence Simulation 1)

III.3.1. Et le double dividende ?

Dans la partie précédente, nous montrons que l'utilisation des revenus de la fiscalité carbone pour réduire, en transition, la fiscalité sur le travail permet un double dividende au sens faible (Simulation 6). Nous pouvons nous demander s'il est possible d'atteindre un double dividende au sens fort, ce qui revient à effacer totalement les coûts macroéconomiques dus à la taxe carbone.

Un dernier jeu de simulations (8 et 9), s'appuyant sur une représentation alternative des liens entre niveau de chômage et niveau des salaires (voir page 27), met en évidence un gain économique net dans le scénario Facteur 4 (Simulation 9) par rapport au scénario sans politique climatique correspondant (Simulation 8). L'objectif de ce jeu de simulations est de mettre en évidence que les coûts d'une politique climatique sont certes conditionnés par des déterminants techniques et des politiques sectorielles, sur les transports en particulier, mais que le rôle de politiques hors du champ de l'énergie peut se révéler prépondérant. Ces résultats sont donnés à titre illustratifs ici, afin d'élargir la réflexion au-delà du rôle des transports dans l'atteinte de l'objectif de Facteur 4. Le lecteur intéressé en trouvera une analyse approfondie dans Combet *et al.*, 2009.

Ecart à la Simulation 8

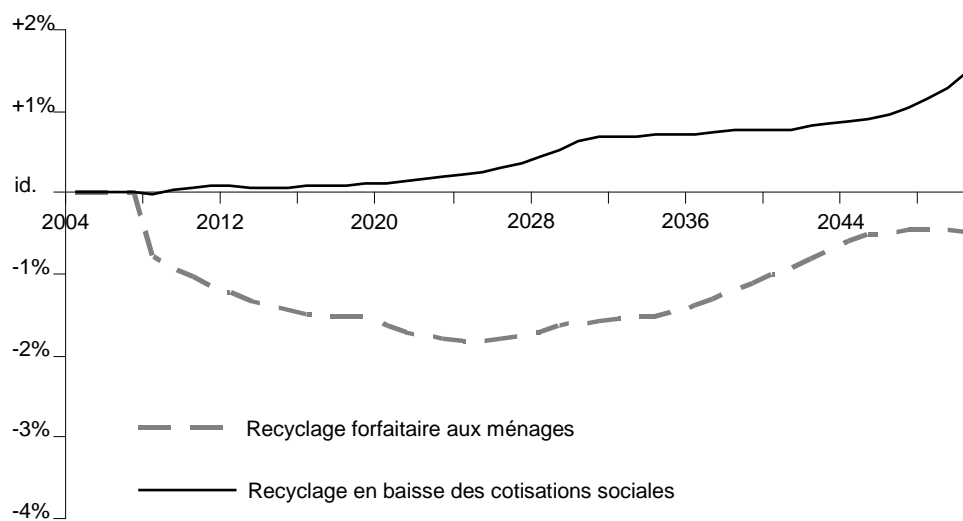


Figure 17 Variations de PIB, Simulation 9 et variante (écart au scénario de référence Simulation 8)

Conclusion

Les expériences numériques que nous avons menées dans le cadre de cette étude mettent en évidence quatre conclusions majeures.

Premièrement, une tarification carbone ne permet pas seule d'infléchir de manière suffisamment significative les émissions du secteur des transports si bien que les contraintes de réduction d'émission sont reportées sur les autres secteurs, ce qui induit un coût macroéconomique important.

Deuxièmement, au-delà d'une seule tarification du carbone, l'infléchissement des émissions du secteur des transports requiert un dispositif de politiques publiques qui permette d'en circonvier les effets distributifs complexes et l'inertie particulière. Ces politiques publiques spécifiques aux transports permettent de réduire les coûts macroéconomiques d'un objectif ambitieux comme le Facteur 4.

Troisièmement, il convient de noter que même dans le cas de politiques de transport volontaristes, les réductions d'émission du secteur des transports restent en-deçà de la division par quatre : il apparaît que le facteur 4 à l'échelle de la France n'est pas un facteur 4 homothétiquement transposé à chacun des secteurs. Le secteur du transport de marchandises se dégage ici comme le point de blocage majeur puisque ses émissions peinent à passer sous la barre du facteur 2.

Enfin, des politiques externes au secteur de l'énergie et des transports, visant à utiliser l'effet de levier des revenus d'une taxe carbone pour réduire d'autres fiscalités distorsives, peuvent permettre de contenir davantage les effets économiques négatifs du Facteur 4.

Le message général qui ressort de ces travaux porte sur la nécessité d'articuler dans le temps des mesures internes et externes au secteur des transports (planification urbaine, immobilier, énergie, fiscalité).

Si nos résultats numériques peuvent être raisonnablement considérés comme 'qualitativement' robustes, il n'en demeure pas moins que le détail des chiffres doit être pris avec précaution. Ils restent comme de simples supports à la réflexion quant à l'évolution potentielle des transports dans un monde 'Facteur 4'. En effet, l'outil de modélisation mobilisé présente l'avantage de donner un cadre cohérent à la réflexion en représentant l'ensemble des interactions économiques entre secteurs, et de mettre en évidence comment les transports s'insèrent dans la vision d'ensemble d'un futur à faible contenu carbone. Les résultats présentés sont cependant le produit d'un jeu d'hypothèses précis sur différents paramètres de ces interactions, et une étude plus en profondeur requerrait de produire des analyses de sensibilité croisées sur ces paramètres.

Dans le déroulement de notre étude, et par les hypothèses parfois extrêmement simplificatrices sur la représentation des transports dans notre modèle, se dégage un diagnostic sur les besoins de mise en dialogue d'expertises dispersées et sur les déficits de connaissances primaires. Nous concluons donc sur la nécessité de poursuivre l'endogénéisation de la dimension spatiale pour permettre une discussion avec des champs d'expertises absents de la 'scène climatique'.

Annexe : L'architecture IMACLIM-R

Choix méthodologiques et structure du modèle

Une vision duale de l'économie pour faciliter le dialogue entre ingénieurs et économistes

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 relatifs⁸. Grâce à cette représentation de variables physiques explicites (et pas seulement de quasi-quantités sans unité concrète), le modèle fournit une vision duale 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.

Une spécificité centrale du modèle, liée à cette description duale de l'économie, réside dans l'abandon des fonctions de production conventionnelles KLE ou KLEM⁹, censées reproduire de manière agrégée l'ensemble des techniques disponibles et les contraintes techniques sur une économie (Berndt et Wood, 1975 ; Jorgenson, 1981). Indépendamment des questions de robustesse empirique, la principale limite de ces fonctions tient précisément à la représentation de la technologie : elle passe par un recours au lemme de Shephard, qui permet de paramétrer les fonctions de production 'réelles' à partir de la répartition des coûts de production entre facteurs sur une année de référence. Or le domaine à l'intérieur duquel cet usage systématique du théorème de l'enveloppe fournit une approximation robuste des ensembles techniques réels est très limité par :

⁸ Concernant les 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 bilans énergétiques en unités physiques qui sont harmonisées, *cf.* par exemple 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).

⁹ Capital-travail-énergie, ou Capital-travail-énergie-matériaux.

- la fragilité de l’hypothèse selon laquelle les données économiques, à chaque point du temps, résultent d’une réponse optimale au vecteur des prix courants¹⁰,
- le manque de réalisme technologique d’une élasticité constante sur l’espace entier des prix relatifs, des niveaux de production et des horizons de temps étudiés pour les problèmes de développement durable.

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 au fil de la projection, dérivent de l’échange récursif d’information entre :

- **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 la date t fournit un ‘cliché’ de l’économie : les 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* de la matrice économique des consommations intermédiaires, 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*’¹¹ est au centre des discussions sur l’inertie des systèmes techniques, et du fait que l’économie s’adapte non seulement au niveau et à la direction des signaux économiques mais aussi à leur volatilité.

¹⁰ Solow indique lui-même que « les calculs de la productivité totale des facteurs reposent sur la conviction que les prix de marché sont de bons indicateurs des productivité marginales, et que le niveau d’agrégation n’invalide pas trop cette hypothèse microéconomique. » (Solow, 1988, notre traduction).

¹¹ Ce faisant nous négligeons les possibilités de reconversion (*retrofitting*) du capital existant d’une technologie à une autre, ou d’un secteur à un autre. Cette hypothèse est aisément modifiable dans les modules décrivant la dynamique du capital. Dans la version actuelle du modèle, nous avons cependant choisi de représenter la borne haute de l’inertie.

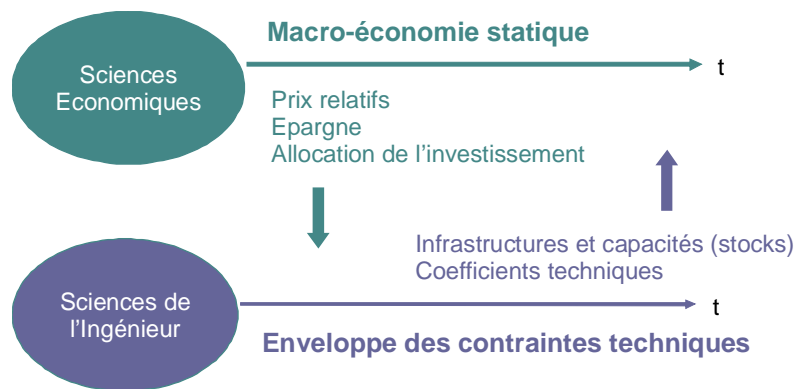


Figure 18 Un dialogue itératif « *top-down / bottom-up* »

Cette structure en modules permet de conserver un niveau d'agrégation assez élevé et maîtrisable dans l'équilibre statique annuel, tout en étayant l'évolution des techniques avec des fonctions de réactions sectorielles '*bottom-up*' (transport, énergie, résidentiel, ressources fossiles, usage des sols) qui capturent les déterminants tangibles des changements structurels et techniques d'une manière compacte¹². Ces formes réduites sont calibrées pour approximer la réponse des modèles technico-économiques à un ensemble de paramètres économiques (signaux prix, investissements). Le niveau d'agrégation sectorielle et les modules compacts peuvent ainsi être adaptés selon l'objectif de l'exercice de modélisation. Un avantage de cette méthode de modélisation est de pouvoir tester l'impact de diverses hypothèses faites sur des routines de décision et la formulation des anticipations (parfaites ou imparfaites, avec de l'aversion au risque, *etc.*).

¹² Construire ces fonctions de réaction compactes nous évite le piège des structures d'équilibre général avec autant de catégories produits que dans les descriptions d'ingénieurs sur les systèmes énergétiques.

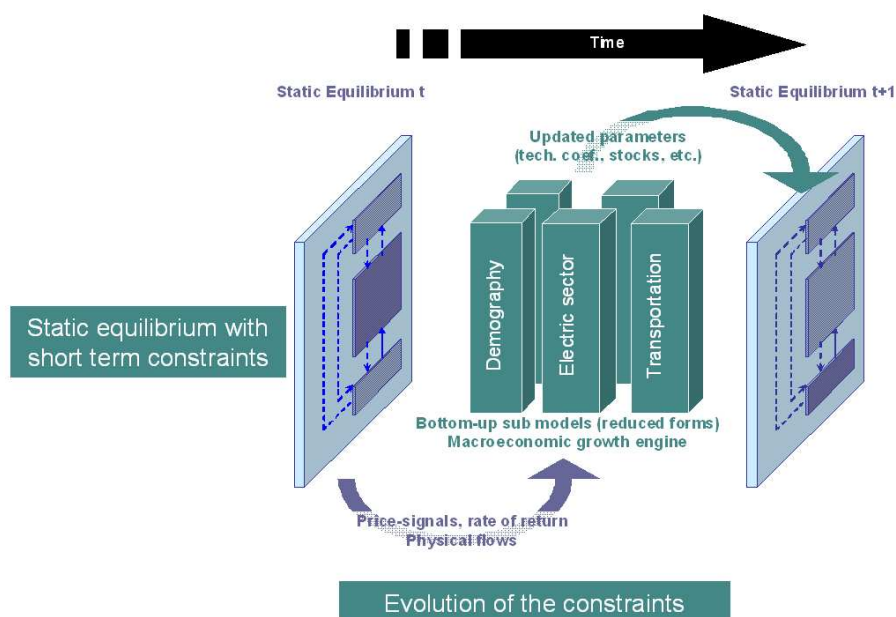


Figure 19 Architecture réursive d’IMACLIM-R

Un moteur de la croissance permettant des écarts entre croissance potentielle et réelle

Le moteur de croissance endogène dans IMACLIM-R est fondé sur les enseignements des travaux de comptabilité de la croissance, il est composé de trajectoires démographiques exogènes et de scénarios d’évolution de la productivité du travail. Cette croissance est dépendante des montants d’investissement total et de l’allocation des investissements entre les secteurs. Une spécificité du modèle est d’autoriser des déséquilibres endogènes entre les anticipations formulées et l’état réel de l’économie, afin d’être en mesure de capturer les coûts de transition après une décision politique ou un choc exogène. Retenir de tels mécanismes de déséquilibre endogène revient à suivre le conseil de Solow (1988) d’accorder une plus grande attention aux chemins de transition, car les cycles économiques ne doivent pas être vus comme des « réponses optimales sur des trajectoires optimales, en réponse à des variations aléatoires de la productivité et de la préférence pour le loisir [...] » et « les marchés de biens et du travail [...] vus comme des mécanismes sans friction pour convertir les préférences de consommation des ménages en production et emplois ». Ainsi nous nous rapprochons d’une dynamique ‘à la Kalecki’ dans laquelle les décisions d’investissement sont déterminées par la maximisation du profit futur, calculé à partir d’anticipations imparfaites dans des marchés non parfaitement compétitifs¹³. Les déséquilibres sont amplifiés par l’inertie de l’adaptation aux conditions économiques changeantes, qui freine un retour automatique et sans coût à un équilibre stationnaire, par

¹³ Nous sommes encouragés dans cette direction par la remarque de Stiglitz selon laquelle certains résultats des modèles de croissance incorporant *des coûts d’ajustement* ont un air de ressemblance avec les modèles de Kaldor (Kaldor, 1957 ; Kaldor, 1961) et Kalecki (Kalecki, 1939), qui « seraient plus proches du réel que les soi-disant ‘théoriquement correct’ modèles néoclassiques. » (Stiglitz, 1990).

exemple l'inertie des générations d'équipements préexistantes et non flexibles. Comme à court terme la flexibilité principale disponible réside dans le taux d'utilisation des capacités, le modèle peut représenter des excès ou pénuries en facteurs de production, du sous-emploi et des taux de profitabilité inégaux entre secteurs.

En résumé, cette architecture nous permet de ne plus recourir à la fonction de production agrégée flexible par laquelle Solow souligne qu'en réalité il existe des mécanismes d'ajustement et de retour à l'équilibre, en réponse à une croissance « sur le fil du rasoir » à la Harrod-Domar. Grâce aux capacités de calcul actuelles, nous sommes en mesure de développer des modèles dans lesquels l'ajustement n'est pas automatique ni instantané, et qui se situent donc à mi-chemin entre les deux approches. En l'absence de nouveaux chocs exogènes, les chemins de croissance produits par IMACLIM-R ressemblent à l'équilibre stationnaire 'à la Solow' après les transitions d'ajustement.

Description technique

Données

Le modèle IMACLIM-R France est calibré sur les données économiques de la comptabilité nationale française (Tableau des Entrées Sorties, INSEE) de l'année de référence choisie (2004), sur les bilans énergétiques issus de ENERDATA et des données de l'agence Internationale de l'Energie.

Secteurs Imaclim-R	Nomenclature des Secteurs de la Comptabilité Nationale (TES niveau 118)
Charbon	GG11
Pétrole	GG12
Gaz	GG2B
Produits raffinés	GG15
Électricité	GG2A
Construction	GH01-GH02
Transport aérien	GK05
Transport par voie d'eau	GK04
Transport terrestre de marchandises	GK03 et GK01 (partie)
Transport terrestre de passagers	GK02 et GK01 (partie)
Agriculture et agro-industries	GA01 à GB06
Industries	GC11 à GF62 et GG13-GG14
Services	GG22, GJ10 à GJ30 et GK07 à GR20

Tableau 8 Agrégation sectorielle d'IMACLIM France

Dans les pages suivantes, nous décrivons les équations de l'équilibre statique qui déterminent les ajustements de court terme, et les modules dynamiques qui conditionnent la croissance et son contenu. Les indices i et j renvoient aux biens et secteurs, l'indice t renvoie à l'année courante et t_0 à l'année de départ 2004.

Equilibre statique

L'équilibre statique est *walrassien* par nature : les marchés pour tous les *biens* sont équilibrés par un ensemble de prix relatifs. Les ajustements des marchés dépendent des comportements des agents représentatifs du côté de la demande et du côté de l'offre. Ils découlent (i) de la maximisation de la fonction d'utilité du ménage représentatif sous contrainte de budget, (ii) du choix des taux d'utilisation des capacités de production installées, (iii) des routines de décision dans les politiques et dépenses publiques, (iv) des ajustements des imports et exports (hypothèse de petit pays en économie ouverte pour la France), (v) de l'allocation des investissements entre secteurs. Le calcul de l'équilibre détermine les variables suivantes : les prix relatifs, les salaires, le travail, les quantités de biens et services, les flux de valeurs. À l'équilibre, toutes ces variables sont telles qu'elles satisfont les conditions d'équilibre des marchés pour tous les biens sous les contraintes de budget des agents tout en respectant le principe de la conservation en masse des flux physiques. Mais du côté de la production, le taux d'utilisation des capacités de production peut varier et il n'y a aucune garantie que la force de travail soit complètement employée.

Demande des Ménages en biens, services et énergie

La demande finale des ménages est calculée en résolvant le programme de maximisation de l'utilité d'un consommateur représentatif¹⁴. Les spécificités de ce programme résident dans les arguments de la fonction d'utilité et dans l'existence de deux contraintes de budget (revenu et temps).

Revenu et épargne

Le revenu des ménages est égal à la somme des salaires reçus dans tous les secteurs i , des dividendes (une part fixe div_i des profits) et des transferts forfaitaires publics, comme indiqué dans l'équation (0.1). L'épargne est une proportion $(1-ptc)$ de ce revenu, conçue comme une variable de scénario, paramètre exogène qui rend compte des points de vues sur la question de savoir comment les comportements d'épargne vont évoluer en fonction de la pyramide des âges¹⁵.

$$Income = \sum_j wages_j + \sum_j div_j \cdot profits_j + transfers \quad (0.1)$$

$$Savings = (1 - ptc) \cdot Income \quad (0.2)$$

¹⁴ Nous suivons ici Muellbauer (1976) qui affirme que la légitimité de l'hypothèse du consommateur représentatif est de fournir 'an elegant and striking informational economy', en capturant le comportement agrégé de la demande finale à travers la maximisation de l'utilité. Cette spécification reste valide aussi longtemps que la dispersion des caractéristiques des consommateurs individuels ne change pas fortement.

¹⁵ Une endogénéisation complète des taux d'épargne sur le long terme nécessiterait une meilleure description de la boucle entre démographie et croissance économique.

Fonction d'utilité

Les arguments de la fonction d'utilité U sont (i) les biens C_i produits par les secteurs de l'agriculture, l'industrie et les services, (ii) le service de mobilité $S_{mobility}$ (en passagers-kilomètres pkm) (iii) les services d'habitat $S_{housing}$ (en mètres carrés). Les besoins fondamentaux pour chaque bien et service sont notés bn .

$$U = \prod_{\substack{\text{goods } i \\ (\text{agriculture,} \\ \text{industry,} \\ \text{services})}} (C_i - bn_i)^{\xi_i} \cdot (S_{housing} - bn_{housing})^{\xi_{housing}} \cdot (S_{mobility} - bn_{mobility})^{\xi_{mobility}} \quad (0.3)$$

Notons d'abord que l'énergie est considérée seulement comme facteur de production des services d'habitat et de mobilité: Elle n'est pas directement explicitée dans la fonction d'utilité, mais les dépenses correspondantes affecteront l'équilibre et le bien-être à travers la facture énergie qui pèse sur le revenu disponible. La consommation d'énergie pour l'habitat est déduite du stock physique de logements et de coefficients d'efficacité caractérisant le stock existant d'équipements utilisateurs d'énergie par mètre carré.

Le lien entre les services de mobilité et la demande d'énergie est plus complexe : il prend en compte non seulement l'efficacité énergétique des véhicules, mais aussi l'accessibilité différente de quatre modes de transport : le transport terrestre collectif, le transport aérien, les véhicules privés et le transport non-motorisé. Du fait des différences d'aménités fournies par chaque mode, les modes de transport sont supposés être des substituts imparfaits. Les quantités de passagers-kilomètres pkm_{mode} dans les différents modes sont agrégées dans un seul indice de service de mobilité, *via* une fonction à élasticité constante de substitution (CES).

$$S_{mobility} = \left(\left(\frac{pkm_{air}}{b_{air}} \right)^\eta + \left(\frac{pkm_{public}}{b_{public}} \right)^\eta + \left(\frac{pkm_{cars}}{b_{cars}} \right)^\eta + \left(\frac{pkm_{nonmotorized}}{b_{nonmotorized}} \right)^\eta \right)^{-1/\eta} \quad (0.4)$$

L'avantage de ne pas faire figurer l'énergie dans la fonction d'utilité est de permettre une représentation explicite des équipements, des demandes induites par ces équipements, et de l'inertie des consommations. Les demandes en énergie finale directement supportées par les ménages sont dérivées des niveaux de $S_{housing}$ et pkm_{cars} à travers l'équation (0.5):

$$C_{Ei} = pkm_{cars} \cdot \alpha_{Ei}^{Cars} + S_{housing} \cdot \alpha_{Ei}^{m^2} \quad (0.5)$$

Dans cette équation, α^{cars} décrit la consommation d'énergie moyenne pour transporter un passager-kilomètre avec le stock existant de voitures privées et α^{m^2} est la consommation de chaque type d'énergie par mètre carré de logement. Ces paramètres sont maintenus constants pendant la résolution de l'équilibre statique et sont ensuite ajustés dans le module résidentiel qui décrit les changements d'équipements utilisateurs d'énergie et leurs besoins unitaires en énergie.

Programme de maximisation

Pour capturer les liens entre la demande finale et la disponibilité en infrastructures et équipements, le consommateur représentatif est supposé maximiser son utilité sous deux contraintes :

- une **contrainte de revenu disponible** qui impose que la somme des achats de biens et services non-énergétiques C_i et des dépenses d'énergie (induites par le transport en véhicule particulier et par les usages finaux dans l'habitat) est égale au revenu disponible pour la consommation (équation (0.6)), pour un ensemble donné de prix au consommateur pC_i

$$ptc \cdot Income = \sum_i pC_i \cdot C_i + \sum_{\text{Energies } E_i} pC_{E_i} \cdot (pkm_{cars} \cdot \alpha_{E_i}^{cars} + S_{h,housing} \cdot \alpha_{E_i}^{m^2}) \quad (0.6)$$

- Une **contrainte de budget temps** qui impose un plafond supérieur au temps moyen quotidien que les gens consacrent au transport. Elle repose sur la loi empirique dite « de Zahavi » (Zahavi et Talvitie, 1980), qui met en évidence que le temps moyen de transport quotidien des ménages reste à peu près constant depuis plusieurs décennies dans un large éventail de zones urbanisées, malgré les substitutions de modes réalisées. Le choix entre différents modes de transport dépend en fait non seulement de leurs prix relatifs mais aussi des efficacités marginales en temps de transport τ_{T_j} , c'est-à-dire le temps requis pour parcourir un kilomètre additionnel avec chaque mode T_j . Chaque mode est ainsi caractérisé par une *efficacité en temps de déplacement* spécifique qui décroît avec le taux d'utilisation de ses infrastructures. Plus on approche de la limite de capacité $Captransport_{T_j}$ de ces infrastructures (exprimée en kilomètres de route ou de rail, ou en siège-kilomètre), moins le mode considéré sera efficace à cause de la congestion. La contrainte de budget temps s'écrit¹⁶ :

$$Tdisp = \sum_{\text{means of transport } T_j} \int_0^{pkm_{T_j}} \tau_{T_j} \left(\frac{u}{Captransport_{T_j}} \right) du \quad (0.7)$$

Naturellement, cette capacité maximale change dans le temps selon la quantité d'investissement affecté à chaque type d'infrastructure.

Contraintes de production et courbes d'offre

À chaque point du temps, les producteurs sont supposés opérer sous la contrainte d'une capacité de production fixe Cap_i définie comme le niveau maximum de production physique qu'on peut atteindre avec les équipements installés. Le modèle permet des ajustements de courte période aux conditions du marché *via* des modifications du taux d'utilisation Q_i / Cap_i . Cette spécification représente un écart significatif par rapport au paradigme habituel des fonctions de production explicites, puisqu'ici le facteur « capital » n'est pas toujours complètement employé. Ce choix découle de trois réalités : (i) au delà d'un certain taux d'utilisation, le rendement statique diminue, ce qui amène à des coûts marginaux opérationnels au dessus du prix de marché, (ii) des marges de sécurité sont établies pour faire face à des incidents techniques ou des opportunités de vente inattendus, (iii) l'existence des cycles économiques de court-terme contraste avec le fait que les industries intensives en capital déterminent leurs créations de capacités nouvelles sur des périodes longues et qu'elles subissent ensuite les hauts et les bas de la demande dans leurs recettes.

¹⁶ En supposant un déplacement de 1,1 heures par jour, le temps total annuel affecté au déplacement est donné par $Tdisp = 1,1 \cdot 365 \cdot L$ où L est la population totale.

Dans IMACLIM-R les producteurs sont décrits à travers des courbes d'offre incluant des rendements statiques décroissants : les coûts de production augmentent quand le taux d'utilisation de la capacité des équipements s'approche de 100% (Figure 20). *A priori* ces rendements décroissants concernent tous les inputs intermédiaires, y compris le travail. Dans IMACLIM-R, pour des raisons de simplicité et suivant les ordres de grandeur suggérés dans Corrado et Matthey (1997) nous supposons que la cause première de la hausse des coûts de production pour des taux d'utilisation élevés réside dans des *coûts du travail* plus élevés, du fait d'heures complémentaires à plus basse productivité, des surcoûts du travail de nuit et de la croissance des besoins de maintenance. Nous supposons donc (i) des coefficients input-output fixes représentant le fait qu'avec l'ensemble existant des techniques incorporées, produire une unité d'un bien i nécessite des quantités physiques fixes $IC_{j,i}$ en biens intermédiaires j et l_i en travail ; (ii) un paramètre de rendement décroissant $\Omega_i = \Omega(Q_i/Cap_i)$ s'appliquant aux salaires moyens à l'échelon du secteur—cf. équation (0.9).

Cette approche fait globalement écho à des travaux précédents sur l'existence de la flexibilité à court terme des systèmes de production à l'échelon du secteur, travaux à l'origine des discussions sur les investissements *putty-clay* démontrant que cette flexibilité à court terme découle moins de la substitution des inputs que des variations dans les taux différenciés des capacités de production (Johansen, 1959).

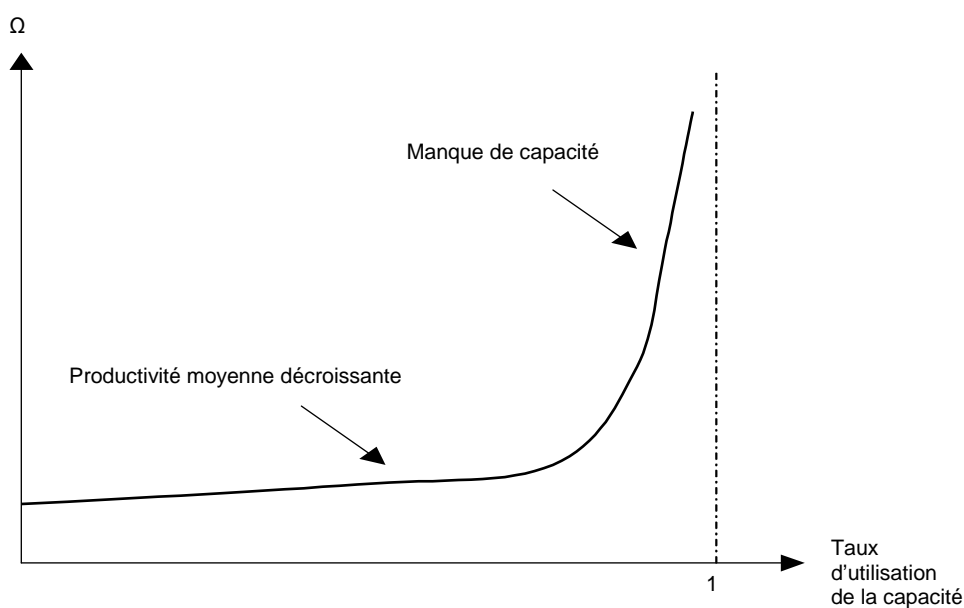


Figure 20 Rendements décroissants statiques

Nous dérivons de ces hypothèses une expression des coûts de production moyens Cm_i , dépendant des prix des biens intermédiaires $pIC_{j,i}$, de coefficients input-output $IC_{j,i}$ et l_i , des salaires de référence w_i , et du niveau de production *via* le facteur de rendement décroissant Ω_i appliqué aux coûts du travail (y compris les taxes sur les salaires tax_i^w) :

$$Cm_i = \sum_j pIC_{j,i} \cdot IC_{j,i} + (\Omega_i \cdot w_i) \cdot l_i \cdot (1 + tax_i^w) \quad (0.8)$$

Les prix du producteur sont égaux à la somme du coût moyen de production et du profit moyen. Dans la version courante du modèle, tous les secteurs appliquent un taux de marge différencié mais constant π_i , comme indiqué dans l'équation (0.9). Ce taux constant revient à la maximisation standard du profit pour les producteurs dont les coûts moyens de production suivent l'équation (0.8) et qui sont en concurrence parfaite, à condition que le facteur de rendement décroissant puisse être approximé par une fonction exponentielle du taux d'utilisation.

$$p_{k,i} = \sum_j pIC_{j,i,k} \cdot IC_{j,i,k} + (\Omega_{k,i} \cdot w_{k,i}) \cdot l_{k,i} \cdot (1 + tax_{k,i}^w) + \pi_{k,i} \cdot p_{k,i} \quad (0.9)$$

Cette équation représente en fait une courbe d'offre inversée, ce qui permet de se rendre compte comment le producteur représentatif décide son niveau de production Q_i (qui est inclus dans le facteur Ω_i) en fonction de tous les prix et des salaires réels.

De l'équation (0.9) nous déduisons simplement les salaires et profits dans chaque secteur :

$$wages_i = (\Omega_i \cdot w_i) \cdot l_i \cdot Q_i \quad (0.10)$$

$$profits_i = \pi_i \cdot p_i \cdot Q_i \quad (0.11)$$

Gouvernement

Les ressources des gouvernements proviennent des revenus de la fiscalité. Ces revenus sont égaux en aval à la somme des dépenses des administrations publiques $G_{k,i}$, des transferts aux ménages $transfers_k$ et des investissements publics dans les infrastructures de transport $InvInfra_k$ ¹⁷. Les dépenses des administrations publiques sont supposées suivre la croissance de la population. Les routines d'investissement dans les infrastructures sont détaillées pour chacune de nos simulations en section III.1.1. Comme $G_{k,i}$ et $InvInfra_k$ sont fixés de façon exogène dans l'équilibre statique, les gouvernements ajustent simplement les transferts directs aux ménages pour équilibrer leur budget :

$$\sum taxes_k = \sum_i G_{k,i} \cdot pG_{k,i} + transfers_k + InvInfra_k \quad (0.12)$$

Marché du travail

Pour chaque secteur la production Q_j requiert un apport total en travail $l_j \cdot Q_j$. Le taux de chômage est ensuite donné par la différence entre le travail total requis et la population active courante L^{act} :

$$z = \frac{L^{act} - \sum_j l_j \cdot Q_j}{L^{act}} \quad (0.13)$$

¹⁷ Nous faisons l'hypothèse que les infrastructures routières sont financées par des dépenses publiques et par des soutiens publics aux industries d'équipement et de la construction.

Le taux de sous-emploi z a un effet sur tous les salaires de référence w_i selon une courbe des salaires (Figure 21)¹⁸. Les salaires effectifs dans chaque secteur dépendent donc à la fois du niveau d'emploi (*via* la courbe des salaires) et du taux d'utilisation des capacités installées du secteur (*via* le facteur de rendements décroissants Ω).

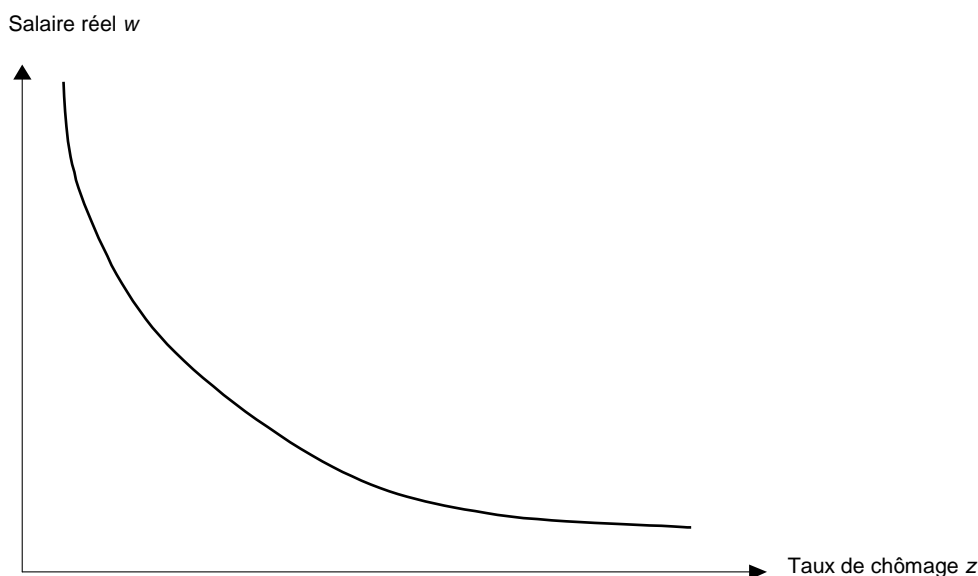


Figure 21 Courbe salaire-chômage

Investissements

La valeur totale $InvFin_i$ disponible pour l'investissement dans le secteur i permet de construire de nouvelles capacités ΔCap_i à un coût $pCap_i$ (0.14). Le coût $pCap_i$ dépend des quantités $\beta_{j,i}$ et des prix pI_j des biens j requis par la construction d'une capacité unitaire nouvelle dans le secteur i (0.15). Le coefficient $\beta_{j,i}$ est la quantité du bien j nécessaire pour construire l'équipement correspondant à une capacité unitaire nouvelle dans le secteur i . Afin d'être cohérent avec des déplacements vers des techniques plus ou moins intensives en capital, ces paramètres sont modifiés selon les caractéristiques des nouveaux ensembles de techniques choisis : ils capturent à la fois la structure de la demande en biens d'équipement et le *capital deepening* associé au changement technique. Finalement, la demande totale en biens pour construire de nouvelles capacités est donnée par l'équation (0.16).

$$\Delta Cap_i = \frac{InvFin_i}{pCap_i} \quad (0.14)$$

$$pCap_i = \sum_j (\beta_{j,i} \cdot pI_j) \quad (0.15)$$

¹⁸ Pour une discussion détaillée sur la signification et la robustesse de la courbe des salaires, voir Blanchflower et Oswald (1995).

$$I_j = \sum_{sectors\ i} \beta_{j,i} \cdot \Delta Cap_i \quad (0.16)$$

Marchés des biens, exports et imports

La France est représentée comme un petit pays en économie ouverte. Les prix mondiaux sont donc pris comme des trajectoires exogènes au modèle.

Pour tous les biens, le prix des importations p_i^{imp} inclut le prix mondial wp_i , les taxes à l'export ou les subventions tax_i^{imp} , et les coûts moyens de transport international ($wp_{it} \cdot nit_i$) (0.17). De même le prix à l'export comprend le prix de production domestique, les éventuelles subventions ou taxe à l'export et les coûts de transport international. Les volumes importés et exportés sont fonction des rapports des prix import/production domestique et export/prix international. Ainsi il est possible de représenter l'impact des prix de l'énergie sur les coûts du transport et finalement sur les flux d'échanges et les schémas de localisation industrielle.

$$p_i^{imp} = wp_i \cdot (1 + tax_i^{imp}) + wp_{it} \cdot nit_i \quad (0.17)$$

Contraintes d'équilibre sur les flux physiques

Les équations (0.18) et (0.19) sont des équations de bouclage du marché qui garantissent l'équilibre en termes physiques ou quasi-physiques respectivement pour les biens domestiques et importés.

$$Q_i = shareC_i^{dom} \cdot C_i + shareG_i^{dom} \cdot G_i + shareI_i^{dom} \cdot I_i \\ + [\sum_j Q_j \cdot IC_{i,j} \cdot shareIC_{i,j}^{dom}] + X_i \quad (0.18)$$

$$M_i = shareC_i^{imp} \cdot C_i + shareG_i^{imp} \cdot G_i + shareI_i^{imp} \cdot I_i \\ + [\sum_j Q_j \cdot IC_{i,j}^{imp} \cdot share_{i,j}^{imp}] \quad (0.19)$$

Émissions de gaz à effet de serre

IMACLIM-R calcule les émissions de CO₂ issues de la combustion des énergies fossiles à partir des balances énergétiques et de coefficients d'émission par combustible. Le travail en cours sur une description détaillée des procédés de l'industrie et sur l'usage des sols va permettre d'inclure plusieurs gaz à effet de serre. L'impact des émissions de CO₂ sur le climat est calculé par un modèle climatique compact développé au CIRED (Ambrosi *et al.*, 2003).

Liens dynamiques : moteur de la croissance et changement technique

Dans IMACLIM-R, le rythme et la direction de la croissance économique sont gouvernés par (i) un moteur de croissance qui détermine le taux potentiel de croissance à chaque période, (ii) le changement technique lié à l'énergie, ce qui recouvre l'évolution de l'offre d'énergie et la dynamique des équipements consommateurs d'énergie, (iii) le changement structurel induit qui résulte des évolutions de la composition de la demande des ménages, des relations intersectorielles et de la productivité du travail par secteur.

Finalement, la croissance économique réelle dans un scénario donné résulte de l'interaction entre ces trois ensembles de déterminants.

Moteur de la croissance : démographie, productivité et investissement

Dans IMACLIM-R le moteur de la croissance est constitué de tendances démographiques exogènes, d'hypothèses de croissance de la productivité du travail dans chaque secteur, accompagnées de mécanismes d'intensification en capital et enfin d'hypothèses sur l'évolution du taux d'épargne.

Les hypothèses démographiques sont tirées des projections INSEE. Cela concerne à la fois la population active et totale : la première détermine l'emploi disponible dans une économie, la seconde détermine les niveaux de consommation pour un ratio donné d'équipement des ménages.

Le taux de croissance de la productivité du travail suit à long terme un chemin de croissance stable de productivité de 1,65% par an, avec une phase de rattrapage les premières décennies. La construction de ces taux de croissance de la productivité du travail s'appuie sur les trajectoires historiques (Maddison, 1995) et des conjectures sur les tendances prospectives longues (Oliveira Martins *et al.*, 2005). Deux spécifications différentes ont été testées pour se focaliser sur le rôle des mécanismes de changement technique endogène dans les politiques climatiques (Crassous *et al.* 2006) : la productivité du travail est soit exogène, soit dépendante de l'investissement cumulé. Le second cas permet de tester l'effet d'éviction (*crowding-out*) par lequel des politiques climatiques remplacent une partie des autres investissements, ce qui abaisse la croissance de la productivité par rapport au scénario de référence dans les secteurs concernés par cette baisse.

En combinaison avec ces déterminants de long-terme, la disponibilité des investissements et leur allocation sont des variables déterminantes pour la réalisation de la croissance potentielle en croissance effective. La quantité d'investissement dans chaque secteur détermine le rythme d'expansion de la capacité productive et le rythme du changement technique incorporé. La capacité productive suit classiquement une loi d'accumulation du capital selon un taux constant de dépréciation, sauf pour l'électricité et l'industrie, deux secteurs pour lesquels nous explicitons les générations d'équipements. Précisément, nous traitons dans un module spécifique pour chaque secteur la sous-répartition des investissements entre les technologies, dans les cas où cette désagrégation est pertinente. L'architecture IMACLIM-R inclut en l'état actuel quatre modules dynamiques détaillés portant soit sur l'offre, soit sur la demande finale d'énergie : génération d'électricité, usages résidentiels de l'énergie, transport et industrie.

Changement technique lié à l'énergie

Comme cela a été expliqué plus haut, le changement technique est déterminé par l'effet cumulé des choix économiques pour la période projetée. Du fait de l'incorporation du changement technique dans les investissements, le changement technique endogène capturé dans IMACLIM-R doit être interprété comme recouvrant à la fois la R&D et l'apprentissage (*'learning-by-doing'*). Nous décrivons ci-dessous les modules qui détaillent cette dynamique *putty-clay* à la fois sur les secteurs d'offre et de demande d'énergie.

Offre d'énergie : production d'électricité

Le secteur électrique ne peut pas être représenté comme les autres secteurs parce que l'électricité ne peut pas être stockée aisément : la courbe de charge associée à un réseau électrique joue un rôle central dans le choix de technologies appropriées. Le problème méthodologique est alors de modéliser de façon réaliste la production de l'électricité qui mobilise les capacités de production installées selon les hypothèses formulées sur la courbe de charge.

Le module d'offre électrique dans IMACLIM-R décrit les décisions d'investissement annuel dans le secteur électrique. Pour cela, le secteur électrique est supposé anticiper, à un horizon de dix ans, la demande future potentielle pour l'électricité, en prenant en compte les tendances passées de la demande. Le module calcule alors un mix optimal des capacités de production d'électricité pour satisfaire la demande future au plus bas coût étant données les anticipations futures sur le prix futur des combustibles. Le processus d'optimisation n'établit pas seulement la capacité totale des usines en stock mais aussi sa répartition en 26 technologies de génération différentes (15 conventionnelles et 11 renouvelables) dont les caractéristiques sont calibrées sur le modèle énergétique POLES (Criqui, 2001). La part de chaque technologie dans le total dépend d'une concurrence classique entre technologies disponibles selon leurs coûts moyens de production respectifs. En outre cette compétition inclut aussi des contraintes liées à la structure différenciée des coûts des technologies : celles qui ont des coûts fixes forts et des coûts variables bas, tel que le nucléaire, sont plus compétitives comme capacités en base alors que les technologies ayant la configuration inverse sont *a priori* choisies pour la pointe.

Cette structure de modélisation permet aussi de tenir compte des contraintes physiques telle que l'absence de capacité de stockage qui fait obstacle à un large déploiement des capacités en électricité renouvelable dans le réseau du fait que leur production est intermittente, surtout pour le solaire et l'éolien. Une fois que la combinaison optimale d'équipements productifs pour l'année $t+10$ a été calculée, le modèle prend en compte les contraintes d'inertie : la capacité neuve construite en l'année t résulte d'une minimisation de l'écart entre le mix de capacité déjà installée et le mix technologique optimal pour satisfaire la demande jusqu'à l'année $t+10$.

Cette minimisation est calculée sous la contrainte de la quantité effective d'investissement alloué au secteur électrique. Ce processus de planification avec connaissance imparfaite du futur est répété à chaque période et les attentes sont adaptées aux changements de prix courants et de demande.

Demande d'énergie

Pour l'évolution des systèmes du côté de la demande, nous distinguons des mécanismes spécifiques pour les consommations du résidentiel, du transport et de l'industrie.

La demande totale d'énergie pour les usages finaux des ménages dans le résidentiel est désagrégée en sept usages principaux dont les caractéristiques sont décrites séparément : chauffage, cuisson, eau chaude, éclairage, climatisation, réfrigérateurs et congélateurs, et autres appareils électriques.

Pour chacun de ces sept usages finaux, le service en énergie finale SE_i dépend du nombre total de ménages H_i (ou le nombre de mètres carrés en résidentiel pour le chauffage et la climatisation), du taux d'équipement λ_i et du niveau d'utilisation de l'équipement e_i . Pour chaque source d'énergie j , la demande d'énergie finale consécutive DEF_j dépend de sa part dans le mix énergétique pour chaque usage final sh_{ij} , et du rendement moyen des équipements ρ_{ij} :

$$\begin{aligned} &\text{pour chaque énergie} \\ \left\{ \begin{aligned} DEF_j &= \sum_{\text{end-use } i} sh_{ij} \cdot \frac{SE_i^{COM}}{\rho_{ij}} \end{aligned} \right. \quad (0.20) \end{aligned}$$

L'évolution des parts dans le mix énergétique pour chaque usage final est modélisée par une fonction *logit* sur les prix des services finaux d'énergie, pour décrire les choix des ménages sur des marchés non homogènes. L'évolution du rendement des équipements peut être rendue dépendante de l'expérience passée et des prix. La surface d'habitation par personne est corrélée au revenu disponible réel par personne. C'est aussi le cas pour les équipements utilisateurs d'énergie, mais l'intensité d'utilisation de ces équipements est déterminée à la fois par le revenu disponible réel par personne et par les prix de l'énergie, avec des élasticités différenciées selon l'usage final (en distinguant les besoins de base et les usages de confort) et le niveau absolu d'usage de l'équipement. Les courbes correspondantes de demande sont bornées par des asymptotes, qui représentent les niveaux minima (ou de subsistance) ou maxima (de saturation) qui traduisent différentes vues sur les 'styles de développement' futurs.

Le traitement des transports est détaillé section II.2.

Enfin, la consommation d'énergie de l'agriculture, de l'industrie et des services change en suivant des tendances d'améliorations globales de l'efficacité énergétique et des changements de mix énergétiques pour les nouvelles générations de capital. Les deux facteurs sont déterminés par les prix relatifs des énergies. Du côté de la demande, les élasticités-revenu de la consommation des biens agricoles et industriels sont supposées décliner quand le revenu par tête augmente, afin de rendre compte des saturations. Cela conduit mécaniquement à une dématérialisation endogène qui se répercute sur les besoins énergétiques de ces secteurs.

Néanmoins l'exploration de trajectoires soutenables qui pourraient représenter de larges écarts par rapport aux trajectoires de référence à cause de mouvements drastiques de décarbonisation et/ou de dématérialisation, amène à considérer que la description des dynamiques de l'industrie doit être améliorée. En effet nous devons évaluer les réductions potentielles des émissions, et des consommations d'énergie et de matériaux non seulement dans les processus industriels eux-mêmes, mais aussi dans les changements potentiels de consommation de matériaux ailleurs dans l'économie.

Bibliographie

- AIE (2006), *Energy Technology Perspectives: Scenarios and Strategies to 2050*, OCDE, Paris.
- Armington, P. S. (1969), "A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production", *International Monetary Fund Staff Papers* 16, pp 170-201.
- Ambrosi, P., Hourcade, J.-C., Hallegatte, S., Lecocq, F., Dumas, P., Ha-Duong, M. (2003), "Optimal Control Models and Elicitation of Attitudes Towards Climate Damages", *Environmental Modeling and Assessment* 8 (3), pp 133-147.
- Babiker, M. H., Reilly, J. M., Mayer, M., Eckaus, R. S., Wing, I. S., Hyman, R. C. (2001), "The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Revisions, Sensitivities, and Comparisons of Results", Report No. 71, *Joint Program on the Science and Policy of Global Change*, MIT, Cambridge, Mass.
- Baumol, W. J., Oates, W. E. (1988), *The theory of Environmental Policy* (2nd edition), Cambridge University Press, 312 p.
- Berndt, E. R., Wood, D. O. (1975), "Technology, Prices and the Derived Demand for Energy", *The Review of Economics and Statistics* 57 (3), pp 259-268.
- Blanchflower, D. G., Oswald, A. J. (1995), "An Introduction to the Wage Curve", *Journal of Economic Perspectives* 9 (3), pp 153-167.
- Clarke, J. F., Edmonds, J. A. (1993), "Modelling energy technologies in a competitive market", *Energy Economics* 15 (2), pp 123-129.
- Combet, E., Gherzi, F., Hourcade, J.-C., Thubin, C. (2009), *Economie d'une fiscalité carbone en France*, IRES, Paris.
- Corrado, C., Matthey, J. (1997), "Capacity Utilization", *Journal of Economic Perspectives* 11 (1), pp 151-167.
- Criqui, P. (2001), *POLES Prospective Outlook on Long-term Energy Systems*, http://upmf-grenoble.fr/iepe/textes/POLES8p_01.pdf.
- Erkel-Rousse, H., Mirza, D., (2002), "Import Price Elasticities: Reconsidering the Evidence," *The Canadian Journal of Economics / Revue Canadienne d'Economie* 35 (2), pp 282-306.
- Fulton, L., Eads G., 2004, *IEA/SMP Model Documentation and Reference Case Projection*, <http://www.wbcsd.org/web/publications/mobility/smp-model-document.pdf>
- Gherzi F., Hourcade J.-C. (2006), "Macroeconomic consistency issues in E3 modeling: the continued fable of the elephant and the rabbit", *The Energy Journal*, 27 (Special Issue n°2: *Hybrid Modeling of Energy-Environment Policies: Reconciling Bottom-up and Top-down*), pp 27-49.
- Hildenbrand, W. (1994), *Market Demand: theory and empirical evidence*, Princeton University Press.
- Hourcade, J.-C. (1993), "Modelling long-run scenarios. Methodology lessons from a prospective study on a low CO₂ intensive country", *Energy Policy* 21 (3), pp 309-326.

INGENUE, 2006, “World Growth and International Capital Flows in the XXIst Century”, *Document de travail OFCE*, n° 2006-07, avril.

Johansen, L. (1959), “Substitution versus Fixed Production Coefficients in the Theory of Growth: A Synthesis”, *Econometrica* 27 (2), pp 157-176.

Jorgenson, D. W. (1981), “Energy Prices and Productivity Growth”, *The Scandinavian Journal of Economics* 83 (2), pp 165-179.

Jorgenson, D.W., Fraumeini, B. (1981), “Relative Prices and Technical Change”, in Berndt E.R., Field B.C. (eds.), *Modelling and Measuring Natural Resource Substitution*, MIT Press, Cambridge Mass.

Kaldor, N. (1957), “A Model of Economic Growth”, *The Economic Journal* 67 (268), pp 591-624.

Kaldor, N. (1961), *Economic growth and capital accumulation*, Macmillan, Londres.

Kalecki, M. (1939), *Essays in the theory of economic fluctuations*, G. Allen & Unwin, Londres.

Layard, R., Nickell, S. (1986), “Unemployment in Britain”, *Economica* 53 (210), pp. S121-S169.

Maddison, A. (1995), *Monitoring the World Economy: 1820 – 1992*, OCDE, Paris, 260 p.

McKibbin, W., Ross, M., Shackleton, R., Wilcoxon, P. (1999), “Emissions Trading, Capital Flows and the Kyoto Protocol”, *The Energy Journal Special Issue*, “The Costs of the Kyoto Protocol: A Multi-model Evaluation”, pp 287-334.

Muellbauer, J. (1976), “Community Preferences and the Representative Consumer”, *Econometrica* 44 (5), pp 979-999.

Oliveira Martins, J., Gonand F., Antolin P., de la Maisonneuve C., Kwang, Y. (2005), “The impact of ageing on demand, factor markets and growth”, *OECD Economics Department Working Papers*, #420, OECD Economics Department.

Sands, R. D., Miller, S., Kim, M. K. (2005), “The Second Generation Model: Comparison of SGM and GTAP Approaches to Data Development”, PNNL report 15467.

Schäfer, A., Victor, D. G. (2000), “The future mobility of future population”, *Transportation Research Part A* 34, pp 171-205.

Shapiro, C., Stiglitz, J. E. (1984), “Equilibrium Unemployment as a Worker Discipline Device”, *The American Economic Review* 74 (3), pp. 433-444.

Solow, R. M. (1988), “Growth theory and after”, *The American Economic Review* 78 (3), pp 307-317.

Stiglitz, J. E. (1990), “Some Retrospective Views on Growth Theory presented on the occasion of the Celebration of Robert Solow’s 65th Birthday”, in Diamond, P. (ed.), *Growth/Productivity/Unemployment*, MIT Press, Cambridge, Mass.

Storchmann, K. (2005), “Long-run gasoline demand for passenger cars: the role of income distribution”, *Energy Economics* 27, pp. 25-58.

Zahavi Y., Talvitie A., 1980, “Regularities in Travel Time and Money Expenditures”, *Transportation Research Record* 750, pp. 13-19.