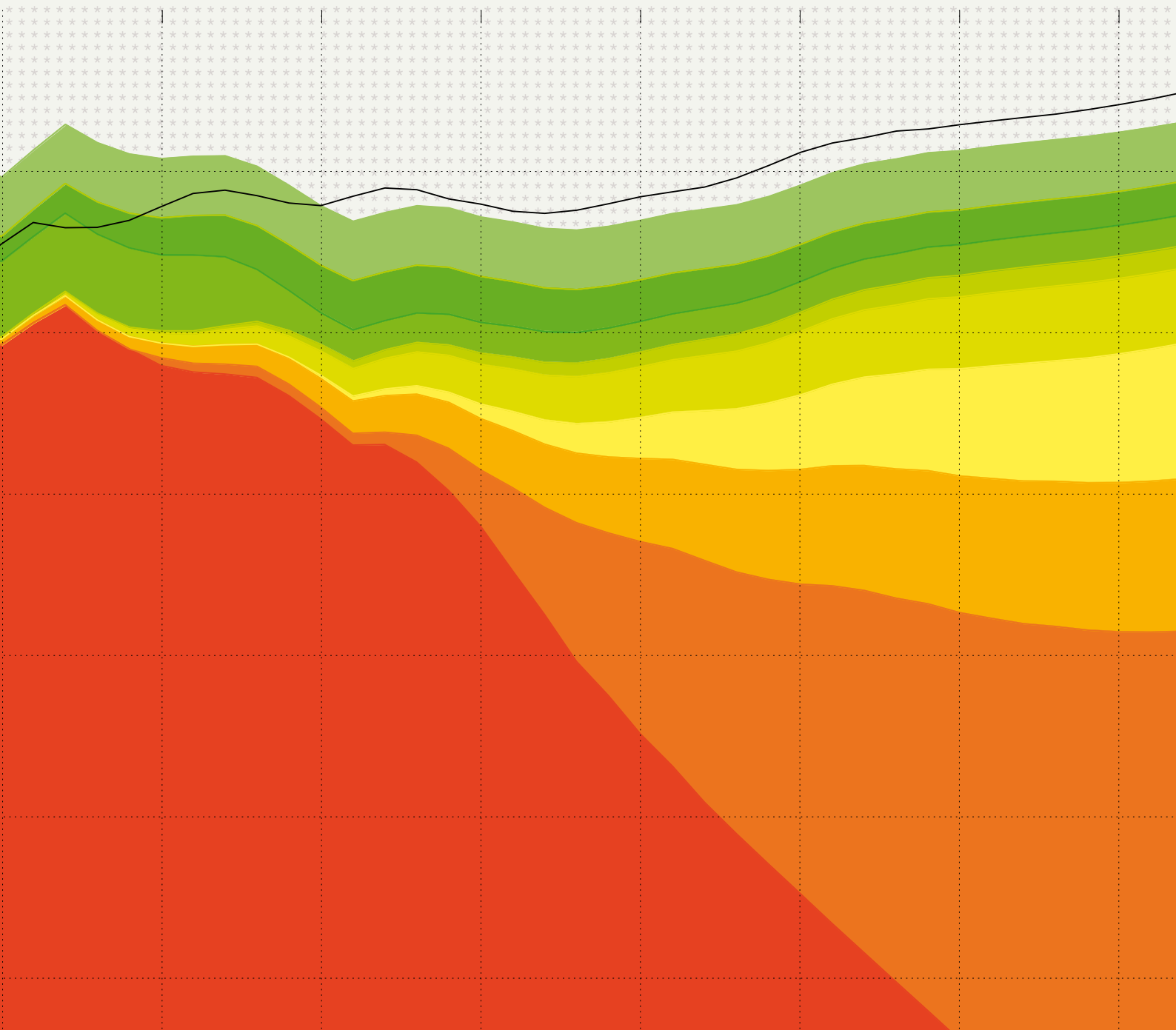




Élaboration d'un scénario bas carbone pour la France

Une approche participative pour intégrer
l'acceptabilité sociale et économique



Sommaire

1. Introduction	3
2. Exposé de la méthodologie : comment concevoir des scénarios collaboratifs ?	4
I. La nécessité d'impliquer les parties prenantes	4
II. L'outil de modélisation Imaclim-R	5
III. Description de la démarche de conception des scénarios collaboratifs	6
3. Le scénario énergétique sobre en carbone « acceptable » pour la France	9
Introduction	9
SECTEUR RÉSIDENTIEL	10
I. État des lieux	10
II. Représentation du secteur résidentiel dans Imaclim-R	11
III. Mesures acceptables dans le secteur résidentiel	12
IV. Évolution de la consommation d'énergie du secteur résidentiel	13
V. Coûts des investissements et des politiques pour le secteur résidentiel	16
SECTEUR TRANSPORT	17
I. État des lieux	17
II. Représentation du secteur des transports dans Imaclim-R	17
III. Mesures acceptables dans le secteur des transports	19
IV. Évolution de la consommation d'énergie du secteur des transports	19
V. Coûts des investissements et des politiques dans le secteur des transports	21
INDUSTRIE ET SERVICES	22
I. État des lieux	22
II. Représentation des secteurs productifs dans Imaclim-R	22
III. Évolution de la consommation d'énergie du secteur de l'industrie	23
SECTEUR ÉLECTRIQUE	24
I. État des lieux	24
II. Représentation du secteur électrique dans Imaclim-R	24
III. Mesures « acceptables » dans le secteur électrique	25
IV. Évolution de la consommation d'énergie du secteur électrique	26
V. Coûts des investissements et des politiques dans le secteur électrique	27
IMPACTS MACROÉCONOMIQUES ET RÉSULTATS DU SCÉNARIO	29
I. Un contexte global, une vision mondiale	29
II. Dynamique macroéconomique du scénario de réduction d'émissions	29
III. Taxe carbone : quelle nécessité ?	33
IV. Réductions des émissions de CO ₂ dans le scénario de réduction des émissions	33
V. Les facteurs clés des réductions d'émissions de CO ₂	34
Réductions d'émissions et périmètre des émissions	35
4. Comment réconcilier acceptabilité et Facteur 4 ?	36
I. Une hypothèse centrale : le prix des énergies fossiles	36
II. L'impact du mode de développement	37
III. Une taxe d'ajustement aux frontières est-elle nécessaire ?	38
IV. Comment atteindre le Facteur 4 ?	38
5. Analyses de sensibilité	42
I. Description de l'analyse de sensibilité	42
II. Analyse de sensibilité pour le « Scénario Acceptable »	42
III. Analyse de sensibilité pour le « Scénario avec mesures additionnelles »	44
6. Conclusion	45
7. Tableaux synthétiques du scénario de réduction des émissions acceptable	46

L'équipe du projet souhaite remercier les parties prenantes pour leur participation active dans ce projet : Ademe, AGPM/AGPB, BPCE, CDC - climat, CFDT, CLER, Consultant Wiel, DGALN / PUCA, DGE, EDF, Energies demain, ERDF, FFB, FNAUT, Futuribles, GDF Suez, négaWatt, Région IdF, RFF, RTE, Saint Gobain, SER, SNCF, UFE, UNARC, UNIS, Université Grenoble, Valéo. Nous souhaitons également remercier les personnes qui ont contribué à la réalisation de cette publication : Aurélie Méjean, Henri Waisman, Elsa Mosseri, Emmanuel Combet, Louis-Gaëtan Giraudet, Frédéric Branger, Vanessa Brun, Céline Guivarch, Adrien Vogt-Schilb, Philippe Quirion Diane Vandaele, Alix Mazounie et bien entendu à l'équipe du projet ENCI-Lowcarb.

Mars 2012

Authors

Ruben Bibas (CIRED)
Sandrine Mathy (CIRED)
Meike Fink (RAC-F)

Layout

Solenn Marrel - www.faceauvent.fr



This publication summarizes the French outcomes of the European research project ENCI-LowCarb (Engaging Civil Society in Low-carbon Scenarios). More information on the project: www.enci-lowcarb.eu

7th Framework Program for Research and Technological Development
The research leading to these results has received funding from the European Community's Seventh Framework Program (FP7/2007-2013) under grant agreement N° 213106. *The contents of this report are the sole responsibility of the ENCI-Lowcarb project Consortium and can in no way be taken to reflect the views of the European Union.*

Introduction

Ce document présente les résultats d'une étude réalisée en France dans le cadre du projet de recherche européen ENCI-LowCarb (Engaging Civil society in Low Carbon scenarios): **Mobilisation de la société civile dans l'élaboration de scénarios bas carbone**¹.

Le projet décrit ici s'attache avant tout à développer une méthodologie garantissant l'intégration transparente des contributions des «parties prenantes» dans le processus d'élaboration des scénarios, afin d'améliorer l'acceptabilité des trajectoires vers un avenir sobre en carbone. Cette démarche s'impose pour différencier la faisabilité technique et économique d'un scénario de son acceptabilité sociale. En effet, si les scénarios publiés à l'heure actuelle reposent pour la plupart sur des consultations publiques ou sur les apports de parties prenantes, la méthodologie déployée pour intégrer les contributions et les traduire en hypothèses exploitables par l'outil de modélisation est souvent passée sous silence. Le projet ENCI-LowCarb se propose précisément de combler cette lacune scientifique.

Un scénario énergétique décrit un futur possible en examinant une multitude de facteurs, tels que l'évolution du coût des combustibles fossiles, les choix technologiques, ou encore le jeu de l'offre et de la demande d'énergie, pour ne citer qu'eux. L'influence des scénarios sur le processus décisionnel est d'autant plus importante qu'ils mettent en évidence les possibles impacts à long terme des décisions d'investissement, notamment le choix d'infrastructures. C'est là que la conception de scénarios fondée sur un dialogue nourri avec les parties prenantes prend tout son sens.

Les scénarios énergétiques sur lesquels porte cette publication ne reflètent pas les opinions du CIRED ou du RAC-F. Le scénario «acceptable» résulte de groupes de discussions avec les parties prenantes consultées tout au long du processus de création de scénario. À ce titre, ce scénario ne représente pas non plus leurs visions individuelles. En outre, les scénarios additionnels présentés s'éloignent du scénario acceptable dans le but d'explorer les incertitudes inhérentes à la modélisation prospective ainsi que les mesures possibles pour atteindre des cibles de réduction très ambitieuses. Les analyses développées dans ce rapport sont fondées sur des exercices de simulation, réalisés avec le modèle Imacim-R France, dont l'objectif

Dans les pages qui suivent, l'équipe française de projet (CIRED et RAC-F) a le plaisir de vous présenter les scénarios énergétiques élaborés pour la France, fruits d'un processus de construction collaborative impliquant un large éventail de parties prenantes à l'échelon national (organisations de la société civile, en particulier syndicats et organisations non gouvernementales, entreprises privées, banques, pouvoirs publics nationaux et locaux).

À chaque participant, il a été demandé de définir ou de sélectionner des mesures acceptables pour atténuer les émissions de CO₂. Leurs contributions ont ensuite été utilisées dans le modèle technico-économique Imacim-R France pour bâtir un scénario à la fois pertinent sur le plan économique et technique et acceptable pour les parties prenantes. Cela a permis de déterminer le niveau de réduction des émissions atteignable par l'application des mesures jugées acceptables par les parties prenantes.

Nous détaillons dans le **chapitre 2** la méthodologie utilisée pour l'élaboration des scénarios collaboratifs. Le **chapitre 3** caractérise le scénario d'atténuation issu des discussions avec les parties prenantes. Le **chapitre 4** aborde les mesures politiques supplémentaires permettant d'atteindre un objectif climatique plus ambitieux et explore également certains déterminants additionnels des émissions de CO₂. Le **chapitre 5** présente des analyses de sensibilité. Enfin, le **chapitre 6** fait office de conclusion.

est de proposer une image cohérente de l'évolution économique et énergétique sur le moyen et long terme. Les différents scénarios considérés dans ce document sont des trajectoires technico-économiques qui reposent sur les hypothèses techniques, économiques et comportementales implémentées dans le modèle Imacim-R après discussions avec les parties prenantes et les experts sectoriels. Cette approche de modélisation implique que les valeurs exactes données comme résultats n'ont pas valeur prédictive. En revanche, ces valeurs dévoilent des ordres de grandeurs et révèlent donc les mécanismes en jeu dans un système dynamique complexe, composé de différents secteurs et agents économiques, liés par des interactions socioéconomiques multiples.

¹ Le projet, d'une durée de trois ans (avril 2009-mars 2012), a été financé par le Septième programme-cadre de la Commission européenne. L'équipe du projet se compose de deux instituts de recherche (le CIRED et le PIK) et de trois ONG (le RAC-France en qualité de coordinateur, Germanwatch et INFORSE-Europe). Pour obtenir davantage d'informations sur le projet : www.enci-lowcarb.eu



Exposé de la méthodologie : comment concevoir des scénarios collaboratifs ?

I. La nécessité d'impliquer les parties prenantes

Nombreux sont les scénarios énergétiques qui se fondent sur des consultations publiques ou des contributions des parties prenantes. Tout aussi rares sont ceux donnant au processus d'élaboration la place qui devrait lui revenir et expliquant sans ambiguïté la manière dont les contributions sont prises en compte et intégrées dans l'outil de modélisation. De ce fait, la « traduction » des idées défendues par les contributeurs vers leur représentation dans l'outil de modélisation fait le plus souvent figure de chaînon manquant.

Ce constat soulève une question légitime : « En quoi l'implication des parties prenantes est-elle importante dans les discussions autour des scénarios énergétiques ? ». En premier lieu, les parties prenantes sont en mesure d'ajouter leur propre expertise aux hypothèses techniques et économiques et d'amorcer des débats sur les sujets sensibles. En outre, les échanges organisés avec elles **permettent de** mettre en lumière les clivages et obstacles majeurs qui s'opposent à la construction d'une société décarbonée. Par là même, ces discussions ouvrent la voie à l'établissement d'un consensus sur les solutions envisageables et à la délimitation d'une stratégie gagnante. Enfin, en renforçant leur sentiment d'avoir contribué d'une manière essentielle à la mise sur pied du scénario, la consultation des parties prenantes favorise l'appropriation du scénario par ces acteurs incontournables des mutations de notre société. Les arguments en faveur d'une intégration active des contributions des parties prenantes concernées lors de l'élaboration des scénarios justifient la mise en place d'une méthodologie ouverte de consultation dans le cadre de ce projet. À l'heure actuelle, le défi consiste à éviter de cantonner les parties prenantes à des modes de communication à sens unique, telles que les consultations en ligne. Les scénarios ne pourront exprimer fidèlement leurs contributions qu'à la condition que la conception du processus gagne en interactivité. De ce point de vue, rien ne saurait plus nuire à la participation des parties prenantes que de les

réunir pour recueillir leur avis, pour les écarter ensuite de l'élaboration des scénarios.

L'innovation du projet ENCI-LowCarb réside donc davantage dans le processus mis en place que dans le contenu du scénario énergétique élaboré par ce processus. L'hypothèse retenue ici est que, si les parties prenantes nationales constatent la prise en compte de leurs contributions (même amenées par celles des autres acteurs), elles seront plus enclines à se projeter dans les scénarios que dans le cas où la procédure manque de transparence. Le recours à des procédures collaboratives contribue à accroître l'acceptation des parties prenantes et à susciter un soutien politique en faveur des scénarios énergétiques et des politiques s'en inspirant. Mais relever ce défi implique que les parties prenantes et les modélisateurs s'investissent davantage en intensifiant leurs échanges sur les sujets traités et en parvenant à un degré minimal de maîtrise du fonctionnement de l'outil de modélisation.

La transparence du processus de consultation des parties prenantes suppose l'établissement d'un terrain d'entente : les paramètres et variables d'entrée du modèle doivent en effet être associés à des implications tangibles et concrètes dont les parties prenantes sont à même de juger la pertinence. Il n'en faut pas moins pour que les conclusions des consultations menées avec les parties prenantes deviennent transposables dans les paramètres techniques du modèle. Les contributions participent ainsi à la définition des conditions posées pour le cadre politique, première étape du processus de création de scénarios décrivant l'évolution vers un système énergétique faiblement carboné. Cette étape de conversion est indispensable pour exploiter les outils de modélisation. Aussi requiert-elle un effort de communication considérable pour clarifier et rendre traçable l'incorporation des contributions dans un modèle complexe qui pourrait apparaître comme une boîte noire opaque. Dans ce projet, le travail de modélisation a été guidé par deux grands principes :

★ **Acceptation** : Obtention d'un degré d'acceptation maximal des parties prenantes.

★ **Réalisme** : Prise en compte des contraintes techniques et économiques.

Acceptation sociale ou acceptation des parties prenantes ?

Centré sur l'«acceptation des parties prenantes», le projet ENCI-LowCarb a exclu de son champ d'analyse l'«acceptation sociale», dont les différents aspects ne peuvent être évalués au moyen des outils du projet. S'agissant des stratégies en rapport avec les systèmes énergétiques, l'acceptation sociale revêt trois dimensions (Wüstenhagen 2007²): (i) l'acceptation sociopolitique, c'est-à-dire acceptation des technologies et des politiques par le public, les principaux intervenants et les décideurs politiques, (ii) l'acceptation communautaire des projets locaux, et (iii) l'acceptation du marché, à savoir le processus d'adoption de produits innovants faiblement émetteurs par les consommateurs et les investisseurs. L'acceptation communautaire est d'une importance primordiale pour la construction de nouvelles infrastructures énergétiques (réseau électrique, éoliennes, entreposage de déchets nucléaires, etc.), mais est impossible à représenter avec un outil de modélisation dépourvu dimension spatiale.

L'un des défis majeurs rencontrés dans le projet ENCI-LowCarb pour concevoir les scénarios a été l'emploi de modèles hybrides macroéconomiques (IMACLIM-R³ et REMIND-R⁴), souvent présentés comme de véritables «boîtes noires»⁵. Il nous apparaît donc utile ici de rappeler dans ses grandes lignes la dynamique intrinsèque du modèle, en particulier les grands mécanismes à l'œuvre, le degré de précision de la représentation sectorielle, les variables exogènes et endogènes, etc. La forme de l'outil de modélisation façonne de fait celle du dialogue avec les parties prenantes.★

II. L'outil de modélisation Imacim-R

Imacim-R France⁶ est un modèle d'équilibre général. Appliqué au processus de construction collaborative de scénarios énergétiques pour la France dans le cadre du projet ENCI-LowCarb, il a servi

à modéliser l'évolution de l'économie française décomposée en quinze secteurs : énergie (pétrole brut, pétrole raffiné, gaz, charbon et électricité), transport (transport routier de marchandises, transport par voie d'eau, transport aérien, transport de passagers et transport public routier de personnes), construction, industries intensives en énergie, agriculture et services.

Il se distingue des modèles dits «économiques» et «techniques» en projetant l'évolution conjointe de l'économie et du système énergétique entre 2004 et 2050. Si les modèles économiques s'appuient sur une dynamique essentiellement économique et représentent imparfaitement le système énergétique, les modèles techniques donnent pour leur part la priorité aux technologies et à l'énergie en négligeant les contraintes et la dynamique économiques (en particulier l'interaction entre les prix et la demande d'énergie et de matières premières).

Dans Imacim-R, l'énergie est formellement représentée en valeurs et en quantités physiques permettant d'isoler le rôle respectif des secteurs énergétiques, ainsi que leur interaction avec le reste de l'économie. L'existence de variables physiques précises (ex. nombre d'automobiles, nombre de logements, efficacité énergétique des technologies) ouvre la voie à l'inclusion rigoureuse des données sectorielles relatives à l'impact des incitations économiques sur la demande finale et les systèmes techniques. Chaque année, l'évolution technico-économique fournit un bilan comptable et physique équilibré, duquel découle un certain nombre d'indicateurs (PIB, prix sectoriels, investissements sectoriels, consommation des ménages de chaque secteur, taux de chômage, commerce international, etc.). La relation entre deux équilibres annuels consécutifs s'opère à l'aide de «modules sectoriels dynamiques» (module d'électricité, module résidentiel, par exemple) illustrant la dynamique propre à chaque secteur, compte tenu des contraintes économiques (investissement disponible dans le secteur, consommations intermédiaires et coût de l'énergie) et physiques (par exemple, l'inertie des infrastructures technologiques et des appareils, facteur limitant les progrès de l'efficacité énergétique).

2- Wüstenhagen R, Wol-sink, M, Bürer MJ 2007, 'Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept', Energy Policy, vol. 35, no. 5, pp. 2683-2691.

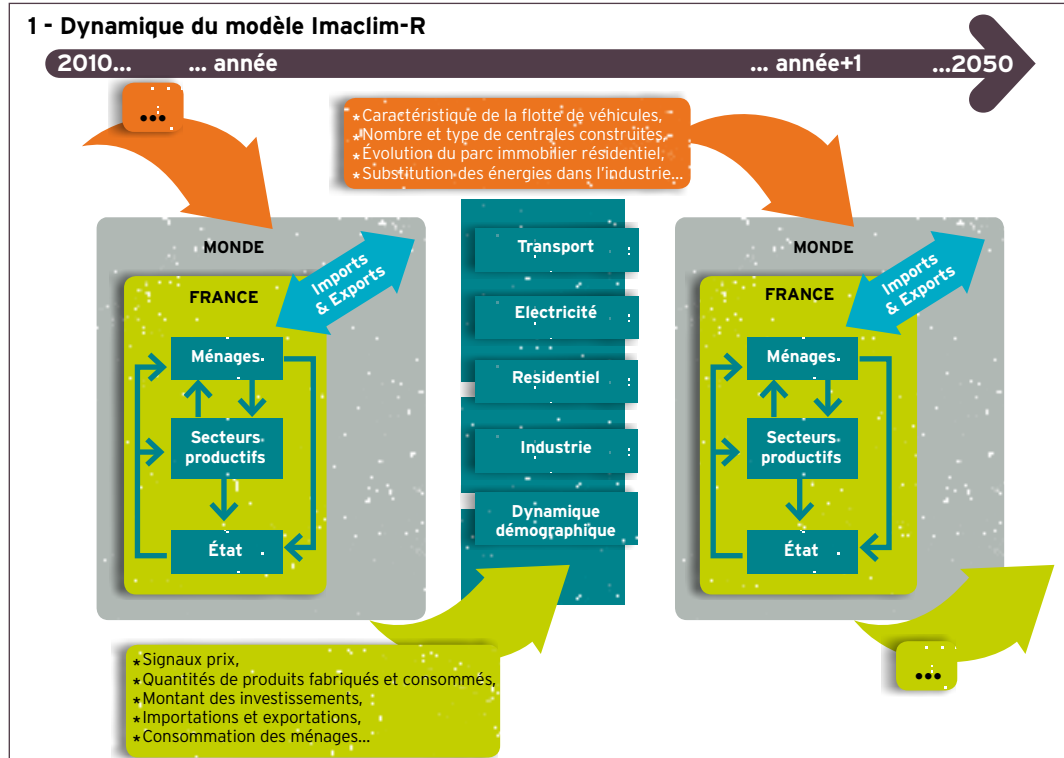
3- www.imacim.fr/spip.php?article129&lang=env

4- www.pik-potsdam.de/research/sustainable-solutions/models/remind

5- Sandrine Mathy, Meike Fink, Ruben Bibas (2011): «Quel rôle pour les scénarios Facteur 4 dans la construction de la décision publique ?», Revue Développement Durable et Territoires, Numéro Spécial sur le Facteur 4; Vol. 2, n° 1 | Mars 2011: <http://developpementdurable.revues.org/8802>

6- Imacim-R France appartient à la famille de modèles Imacim développée par le CIRED.

1 - Dynamique du modèle Imaclim-R



Imaclim-R étant un modèle en économie ouverte, il attribue par définition une nature exogène concernant l'évolution des prix des énergies fossiles, dont la valeur dans cet exercice est tirée du World Energy Outlook publié par l'Agence internationale de l'énergie (2011). En outre, l'une des limites d'Imaclim-R France consiste à ne calculer que les émissions de CO₂ induites par la consommation d'énergie, les autres gaz à effet de serre étant exclus.

Le processus d'élaboration de scénarios collaboratifs fait appel au modèle Imaclim-R France pour intégrer l'ensemble des apports des parties prenantes. On comprend alors que l'outil de modélisation influence considérablement la forme des échanges avec les parties prenantes, le format des réunions et la manière de traiter chaque sujet. Le fait qu'Imaclim-R repose sur une logique récursive exploitant des modules sectoriels dynamiques nous a incités à réunir successivement les experts puis les parties prenantes d'un même secteur pour approfondir le débat surtout là où la décarbonisation aboutit à une transformation structurelle du secteur considéré. Une fois que l'intégralité des contributions est entrée dans le modèle, un séminaire transversal a été organisé pour permettre une meilleure compréhension des interactions entre l'ensemble des secteurs. Le sous-chapitre suivant décrit ce processus en détail. *

III. Description de la démarche de conception des scénarios collaboratifs

Le processus de conception de scénarios collaboratifs est divisé en plusieurs étapes :

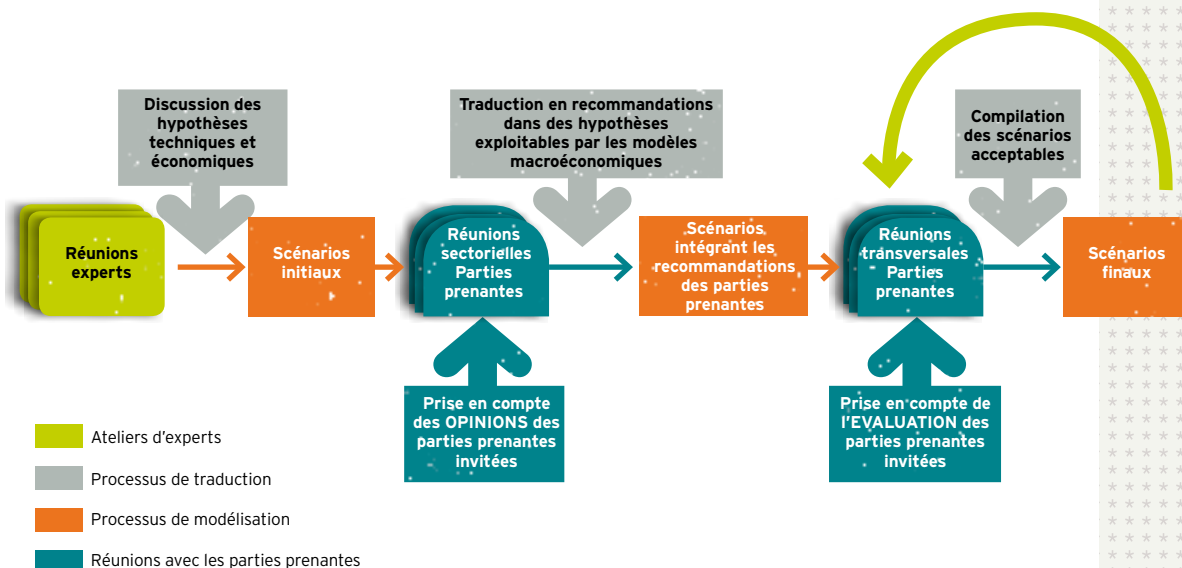
1. Organisation d'ateliers d'experts.
2. Identification et choix des parties prenantes nationales.
3. Organisation d'ateliers sectoriels des parties prenantes.
4. Transposition des contributions des parties prenantes dans le paramétrage de la modélisation.
5. Organisation d'un séminaire intersectoriel.

1. Organisation d'ateliers d'experts

Pour évaluer le degré de réalisme économique et technique de l'outil de modélisation des réunions d'experts ont été organisées pour corriger et actualiser les hypothèses exogènes (coûts potentiels, investissements, courbes d'apprentissage, etc.). Ces réunions ont réuni des experts dans trois secteurs clefs : résidentiel, transport, électricité. La dynamique intrinsèque du modèle (investissements dans le secteur électrique ou mutation du secteur résidentiel) a été également discutée.



2 - Processus de création des scénarios collaboratifs



2. Identification des parties prenantes nationales

Pour sélectionner les parties prenantes jouant un rôle essentiel dans les secteurs énergétiques considérés (habitat, transport, électricité), nous avons utilisé une grille « influence-intérêt ». Cette approche permet de dresser le paysage des acteurs sectoriels et d'identifier les principales parties prenantes pour établir une liste de parties prenantes sélectionnées.

Les grilles « influence-intérêt » facilitent l'identification des parties prenantes à consulter dans l'analyse d'un problème ou d'un sujet en les classant par le degré de leur intérêt et influence. Les parties prenantes sélectionnées dans le cadre de ce projet se retrouvent prioritairement dans les cases de la partie droite du carré : « Acteurs clefs » et « Acteurs intéressés ». L'appréciation du degré d'intérêt et d'influence de chaque acteur étant personnelle, les

entretiens ont été renouvelés avec au moins trois experts du secteur pour en recouper les résultats.

Organisation des entretiens :

- I. Discussion sur les principaux enjeux du secteur.
- II. Elaboration d'une liste des acteurs selon différents typologies (entreprises privées, ministres, associations, syndicats, banques, etc.).
- III. Cartographie des acteurs identifiés sur la grille influence-intérêt.

3. Organisation d'ateliers sectoriels des parties prenantes

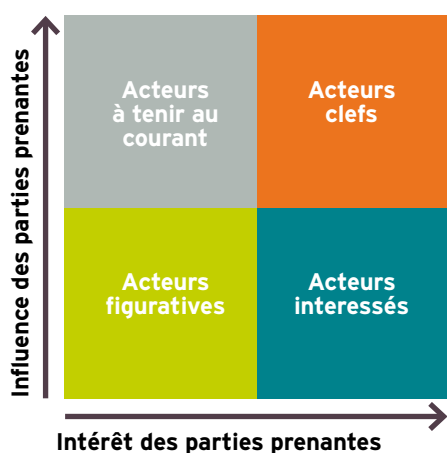
Pour bâtir des scénarios affichant une « acceptation » élevée, l'équipe du projet ENCI-LowCarb a invité des parties prenantes nationales à des réunions sectorielles (transport, habitat, électricité). À l'occasion de ces réunions, chacun d'eux a pu exprimer sa vision de l'évolution des choix technologiques, des mesures politiques et des incitations économiques jugés nécessaires et acceptables pour réduire les émissions de CO₂. Afin de recueillir un maximum d'informations, les réunions ont été enregistrées, l'ensemble des parties prenantes a répondu à des questionnaires et des comptes-rendus détaillés ont été rédigés. Le nombre de participants a été limité à une quinzaine pour approfondir les discussions.

Les réunions se sont déroulées en trois phases :

1. Présentation de la méthodologie du projet.
2. Introduction aux sujets propres au secteur examiné.
3. Discussion avec les parties prenantes invitées sur des sujets sectoriels.

Un questionnaire a été rédigé pour chacun des sujets abordés au cours de la troisième phase.

3 - « Grilles influence-intérêt »



7- Bryson, J.
(1995) *Strategic
Planning for Public
and Nonprofit
Organizations*,
San Francisco,
CA: Jossey- Bass

Exemple de traduction: la question de la rénovation du parc résidentiel

Parmi les obstacles majeurs à la rénovation du bâti résidentiel, les parties prenantes ont identifié l'aversion persistante des propriétaires à la réhabilitation de leur maison ou de leur appartement, même en présence d'incitations financières. Le phénomène est encore plus marqué pour les propriétaires bailleurs. Il est vrai que l'accès des propriétaires aux incitations fiscales et aux subventions est conditionné au versement d'un apport financier personnel important, le prêt à taux zéro exigeant lui aussi l'existence d'une garantie. Plusieurs solutions ont été recommandées par les parties prenantes pour faire évoluer la situation, telle la création d'un fond de rénovation obligatoire dans les copropriétés, ou d'un mécanisme de tiers-financement à long terme. L'impossibilité d'intégrer ces solutions d'une manière explicite dans l'outil de modélisation a imposé une traduction implicite de ces mesures en données utilisables par le modèle: à titre d'exemple, il est désormais possible, avec l'outil Imacsim-R, de modifier le degré d'aversion au risque des différents agents (propriétaires locataires, propriétaires non locataires, etc.).

Si l'obligation de rénovation est encore loin de faire l'unanimité chez les parties prenantes, une minorité non négligeable s'y déclare favorable. Dans tous les cas, force est de reconnaître que son entrée en vigueur renforcerait la mutation structurelle du secteur résidentiel. L'impact non négligeable de cette mesure nous a poussés à l'inclure dans le scénario plus ambitieux présenté dans le chapitre 4 de cette publication.



Les scénarios énergétiques modélisés exploitent les réponses données par les parties prenantes.

4. Transposition de la contribution des parties prenantes en paramètres de modélisation

Entre l'évaluation des contributions des parties prenantes et l'exercice de modélisation proprement dit s'intercale une étape cruciale: l'incorporation du point de vue des parties prenantes aux paramètres du modèle.

Cela signifie que les informations réunies lors des ateliers sectoriels ont été « traduites » par l'équipe de projet en paramètres de modélisation pour produire le scénario jugé acceptable par les parties prenantes. Les points de désaccord n'ont pas été tranchés et ont donné lieu au développement de plusieurs variantes de scénario.

5. Organisation d'une réunion intersectorielle

Pour dépasser l'approche sectorielle de la première série de réunions entre parties prenantes une réunion intersectorielle a été organisée, motivée par la nécessité de surmonter la distinction artificielle des sujets qui concernent différents secteurs. Il serait en effet difficilement justifiable de négliger les interactions existantes entre les choix de modes de transport et d'habitat lors du traitement de sujets tels que « l'étalement urbain », ou de questions se rapportant à l'électricité et au logement, comme celle du « chauffage électrique ». La décomposition du système énergétique en sous-secteurs au début de l'exercice s'imposait néanmoins pour structurer des visions et des mesures politiques.

Le premier objectif de la réunion transversale était de recueillir les réactions des participants sur le « scénario acceptable ». Après quoi, les retours ont été incorporés au modèle. Les divergences nées de l'évaluation des conclusions des premières réunions ont été exprimées sous la forme de variantes.

Le bilan de l'analyse fait apparaître que le pourcentage de réduction des émissions de CO₂ découlant des mesures politiques jugées acceptables par au moins la moitié des parties prenantes (68%) est inférieur à la réduction préconisée par les recommandations du GIEC et à l'objectif fixé par la France à l'horizon 2050 (diminution de 75% par rapport à 1990).

Dans le cadre du projet ENCI-LowCarb, nous avons décidé de présenter de manière transparente un éventail de mesures supplémentaires (chapitre 4) jugées non acceptables par la majorité des parties prenantes, mais indispensables à la poursuite d'objectifs climatiques plus ambitieux. Ces mesures mériteraient d'être examinées en détail par les acteurs de la sphère politique.★

Le scénario énergétique sobre en carbone « acceptable » pour la France

3



Introduction

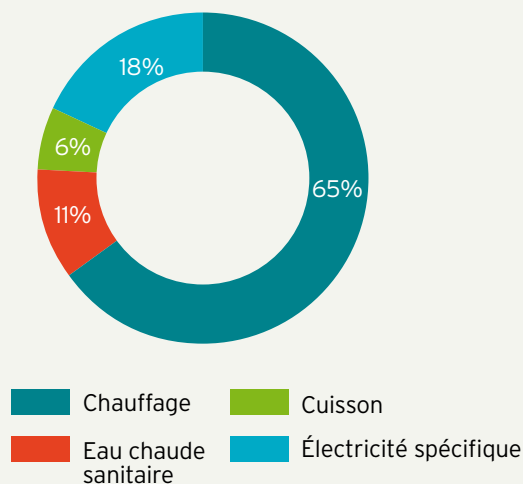
Le scénario détaillé dans les pages suivantes repose sur l'approche collaborative décrite à la partie 2. Les variables techniques, économiques et politiques ayant servi à son élaboration ont été directement définies par les parties prenantes en collaboration avec l'équipe de modélisation.

La raison d'être du projet est d'évaluer « l'acceptabilité des parties prenantes », et non « l'acceptabilité sociale » au sens large : cette notion, qui dépasse les limites du projet et englobe par exemple l'« acceptabilité locale », aurait nécessité la constitution d'un échantillon autrement plus large de participants, voire la consultation de citoyens.

Le scénario développé et présenté ici repose sur un groupe de mesures politiques et de technologies jugées « acceptables » par la majorité des parties prenantes consultées. Les sous-chapitres suivants traitent des composantes sectorielles du scénario (résidentiel, transport, industrie et tertiaire) aussi bien que des impacts macroéconomiques. Ce chapitre s'achève sur une analyse des déterminants des réductions d'émissions de ce scénario et la conclusion met en perspective l'ambition de ces réductions d'émissions et leur périmètre.

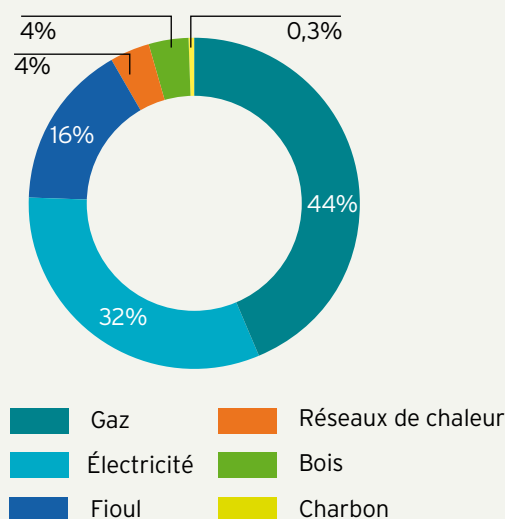
Secteur résidentiel

4 - Consommation d'énergie finale du secteur résidentiel (2010)



Le gaz et l'électricité fournissent 76% des besoins du parc immobilier et arrivent donc en tête des sources d'énergie pour le chauffage. Le fioul et le bois sont préférentiellement utilisés dans l'habitat individuel, tandis que le chauffage urbain alimente presque exclusivement les immeubles d'habitation.

5 - Mix énergétique du chauffage dans le secteur résidentiel énergie finale (2010)



En France, le parc résidentiel se compose de 32,6 millions de logements, dont 6% sont vacants et 10% des résidences secondaires. 57% sont des maisons individuelles et 43% des immeubles d'habitations. Près de 60% du parc immobilier total a été construit avant l'entrée en vigueur de la première réglementation thermique en 1975.

I. État des lieux

En 2009, le secteur résidentiel représentait 16% des émissions totales de CO₂. Si ce pourcentage est resté pratiquement stable depuis 1990, les émissions du secteur se sont toutefois accrues d'environ 15% en termes absolus. Ce chiffre passe à 22% si l'on y inclut les émissions issues de la production d'électricité et du chauffage urbain (généralement comptabilisées sous la rubrique « industries productrices d'énergie »).

En 2010, ce même secteur était responsable de 30% de la consommation d'énergie finale, ce qui représente une progression voisine de 25% depuis 1973 (l'évolution est négligeable depuis 2000). Avec 65% de la consommation d'énergie finale, le chauffage représentait le premier service consommateur d'énergie de ce secteur.

Sur l'ensemble des logements, environ 30% correspondent à l'étiquette énergie D. Moins de 1% satisfait aux critères de la classe A et à peine plus de 3% à ceux de la classe B.

L'ancienneté du parc immobilier existant s'explique par le faible rythme des démolitions (environ 20 000

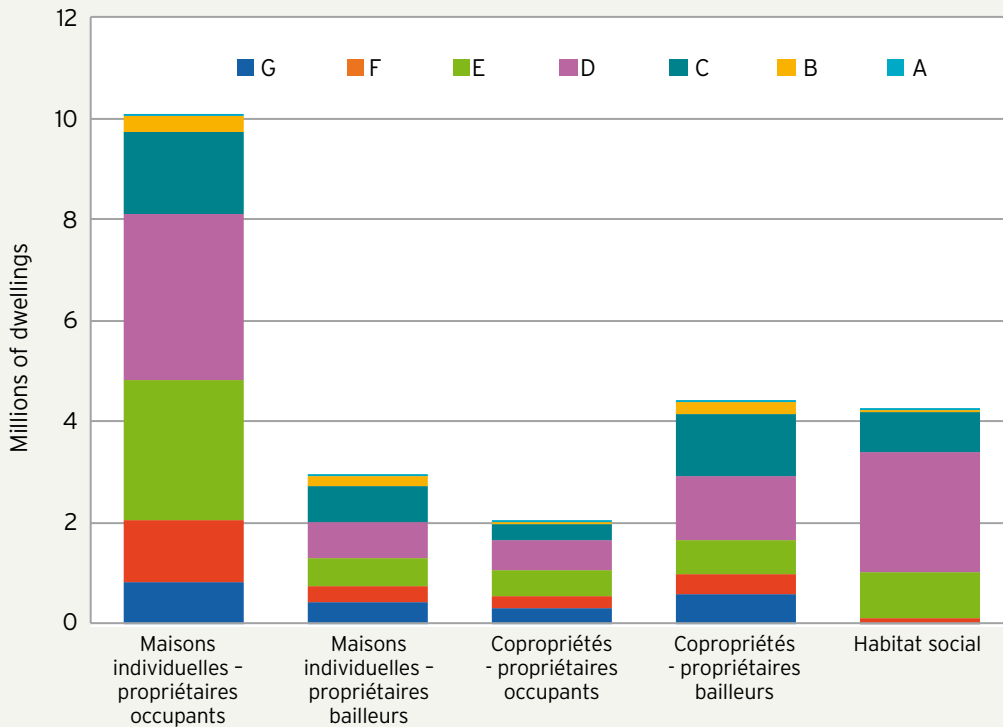
à 30 000 logements par an). Dans ces conditions, les constructions neuves contribuent principalement à nourrir la croissance du parc sans pour autant permettre une amélioration significative de l'efficacité énergétique du parc dans son ensemble. L'enjeu principal de toute politique climatique et énergétique future, aussi bien à l'échelle du secteur qu'à l'échelle nationale, sera d'améliorer les performances des bâtiments et d'accélérer leur rythme de réhabilitation. À l'heure actuelle, les deux tiers des bâtiments qui existeront en 2050 sont en effet déjà construits !

Objectifs climatiques et énergétiques :

La législation française fixe plusieurs objectifs au secteur résidentiel :

- * La réduction de 38% de la consommation d'énergie primaire d'ici 2020.
- * La baisse de 40% de la consommation d'énergie primaire des bâtiments publics d'ici 2020.
- * La rénovation de tous les logements sociaux affichant une consommation d'énergie primaire supérieure à 230 kWh/m²/an d'ici 2020.
- * À compter de 2013, un rythme de rénovation annuel de 400 000 logements. ★

6 - Parc immobilier (résidences principales) selon le type de bâtiment et l'étiquette énergie en 2007



II. Représentation du secteur résidentiel dans Imaclim-R

1. Représentation technologique du parc immobilier

Imaclim-R décrit la dynamique du secteur des bâtiments résidentiels en France au travers de la construction de bâtiments neufs et de la rénovation des bâtiments existants. Seules les résidences principales sont considérées, et les appareils de chauffage d'appoint ne sont pas pris en compte. Le parc est ventilé par vecteur énergétique (électricité, gaz, fioul, bois, charbon), par classe énergétique au sens de l'étiquette énergie pour les bâtiments (de la classe A, équivalente à une consommation d'énergie primaire de 50 kWh/m²/an, à la classe G, synonyme d'une consommation d'énergie primaire supérieure à 450 kWh/m²/an), et par type de propriétaires et de logement (propriétaires occupants ou bailleurs de maisons individuelles, propriétaires occupants ou bailleurs de logements collectifs et logements sociaux). Aucune technologie explicite n'est représentée mais des actions implicites sur l'enveloppe (isolation, double vitrage) et sur les systèmes de chauffage font évoluer le niveau de performance thermique. Chaque année, l'effet

conjugué de la croissance démographique, de l'augmentation moyenne de la surface par habitant et des démolitions justifie la demande de nouvelles mises en chantier. Les bâtiments construits à partir de 2010 répondent à la législation présente et future selon 3 paliers. Jusqu'en 2011, les bâtiments neufs répondent à la réglementation thermique de 2005 (consommation d'énergie primaire comprise entre 250 et 120 kWh/m²/an, selon les conditions climatiques locales). Entre 2012 et 2019, les bâtiments neufs sont à basse consommation (BBC) en vertu de la réglementation antérieure à 2012 (50 kWh/m²/an). Enfin, à partir de 2020, les bâtiments neufs sont à énergie positive (BEPOS), c'est-à-dire qu'ils produisent autant ou plus d'énergie qu'ils n'en consomment grâce aux énergies renouvelables et à leur grande efficacité énergétique.

2. Les facteurs des économies d'énergie

Dans les bâtiments existants, les gains d'efficacité énergétique découlent d'une part, des investissements visant à améliorer leur étiquette énergie (ex. passage de la classe G à la classe F, ... jusqu'à A; de F et E, ... jusqu'à A), et d'autre part, de la substitution des combustibles. Ces transitions dépendent du coût du cycle de vie de chaque option, notam-

ment du coût d'investissement et des dépenses énergétiques actualisées sur leur durée de vie. Des taux d'actualisation spécifiques à chacun des types de propriétaires des logements (propriétaires occupants ou bailleur des logements individuels ou collectifs ou des logements sociaux) permettent de refléter le « dilemme propriétaire-locataire », ainsi que la difficulté de mettre en œuvre une rénovation des logements dans des copropriétés. La nature imparfaite de l'information se traduit par la prise en compte de « coûts intangibles ». Ces derniers s'ajoutent aux coûts économiques lorsqu'un propriétaire prend la décision de rénover un logement. Cependant, ils ne correspondent pas à des coûts monétaires : ils permettent de représenter l'écart entre les choix technologiques observés et ceux qui auraient été effectués en présence d'une information parfaite, par l'estimation de la valeur monétaire dudit écart. Ce dernier se resserre avec le temps selon une fonction décroissante des coûts intangibles du fait de l'accumulation des connaissances, liée à l'accélération de la diffusion de l'information ou à l'« effet de voisinage ». Dans l'ensemble, l'amélioration de l'efficacité énergétique (à savoir, l'augmentation de la quantité et/ou de la qualité des réhabilitations) procède d'une évolution de la rentabilité relative des différentes options de rénovation, induite par l'accroissement du prix de l'énergie et soutenue par la diminution des coûts de la réhabilitation. ★

III. Mesures acceptables dans le secteur résidentiel

1. Crédit d'impôts

Les dépenses améliorant l'efficacité énergétique dans le résidentiel (double vitrage, isolation, chaudières à haut rendement ou pompes à chaleur), sont éligibles aux crédits d'impôt sur le revenu, à raison d'un taux variant entre 15 et 50% du coût des investissements. Une augmentation du taux moyen et un élargissement des critères d'éligibilité par rapport au dispositif de subvention antérieur sont représentés pour la période 2009-2050 en retenant un taux de crédit uniforme égal à 30% de l'investissement. Le crédit d'impôt applicable aux opérations de rénovation thermique est plafonné à 8 000€ par logement.

2. Prêt à taux zéro pour la rénovation thermique (Eco-PTZ)

Il s'applique aux actions de rénovation thermique moyennant un plafond de 30 000€ par logement. Le prêt s'étale sur une durée voisine de 10 ans pour une maison individuelle et sur 15 ans pour un logement social ou collectif.

3. Tarification progressive

Cette mesure vise à réduire la consommation d'électricité en augmentant le tarif de l'électricité au-

delà d'un certain seuil de consommation. Dans le scénario, le principe s'applique à l'ensemble de la consommation électrique des ménages et prévoit une élévation de tarif dès que la consommation excède 60 kWh/m². Le coût du kilowattheure supplémentaire augmente de 5% à partir de 2014 en cas de dépassement de cette limite, puis de 10% à compter de 2030.

4. Biogaz

Cette source d'énergie connaît une pénétration graduelle entre 2012 et 2050, pour atteindre 17% de la consommation de gaz à l'horizon 2050.

5. Réglementation thermique des bâtiments neufs

Dès 2012, les nouvelles constructions doivent se soumettre au label BBC avec un niveau maximal de consommation d'énergie primaire de 50 kWh/m²/an. Après 2020, c'est le label BEPOS qui s'applique.

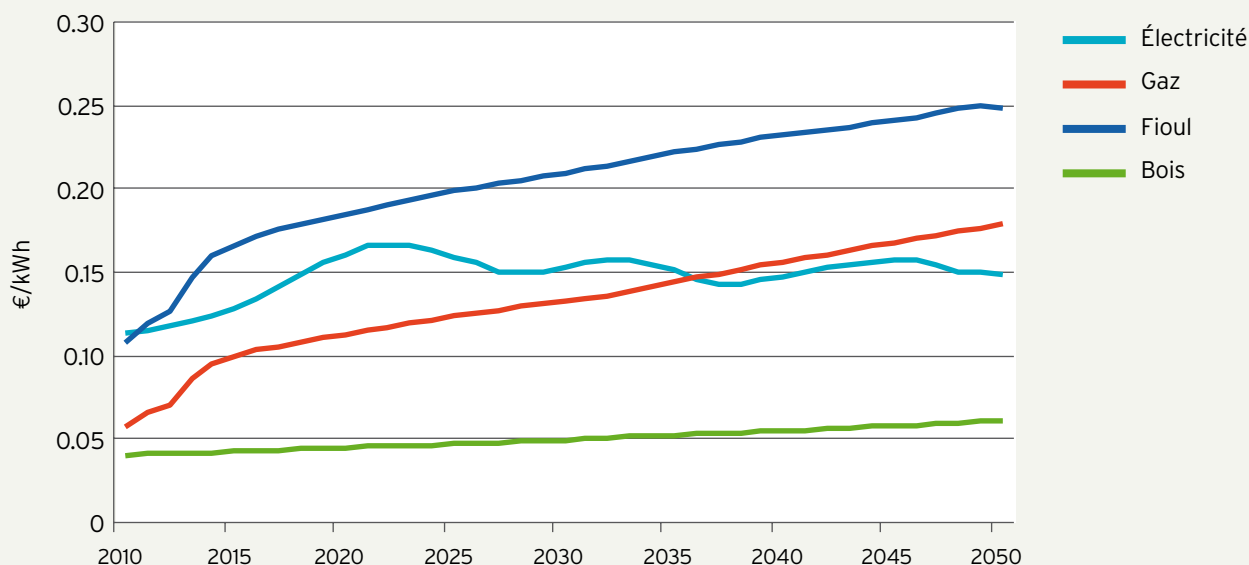
6. Taxe carbone

Cet instrument économique est intégré au scénario dès 2012 à une valeur de 32€/tCO₂. La taxe subit par la suite une élévation graduelle : 56€/tCO₂ en 2020, 100€/tCO₂ en 2030, 200€/tCO₂ en 2040, puis 300€/tCO₂ en 2050. Dans ce scénario, les recettes tirées de l'instauration de la taxe carbone sont reversées aux ménages sur une base forfaitaire.

Parmi les obstacles majeurs à la rénovation du bâti résidentiel, les parties prenantes ont mis en évidence l'aversion persistante des propriétaires à la réhabilitation de leur maison ou de leur appartement, même en présence d'incitations financières. Le phénomène est encore plus marqué pour les propriétaires bailleurs. L'accès des propriétaires aux incitations fiscales et aux subventions est en effet conditionné à un apport financier personnel important, le prêt à taux zéro nécessitant lui aussi souvent des garanties. Plusieurs solutions ont été recommandées par les parties prenantes pour faire évoluer cette situation : la création d'un fonds de rénovation obligatoire dans les copropriétés, ou le recours à des tiers-financeurs. L'impossibilité d'intégrer ces solutions une à une dans l'outil de modélisation a imposé la mise au point de stratégies de modélisation alternatives : à titre d'exemple, ces mesures sont représentées via la modification du degré d'aversion au risque des différents agents (propriétaires, locataires, etc.)

Si l'obligation de rénovation est encore loin de faire l'unanimité chez les parties prenantes, une minorité non négligeable s'y déclare favorable. Dans tous les cas, force est de reconnaître que son entrée en vigueur renforcerait la mutation structurelle du secteur résidentiel. L'impact non négligeable de cette mesure nous a poussés à l'inclure dans le scénario plus ambitieux présenté dans le chapitre 4 de cette publication. ★

7 - Évolution des prix à la consommation de l'énergie finale dans le secteur résidentiel



IV. Évolution de la consommation d'énergie du secteur résidentiel

Les gains d'efficacité énergétique s'opèrent au travers de la modernisation des logements les moins performants et de la substitution des sources d'énergie. Les résultats du modèle montrent au cours de la période 2010-2050 la disparition progressive des bâtiments appartenant aux classes d'énergie les plus basses (G à D), et la généralisation des logements de classe C, sous l'effet des incitations économiques et des effets d'apprentissage diminuant les coûts d'investissements, tous deux à l'origine d'une baisse des coûts de rénovation. Trois quarts des rénovations en 2050 atteignent les exigences de la classe C. En revanche, la place réservée aux classes B et A dans les rénovations est marginale : ces transitions demeurent en effet trop onéreuses pour les ménages à l'égard du niveau d'incitations économiques et aux prix de l'énergie retenus dans le scénario. L'existence d'un fonds de travaux obligatoire pour la réhabilitation des bâtiments détenus en copropriété, de même que l'instauration de mécanismes de tiers-financement, ne suffisent pas à atténuer suffisamment l'aversion au risque des propriétaires de maisons individuelles et de logements en copropriétés. Le rythme de transition est bien supérieur dans le logement social. Ceci est cohérent avec la législation française imposant la remise à neuf de tous les logements sociaux en vue d'abaisser à 150 kWh/m²/an la consommation énergétique des logements consommant actuellement plus de 230 kWh/m²/an d'ici 2020⁸. Ajoutons que cette fraction du parc immobilier est aussi la plus structurée et n'est donc pas confrontée au même défi que les copropriétés,

pour lesquelles la complexité de la prise de décision ralentit fortement les avancées.

Les Graphiques sur les pages 14 et 15 représentent les transitions des classes énergétiques et l'évolution du mix énergétique du parc immobilier existant et neuf respectivement dans les maisons individuelles, les logements sociaux, les copropriétés et les constructions neuves. Quelle que soit la catégorie de bâtiments existants, le passage à une classe d'énergie supérieure s'accompagne d'une substitution massive du gaz et du fioul par l'électricité pour le chauffage, conséquence du fort taux de pénétration des pompes à chaleur (7 millions en 2050) dans le scénario. Cette substitution est induite par l'évolution des prix relatifs des différentes énergies finales.

À la fin de la période, la quantité d'énergie finale consommée par mètre carré pour le chauffage est divisée par 3,2, la quantité d'énergie finale totale consommée pour le chauffage par 2,4, et la quantité d'énergie primaire totale consommée pour le chauffage par 1,8.

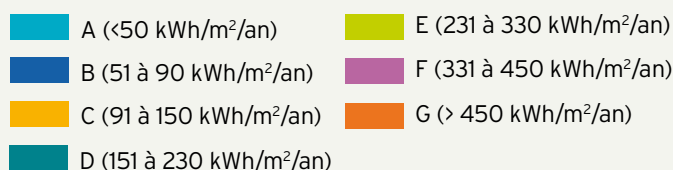
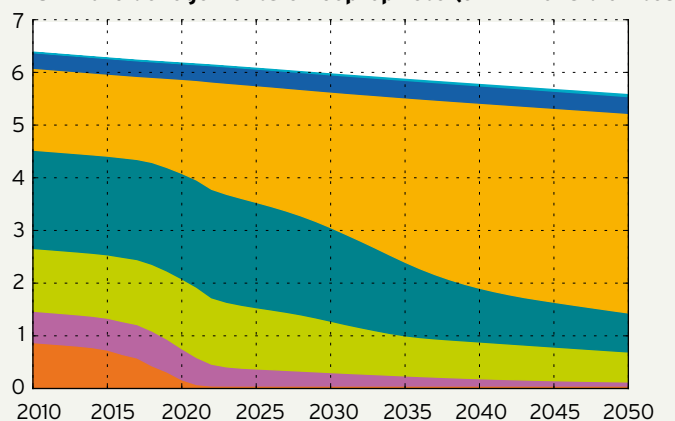
Sur la base d'une fonction comportementale, le modèle calcule⁹ l'effet rebond (c'est-à-dire l'écart entre la consommation d'énergie théorique et la consommation réelle) entraîné par les économies d'énergie en cas de rénovation thermique ou de construction de bâtiments neufs performants. Dans ce scénario, le niveau élevé du prix des énergies fossiles et les mesures fiscales supplémentaires (tarification progressive de l'électricité, instauration d'une taxe carbone sur le fioul et le gaz) limitent fortement l'effet de rebond : celui-ci est négatif jusqu'en 2034 et est au plus égal à 4% en 2042.

8- Ces chiffres expriment la quantité d'énergie primaire consommée.

9- Le modèle est bâti sur une relation logistique entre le « facteur de service » (exprimant l'écart entre les consommations d'énergie effective et conventionnelle) et les dépenses annuelles de chauffage, comme indicateur du prix du service de chauffage. L'hypothèse de départ est de considérer que plus le niveau de performance du logement est élevé, plus le facteur de service l'est : on assiste alors à un relâchement de la sobriété. Inversement, plus le prix de l'énergie est élevé, plus faible est le facteur de service, ce qui renforce la sobriété. Les investissements permettant de faire passer un logement à une classe d'efficacité supérieure (p. ex., de la classe F à la classe C) se traduisent par une élévation du facteur de service, et induisent un effet de rebond. De même, le remplacement d'un vecteur énergétique par un autre moins onéreux (par exemple, substitution du bois au fioul) mais appartenant à la même classe s'accompagne d'une augmentation du facteur de service.

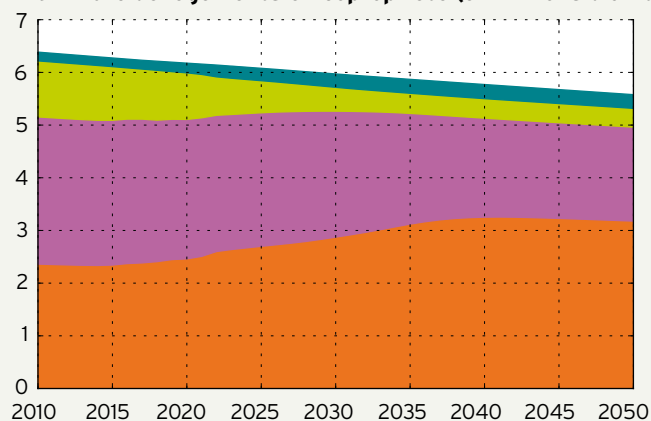
ÉTIQUETTES ÉNERGIE

8 - Parc de logements en copropriété (en millions d'unités)

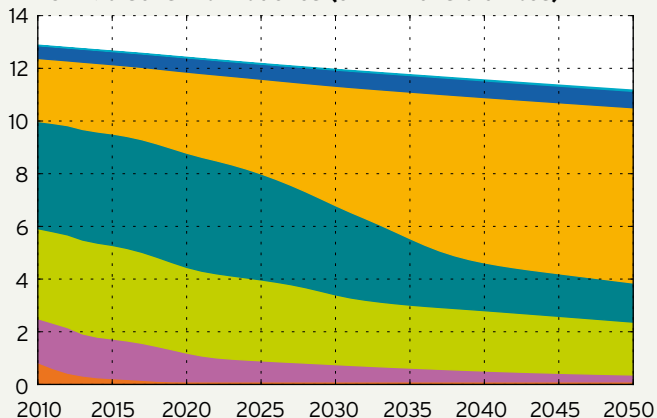


MIX ÉNERGETIQUE

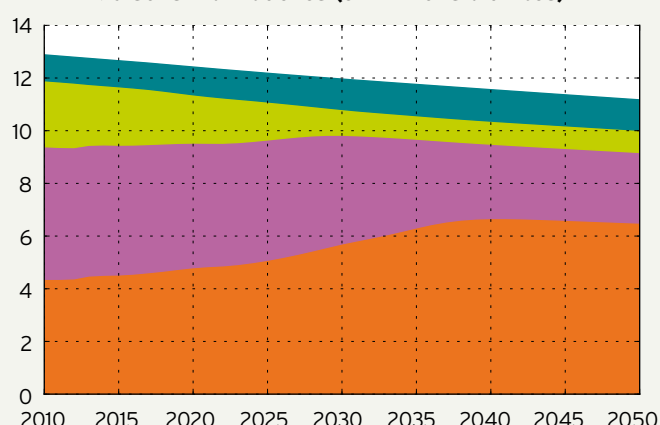
9 - Parc de logements en copropriété (en millions d'unités)



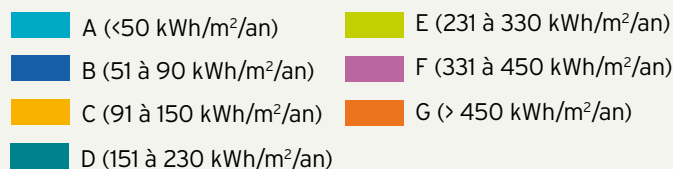
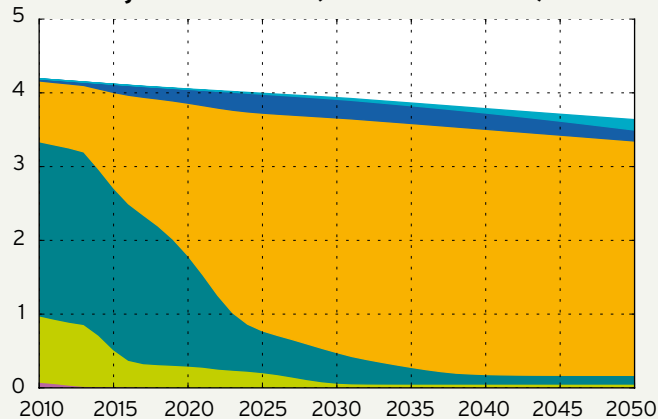
10 - Maisons individuelles (en millions d'unités)



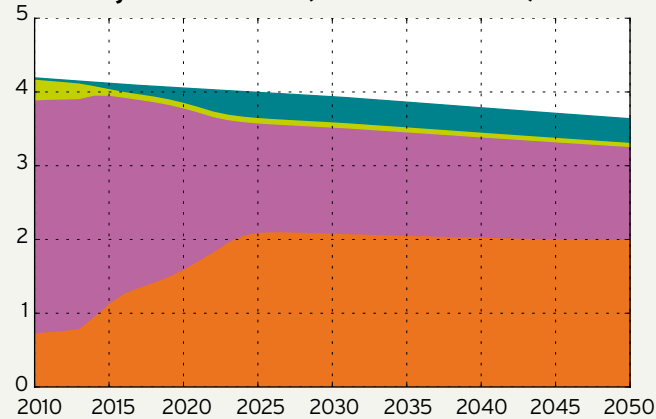
11 - Maisons individuelles (en millions d'unités)



12 - Logements sociaux (en millions d'unités)

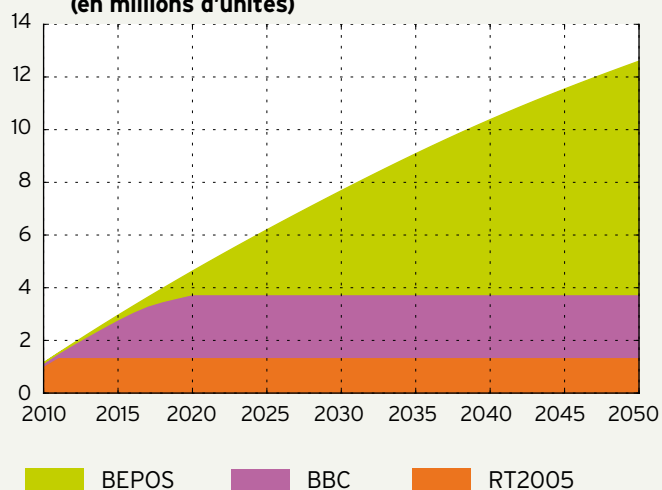


13 - Logements sociaux (en millions d'unités)



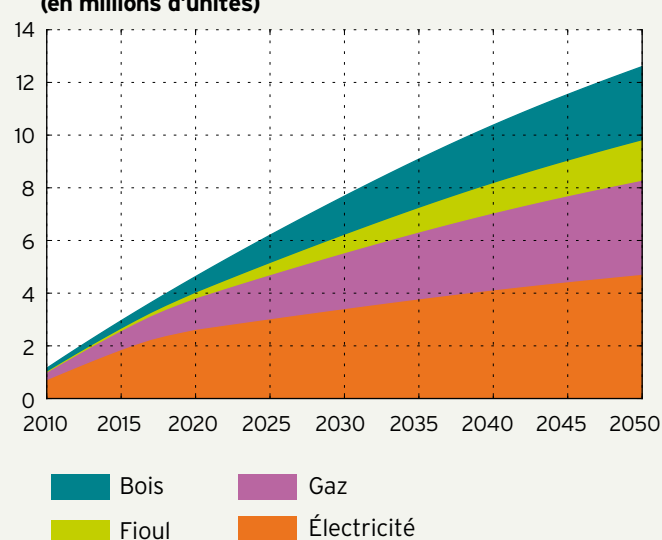
ÉTIQUETTES ÉNERGIE

14 - Parc de logements construit après 2007
(en millions d'unités)

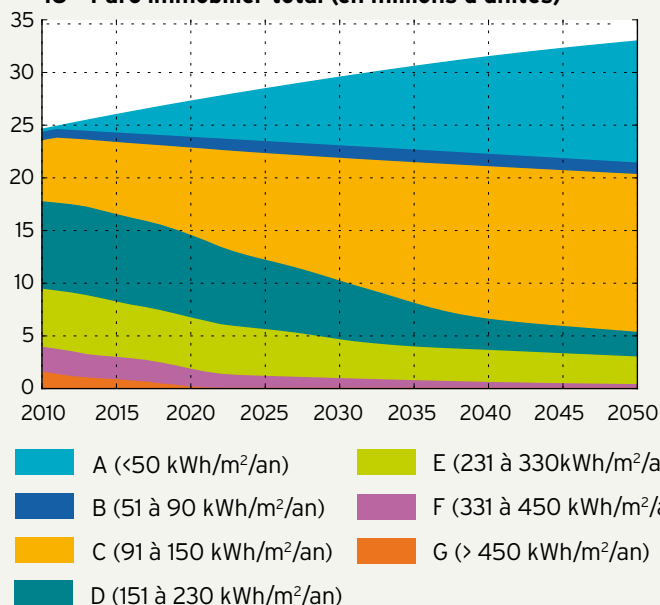


MIX ÉNERGETIQUE

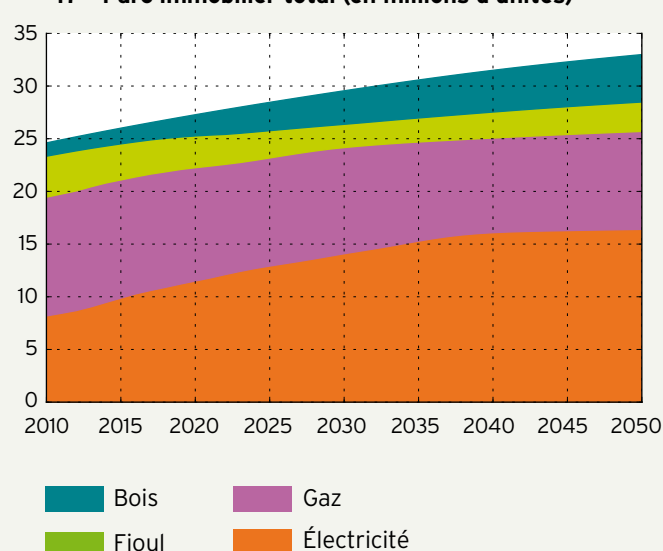
15 - Parc de logements construit après 2007
(en millions d'unités)



16 - Parc immobilier total (en millions d'unités)

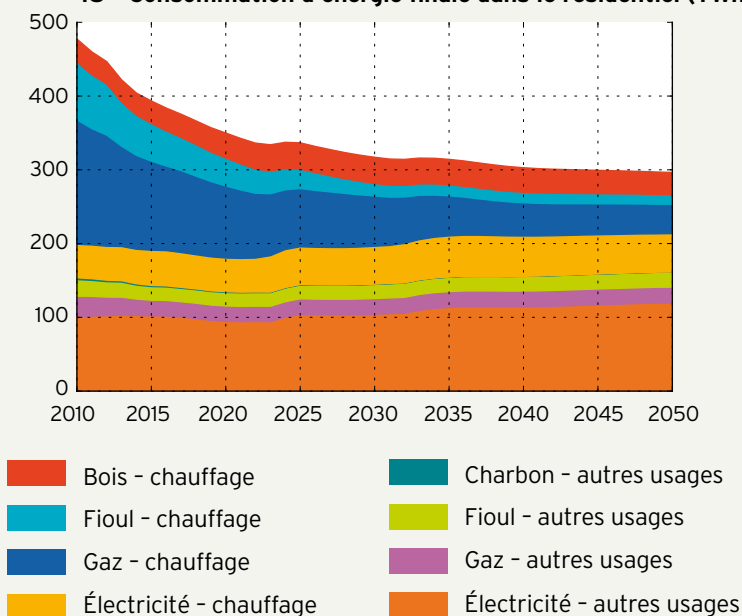


17 - Parc immobilier total (en millions d'unités)

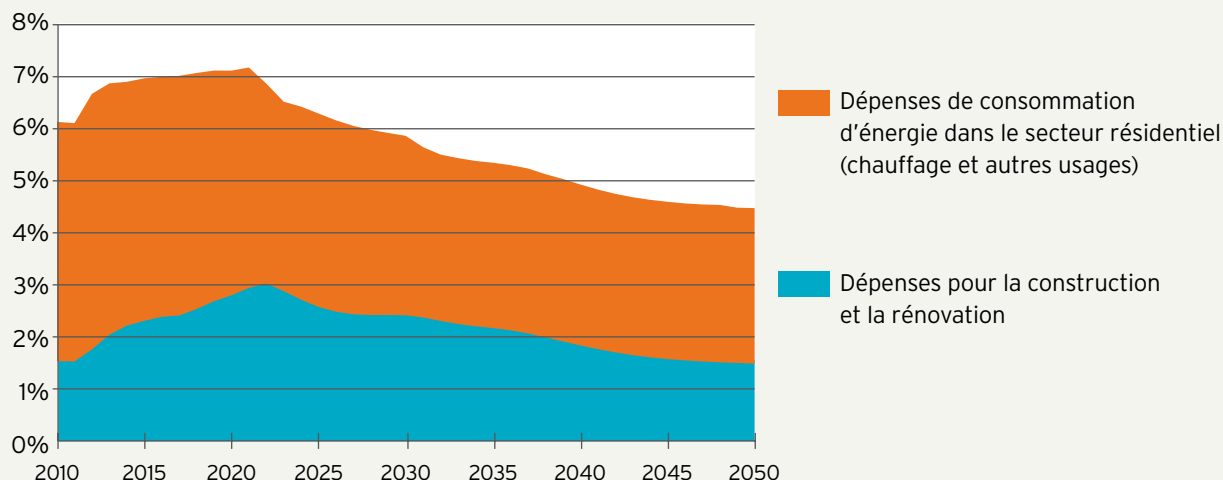


CONSOMMATION

18 - Consommation d'énergie finale dans le résidentiel (TWh)



19 - Part du budget des ménages affectée au logement



10- La consommation électrique spécifique renvoie à la consommation d'électricité liée à d'autres usages résidentiels, majoritairement imputable aux appareils électriques (chaudières d'appoint, notamment).

S'agissant des usages énergétiques autres que le chauffage principal des résidences, la proportion respective du gaz et du fioul (essentiellement destinés à la cuisine et aux appareils de chauffage d'appoint) reste stable. La consommation électrique spécifique¹⁰ s'inscrit quant à elle en légère hausse à l'échéance 2050 (+24% par rapport à 2010). Cela s'explique par les progrès réalisés en matière d'efficacité énergétique (poursuite de la tendance actuellement à l'œuvre, induite par une augmentation de 40% des prix de l'électricité entre 2010 et 2020), qui font plus que compenser le développement de nouveaux appareils électriques (principalement multimédia) et la croissance démographique (+15%).

Globalement, la quantité d'énergie primaire consommée par habitant pour le chauffage et les autres usages est divisée par 2, tandis que la quantité d'énergie finale totale diminue de 37% entre 2010 et 2050. Les émissions de CO₂ du secteur résidentiel (à l'exclusion des émissions générées par la production d'électricité, qui relèvent du secteur électrique) déclinent de 75% entre 2010 et 2050. ★

V. Coûts des investissements et des politiques pour le secteur résidentiel

Les subventions gouvernementales allouées au titre de la transformation du parc de bâtiments résidentiels diminuent à mesure que le scénario progresse. Les ménages supportent la part la plus importante des coûts entraînés par la réhabilitation du secteur et la construction de logements énergétiquement performants.

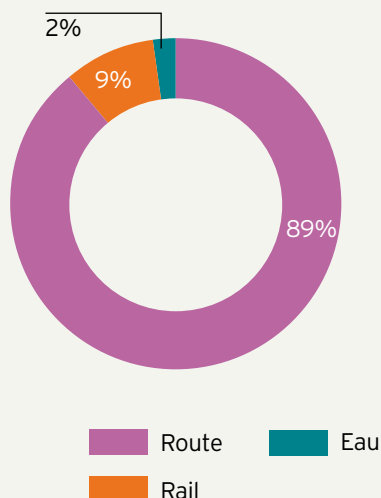
Au cours du scénario, les dépenses affectées par les ménages à la consommation d'énergie dans leur logement, à la rénovation et à la construction de logements résidentiels passent de 6% à 4,5% de leur budget total. Les dépenses d'énergie culminent en 2020. Les mesures d'efficacité énergétique réduisent la consommation d'énergie et par là même la facture énergétique des ménages.

Le pic des charges de construction et de rénovation est quant à lui atteint en 2022, comme le laissent prévoir le processus de transformation du parc résidentiel et les investissements nécessaires à la conversion en classe D du bâti en classe C. ★

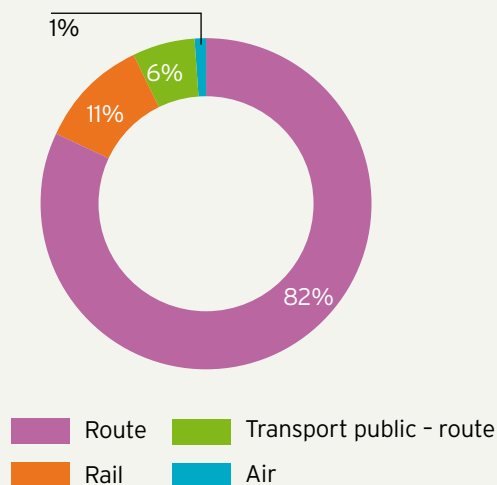
	2020	2030	2040	2050
Coût des incitations du gouvernement (en milliards d'€)				
Crédit d'impôts	- 3,3	- 2,5	- 0,8	- 0,5
Éco-prêt	- 3,3	- 1,9	- 0,6	- 0,4
Surcoût pour les ménages (en milliards d'€)				
Construction	- 9,5	- 9,4	- 7,7	- 6,3
Rénovation	- 14,9	- 10,3	- 3	- 1,8

Secteur transport

20 - Parts modales du transport de marchandises - 2010



21 - Parts modales du transport de passagers - 2010



I. État des lieux

En 2010, le secteur des transports était responsable de 33% des émissions de CO₂, soit une hausse de 16% par rapport à 1990. La première source d'émissions était constituée par la combustion de carburant pour le transport routier qui domine largement au sein du transport de personnes et de celui de marchandises.

Les trajets inférieurs à 50 km représentent une part écrasante des déplacements (89%), ceux supérieurs à 500 km ne totalisant que 1,3% des déplacements (mais 40% des distances parcourues). Notons que si la marche à pied ne représente qu'une infime proportion des distances parcourues (2% en tout), elle compte en revanche pour 22% de la mobilité locale (en nombre de trajets).

En 1990, 29% de la consommation finale d'énergie en France était attribuable aux transports; vingt ans plus tard, ce pourcentage est passé à 32%. En termes absolus, l'augmentation s'élève néanmoins à 25%.

L'analyse des investissements réalisés au cours des dernières décennies montre à quel point le transport routier a été favorisé: le réseau routier s'est en effet accru de quelque 5 300 km en 1980 à 11 054 km en 2008. Entre 1994 et 2008, le trafic autoroutier progressait d'environ 55%. Dans le même temps, le kilométrage du réseau ferroviaire à haute vitesse (TGV) passait seulement de 1 574 km à 1 847 km (même si, au cours de cette période, le nombre de personnes transportées bondissait de 146%).

Notons, pour clôturer cet état des lieux, que si le trafic de fret a décliné d'environ 15% sous l'effet

de la crise économique de 2009, il a tendance à revenir lentement à son niveau précédent.

Objectifs climatiques et énergétiques :

La législation française assigne plusieurs objectifs au secteur des transports :

- ★ La réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2020 par rapport à 2005 (année de référence).
- ★ L'instauration d'une écotaxe sur le transport de marchandises par poids lourds (prévue en 2011 mais retardée).
- ★ L'augmentation de 14% à 25% en 2022 du trafic assuré par les modes de transport autres que l'air et la route. L'objectif intermédiaire fixé pour 2012 correspondait à un accroissement de 25% par rapport à 2007, mais sa réalisation a été fortement compromise par la diminution de cette part modale depuis 2007.
- ★ La construction de 2 000 km de voies ferrées à grande vitesse d'ici 2020.
- ★ La baisse de 50% de la consommation d'énergie du transport aérien par personne et par kilomètre d'ici 2020. ★

11- Seul le trafic aérien intérieur est pris en compte par Imaclim-R France.

II. Représentation du secteur des transports dans Imaclim-R

Imaclim-R représente deux types de transport de nature différente du point de vue des circuits économiques :

d'un côté, ceux assimilables à des services de transport à titre onéreux pour le compte de personnes ou de secteurs d'activité définis (transport aérien¹¹, transport par voie d'eau, transport terrestre de marchandises, transport terrestre de personnes, par exemple taxis ou transports en commun), de l'autre, ceux accomplis par les individus eux-mêmes (automobiles individuelles et transports non motorisés).

12- Cela signifie qu'une augmentation du prix de 1% entraînera une baisse de la consommation de 0,4%.

Dans le cas du **transport de personnes**, l'existence d'une « **contrainte de budget temps** » plafonne la durée quotidienne consacrée aux transports. Ce choix méthodologique tire son origine de la règle empirique connue sous le nom de « loi de Zahavi », qui postule la constance du budget-temps de transport quotidien des ménages depuis de nombreuses décennies. La sélection du mode de transport dépend des prix relatifs et de la vitesse de déplacement procurée, elle-même fonction décroissante du taux d'utilisation de l'infrastructure correspondante : en effet, plus une infrastructure est utilisée (sa capacité étant limitée par les investissements qui lui ont donné naissance), plus le risque de congestion est élevé, donc plus la vitesse décroît. L'hypothèse de constance du budget-temps quotidien alimente par conséquent la préférence pour des modes alternatifs lorsqu'un réseau de transport se trouve au bord de la congestion. La capacité maximale de chaque infrastructure est à rapprocher de l'ampleur des investissements réalisés pour sa mise en place.

Le modèle exprime l'**évolution des infrastructures de transport** au moyen de décisions d'investissements publics et privés. Dans le scénario de référence, le développement des réseaux évolue ainsi parallèlement à la demande de transport modal, tiré soit par les dépenses gouvernementales allouées aux infrastructures, soit par les investissements des acteurs privés du secteur des transports. Les politiques climatiques au contraire se traduisent par la réaffectation d'une partie des investissements initialement consacrés à la construction de voies routières à l'extension des infrastructures des transports en commun.

L'**évolution du taux de motorisation** est liée à l'évolution du revenu des ménages et à la densité urbaine, tout en étant presque insensible aux fluctuations du prix du carburant. À l'opposé de cette tendance, les politiques climatiques, dans lesquels s'inscrivent les programmes d'urbanisme, sont à même de contribuer à une réduction du taux de motorisation à long terme.

L'**efficacité énergétique du parc d'automobiles individuelles** dépend des choix de consommation des ménages et du progrès technique. Le parc se divise lui-même en plusieurs segments en fonction de la date de mise en circulation et de la classe énergétique (motorisation conventionnelle regroupées en classes G à A, véhicules hybrides ou électriques). La représentation adoptée ici se base sur les caractéristiques des véhicules en termes de coûts, d'efficacité énergétique et de frais d'entretien fixes et variables.

L'**évolution des prix de l'énergie** est intégrée à celle des prix des services de transport de chaque secteur (par exemple, dans le prix du billet de train ou du ticket de bus), et, pour les transports individuels, dans le prix du carburant au moment de l'acquisition et de la consommation effective.

Les consommations d'énergie du transport de marchandises résultent des hypothèses suivantes concernant les progrès de l'efficacité énergétique :

- ★ Pour le transport aérien, la consommation de carburant diminue de 0,7% par an. Ce résultat reflète les améliorations apportées à la conception des avions afin d'en abaisser la consommation de kérosène, ainsi que les mesures de gestion du trafic destinées à accroître le taux d'occupation des sièges.

- ★ Pour le transport par voie d'eau, la consommation d'énergie par unité de marchandises transportées demeure inchangée.

- ★ Pour le transport terrestre de marchandises (route et rail), la consommation moyenne de carburant liquide dépend d'une élasticité-prix du carburant de -0,4¹² et les gains d'efficacité énergétique sont limités à 25% par rapport à 2010 au maximum. L'évolution de la consommation d'énergie dans ce secteur exprime simultanément les mutations technologiques, les reports modaux (notamment celui du fret terrestre sur le rail) et les modifications affectant les composantes structurelles du secteur, attribuables à l'évolution du poids relatif des matières acheminées dans chacun de ses sous-secteurs.

Dans Imacim-R, la demande de transport de marchandises résulte de l'agrégation de la demande de transport de marchandises de chaque secteur productif. Le volume de transport de fret est directement lié aux modes de consommation et à la structure de l'économie (économie orientée vers la production de services ou de biens industriels). En revanche, le volume de fret est peu sensible aux prix de l'énergie, les choix modaux étant davantage dictés par les possibilités logistiques et l'organisation de la chaîne d'approvisionnement. L'ampleur des incertitudes entourant la réaction des entreprises aux variations des prix de l'énergie sur le plan organisationnel et logistique nous a conduits à représenter ici ces paramètres et leur évolution par des variables exogènes.

Notons enfin que dans les scénarios de mitigation, les hypothèses concernant l'organisation spatiale aboutissent parfois à un découplage de la croissance économique et du volume de fret, et par là même à un recul de la demande de transport de marchandises. Les hypothèses portant sur le changement de mode de consommation et la structure de l'économie peuvent quant à elles conduire à une dématérialisation généralisée de la croissance économique, source d'une contraction de la demande de transport de marchandises. Cette dernière orientation n'est envisagée que dans les variantes du scénario (chapitre 4). ★

III. Mesures acceptables dans le secteur des transports

1. Transport urbain et local

Urbanisme. Les incitations économiques et la réglementation ont pour objectif de limiter la croissance de l'étalement urbain. En raison du phénomène d'inertie, ces mesures n'auront qu'un impact significatif qu'à compter de 2030 : l'étalement urbain poursuivra alors sa progression jusqu'en 2030, mais à un rythme plus lent. Au-delà, l'arrêt de l'étalement urbain entraînera une remontée de la densité urbaine.

Programme d'investissements dans les transports urbains. Le montant de ces programmes, qui verront notamment la mise en service de nouveaux bus et tramways, est doublée à partir de 2012 par rapport aux dernières années pour une période de 15 ans. La modernisation des voies ferrées est également intégrée dans ces investissements pour intensifier le trafic à l'échelle régionale et développer l'intermodalité. Là encore, l'effet de l'inertie temporelle est pris en compte dans le délai de construction des réseaux.

Télétravail. L'hypothèse formulée ici est de considérer que ce mode d'organisation professionnelle représente en moyenne un jour de travail sur dix, si l'on tient compte du fait que toutes les activités ne s'y prêtent pas.

Taux d'occupation des automobiles. Les incitations (encouragement des entreprises à la mise en œuvre de plans de déplacements entreprise, covoiturage) sont supposées faire passer le taux d'occupation des voitures en milieu urbain de 1,25 à 1,5.

2. Trajets de longues distances

Programme d'investissements ferroviaires. Le déplacement des investissements du transport routier vers le transport ferroviaire pendant 20 ans vise à garantir une modernisation suffisante des infrastructures existantes pour accroître la part de marché du rail au niveau régional ainsi que la construction de nouveaux réseaux à grande vitesse pour concurrencer le transport aérien. Les investissements dans les infrastructures routières se limitent au seul entretien des infrastructures existantes.

Taxe sur le kérosène. À partir de 2012, la consommation de kérosène pour le transport aérien sera soumise à une taxation, dont le montant est fixé à 400€/tep.

3. Automobiles individuelles et progrès technique

Bonus-malus. Cette mesure, axée sur la réduction des émissions des nouveaux véhicules, est prolongée jusqu'en 2050. Son calibrage vise à stimuler la pénétration des véhicules propres (classes A+, A et B) tout en garantissant chaque année l'équilibre financier du dispositif gouvernemental (résultat positif ou proche de zéro).

4. Transport de marchandises

Écoredevance poids lourds. Cette écotaxe frappant la consommation de carburant liquide des poids lourds entrera en vigueur en 2012. Ses recettes devraient rapporter 1,3 milliard d'€ au cours de cette année.

Logistique. Les politiques déployées pour accroître l'efficacité des chaînes d'approvisionnement des secteurs de la production et de la distribution réduisent le volume de transport pour chaque unité de consommation. En l'occurrence, elles sont censées induire une réduction des besoins de transport de marchandises égale à 1% par an dans tous les secteurs.

Infrastructures. Elles font l'objet d'un programme centré sur le développement d'alternatives au transport de marchandises par la route, grâce à l'amélioration de la chaîne d'approvisionnement du fret ferroviaire et à l'extension de ses capacités. Dans le modèle, cette évolution s'exprime par de nouveaux investissements gouvernementaux dans le secteur du fret. Le degré d'inertie étant jugé relativement élevé dans le secteur, nous nous en tenons à l'hypothèse exogène en vertu de laquelle la part du mode de transport de marchandises par voie ferrée n'atteint que 20% en 2030.

Taxe carbone. Cet instrument économique est intégré au scénario dès 2012 à une valeur de 32€/tCO₂. Elle subit par la suite une élévation graduelle : 56€/tCO₂ en 2020, 100€/tCO₂ en 2030, 200€/tCO₂ en 2040, puis 300€/tCO₂ en 2050. Dans ce scénario, les recettes tirées de l'instauration de la taxe carbone sont reversées aux ménages sur une base forfaitaire. ★

IV. Évolution de la consommation d'énergie du secteur des transports

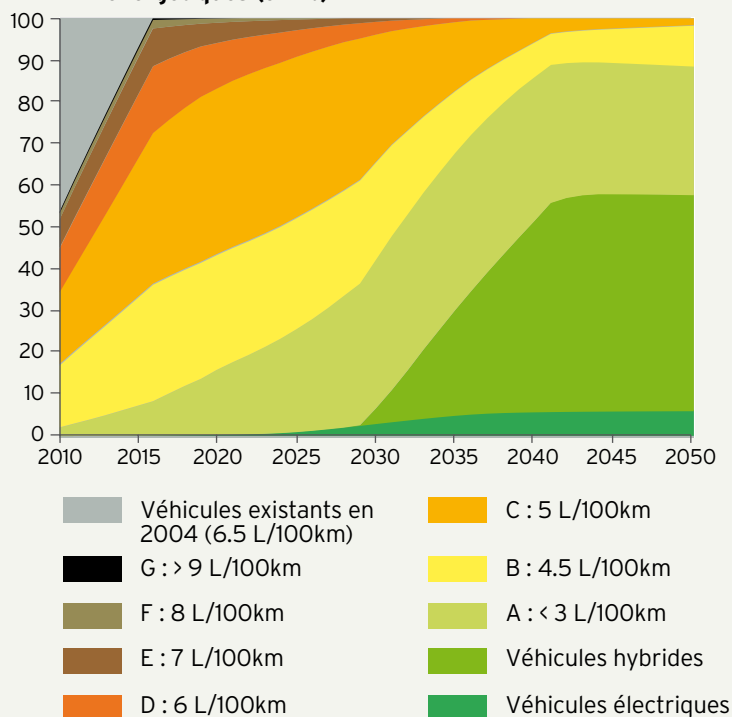
Ce scénario inclut deux stratégies par rapport au transport de passagers : Une limitation de l'augmentation de la mobilité individuelle par des mesures d'aménagement urbain et des incitations pour réduire la mobilité individuelle d'une manière volontaire.

1. Pénétration des véhicules décarbonés et des biocarburants

Le calibrage du dispositif de bonus-malus entre 2010 et 2050 répond à la nécessité d'atteindre l'équilibre financier pour le gouvernement, voire de dégager un excédent. Il est soumis à un réexamen tous les cinq ans pour garantir la généralisation des véhicules les plus efficaces et faire disparaître les plus polluants. Les véhicules électriques se cantonnent pour leur part à des marchés de niche participant à la mobilité urbaine, avec un taux de pénétration limité à 5% du parc total de véhicules en 2050 ; ils renvoient plus spécifiquement à des systèmes d'autopartage. Les véhicules hybrides « range extender¹³ » entament

13- Les véhicules hybrides « range extender » ou à prolongateur d'autonomie ont pour avantage de remédier à la faible autonomie des véhicules électriques et au coût élevé des batteries en abritant à la fois un moteur à combustion et un moteur électrique. Le premier, de cylindrée modeste, joue uniquement le rôle de générateur servant à alimenter le moteur électrique ou à recharger ses batteries. À la différence d'un moteur conventionnel, qui fournit une puissance variable selon les conditions de fonctionnement, le prolongateur d'autonomie délivre en permanence des performances optimales. Par rapport aux modèles classiques, les véhicules hybrides équipés d'un tel dispositif possèdent un moteur électrique plus puissant permettant de se passer de moteur à combustion interne.

22 - Répartition du parc de véhicules selon les étiquettes énergétiques (en %)



14- ADEME (2010)
« Analyses de cycle de vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France », Rapport final.

une percée massive après 2030, leur usage préférentiellement citadin se doublant de la possibilité d'effectuer des trajets beaucoup plus longs.

2. Essor des biocarburants

Concernant le développement des agrocarburants, le scénario reprend l'hypothèse formulée par le World Energy Outlook 2006. En 2030, 147 Mtep de biocarburants sont produits à l'échelle mondiale, soit l'équivalent de 7% de la demande totale de carburants destinés au transport routier. Le biodiesel représente 15% de ces agrocarburants. En Europe, la proportion de biodiesel au sein des agrocarburants chute de plus de 50% à moins de 30% en 2030.

Pour la France, la consommation d'agrocarburants est voisine de 5 Mtep en 2020, avant d'atteindre 16 Mtep en 2050 (respectivement 9% et 39% des produits pétroliers raffinés). Une rupture technologique survient aux alentours de 2030 et l'éthanol de pre-

mière génération, issu des sucres et de l'amidon agricoles, cède la place aux biocarburants de seconde génération (tel l'éthanol ligno-cellulosique), dont les coûts de production ont suffisamment diminué pour devenir compétitifs. Le recours à ces nouveaux agrocarburants atténue en grande partie l'impact négatif de la génération précédente : concurrence avec les cultures alimentaires, consommation de produits agricoles, émissions induites par le changement d'usage des sols (allant parfois jusqu'à dépasser celles des combustibles fossiles conventionnels¹⁴).

3. Évolution de la mobilité individuelle

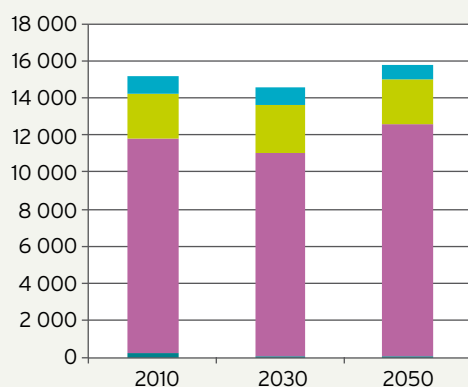
De manière générale, le scénario de mitigation se caractérise par un léger renforcement de la mobilité individuelle à long terme (+3% par rapport 2010), comme en atteste l'accroissement de la mobilité totale des personnes (+19%). Néanmoins, à moyen terme (2030), le renchérissement de l'énergie et l'inertie entravant le développement rapide des transports en commun alternatifs se soldent par une mobilité légèrement contrainte : ainsi assiste-t-on à un repli de 4,5% de la mobilité individuelle, alors même que la mobilité totale des personnes progresse de 4%, si on les compare toutes les deux à leur niveau de 2010.

Ce scénario de mitigation ne saurait donc s'interpréter comme un scénario de restriction ou de rationnement : il englobe un exercice de gestion de la mobilité incluant les goulets d'étranglement et les asymptotes en rapport avec l'étalement urbain et le taux de motorisation.

4. Mobilité urbaine et locale

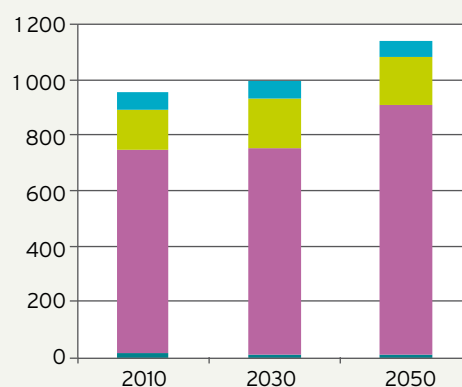
L'objet des politiques et des mesures portant sur la mobilité urbaine consiste à limiter la croissance de l'étalement urbain et à privilégier l'émergence d'infrastructures de transport en commun. L'inertie du système existant justifie cependant que leur impact ne commence véritablement à se manifester qu'après 2030. Les deux grands facteurs de la mobilité urbaine totale correspondent aux tendances démographiques en milieu urbain et à l'étalement urbain. Ce dernier connaît deux moments succes-

23 - Mobilité individuelle annuelle totale (en km)



Transport non motorisé
Transport collectif

24 - Mobilité globale annuelle (en Gp. km)



Voitures personnelles
Avion

sifs: il continue tout d'abord à se renforcer jusqu'à 2030, en particulier dans l'agglomération parisienne, avant que la dynamique inverse ne s'enclenche. Dans le même temps, la congestion s'accroît en zone urbaine dans tous les modes de transport, jusqu'à ce que les transports en commun prennent leur essor. À court terme, la réduction de la mobilité grâce au développement du télétravail et à l'élévation du taux d'occupation des véhicules correspondant à la généralisation des plans de déplacement entreprise permettent d'amortir les impacts du fait de l'accroissement du prix du pétrole.

5. Mobilité à longue distance

Les contraintes imposées aux transports urbains contribuent à limiter les longs trajets : la congestion grandissante des réseaux urbains réduit en effet le temps disponible pour les voyages à longue distance, en raison notamment du renchérissement du transport aérien (taxe sur le kérosène) et de l'inertie frappant le développement des alternatives routières. Il s'agit là d'une des causes du repli de la mobilité totale des personnes en 2030. Au-delà de cette date, la capacité des transports ferroviaires augmente et les contraintes temporelles s'assouplissent partiellement.

Les émissions du transport de personnes chutent de 66% entre 2010 et 2050, sous l'effet conjugué (i) d'une baisse moyenne de 70% de la consommation de carburant par les automobiles individuelles, (ii) de la pénétration des agrocarburants et (iii) d'une augmentation de 23% du nombre de passagers-kilomètre. Les réductions d'émissions réalisées dans le transport aérien s'expliquent pour leur part par une légère diminution de la demande et l'obtention de gains d'efficacité énergétique de 40%.

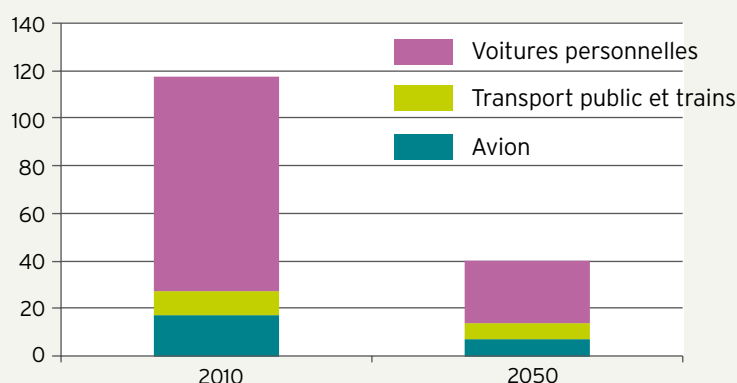
6. Transport de marchandises

L'écoredevance poids-lourds stimule la mise au point de technologies plus efficaces sur le plan énergétique: l'efficacité énergétique des poids lourds s'améliore de 25% d'ici 2030.

Globalement, les émissions du secteur du fret diminuent de 40% entre 2010 et 2050. Ce résultat provient à la fois (i) d'un découplage de la demande de fret par rapport au niveau de production, puisque bien que la production augmente de 60% sur la période, la demande de fret n'augmente que de 20%, (ii) d'une amélioration de 30% de l'efficacité énergétique du transport routier par unité de marchandises transportées, (iii) d'un report modal vers le rail dont la part modale atteint 20% et (iv) d'une pénétration des agrocarburants à hauteur de 12%.

Au total, les émissions de CO₂ du secteur des transports (personnes et marchandises) chutent de 60% entre 2010 et 2050, la consommation d'énergie finale de 41%. ★

25 - Émissions du transport de passagers (en MtCO₂)



V. Coûts des investissements et des politiques dans le secteur des transports

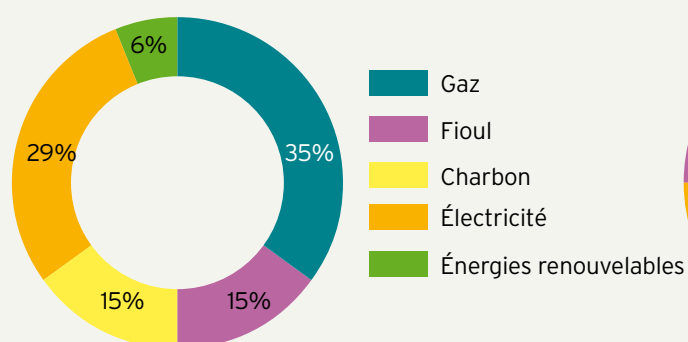
Les mesures fiscales appliquées aux transports exercent un effet positif sur l'équilibre financier du gouvernement, exception faite de la taxe intérieure de consommation sur les produits pétroliers, dont le produit enregistre un recul significatif avec le temps (de 10% en 2020, 25% en 2030 et environ 50% en 2050). Le taux de la taxe restant inchangé, la diminution des recettes est intégralement imputable au déclin de la consommation de produits pétroliers importés.

Les investissements en infrastructures s'effectuent pour leur part à périmètre financier constant, seule leur répartition entre les différents modes de transport étant affectée. Les 6 milliards d'euros retirés aux investissements routiers sont alloués pour moitié à la mise en place de transports en commun urbains, pour moitié aux transports ferroviaires. ★

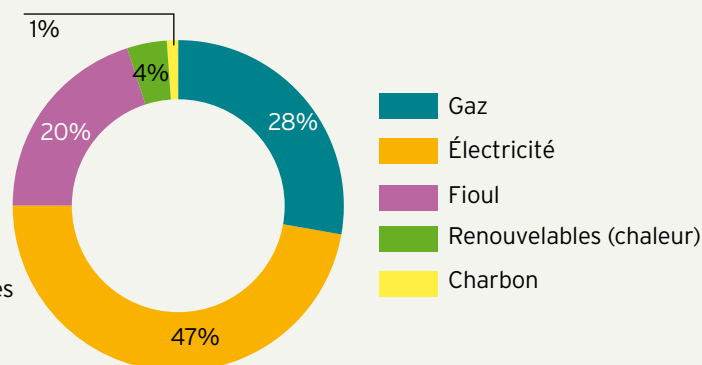
	2010	2020	2030	2040	2050
Mesures fiscales (en milliards d'€)					
Écoredevance poids lourds	0	1,3	1,1	1,1	1,2
Taxe sur le kérosène	0	1,6	1,1	1,4	1,3
Effet sur le produit de la taxe intérieure de consommation sur les produits pétroliers	23,8	21,4	17,9	13,4	12,9
Taxe carbone	0	0	13,7	18,1	34,8
Investissements en infrastructures					
Transports urbains	+3 milliards d'€ par an entre 2012 et 2030				
Transport ferroviaire	+3 milliards d'€ par an entre 2012 et 2030				
Transport routier	-6 milliards d'€ par an entre 2012 et 2030				

Industrie et services

26 - Mix énergétique du secteur industriel - énergie finale (2010)



27 - Mix énergétique du secteur tertiaire - énergie finale (2010)



I. État des lieux

1. L'industrie

Le mix énergétique du secteur industriel est dominé par les combustibles fossiles (65%). La consommation d'énergie finale des activités industrielles a diminué entre 1990 et 2010, passant de 27% (38 Mtep) à 22% (35 Mtep). Plusieurs sous-secteurs contribuent à hauteur de plus de 10% aux émissions industrielles :

- *Les produits minéraux non métalliques et les matériaux de construction (27%).
- *La chimie (24,7%).
- *La métallurgie et l'acier (17,1%).
- *L'agroalimentaire (12%).

Les émissions des procédés industriels se décomposent en émissions issues de la combustion des combustibles fossiles d'une part, en émissions causées par les réactions chimiques (comme la calcination du carbonate de calcium, à l'origine de la production de ciment) de l'autre. Pour la deuxième partie l'abattement des émissions peut être envisagé en faisant évoluer les procédés eux-mêmes, ou en recourant à des technologies de capture et de séquestration du carbone (CSC), pour autant qu'elles soient matures.

La récente crise économique a eu des répercussions importantes sur la production industrielle française, comme en témoigne la baisse de 13% de la consommation d'énergie finale du secteur; certaines activités ont même accusé un repli plus marqué, telles que la sidérurgie, dont les émissions ont plongé de 27%. Dans le contexte de reprise caractérisant les années 2009 et 2010, la production industrielle est repartie à la hausse, entraînant dans son sillage la consommation d'énergie (21%). Les rejets de CO₂ de l'industrie ont quant à eux enregistré un recul de 22% entre 1990 et 2010: l'industrie n'était ainsi plus responsable que de 23% des émissions totales de CO₂ en 2010 (67 Mtep), contre 28% (85 Mtep) vingt ans plus tôt.

La question de la place de l'industrie française dans un avenir sobre en carbone se pose avec d'autant plus d'acuité que l'évolution des importations de produits manufacturés et la relocalisation de l'industrie dans le pays (souhaitable sur le plan économique) risquerait d'entraîner à la hausse le niveau des émissions industrielles.

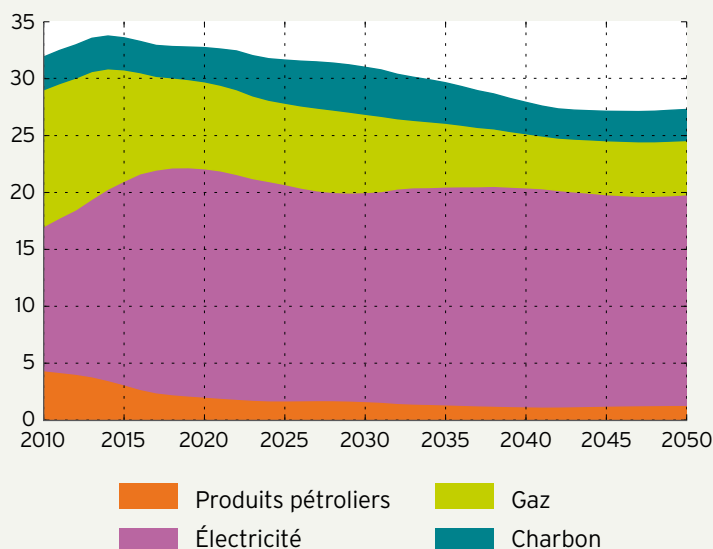
2. Les services

En 2010, le secteur tertiaire représentait 11% de la consommation d'énergie finale en France (21,7 Mtep). Le mix énergétique des services était dominé par l'électricité (47%). Hors électricité renouvelable, les énergies thermiques renouvelables ne constituaient que 4% du montant total. Les émissions de CO₂ du secteur tertiaire se sont accrues d'environ 9% entre 1990 et 2010, passant de 28 MtCO₂ à 31 MtCO₂.★

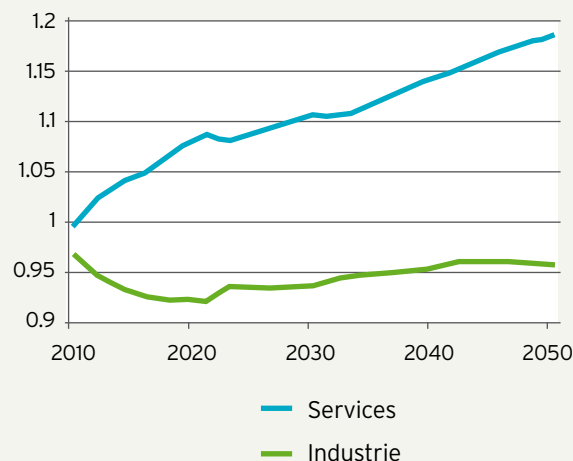
II. Représentation des secteurs productifs dans Imaclim-R

L'extrême diversité des activités industrielles (dont le transport et la production d'énergie sont ici exclus) ne permet pas de représenter toutes les unités de production dans Imaclim-R. L'inertie inhérente aux capacités installées ainsi que celle des technologies se reflète néanmoins par le biais d'une représentation en générations de capital (les capacités installées à une certaine date sont d'une technologie donnée et ont une durée de vie incompressible). La consommation d'énergie du secteur industriel dans Imaclim-R est donc égale à la moyenne des consommations de toutes les capacités installées (ou de toutes les générations de capital). L'évolution de la consommation énergétique dans l'industrie traduit non seulement l'amélioration des technologies, mais également l'évolution de la répartition des différents sous-secteurs agrégés (à titre d'exemple, réduction de la part des services intensifs en énergie au profit d'autres services). Trois mécanismes sont pris en compte: (i) le progrès technique autonome sui-

28 - Consommation d'énergie finale dans l'industrie (en Mtep)



29 - Indice de compétitivité des services et de l'industrie



vant une tendance historique, (ii) une tendance à l'abaissement structurel de l'intensité énergétique (du fait de la modification structurelle des types d'activités industrielles vers des industries moins intensives en énergie), et (iii) le progrès technique induit par l'évolution des prix relatifs de l'énergie.

Dans le scénario de mitigation, le gain en efficacité énergétique du fait du progrès technique autonome est fixé à 30%. Le renchérissement de l'énergie et la taxe carbone contribuent en outre à l'essor des énergies peu intensives en carbone (en stimulant la concurrence par les prix) et au progrès technique endogène. La même description s'applique au secteur tertiaire.★

III. Évolution de la consommation d'énergie du secteur de l'industrie

Dans Imaclim-R France, le secteur industriel¹⁵ représente approximativement 26% de la consommation finale d'énergie en 2010. Ce pourcentage reste inchangé en 2050 malgré la diffusion des gains d'efficacité énergétique à l'économie tout entière. En effet, le modèle intégrant des industries particulièrement intensives en énergie (acier, aluminium et chimie, pour ne citer qu'elles), la demande d'énergie finale, bien que tendancielle en baisse, demeure fondamentalement élevée. Or, derrière l'apparente stabilité de la consommation d'énergie finale, se cachent en réalité des progrès notables sur le plan de l'efficacité énergétique : ainsi une diminution de 15% de l'énergie finale utilisée dans le secteur est-elle enregistrée alors même que le niveau d'activité s'élève de près de 35%, soit en fait des gains d'efficacité énergétique de 37%¹⁶.

La composition des sources d'énergie subit également une évolution majeure : si la demande de charbon demeure pratiquement inchangée, le

pétrole et le gaz sont, respectivement en forte proportion et pour moitié, remplacés par l'électricité dont la compétitivité-prix la rend plus attractive que le gaz. Les possibilités de substitution sont principalement nourries par la dynamique des prix relatifs de ces deux énergies, très proches l'un de l'autre jusqu'à 2025. L'écart se creuse ensuite fortement, au bénéfice de l'électricité, 40% moins chère que le gaz à quantité d'énergie consommée égale dans l'industrie.

La substitution de l'électricité au gaz et les économies d'énergie en découlant induisent une forte baisse des émissions industrielles de CO₂¹⁷ (23 MtCO₂ en 2050, contre 53 en 2010). L'application des technologies CSC aux procédés industriels pourrait par ailleurs favoriser une nouvelle chute des émissions dans le secteur¹⁸.

Le graphique 29 atteste du renforcement de la compétitivité de la France par rapport à l'offre globale¹⁹ : plus l'indice est haut, plus la concurrence joue en faveur de la France (sans donner de chiffres absolus, les courbes donnent néanmoins la tendance générale). L'indice de l'industrie reste voisin de 1 tout au long de la période, signe que les produits industriels ne sont ni plus ni moins compétitifs qu'au début de la période. On assiste en revanche à une amélioration de la compétitivité-prix du secteur tertiaire français, comme en témoigne la progression constante de l'indice de compétitivité des services.

Le résultat obtenu dérive de l'évolution du coût de l'énergie au sein des coûts de production des secteurs en question. Dans le secteur tertiaire, les avancées en matière d'efficacité énergétique ont pour effet d'abaisser la facture énergétique; dans les industries intensives en énergie, au contraire, les gains en efficacité énergétique sont structurellement bornés et les coûts ne peuvent être réduits de manière aussi significative. ★

15- Dans Imaclim, ce secteur englobe l'acier, le ciment, la chimie, les métaux non ferreux, la fabrication d'équipement et le papier.

16- Les gains d'efficacité énergétique correspondent ici à une réduction de 37% de l'intensité énergétique, définie comme le rapport entre la quantité d'énergie finale et la valeur ajoutée (PIB) du secteur de l'industrie.

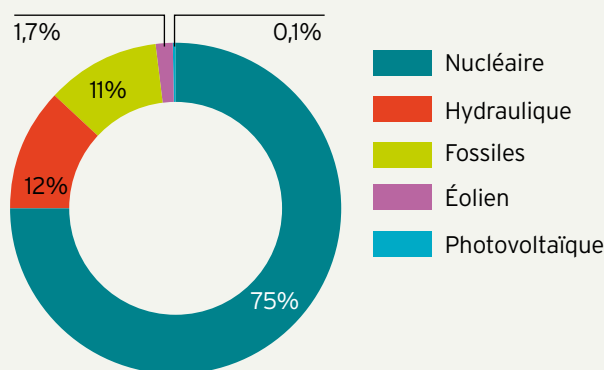
17- Les émissions industrielles correspondent aux émissions directes (hors génération d'électricité).

18- Ce scénario repose sur une hypothèse prudente quant aux technologies CSC : celles-ci sont supposées ne se déployer que marginalement dans le secteur électrique, et rester à l'écart de l'industrie proprement dite.

19- Cet indice se définit comme le rapport entre l'indice mondial et l'indice français des prix dans l'industrie. Si les prix mondiaux grimpent de 80%, contre seulement 20% pour les prix français, l'indice de compétitivité s'établit à 1,5 (=180/120), ce qui confère un avantage aux produits fabriqués en France. Le calcul des indices prend pour référence l'année 2004.

Secteur électrique

30 - Mix énergétique du secteur électrique (2010)



20- Loi de Programmation et d'Orientation de la Politique Énergétique - POPE (2005).

21- Tel que défini dans le Plan d'action national de la France pour les énergies renouvelables (2010).

22- La monotone de charge exprime la demande horaire de capacités (en GW) en fonction de l'utilisation effective des capacités (nombre d'heures pendant lesquelles elles sont exploitées en une année). Elle est tracée en classant par ordre décroissant la demande horaire de capacités (en GW) par valeur de puissance appelée. La courbe ainsi obtenue présente synthétiquement la capacité de pointe, la capacité de base et l'écart éventuel entre les capacités excédentaires destinées à couvrir les pointes de demande et le nombre d'heures durant lesquelles ces dernières sont effectivement exploitées.

I. État des lieux

En 1990, l'électricité représentait 36% (83 Mtep) du mix énergétique primaire, mais seulement 18% (26 Mtep) de l'énergie finale, en raison de la part élevée de l'énergie d'origine nucléaire. En 2010, les quelque 550 TWh produits équivalaient à 43% (115 Mtep) de l'énergie primaire totale et à 24% de l'énergie finale. 67% de l'électricité primaire produite était consommée par les processus de transformation.

En 2010, la proportion d'électricité renouvelable était voisine de 15%, dont la majeure partie d'origine hydraulique. La balance commerciale des échanges d'électricité enregistrait un excédent, bien que les importations aient atteint leur plus haut niveau historique, à 19,5 TWh. En tout, 50 TWh ont été exportés.

Les émissions liées à la production d'électricité ont reculé de 19,7% par rapport à 1990, année au cours de laquelle 39 MtCO₂ (10% des émissions totales de CO₂) ont été émis par le secteur électrique, contre seulement 31 MtCO₂ (9%) en 2010.

68% de l'électricité finale produite est consommée par les secteurs résidentiel et tertiaire, 25% par l'industrie et 3% par les transports. L'électricité coûtant 25% de moins en France que dans les autres pays européens, la consommation moyenne par habitant y est logiquement plus élevée (+21%), surtout si seule la consommation résidentielle est prise en compte (+49%). Cette particularité française de la demande d'électricité provient également de l'importance du chauffage électrique par effet Joule, utilisé dans un tiers des bâtiments aujourd'hui. La sensibilité aux aléas climatiques qui en résulte pour le secteur électrique se ressent en particulier aux heures de pointe en hiver : chaque vague de froid fait courir le risque de pannes et de délestages, dans la mesure où une baisse de

température d'un degré induit la consommation de 2,3 GW supplémentaires. L'autre sujet de controverse est l'évolution future de la demande, exposée en particulier aux incertitudes concernant l'impact des nouveaux usages finaux (véhicules électriques, électronique...) sur la consommation d'énergie finale totale.

Objectifs climatiques et énergétiques :

L'objectif fixé par la législation française²⁰ en 2005 de porter à 21% la part des énergies renouvelables dans le mix électrique en 2010 n'a pas été atteint, pas plus que la cible de réduction de l'intensité énergétique de 2% par an. Le nouvel objectif²¹ poursuivi à l'horizon 2020 consiste désormais à atteindre la proportion de 27% d'énergies renouvelables dans la production finale d'électricité.★

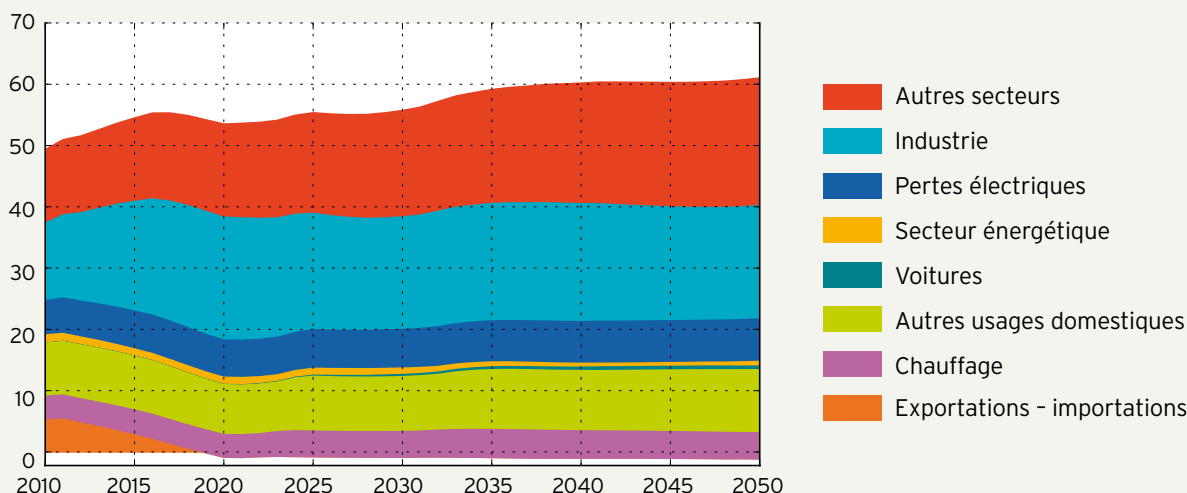
II. Représentation du secteur électrique dans Imacim-R

Le module électrique d'Imacim-R vise à représenter les spécificités du secteur électrique français. La prise en compte de la demande horaire permet de représenter les spécificités de la demande selon les usages et notamment le chauffage électrique en période de pointe, l'évolution du prix horaire de l'électricité et la dynamique des investissements dans de nouvelles unités de production (en base, en semi base, en pointe, voire en hyper pointe).

La demande. Dans Imacim, la demande de chaque secteur et des consommateurs est agrégée de manière à obtenir la demande horaire totale. Les variations saisonnières de la consommation de chauffage électrique sont reflétées en modifiant l'allure de la courbe de demande horaire. Pour chaque année, la demande horaire est ensuite exprimée sous la forme d'une monotone de charge²² en classant les capacités horaires par ordre décroissant en fonction du nombre d'heures de consommation électrique. Il devient ainsi possible de segmenter la demande en trois types : la demande de base, c'est-à-dire celle mettant en jeu des capacités exploitées plus de 5 000 heures par an, la demande de semi-base, sollicitant des capacités utilisées entre 500 et 5 000 heures par an, et la demande de pointe, faisant intervenir des capacités employées moins de 500 heures par an.

L'offre. La dynamique d'investissement prévalant dans le secteur électrique s'exprime au travers des investissements réalisés sur le marché libéralisé par des acteurs cherchant à maximiser leur profit : cela signifie que les technologies produisant de

31 - Décomposition de la demande d'électricité (en Mtep)



interruptibles autorisant le fournisseur à suspendre unilatéralement l'approvisionnement pendant une courte durée. Notons par ailleurs que la baisse de la consommation liée au chauffage électrique par effet Joule a pour effet d'alléger la charge de pointe.

Interdiction du chauffage électrique par effet Joule dans les constructions neuves. Si le chauffage électrique ne fait pas l'objet d'une interdiction, l'entrée en vigueur de la réglementation thermique 2012 exclut *de facto* le chauffage électrique par effet Joule, mais pas les pompes à chaleur dans les bâtiments neufs.

Prolongation de la durée de vie des centrales nucléaires. 23 GW des plus anciennes centrales nucléaires en service sont démantelées au bout d'une durée d'exploitation de 40 ans. Cette opération est lissée dans le temps afin d'échelonner le déploiement des capacités nécessaires à leur remplacement. 40 autres GW de capacité installée sont exploités jusqu'à l'âge de 60 ans pour un coût d'investissement additionnel de 0,7 mrd€/GW. Ainsi, en 2050, 10 GW de nucléaire existant en 2010 sont encore en activité.

Acceptabilité des technologies. Toutes les technologies de production de l'électricité sont considérées comme acceptables hormis le recours aux gaz de schiste.★

La construction de capacités de production d'électricité visant à exporter de l'électricité a été rejetée par les parties prenantes. De ce fait, le volume des exportations décline rapidement dans le scénario. La France, qui perd ainsi son statut d'exportatrice nette d'électricité après 2020, recourt toujours ponctuellement à des importations de courant (inférieures à 1 Mtep ou 12 TWh; exprimées par la portion du graphique située en dessous de la ligne horizontale d'ordonnée 0) pour satisfaire les pics de consommation dus à la demande de chaleur l'hiver. Les gains d'efficacité énergétique procurés par la rénovation thermique du secteur résidentiel, de même que le recul du chauffage électrique par effet Joule contribuent à limiter les pointes de demande en période hivernale. Toutefois, plus l'on se rapproche de 2050, plus la capacité de pointe remonte atteignant 103 GW en 2050, le chauffage au gaz cédant progressivement la place aux pompes à chaleur.

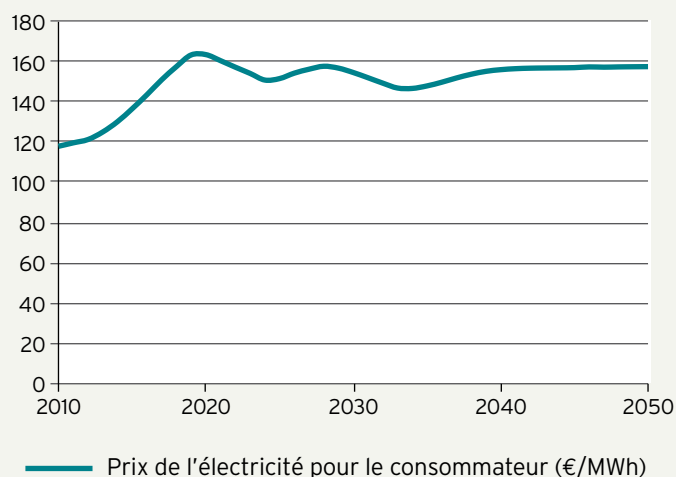
Une substitution partielle de l'électricité au gaz survient dans l'industrie avant 2020. À contre-courant de cette tendance, la consommation des services progresse à un rythme supérieur à 2% d'ici 2025 et autour de 1% par la suite. La consommation électrique des industries productrices d'énergie (comme les raffineries de pétrole) décroît lentement. Enfin, les pertes d'électricité pendant son transport évoluent proportionnellement à l'accroissement de la consommation électrique.

IV. Évolution de la consommation d'énergie du secteur électrique

La production électrique totale s'accroît tout au long de la période du scénario pour atteindre 60 Mtep en 2050, contre 50 Mtep en 2010. Remarquons que cette hausse de 20% demeure relativement faible par rapport au triplement enregistré sur le même nombre d'années entre 1973 et 2010. Les secteurs industriel et tertiaire sont les premiers responsables de cette évolution, principalement du fait de la substitution vers l'électricité du gaz.

Dans le secteur résidentiel, la consommation d'énergie servant au chauffage s'inscrit en légère hausse au fur et à mesure de la généralisation des pompes à chaleur au détriment du gaz. Les usages résidentiels autres que le chauffage principal refluent dans un premier temps, passant de 9 à 8 Mtep en 2020, avant de repartir à la hausse pour revenir à 10 Mtep. La diffusion des nouveaux appareils électriques, notamment multimédia, explique la poussée de la consommation durant la période du scénario. À l'inverse, les usages spécifiques de l'électricité (éclairage, lavage, cuisine, etc.) reculent grâce aux avancées réalisées en matière d'efficacité énergétique.

32 - Prix à la consommation de l'électricité (€/MWh)



Avant 2030, la consommation des véhicules électriques, négligeable au regard de la consommation totale, n'apparaît pas sur le graphique. Elle franchit ensuite un palier pour se stabiliser à 0,6 Mtep en 2040. Les véhicules électriques du scénario correspondant à des systèmes d'auto-partage, la recharge est répartie de manière égale au cours de la journée : ainsi, la demande supplémentaire liée à la recharge vient simplement s'ajouter à la charge de base et n'induit aucune perturbation sur la courbe de charge.

Prix

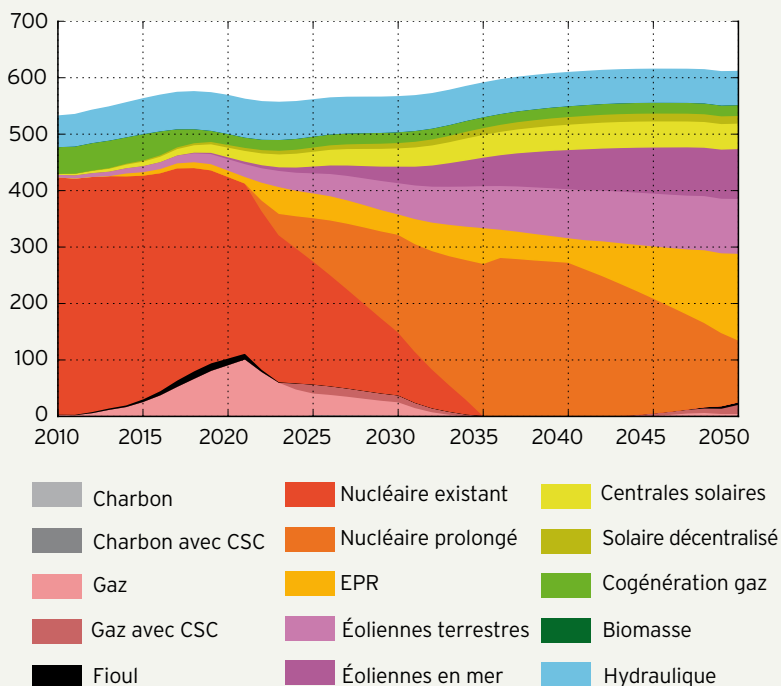
Le prix de l'électricité payé par les ménages enregistre une forte hausse entre 2010 et 2020 avec un bond de 41%. Il se maintient ensuite aux environs de 160€/MWh (16 c€/kWh), soit un renchérissement de 34% par rapport à son niveau de 2011. Une telle envolée est imputable à la combinaison de plusieurs facteurs : (i) la pénétration de centrales à cycle combiné gaz en remplacement d'une partie des capacités nucléaires existantes, (ii) l'accélération de l'installation des capacités de production renouvelables et (iii) le déploiement de centrales au fioul visant à compenser l'intermittence des sources renouvelables et (iv) le démantèlement et la construction de nouvelles capacités nucléaires. S'agissant de la hausse constatée à plus long terme, les raisons sont plutôt à chercher du côté du coût des énergies renouvelables, supérieur à celui des anciennes unités de production thermiques et nucléaires, et des besoins d'extension du parc de production au cours de la période étudiée.*

V. Coûts des investissements et des politiques dans le secteur électrique

Investissements

Tout au long de la période, les investissements dans les capacités de production s'orientent pour l'essentiel vers les énergies renouvelables, dont la part dans le mix énergétique finit par s'élever à 50% en 2050, contre 20% en 2020.

33 - Mix électrique (en TWh)



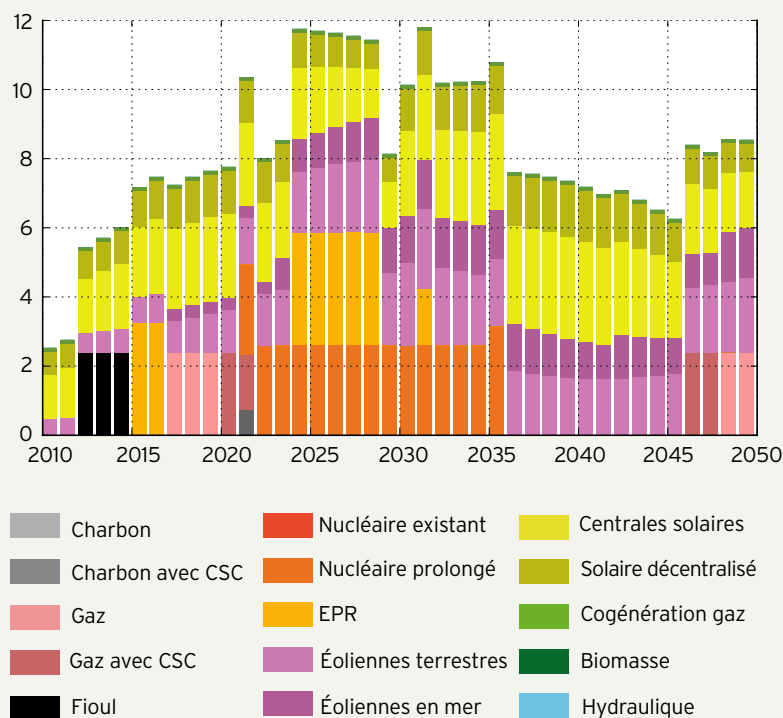
Par ailleurs, l'exploitation de 43GW de capacité nucléaire est prolongée pendant 20 ans, moyennant un coût de 700 millions d'euros par GW. L'essor des renouvelables et l'allongement de la durée de vie de certaines centrales nucléaires constituent le gros des investissements d'ici 2050. Parallèlement, neuf centrales nucléaires de type EPR (réacteur pressurisé européen, d'une capacité de 1630 MW chacun) sont construites à raison d'un coût d'investissement de 2,9 Mds€/GW, en vue de compenser partiellement les opérations de démantèlement menées au cours de la décennie 2020-2030. Le financement de la transition se traduit logiquement par une hausse régulière des investissements, qui passent de 8 Mds€ en 2010 à près de 17 Mds€ en 2026, avant d'entamer une baisse régulière jusqu'à 6 Mds€ en 2050.

Dépenses annuelles moyennes engendrées par la production d'électricité (en Mds€)

Période	2011-2020	2021-2030	2031-2040	2041-2050
Investissements	12	15	9	6
Coûts de combustible	1	1,4	0,1	0,6
Coûts du carbone	8,7	10,9	2,8	3,5

La période nous séparant de l'année 2025 est la plus décisive : le début du démantèlement des centrales nucléaires, conjugué à l'essor des énergies renouvelables intermittentes et aux incertitudes entourant le marché de la distribution d'électricité, justifie la mise en fonctionnement de centrales alimentées par les combustibles fossiles. Entre 2010 et 2020, des centrales au fioul et à cycle combiné gaz d'une capacité supérieure à 10 GW entrent ainsi en service, provoquant du même coup la montée en flèche des émissions du secteur électrique (+49%). Ce constat souligne l'urgence

34 - Investissements dans les nouvelles capacités (GW)

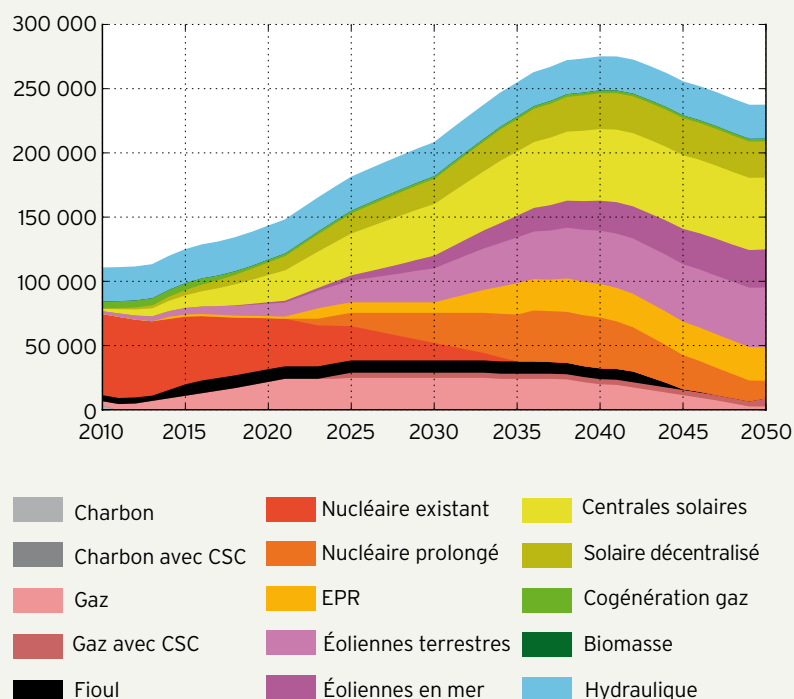


à adopter des mesures d'efficacité énergétique et de gestion de la demande permettant de se passer de centrales fortement émettrices de carbone. Toutefois, la période de transition d'un mix électrique dominé par le nucléaire vers une offre dominée par des sources renouvelables est de courte durée et provoque un reflux des émissions au-delà de 2030. Après 2040, le démantèlement rapide des centrales nucléaires modernisées pour en allonger la durée de vie suscite de nouvelles tensions du côté de l'offre, ainsi qu'une nouvelle remontée des émissions, principalement induite par le recours au gaz (une partie des centrales au gaz n'étant pas équipée de CSC).

Chiffrage du coût des politiques

Dans le modèle, les mesures fiscales appliquées au secteur électrique se limitent à la contribution CSPE servant au financement des tarifs d'achat garantis et à la taxe carbone. Les tarifs d'achat ont un impact neutre sur le budget gouvernemental, car ils sont intégralement payés par le consommateur final. Quant au financement de la plupart des mesures de gestion de la demande, il est assuré soit par les consommateurs soit par le fournisseur d'électricité. ★

35 - Capacités existantes (MW)



Mesures fiscales (en Mds€)

Tarifs d'achat garantis	2010	2020	2030	2040	2050
Recettes de la CSPE					
=					
financement des tarifs d'achat garantis	2,9	1,9	7,2	17,8	12,7
Taxe carbone	0	13,7	18,1	23,9	34,8

27- Dans le scénario, les émissions produites en amont et en aval pour l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables sont supposées nulles car attribuées à d'autres secteurs : par exemple les émissions générées par la construction d'une centrale nucléaire sont rapportées à celles du secteur de la construction. Seules les émissions de combustion du secteur électrique, autrement dit les rejets entraînés par la production électrique mettant en jeu des combustibles fossiles, apparaissent sur le graphique.

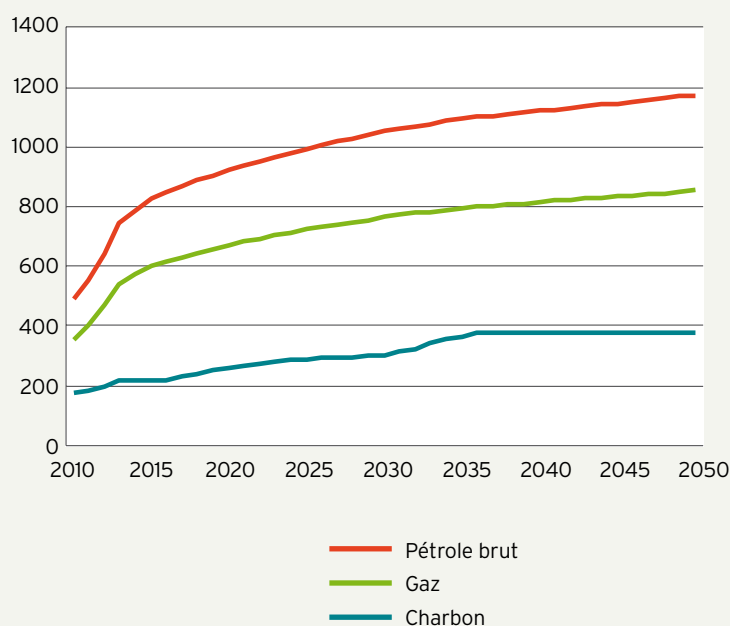
Impacts macroéconomiques et résultats du scénario

I. Un contexte global, une vision mondiale

Tout scénario s'insère dans un contexte général et une vision mondiale à l'horizon 2050. Cette vision du monde répond à un ensemble de questions qui sont déterminantes pour pouvoir construire le scénario. Quel type de coordination internationale sur le changement climatique ? Quelles tensions sur les marchés de l'énergie, notamment pétrolier ? Quelles seront les priorités et orientations du changement technique ? Quels modes de consommation prévaudront dans les économies développées et dans les économies émergentes ?

Les hypothèses retenues sont les suivantes : les modes de consommation dans les pays occidentaux tels que nous les connaissons aujourd'hui, c'est-à-dire fortement consommateurs de ressources naturelles, se poursuivent. L'impact d'un découplage entre la croissance et le degré d'exploitation des ressources sera examiné de plus près au chapitre 4. Le scénario présenté suppose l'absence d'un accord climatique à l'échelle internationale, mais considère une régulation des politiques climatiques au niveau de l'Union européenne. Avec de telles hypothèses, la demande énergétique et le prix des énergies fossiles se maintiennent à un niveau élevé. La dynamique des prix des énergies fossiles, avec une multiplication légèrement supérieure à 2 entre 2010 et 2050 obéit à celle décrite dans le World Energy Outlook 2011; les cours du pétrole brut se hissent ainsi à 160€ le baril en 2050. Demande soutenue et croissance des prix pour les énergies fossiles stimulent l'innovation technologique dans le domaine des énergies renouvelables, de l'efficacité énergétique mais aussi de la capture et séquestration du carbone. ✱

36 - Évolution du prix mondial des énergies fossiles (en €/tep)



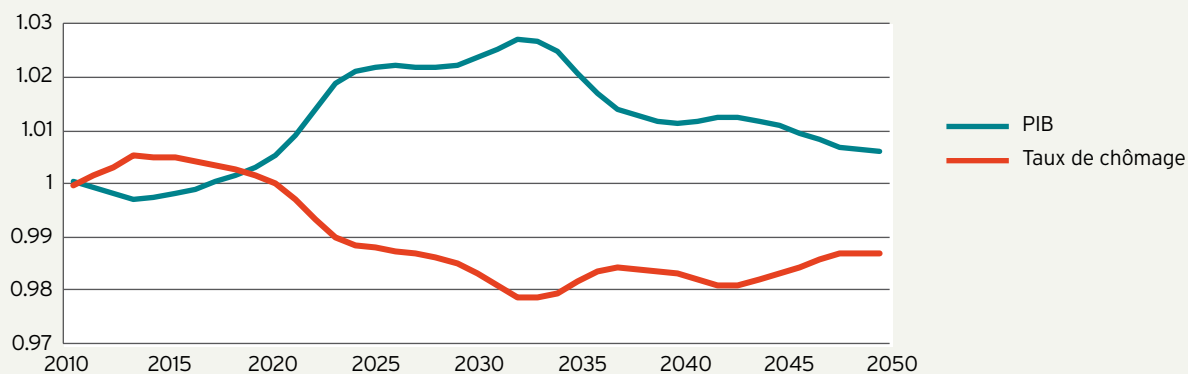
II. Dynamique macroéconomique du scénario de réduction d'émissions

1. Taux de croissance économique

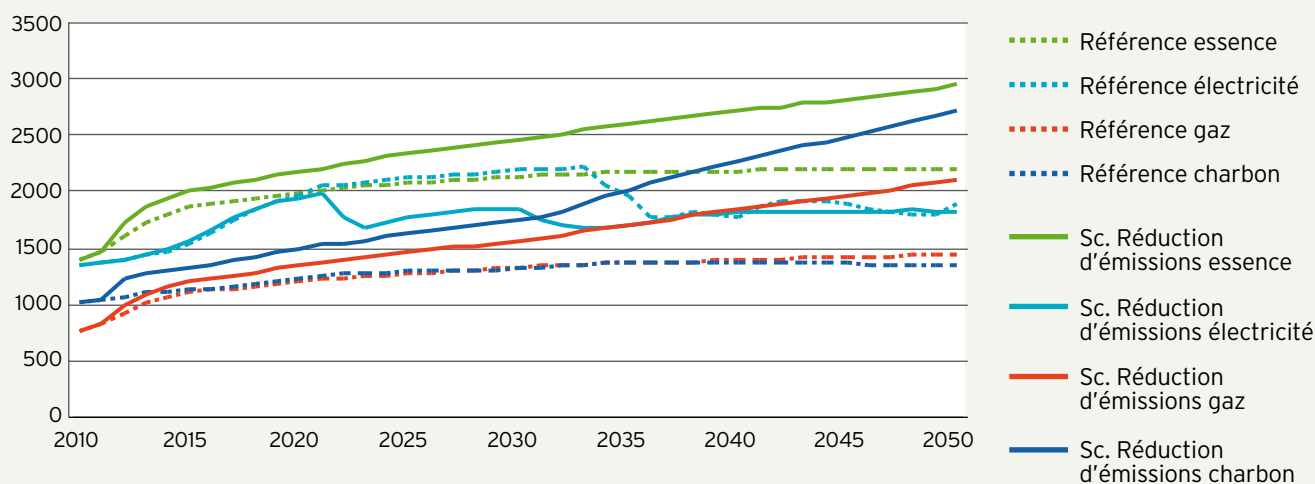
Par convention, dans Imacim-R, le moteur de croissance économique est constitué par la dynamique démographique exogène et les taux de croissance de la productivité du travail. La croissance est alimentée par le rythme des investissements et leur distribution entre les différents secteurs. Des déséquilibres endogènes peuvent apparaître au travers de coûts de transition induits par une décision politique ou un choc exogène. Les décisions d'investissement sont dictées par l'objectif de maximisation du profit sur des marchés de concurrence incomplète dans un environnement d'information imparfaite.

La population suit le scénario démographique central 2010 de l'INSEE et s'élève à 72,3 millions d'habitants en 2050, soit une hausse de 15% par rapport à 2010. Dans le scénario de référence (également appelé scénario business as usual, c'est-à-dire excluant toute politique climatique), le taux de croissance économique

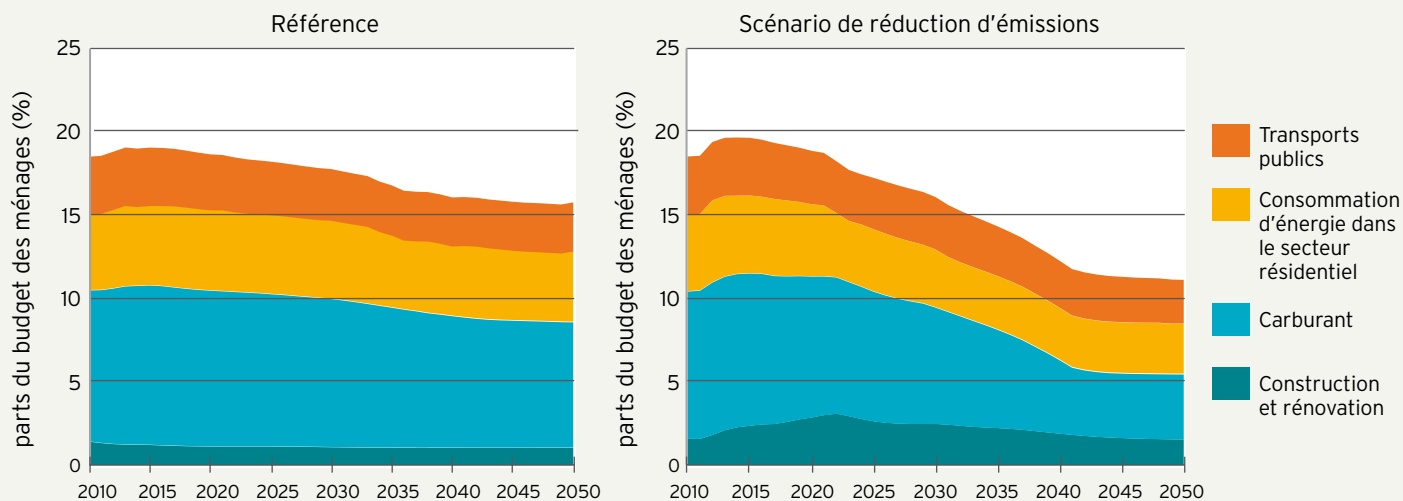
37 - Évolution des indicateurs macroéconomiques dans le scénario de réduction d'émissions par rapport au scénario de référence (base 1 en 2010)



38 - Prix à la consommation de l'énergie (en €/tep)



39 - Parts budgétaires des dépenses des ménages



annuel moyen est de 1,24% entre 2010 et 2050. L'impact économique global des mesures de réduction d'émissions est positif, sauf à court terme (jusqu'à 2017), en raison de l'instauration de la taxe carbone en 2012. Par la suite, le PIB et l'emploi restent supérieurs aux niveaux du scénario de référence.

Taux de croissance annuel moyen du PIB

	2010-2020	2020-2030	2030-2050	2010-2050
Référence	1,19	1,29	1,2	1,22
Sc. Réduction d'émissions	1,24	1,47	1,11	1,24

L'effet est particulièrement avantageux entre 2025 et 2035 : à cette dernière date, le prix de l'électricité dans le scénario de réduction d'émissions est environ 25% inférieur à celui obtenu dans le scénario de référence. L'application de la taxe carbone s'accompagne par ailleurs d'un net renchérissement des énergies fossiles. La combinaison des deux facteurs aboutit finalement à une substitution énergétique marquée en faveur de l'électricité dans les secteurs productifs et les bâtiments. Enfin, les progrès réalisés en matière d'efficacité énergétique se traduisent par une diminution des dépenses d'énergie :

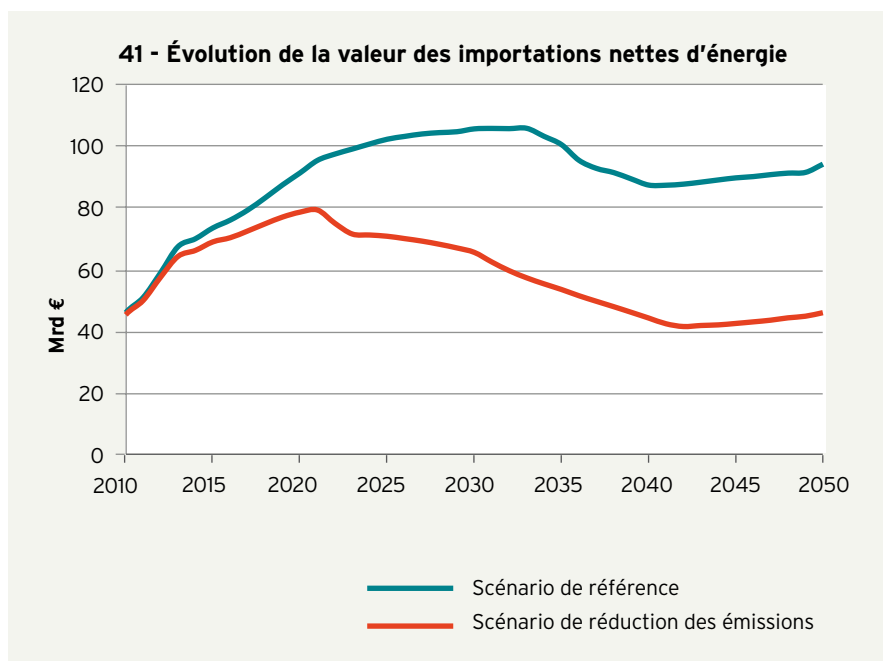
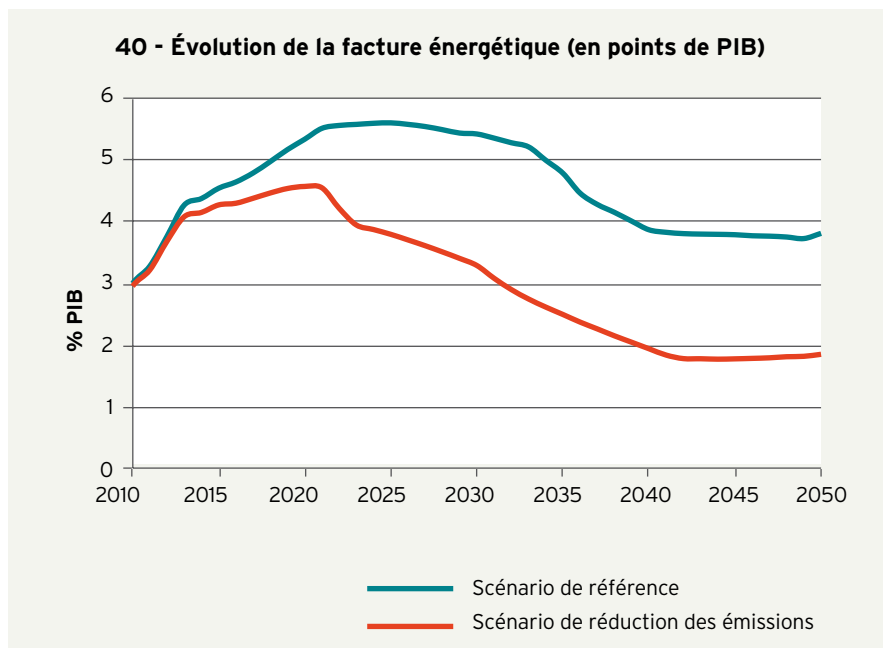
- *dans le budget des ménages (la montée des coûts de construction et de rénovation ne compensant pas les gains),

- * dans les industries de services peu intensives en énergie, ce qui améliore la compétitivité des produits français à l'international.

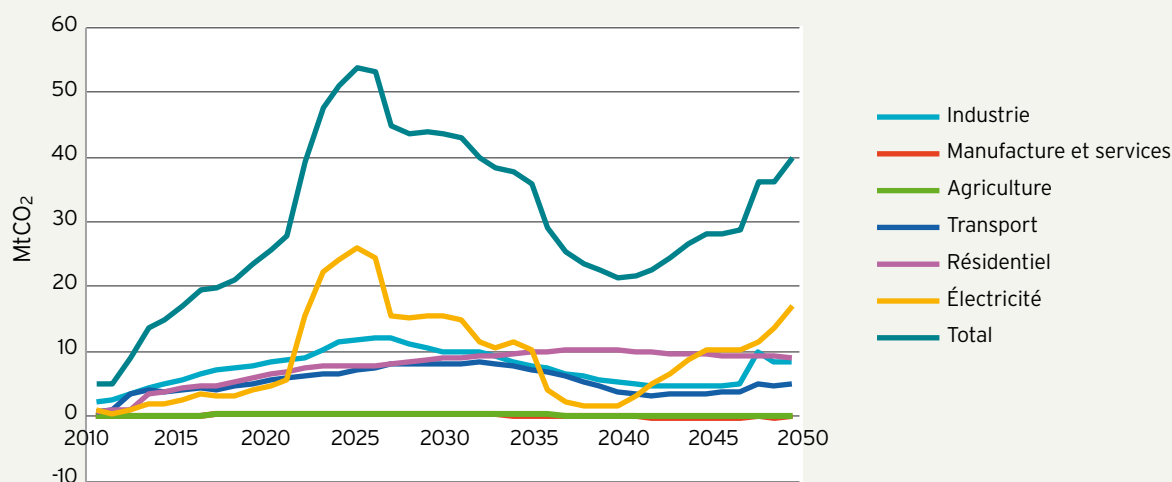
2. Efficacité énergétique, dépendance aux importations et facture énergétique

L'essor des énergies non fossiles, concomitant de l'adoption de mesures d'efficacité énergétique, constitue une protection contre les répercussions négatives induites par la hausse des prix de l'énergie notamment à l'égard de la dépendance de la France aux importations énergétiques. Dans le scénario de référence, les importations d'énergie se chiffrent à plus de 5% du PIB entre 2019 et 2035; dans le scénario de réduction des émissions, elles atteignent leur valeur maximale en 2020 (4,7%), pour retomber ensuite à un niveau stable (1,7%) après 2040.

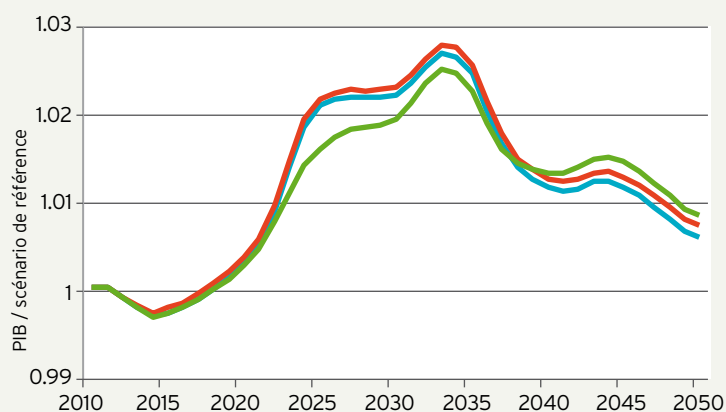
Relevons à ce propos la relation existant entre le mix énergétique français et les importations d'uranium, souvent négligée dans l'analyse : bien que son impact sur la facture énergétique soit négligeable, la consommation d'uranium par les centrales nucléaires fait en effet naître une dépendance et accroît la vulnérabilité énergétique nationale. *



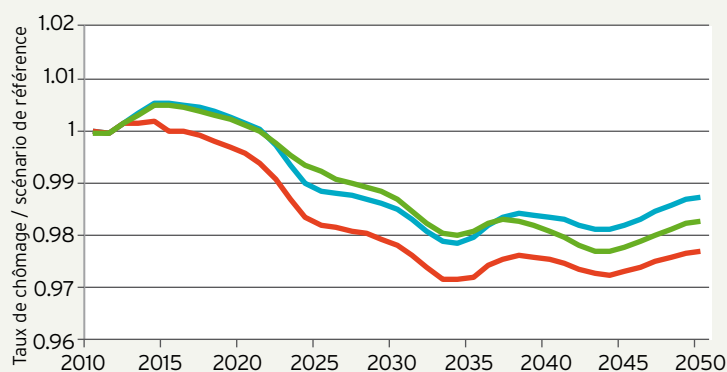
42 - Réductions d'émissions de CO₂ annuelles induites par la taxe carbone



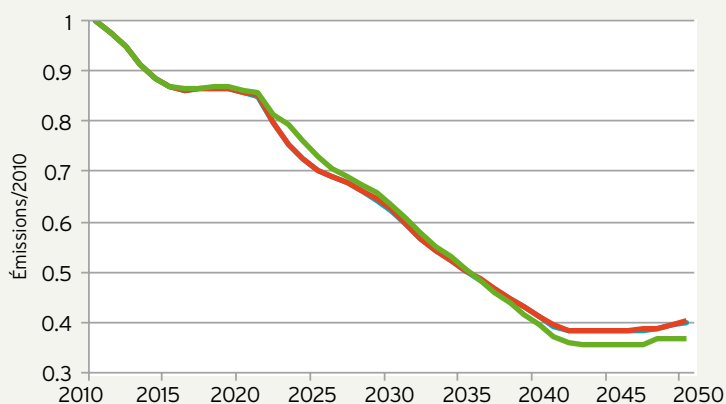
43 - Évolution du PIB en fonction de l'option de recyclage du produit de la taxe carbone



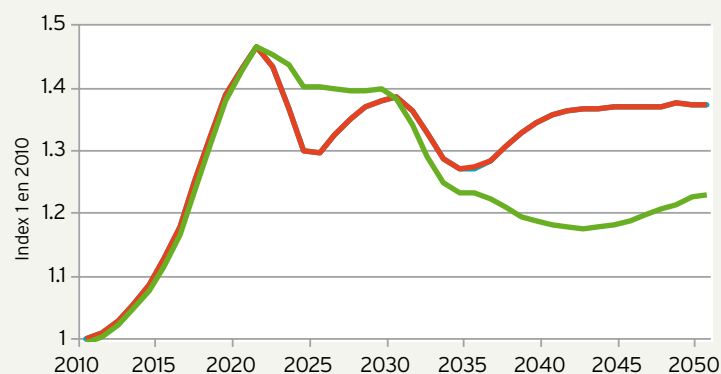
44 - Évolution du taux de chômage en fonction de l'option de recyclage du produit de la taxe carbone



45 - Évolution des émissions en fonction de l'option de recyclage du produit de la taxe carbone



46 - Prix à la consommation de l'électricité en fonction de l'option de recyclage du produit de la taxe carbone



- Chèque vert aux ménages
- Réduction des charges salariales
- Soutien aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique

III. Taxe carbone : quelle nécessité ?

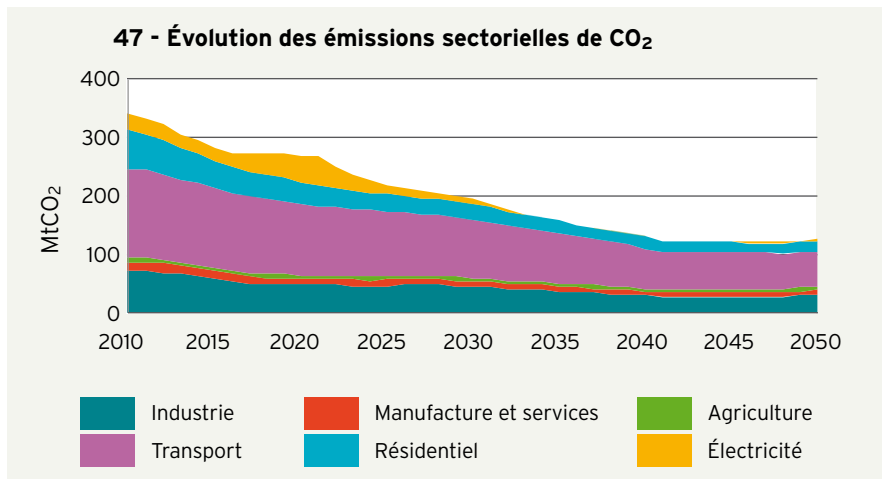
1. L'impact de la taxe carbone sur les réductions d'émissions

L'instauration de la taxe carbone constitue l'une des mesures les plus emblématiques du scénario. Son impact marginal sur les réductions d'émissions sectorielles a été calculé. Les réductions d'émissions obtenues grâce à la taxe carbone dans le graphique 42 sont subordonnées aux autres mesures mises en œuvre dans le « scénario acceptable ». L'impact de la taxe carbone seule serait plus marqué si aucune autre mesure visant à réduire les émissions n'était mise en œuvre.

Force est de constater l'efficacité de la taxe carbone à décarboner le secteur électrique, notamment durant la phase de transition s'écoulant entre 2020 et 2030, ainsi qu'à la fin de la période du scénario, à savoir au moment où une partie des réacteurs nucléaires est démantelée. La taxe carbone encourage aussi largement les décisions de rénovation dans le secteur résidentiel d'un bout à l'autre de la période. Enfin, les émissions industrielles seraient nettement plus élevées à court terme en l'absence de taxe carbone, dont le rôle de signal-prix à l'attention des investisseurs est particulièrement tangible.

2. Les options de recyclage des recettes de la taxe carbone

Dans le scénario de réduction des émissions décrit dans ce chapitre 3, la taxe carbone constitue une variable exogène et l'évolution de son montant obéit aux recommandations du rapport gouvernemental Quinet²⁸ jusqu'en 2030 (32€/tCO₂ en 2012, 56€/tCO₂ en 2020, 100€/tCO₂ en 2030); elle est par la suite extrapolée jusqu'en 2050 (200€/tCO₂ en 2040 et 300€/tCO₂ en 2050). Il est important de noter les hypothèses suivantes concernant la taxe carbone : sa croissance est parfaitement anticipée dans le secteur électrique; par contre les autres agents (autres activités et ménages) forment des anticipations myopes c'est-à-dire qu'ils considèrent que sa valeur restera dans le futur identique à celle de l'année en cours. Le scénario de réduction des émissions décrit aux chapitres précédents considère que les revenus de la taxe carbone sont reversés aux ménages de manière forfaitaire (chèque vert). Deux autres options ont cependant été examinées pour intégrer les contributions des parties pre-



nantes : i) le recyclage sous la forme de subventions au développement des énergies renouvelables et aux progrès en matière d'efficacité énergétique, et ii) l'affectation du produit de la taxe à l'abaissement des charges pesant sur le coût du travail.

28- Alain Quinet (2009) : « La valeur tutélaire du carbone », Centre d'analyse stratégique.

Les graphiques 43 à 46 présentent l'impact économique des trois variantes. À long terme, le recyclage vers les subventions au profit du développement des énergies renouvelables et des progrès en termes d'efficacité énergétique a l'effet le plus positif sur la croissance du PIB, tout en conduisant simultanément aux réductions d'émissions les plus importantes. De son côté, sans surprise, l'affectation des recettes de la taxe à l'abaissement du coût du travail procure les meilleures retombées sur le marché de l'emploi. Notons, au demeurant, qu'après 2035, le prix de l'électricité payé par le consommateur varie fortement suivant l'option choisie : il atteint son niveau le plus bas dans le cas d'un recyclage de la taxe en subventions pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique, qui constitue aussi l'hypothèse la plus favorable pour la croissance économique. ★

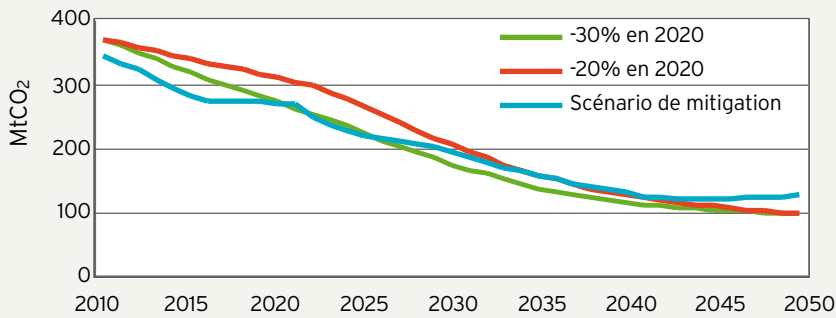
IV. Réductions des émissions de CO₂ dans le scénario de réduction des émissions

À la fin de la période, l'application de l'ensemble des mesures jugées acceptables par les parties prenantes se traduit par une diminution à 126 MtCO₂ des émissions énergétiques de CO₂. Le graphique suivant précise la part imputable aux différents secteurs dans cette baisse de 60% des rejets par rapport à 2010 (68% par rapport à 1990).

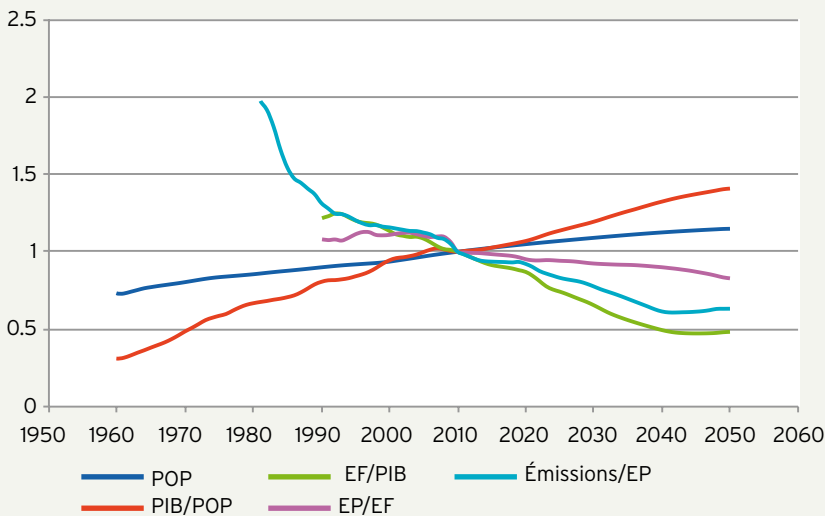
Évolution des émissions sectorielles de CO₂ par rapport à 2010 (scénario de de réduction des émissions)

	2020	2030	2040	2050
Industrie	-33%	-37%	-59%	-57%
Manufacture et services	-36%	-39%	-49%	-49%
Agriculture	-24%	-30%	-42%	-40%
Transport	-19%	-35%	-55%	-60%
Résidentiel	-44%	-62%	-72%	-75%
Électricité	49%	-68%	-100%	-86%
Total	-15%	-39%	-59%	-60%
Total (comparé à 1990)	-31%	-50%	-67%	-68%

48 - Comparaison de la trajectoire des émissions du scénario de de réduction des émissions aux trajectoires requises pour atteindre le Facteur 4



49 - Décomposition de Kaya des émissions de CO₂ (indice 1 en 2010)



La décarbonisation du secteur électrique s'avère délicate entre 2015 et 2025, au moment de la première vague de démantèlement des centrales nucléaires : durant cette période de transition, la mise en service de centrales à gaz occasionne une remontée provisoire des émissions dans le secteur. Pour limiter ces « émissions de transition », la priorité doit être donnée à des mesures très ambitieuses sur le plan de l'efficacité énergétique, pour abaisser la demande d'électricité au cours de la décennie mais aussi à stimuler le développement des énergies renouvelables à court terme. Le secteur des transports demeure la pierre d'achoppement des efforts de décarbonisation, ses émissions représentant encore 60 MtCO₂, soit la moitié du total des rejets de CO₂ à l'horizon 2050.

Le différentiel d'émissions séparant la réalisation du Facteur 4 du scénario de réduction d'émissions se monte à 28 MtCO₂, ce qui correspond à 25% des émissions résiduelles comptabilisées dans le scénario à la fin de la période. Pourtant, jusqu'en 2042, les émissions de CO₂ suivent une trajectoire permettant l'atteinte du Facteur 4 avec notamment des réductions en 2020 supérieures à -30% par rapport à 1990. Mais le rythme des réductions ralentissent vers la fin de la période et provoque la stagnation des émissions au niveau de 126 MtCO₂. ★

V. Les facteurs clés des réductions d'émissions de CO₂

L'identité dite de Kaya décompose l'évolution des émissions en faisant intervenir cinq grands facteurs :

$$CO_2 = POP \times \frac{PIB}{POP} \times \frac{EF}{PIB} \times \frac{EP}{EF} \times \frac{CO_2}{EP}$$

Cette équation exprime le niveau total des émissions sous la forme du produit de cinq variables : la population (POP), le revenu par habitant ($\frac{PIB}{POP}$), l'intensité énergétique finale du PIB ($\frac{EF}{PIB}$), l'efficacité de conversion de l'énergie primaire en énergie finale ($\frac{EP}{EF}$) (exprimant l'efficacité du système énergétique français) et le contenu carbone de l'énergie primaire ($\frac{CO_2}{EP}$).

Le graphique fait apparaître l'évolution respective des cinq facteurs entre 2010 et 2050. Il en ressort, durant la période d'étude, que :

- * la population s'accroît de 15%,
- * le revenu par habitant augmente de 41%,
- * l'intensité énergétique finale du PIB chute de 51%,
- * la quantité d'énergie primaire nécessaire à la consommation d'une unité d'énergie finale baisse de 18%,
- * l'intensité en CO₂ de l'énergie primaire est réduite de 38%.

Globalement, l'efficacité énergétique et le changement structurel sont responsables des deux tiers des réductions d'émissions, le déploiement de sources d'énergie décarbonées du tiers restant.

En accord avec la tendance de long terme, la dynamique démographique demeure positive malgré le ralentissement du taux de croissance (0,2% en 2050 selon les estimations, contre plus de 1,5% par an dans les années 1960). La croissance du PIB par tête, très élevée (plus de 4%) jusqu'à la fin des années 1970, s'est maintenue à un niveau légèrement inférieur à 2% jusqu'à 2000 et reste légèrement inférieur à 1% au cours de la période simulée. De son côté, la décroissance de l'intensité énergétique finale du PIB des dernières décennies (de -0,3% par an pendant les années 1990) s'accroît jusqu'au milieu des années 2030 environ (-3%/an en moyenne). À partir de 2035, l'absence de nouvelles réductions marque cependant une rupture avec l'évolution historique. La même analyse s'applique à l'efficacité du système français de transformation de l'énergie : dans un premier temps, l'intensité carbone de l'énergie primaire plonge, dans la continuité de la dynamique entamée après la construction de capacités de production d'énergie nucléaire (années 1990). Au-delà de 2040, en revanche, la stabilisation de l'intensité carbone contrarie l'obtention du Facteur 4. À la fin de la période d'étude, la seconde vague de démantèlement des réacteurs nucléaires coïncide avec la mise en service de nouvelles centrales au gaz appelées à combler le fossé existant entre la production d'énergie assurée par l'EPR et les sources renouvelables d'une part et la demande totale d'électricité d'autre part. ★

Réductions d'émissions et périmètre des émissions

Une part non négligeable des émissions de gaz à effet de serre est exclue du champ du présent projet. Le scénario se penche en effet uniquement sur les émissions nationales de CO₂ d'origine énergétique : en d'autres termes, exception faite de ceux se rapportant à l'énergie, les rejets attribuables à l'agriculture ne sont pas pris en compte, ce qui omet de fait la question du changement d'utilisation des sols. De même, les émissions en amont et en aval extérieures au cadre national ne font pas partie de l'étude : ceci renvoie à la distinction entre les émissions générées par la production à l'intérieur des frontières d'un territoire donné et celles dérivant de la consommation sur ce même territoire (leur calcul imposerait d'intégrer les émissions liées à la production des importations et de soustraire les émissions liées à la production des exportations). Enfin, ni le transport international ni les gaz à effet de serre autres que le dioxyde de carbone ne sont inclus dans l'analyse.

En conséquence, le présent scénario porte sur 69%²⁹ du total des émissions françaises internes (fraction des émissions entraînées par les activités de production en France). Si les émissions induites

par la consommation de produits fabriqués en dehors du territoire français devaient être ajoutées, le scénario présenté ici ne représenterait plus que 44% des émissions françaises.

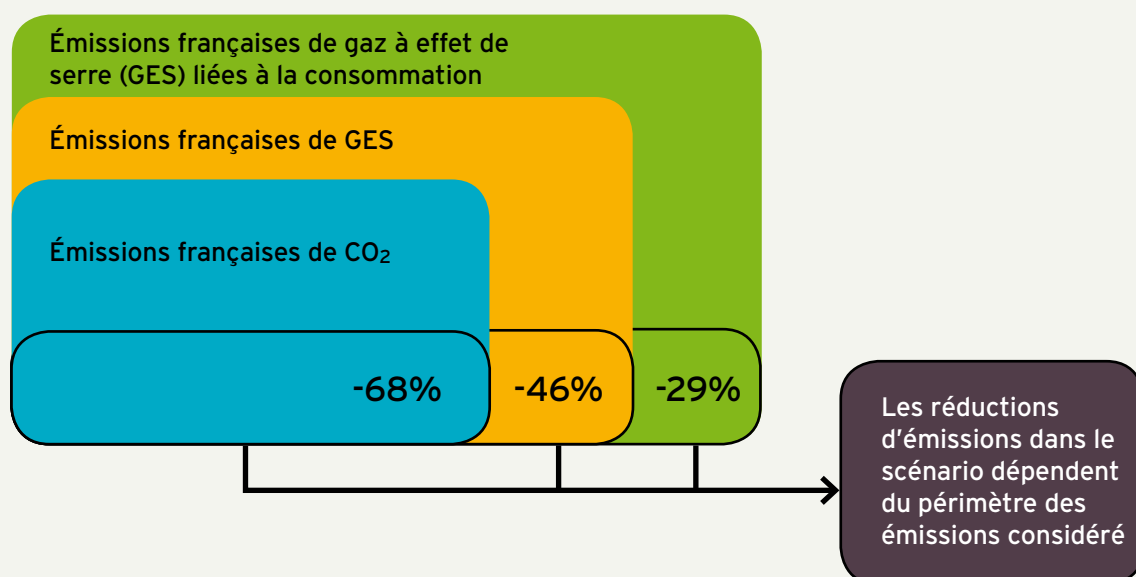
La chute de 68% des émissions d'ici 2050 correspond ainsi à une baisse de 46% des émissions totales de GES en France et de 29% des émissions totales de GES liées à la consommation sur le territoire français³⁰. Outre les incertitudes caractérisant la transition énergétique, ces chiffres mettent en évidence l'obligation minimale de respecter le Facteur 4 en France pour lutter efficacement contre les changements climatiques.

Dans le chapitre suivant, nous explorons l'impact d'autres déterminants sur les trajectoires d'émissions dont l'évolution revêt une forte incertitude. Des mesures supplémentaires, même si elles n'ont pas été soutenues par une majorité de parties prenantes, s'avèrent indispensables au relèvement du niveau d'ambition du scénario pour atteindre le Facteur 4. Elles seront également analysées dans le chapitre 4.★

²⁹- CITEPA (2011) « Inventaire des émissions en France ».

³⁰- Edgar G. Hertwich / Glen P. Peters (2009) « Carbon Footprint of Nations: A Global, Trade-Linked Analysis », *Environmental science & technology*, 43 (16).

Périmètre des réductions d'émissions (par rapport à 1990)

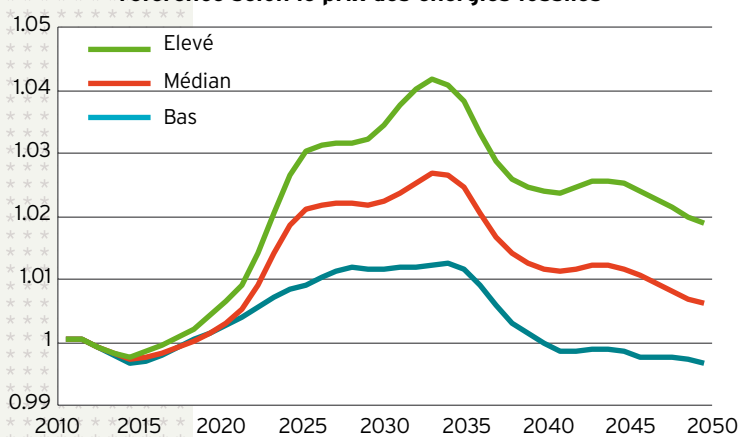


4

Comment réconcilier acceptabilité et Facteur 4 ?

Après avoir consacré le chapitre précédent à l'acceptabilité des mesures politiques, nous allons à présent étudier d'autres facteurs influençant l'évolution des émissions de CO₂. Nous explorons les impacts des incertitudes concernant le niveau de prix des énergies fossiles, ainsi que l'éventualité de l'instauration d'une taxe d'ajustement aux frontières et d'une mutation des modes de consommation. Les incertitudes abordées dans ces variantes autour du scénario acceptable sont d'une nature différente par rapport à la question de l'acceptabilité.

50 - Évolution du PIB dans le scénario de réduction des émissions par rapport au scénario correspondant de référence selon le prix des énergies fossiles



31- Le terme « industrie » renvoie aux industries intensives en énergie.

32- Le terme « tertiaire » agrège les services et les activités manufacturières peu intensives en énergie.

I. Une hypothèse centrale : le prix des énergies fossiles

Dans le chapitre précédent, le scénario de réduction des émissions exposé s'appuie sur les prix des énergies fossiles anticipés dans le World Energy Outlook (AIE, 2011). Pour mettre en évidence l'impact des hypothèses relatives aux prix de l'énergie sur les réductions des émissions, deux autres scénarios ont été élaborés : l'un projetant des prix des énergies fossiles de 30% inférieurs, l'autre des prix de 30% supérieurs.

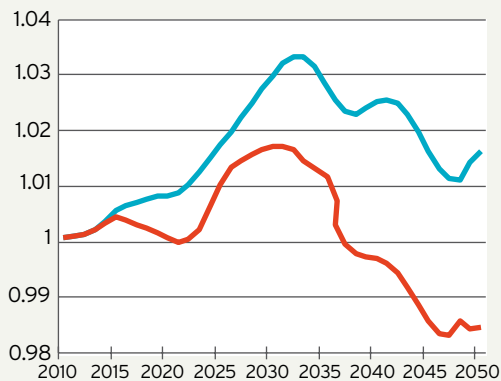
Comme l'on pouvait s'y attendre, plus les prix de l'énergie sont élevés, plus les réductions d'émissions le sont également et inversement des prix bas de l'énergie conduisent à des réductions d'émissions plus faibles. Néanmoins, la baisse des émissions à l'horizon 2020 demeure dans tous les cas supérieure à 25% par rapport à 1990. À long terme, seul le maintien des prix de l'énergie au niveau le plus haut est compatible avec l'atteinte du Facteur 4. Dans le scénario avec les prix bas, les réductions d'émissions s'accroissent dans un premier temps par rapport au scénario avec les prix médians. Ceci s'explique par le jeu des prix relatifs des différentes énergies qui favorisent une substitution du pétrole, du charbon et de l'électricité vers le gaz. À plus long terme, les émissions totales de CO₂ n'enregistrent qu'un recul de 57% par rapport à 2010.

La principale répercussion sectorielle par rapport à l'hypothèse de prix médians concerne la rénovation du parc immobilier existant. Dans le cas de prix de l'énergie plus bas, les incitations financières à la réhabilitation ne suffisent pas à induire une transition significative vers les classes énergétiques supérieures. Dans ce même cas, la décarbonisation du secteur électrique est complète dans la mesure où le prix de l'électricité reste supérieur à celui du gaz tout au long de la période. La diminution de la demande qui s'ensuit permet un relâchement des contraintes freinant la décarbonisation du secteur électrique.

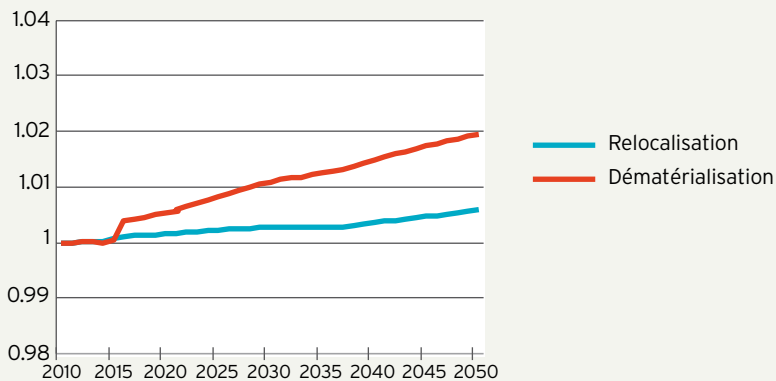
Réduction des émissions totales et sectorielles par rapport à 2010 en fonction du prix des énergies fossiles

	2020			2030			2040			2050		
	Bas	Médian	Haut	Bas	Médian	Haut	Bas	Médian	Haut	Bas	Médian	Haut
Industrie³¹	-33%	-33%	-33%	-38%	-37%	-53%	-48%	-59%	-67%	-57%	-57%	-77%
Tertiaire³²	-34%	-36%	-38%	-40%	-39%	-59%	-44%	-49%	-64%	-47%	-49%	-67%
Agriculture	-19%	-24%	-20%	-26%	-30%	-48%	-30%	-42%	-58%	-33%	-40%	-61%
Transport	-8%	-19%	-19%	-22%	-35%	-37%	-38%	-55%	-57%	-54%	-60%	-65%
Résidentiel	-28%	-44%	-37%	-43%	-62%	-61%	-54%	-72%	-74%	-65%	-75%	-79%
Électricité	-61%	49%	-53%	-34%	-68%	-43%	-99%	-100%	-100%	-100%	-86%	-99%
Total	-18%	-15%	-24%	-26%	-39%	-43%	-45%	-59%	-64%	-57%	-60%	-71%
Total /1990	-25%	-31%	-31%	-33%	-50%	-48%	-50%	-67%	-67%	-60%	-68%	-74%

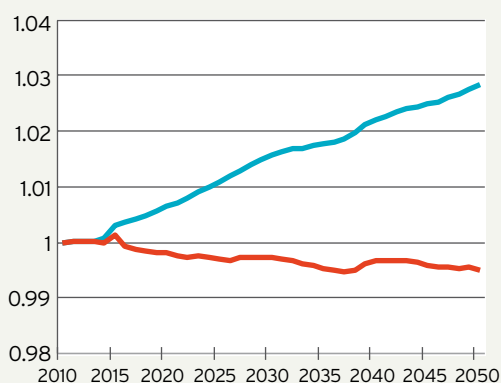
51 - Évolution des émissions de CO₂ (par rapport au scénario de réduction d'émissions du chapitre 3)



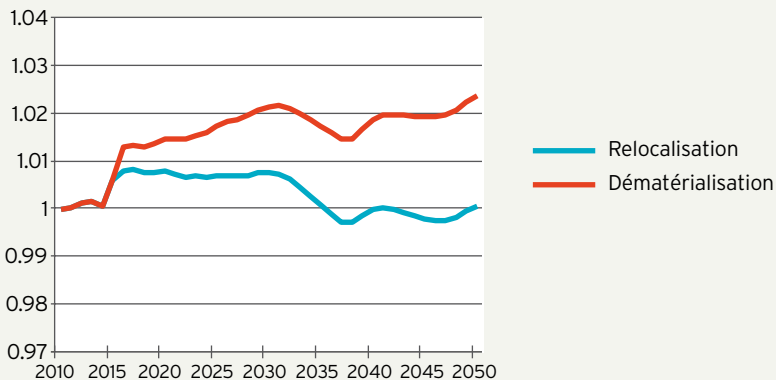
52 - Évolution du PIB (par rapport au scénario de réduction d'émissions du chapitre 3)



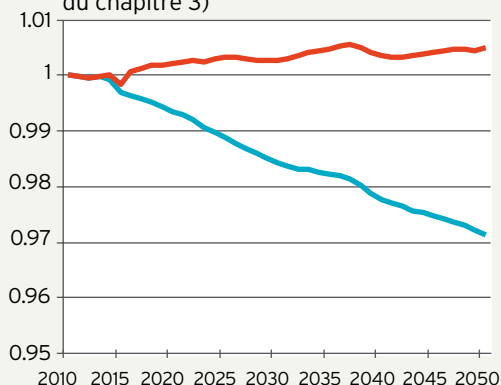
53 - Évolution de l'indice des prix à la consommation (par rapport au scénario de réduction d'émissions du chapitre 3)



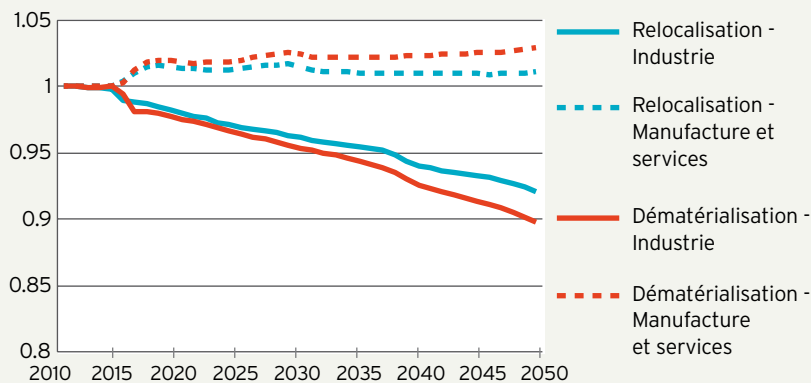
54 - Évolution de la consommation finale (par rapport au scénario de réduction d'émissions du chapitre 3)



55 - Évolution de l'indice de compétitivité (par rapport au scénario de réduction d'émissions du chapitre 3)



56 - Évolution de la production (par rapport au scénario de réduction d'émissions du chapitre 3)



L'obtention d'un taux de décarbonisation plus élevé à long terme dans le secteur électrique dans le scénario postulant les prix d'énergie les plus élevés par rapport au scénario avec les prix médian se justifie pour d'autres raisons les technologies CSC deviennent compétitives et atténuent les émissions issues de la production d'électricité fossile.

Quelles que soient les hypothèses formulées au sujet des prix des énergies fossiles, la croissance du PIB obtenue dans les scénarios de réductions d'émissions dépasse toujours celle du scénario de référence correspondant. Cette conclusion souligne l'importance des politiques de réductions d'émissions qui permettent de réduire la vulnérabilité liée à l'évolution des prix des combustibles fossiles. *

II. L'impact du mode de développement

Deux variantes sont envisagées pour refléter l'évolution des valeurs et des normes :

- ✱ La dématérialisation³³ de l'économie via l'évolution des modes de consommation : les ménages français modifient leurs habitudes en abaissant leur consommation de biens matériels au profit des services.
- ✱ La relocalisation³⁴ des capacités de production en France : les consommateurs et fabricants français préfèrent consommer des produits français au lieu de les importer.

33- La capacité d'une économie à se développer tout en contenant l'exploitation des ressources naturelles, porte le nom de découplage ou de dématérialisation.

34- La relocalisation, notamment industrielle, désigne le processus de relocalisation en France d'activités précédemment délocalisées à l'étranger, par exemple, l'implantation sur le territoire français d'un site de production antérieurement situé en Chine.

Dans le scénario de relocalisation, les ménages acceptent de payer plus cher les produits qu'ils consomment à condition que leur fabrication ait lieu en France, ce qui se traduit logiquement par une hausse des prix à la consommation (+3% en 2050). La compétitivité globale s'érode, mais la part des produits de consommation fabriqués en France progresse. Par contre le niveau de production des industries intensives en énergie diminue. L'effet conjugué de l'inflation et de la relocalisation de la production manufacturière et des services est quasiment neutre sur le niveau de consommation final. En 2050, le PIB a gagné 0,6% et les émissions de CO₂ sont plus élevées de 1 à 3% par rapport à celles du scénario présenté au chapitre 3.

La dématérialisation, se traduit par une chute de 30% de l'intensité industrielle et matérielle de la consommation à l'échéance 2050. Le recul de la consommation matérielle est partiellement compensé par la progression de la consommation de services. Globalement, la consommation finale enregistre une hausse de 2,5% en 2050. Il en résulte à la fois une croissance de 2% du PIB en 2050 comparé au scénario présenté au chapitre 3, et un abaissement des émissions de CO₂ voisin de 2%. L'indice des prix à la consommation est en légère baisse du fait de l'allègement des coûts énergétiques pesant sur l'économie. Pour la même raison, l'indice de compétitivité-prix s'accroît légèrement.

Si ces deux variantes mettent en scène une progression du PIB, les résultats obtenus sur le plan des émissions et du niveau d'activité ne se recoupent pas : la relocalisation pousse les émissions de CO₂ à la hausse, tout comme l'indice des prix à la consommation, tandis que la dématérialisation économique favorise le niveau d'activité sans pour autant s'accompagner d'émissions plus importantes. ★

III. Une taxe d'ajustement aux frontières est-elle nécessaire ?

Un certain nombre de politiques ont été proposées pour répondre aux inquiétudes soulevées par les pertes de compétitivité liées à l'instauration unilatérale d'une taxe carbone par un pays. Cette variante analyse l'impact de l'application d'une taxe d'ajustement aux frontières (TAF) à l'échelon de l'UE à 27. La finalité d'une ATF est d'enrayer la détérioration de la compétitivité attribuable à la distorsion des prix provoquée par la taxation du carbone, en soumettant les importations de produits manufacturés au versement d'une taxe. Les produits manufacturés étant supposés représenter une forte proportion des importations de l'UE, les produits industriels intensifs en énergie échappent par conséquent à l'ATF. Le niveau de taxation est fonction de l'écart existant entre l'intensité car-

bone des importations et la valeur moyenne au sein de la zone. Cette mesure donne lieu à deux scénarios : l'un prévoyant l'introduction isolée d'une ATF, l'autre combinant l'ATF aux hypothèses précédemment émises de dématérialisation et de relocalisation

L'instauration d'une ATF induit logiquement un renforcement direct de la compétitivité internationale, mais également un renchérissement des biens de consommation. L'ATF ne portant que sur les produits manufacturés, leur production nationale s'accroît, pendant que la production des industries intensives en énergie connaît l'évolution inverse. Compte tenu du poids relatif des deux secteurs dans l'économie française, il en résulte en fin de compte une légère croissance économique à long terme, assortie d'une baisse plus nette des émissions de CO₂.

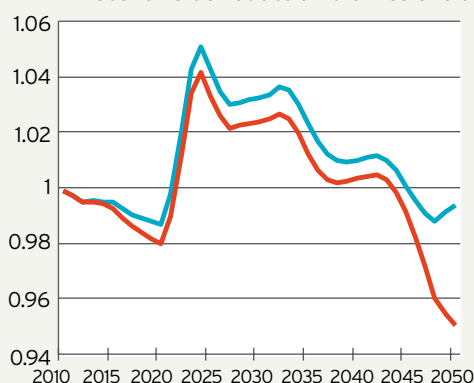
La prise en compte conjointe des hypothèses se rapportant à la relocalisation et à la dématérialisation ouvre la voie à de meilleurs résultats, tant sur le plan économique qu'environnemental. Dans cette variante, les émissions de CO₂ chutent de 5% de plus en 2050, le PIB et la consommation finale s'élèvent de 2% et la compétitivité s'en trouve consolidée. Par contre l'indice des prix à la consommation s'élève de 5%. ★

IV. Comment atteindre le Facteur 4 ?

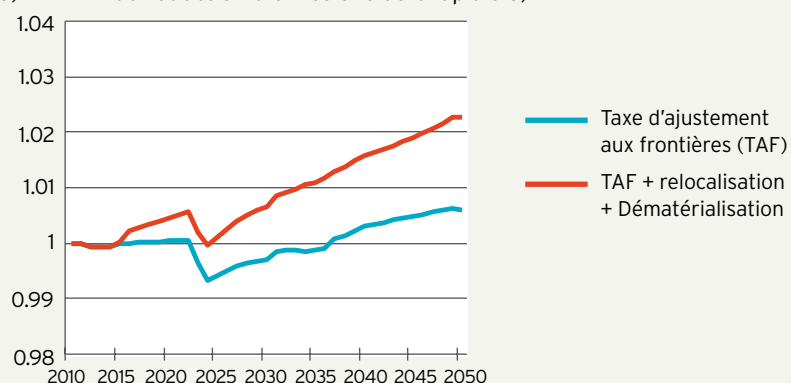
Des mesures complémentaires, jugées acceptables par environ 50% des parties prenantes, sont envisagées ici pour intensifier la lutte contre les émissions de CO₂ :

Une taxe carbone-énergie (TCE) : La taxe carbone est remplacée par une taxe carbone-énergie encourageant la baisse de la consommation d'énergie. Assise à la fois le contenu carbone et le contenu énergétique de l'énergie, elle concerne toutes les formes d'énergie (charbon, gaz, pétrole, nucléaire), à l'exclusion des sources renouvelables ; l'électricité n'y échappe donc pas. Le taux de taxe pour la partie carbone est identique à celle du chapitre 3. Le taux de taxe pour la partie énergie est calibré en 2012 de manière à ce que les revenus totaux de la taxe carbone-énergie soient issus à moitié de la partie carbone et à moitié de la partie énergie. L'application de la TCE reviendrait en moyenne à doubler le taux de la taxe carbone sur les combustibles fossiles. L'énergie nucléaire serait pour sa part soumise à un prélèvement équivalent à la fraction énergétique de la TCE sur les combustibles fossiles. La TCE vise d'une part, à inciter les ménages à faire preuve d'une plus grande sobriété dans leurs comportements, notamment en limitant leur consommation d'électricité spécifique, d'autre

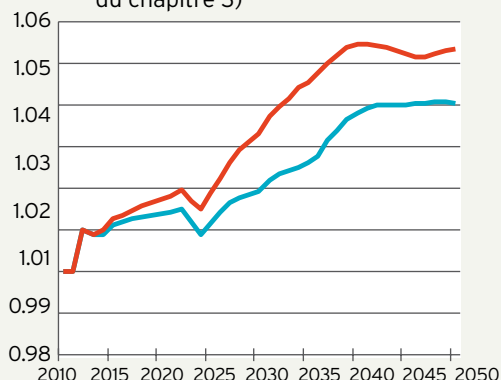
57 - Évolution des émissions de CO₂ (par rapport au scénario de réduction d'émissions du chapitre 3)



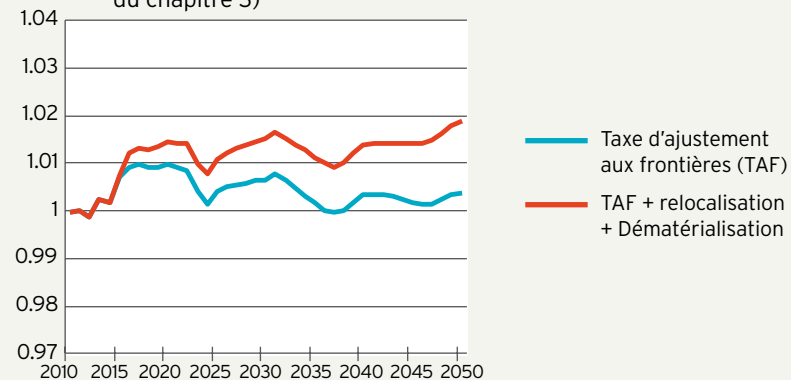
58 - Évolution du PIB (par rapport au scénario de réduction d'émissions du chapitre 3)



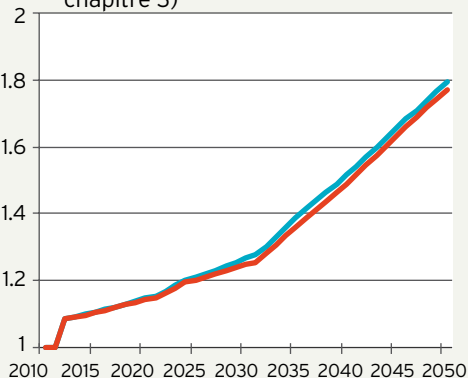
59 - Évolution des prix à la consommation (par rapport au scénario de réduction d'émissions du chapitre 3)



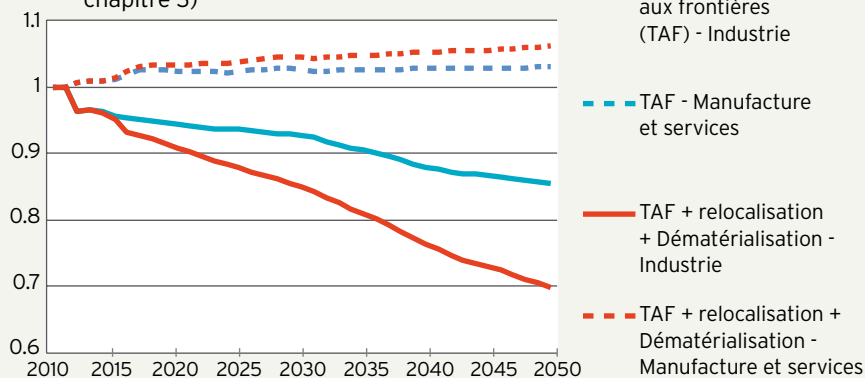
60 - Évolution de la consommation finale (par rapport au scénario de réduction d'émissions du chapitre 3)



61 - Évolution de la compétitivité (par rapport au scénario de réduction d'émissions du chapitre 3)



62 - Évolution de la production (par rapport au scénario de réduction d'émissions du chapitre 3)



part, à renforcer l'efficacité énergétique de l'industrie et du secteur tertiaire.

Une obligation de rénovation est imposée au parc immobilier existant. Le calendrier de sa mise en œuvre, donné dans le tableau suivant, est élaboré en tenant compte du type de bâtiment (maison individuelle, habitat collectif ou logement social) et de ses performances énergétiques, les efforts portant en premier lieu sur les classes d'efficacité énergétique inférieures. La mesure se fixe pour objectif d'atteindre la classe B (80 kWh/m²/an). Les logements sociaux constituent le premier terrain d'application de l'obligation, non seulement parce qu'ils forment le segment le plus propice à

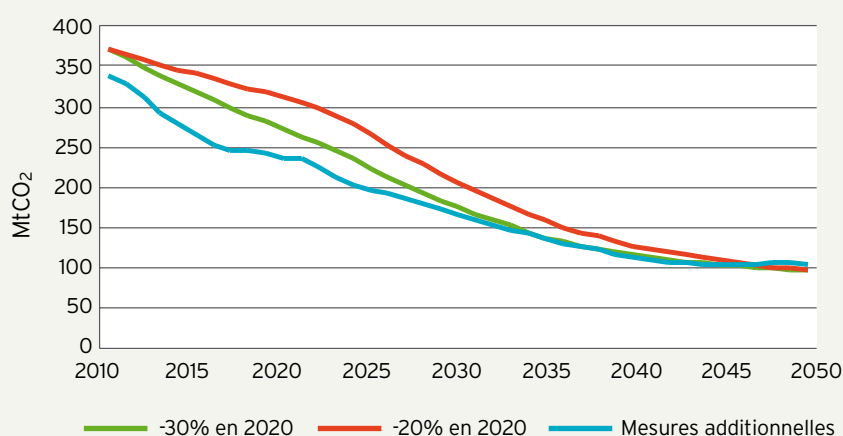
sa mise en œuvre du fait de la structuration du secteur, mais également au regard du niveau de revenu a priori plus modeste de leurs occupants. Le rythme de rénovation est calibré de manière à laisser suffisamment de temps aux entreprises du secteur de la construction pour se restructurer et former leur personnel en vue de participer à ce vaste plan d'action national.

Calendrier de l'obligation de rénovation

	G	F	E	D	C
Logement social	2016	2016	2016	2020	2020
Logements collectifs	2020	2024	2024	2028	2032
Maisons individuelles	2018	2022	2026	2030	2034

Réductions d'émissions par secteur (par rapport à 2010)				
	2020	2030	2040	2050
Industrie	-41%	-43%	-57%	-63%
Manufactures et services	-51%	-55%	-70%	-75%
Agriculture	-32%	-37%	-52%	-58%
Transport	-23%	-40%	-57%	-63%
Résidentiel	-48%	-67%	-81%	-85%
Électricité	-20%	-90%	-100%	-85%
Total	-43%	-48%	-65%	-69%
Total/1990	-36%	-59%	-73%	-75%

63 - Comparaison de la trajectoire des émissions du scénario intégrant les mesures supplémentaires et de celles requises pour atteindre le Facteur 4

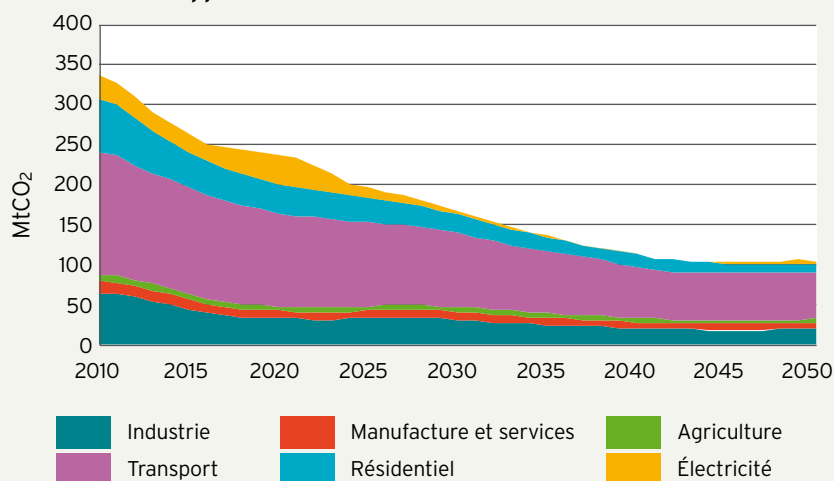


Le nombre total de logements réhabilités reste inférieur à 200 000 unités d'ici 2020, avant de grimper progressivement pour atteindre les 900 000 unités par an à l'horizon 2040. Par la suite, le rythme annuel de rénovations ralentit. Au terme de la période d'étude, 16,1 millions de bâtiments bénéficient de rénovation.

L'application de ces mesures supplémentaires permet l'obtention du Facteur 4.

En mettant en œuvre les mesures additionnelles, la trajectoire suivie par les émissions est inférieure à celle des deux scénarios garantissant le Facteur 4 (respectivement -20% et -30% en 2020). L'abattement précoce nécessaire à l'accomplissement du Facteur 4 plaide donc pour la mise en œuvre d'actions urgentes sauvegardant la dynamique prescrite pour les réductions d'émissions en fin de période. Leur application immédiate abaisserait en outre les émissions cumulées, et par là même les conséquences sur l'environnement.

64 - Émissions sectorielles de CO₂ dans le scénario intégrant les mesures supplémentaires



Les émissions sectorielles chutent à un niveau extrêmement bas. Les émissions du secteur résidentiel sont divisées par 6.6 grâce à l'obligation de rénovation. Enfin, le transport et les secteurs productifs voient une réduction de leurs émissions de deux tiers environ. Les émissions du secteur électrique après une décarbonisation totale en 2040 réaugmentent légèrement en fin de période du fait d'un recours au gaz pour combler le gap entre la demande d'électricité et la pénétration des énergies renouvelables, et le nucléaire résiduel. Les résultats sont similaires à ceux du chapitre 3 pour ce qui est des secteurs enregistrant les plus fortes baisses d'émissions (résidentiel et électricité) et de ceux dont la décarbonisation constitue le défi majeur (transport et industrie intensive en énergie).

Sur le plan macroéconomique, la croissance économique moyenne du scénario intégrant ces mesures supplémentaires est légèrement inférieure au scénario de référence, indépendamment de l'option de recyclage des recettes de la TCE. Néanmoins, jusqu'en 2030, les mesures complémentaires exer-

s'élève respectivement à 18,4% en 2010, 15,8% en 2050 dans le scénario de référence et 11,3% en 2050 si le Facteur 4 est réalisé.

L'apparente régularité du recul des dépenses cache en réalité des tendances contradictoires. Les dépenses de carburants diminuent tout au long de la période à un rythme sensiblement plus élevé que celui du scénario de référence reflétant l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules et le report modal sur les transports en commun. La proportion des dépenses d'énergie représentée par les autres moyens de transport s'accroît ainsi de 20% en 2030 avant de revenir à son niveau initial à l'horizon 2050.

S'agissant des dépenses résidentielles, la majeure partie des efforts sont déployés durant la décennie 2020-2030, au cours de laquelle cette fraction de dépenses enregistre une chute beaucoup plus rapide que celle constatée dans le scénario de référence. Sous l'effet de l'obligation de rénovation, la part des dépenses de construction et de réhabilitation monte quant à elle en flèche à l'échéance 2030 (multiplication par 2,7).

Comme nous l'avons relevé plus haut, ces évolutions se soldent par une nette contraction des dépenses. *

		Taux de chômage (par rapport au scénario de référence)		
		2020	2030	2040
Scénario intégrant les mesures supplémentaires	Transfert au bénéfice des ménages	-0,2%	-1,9%	-1,0%
	Abaissement des charges sociales	-1,3%	-3,1%	-2,4%
	Gains d'efficacité énergétique et essor des renouvelables	-0,2%	-1,9%	-1,0%

Part des dépenses des ménages dédiées aux services énergétiques dans le Scénario avec mesures supplémentaires par rapport au Scénario de référence	2020	2030	2050
Construction et rénovation	156%	262%	67%
Carburant	-17%	-32%	-49%
Énergie résidentielle	-15%	-32%	-36%
Autres transports	10%	19%	1%
Part totale du budget énergétique	-1%	-5%	-28%

Analyses de sensibilité

1 - Paramètres de l'analyse de sensibilité et nomenclature des scénarios

	Nom du scénario	CSC secteur électrique	Coût EPR (€/kW)	Coût de prolongation (€/kW)	Agrocarburants 1 ^e et 2 ^e génération	Décroissance du coût des ENR entre 2010 et 2050
Paramètres par défaut	Scénario acceptable	disponible	2900	700	disponibles	- X%
	Scénario AMA	disponible	2900	700	disponibles	- X%
Alternatives	Sans CSC	indisponible	2900	700	disponibles	- X%
	EPR cher	disponible	4500	700	disponibles	- X%
	Prolongation chère	disponible	2900	1400	disponibles	- X%
	Sans agrocarburants	disponible	2900	700	indisponibles	- X%
	Renouvelables chers	disponible	2900	700	disponibles	- X/2%
	Pessimisme technologique	indisponible	4500	1400	indisponibles	- X/2%

I. Description de l'analyse de sensibilité

Les résultats de décarbonisation du scénario comprenant l'ensemble des mesures jugées acceptables par les parties prenantes dépendent bien sûr des hypothèses adoptées notamment sur l'évolution du progrès technique ainsi que sur la disponibilité et l'acceptabilité des technologies. C'est pourquoi nous menons ici une analyse de sensibilité sur différents paramètres. Nous testons les paramètres listés dans le tableau 1 : la disponibilité du CSC, les coûts d'investissement dans la construction de nouvelles centrales nucléaires, dans la prolongation de la durée de vie des centrales nucléaires existantes ainsi que dans les renouvelables électriques et la disponibilité des agrocarburants. L'alternative pessimiste pour les agrocarburants considère que les recherches ne permettent pas de développer des agrocarburants de seconde génération et que les agrocarburants de première génération sont bannis du fait de leurs impacts sur la compétition d'usage des sols et de leur faible performance environnementale. Pour les ENR, l'alternative pessimiste considère que les coûts des ENR énergies renouvelables, ainsi que les tarifs d'achat, décroissent deux fois moins vite que dans le scénario acceptable décrit au chapitre 3.

La sensibilité du « scénario acceptable » à chacun de ces alternatives prises indépendamment les unes des autres ainsi qu'au cumul simultané de ces 5

alternatives technologiques pessimistes a été évaluée. L'alternative « pessimisme technologique » a également été évaluée dans le cas du scénario avec mesures additionnelles (dorénavant noté AMA). Le tableau 1 décrit le paramétrage et la nomenclature de chacun de ces 7 scénarios. ★

II. Analyse de sensibilité pour le « Scénario Acceptable »

Le tableau 2 présente les impacts en termes de réductions d'émissions pour l'analyse de sensibilité. À moyen comme à long terme, l'impossibilité d'avoir recours aux agrocarburants est le paramètre ayant le plus fort impact sur les réductions d'émissions. Les autres paramètres pris l'un indépendamment des autres ont peu d'impact sur les réductions d'émissions.

En revanche, lorsque ces paramètres sont combinés tous ensemble, les réductions d'émissions sont fortement réduites puisqu'elles n'atteignent que -53% par rapport à 1990. Le Facteur 4 est donc loin d'être atteint en 2050. Par contre, comme les alternatives technologiques hors celle sur les agrocarburants visent le secteur électrique et que les technologies concernées (EPR, prolongation des centrales existantes, CSC et ENR) ne se déploient dans le scénario acceptable présenté au chapitre 3 qu'après 2020, les réductions d'émissions en 2020 dans le scénario « pessimisme technologique »

2 - Tests de sensibilité du scénario «acceptable» du chapitre 3 - Émissions, prix de l'électricité et impacts macroéconomiques

	Réductions d'émissions CO ₂ (/1990)		Prix électricité (€/MWh)		PIB (/acceptable)		Taux de chômage (/acceptable)		Dépenses énergie des ménages (/acceptable)	
	2020	2050	2030	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050
Scénario acceptable	-31%	-68%	1081	1100	-	-	-	-	-	-
Sans CSC	-32%	-67%	1110	1077	0,0%	0,2%	0,0%	-0,1%	0,0%	-0,3%
EPR cher	-33%	-65%	1151	1217	0,1%	-1,1%	-0,1%	0,8%	-0,4%	2,7%
Prolongation chère	-31%	-67%	1090	1153	0,0%	-0,2%	0,0%	0,2%	0,0%	0,6%
Sans agrocarburants	-28%	-61%	1109	1087	-0,2%	-1,2%	0,3%	1,2%	0,3%	0,4%
Renouvelables chers	-31%	-66%	1085	1163	0,0%	-0,2%	0,0%	0,3%	0,0%	0,9%
Scénario défavorable	-28%	-53%	1169	1332	-0,2%	-2,3%	0,2%	2,4%	0,4%	4,3%

3 - Test de sensibilité pour le scénario «acceptable» - Impacts sur les investissements dans le secteur électrique (GW)

	Gaz sans CSC		Gaz avec CSC		EPR		Charbon avec CSC		Fioul		Total	
Scénario acceptable	14,4		7,2		22,82		2,22		7,2		53,84	
Sans CSC	16,8	(2,4)	0	(-7,2)	27,71	(4,9)	0	(-2,2)	7,2	(0)	51,71	(-2,1)
EPR cher	19,2	(4,8)	12,8	(5,6)	8,15	(-14,6)	4,44	(2,2)	7,2	(0)	51,79	(-2)
Prolongation chère	14,4	(0)	7,2	(0)	21,19	(-1,6)	2,22	(0)	7,2	(0)	52,21	(-1,6)
Sans agrocarburants	16,8	(2,4)	6,4	(-0,8)	24,45	(1,7)	0,74	(-1,5)	7,2	(0)	55,59	(1,8)
Renouvelables chers	14,4	(0)	7,2	(0)	21,19	(-1,6)	2,22	(0)	7,2	(0)	52,21	(-1,6)
Scénario défavorable	24,8	(10,4)	0	(-7,2)	11,41	(-11,4)	0	(-2,2)	9,6	(2,4)	45,81	(-8)

sont proches du scénario acceptable du chapitre 3 et l'écart sur les émissions est déterminé par la seule alternative sur les agrocarburants. Dans le scénario «pessimisme technologique», les mesures jugées comme acceptables par les parties prenantes ne permettraient alors pas d'atteindre le Facteur 4, même si les réductions d'émissions en 2020 restent significatives.

Les prix de l'électricité augmentent dans le court terme dans tous les scénarios. Le paramètre le plus déterminant est le coût d'investissement des nouvelles centrales nucléaires. Ainsi, l'augmentation de ce coût de 55% conduit à une augmentation du prix de l'électricité de 6% dans court terme et 11% dans le long terme par rapport au «Scénario acceptable». L'indisponibilité du CSC, aussi bien que celle des agrocarburants, induit une augmentation de 3% dans le court terme, puisque, sans ces technologies l'assiette de la taxe carbone est élargie, mais l'on assiste à une réduction légère de ce prix dans le long terme puisque l'indisponibilité de ces technologies prévient un lock-in dans des technologies émettrices de carbone. Le cas pessimiste pour le coût d'investissement des renouvelables (respectivement pour le coût de la prolongation du nucléaire existant) n'a pas d'effet dans le court terme et induit une augmentation du prix de l'électricité de 5% (respectivement 6%) sur le long terme. Enfin, le scénario «pessimisme technologique» implique une augmentation du prix

de l'électricité de 8% sur le court terme et 21% sur le long terme, comparé au «Scénario acceptable» présenté au chapitre 3.

Les impacts macroéconomiques tels que sur la croissance, le chômage et sur les dépenses énergétiques des ménages sont faibles, mais globalement négatifs pour chacune des alternatives (cf. tableau 2). Les paramètres déterminants sont la disponibilité des agrocarburants et le coût des nouvelles installations nucléaires. Néanmoins, les impacts sur le court terme sont très limités, ceci même dans le scénario «pessimisme technologique», (inférieurs à 1% en 2020 par rapport au scénario acceptable). Sur le long terme, l'augmentation des prix de l'électricité et des coûts d'usages des carburants conduit à une augmentation de 4.3% des dépenses énergie des ménages dans le scénario «pessimisme technologique».

L'impact sur les investissements dans le secteur électrique est extrêmement faible. En effet, un coût de l'EPR revu à la hausse diminue fortement sa place dans le mix énergétique du secteur électrique au profit du gaz avec notamment une place importante laissée à la technologie CSC si celle-ci est disponible. À cause de la faible taxe carbone en début de période, la moitié des reports d'investissement se fait sur du gaz non équipé de CSC. En revanche, la non-disponibilité de cette technologie implique un recours aux EPR et au gaz non CSC. Il est intéressant de constater que la plupart des scénarios reposent

4 - Tests de sensibilité du scénario avec mesures additionnelles
Émissions, prix de l'électricité et impacts macroéconomiques

	Réductions d'émissions CO ₂ (/1990)		Prix électricité (€/MWh)		PIB (/AMA)		Taux de chômage (/AMA)		Dépenses énergie des ménages (/AMA)	
	2020	2050	2030	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050
AMA	-44%	-75%	1179	1600	-	-	-	-	-	-
Scénario AMA défavorable	-40%	-68%	1192	1503	-0.2%	-1.6%	0.3%	1.5%	0.3%	-0.1%

5 - Tests de sensibilité pour le scénario avec mesures additionnelles (AMA)
impacts sur les investissements dans le secteur électrique (GW)

	Gaz sans CCS	Gaz avec CCS	EPR	Charbon avec CSC	Turbine fioul	Total
Scénario AMA	14.4	2.4	0	0	2.4	19.2
Scénario AMA +Pessimisme technologique	14.4	2.4	0	0	4.8	21.6

sur une utilisation non négligeable du gaz, au moins comme une énergie de transition.

Les autres paramètres ont des impacts beaucoup plus limités. La capacité totale installée est toujours au même niveau, mettant en exergue l'importance croissance de l'électricité comme vecteur énergétique. Cependant, quelle que soit l'hypothèse pessimiste prise en compte, celle-ci conduit à une augmentation du prix de l'électricité (au moins temporaire), comparé au scénario acceptable, impliquant une réduction de la demande, ce qui, réduisant la rentabilité des investissements, diminue l'investissement nécessaire (même si de manière négligeable).

Lorsque l'ensemble de ces incertitudes est cumulé (scénario défavorable), la cherté du nucléaire et l'indisponibilité de la technologie CSC impliquent un recours massif à des centrales au gaz sans CSC. Cependant, seuls sont construits 10,4 GW de centrales à gaz, à comparer aux 18,6 GW manquants de nucléaire et gaz avec CSC. Ainsi, l'impact haussier sur le prix de l'électricité par ces contraintes sur l'offre diminue conséquemment (-16%) les investissements cumulés dans le secteur électrique.

III. Analyse de sensibilité pour le Scénario avec mesures additionnelles

De la même manière, l'impact agrégé de l'ensemble de ces paramètres est analysé pour le scénario avec mesures additionnelles (décrit au chapitre 4).

L'impact des contraintes sur les réductions d'émissions est également significatif. Néanmoins, la baisse des réductions d'émissions est moindre par rapport au scénario « acceptable » du chapitre 3 (7 points de réductions en moins contre 13 points précédemment). Ainsi, il est important de noter que la mise en œuvre des mesures additionnelles permet de réduire de moitié l'impact des incertitudes liées au développement des technologies sur les réductions d'émissions. De la même manière, les impacts macroéconomiques liés au taux de chômage, à la croissance économique et aux dépenses énergétiques des ménages sont plus limités que pour le scénario sans les mesures additionnelles. Ceci est en partie expliqué par le très faible impact que les incertitudes ont sur les investissements dans le secteur électrique dans ce scénario avec mesures additionnelles. Dans ce scénario la demande d'électricité est réduite par rapport au scénario « acceptable » et donc les investissements dans la capacité de production électrique aussi.

Le scénario avec mesures additionnelles est donc plus robuste aux incertitudes. ★

Conclusion

6

Cet effort collaboratif de création de scénarios se décline en trois étapes distinctes. Dans un premier temps, nous nous sommes attachés à définir la méthodologie collaborative de conception de scénarios. Nous avons ensuite appliqué cette méthodologie en incorporant les visions et contributions de différentes parties prenantes dans le processus de création du scénario. Pour terminer, l'analyse du scénario énergétique ainsi élaboré a donné lieu à un débat constructif sur la transition à accomplir et les mesures politiques nécessaires pour y parvenir.

Les réductions d'émissions découlant de l'application des mesures jugées acceptables par au moins la moitié des parties prenantes se rapprochent du seuil du Facteur 4 sans pour autant l'atteindre. En 2020, le scénario de mitigation conduit à une baisse de 33% des émissions de CO₂ par rapport à 1990. Ce résultat est plus ambitieux que l'objectif européen de 20%. Néanmoins, l'exécution de l'ensemble des mesures n'atteint que -68% et ne réalise donc pas le Facteur 4. Certes, le Facteur 4 est réel dans le secteur résidentiel, tout comme dans le secteur électrique, mais les incertitudes subsistant dans le domaine des transports et des secteurs productifs sont susceptibles de contrarier des ambitions plus hautes. Pour ce qui est des transports, l'évolution des émissions dépendra en grande partie de l'évolution de la mobilité, dont l'étalement urbain est un déterminant incontestable. La prédominance du transport routier et l'aspiration à une mobilité croissante, associées à la mutation des dynamiques urbaines en France, sont des déterminants de la transition énergétique. Dans les secteurs productifs, le niveau des émissions sera déterminé par les prix relatifs du gaz et de l'électricité et le rythme du progrès technique. Cette transformation pourrait affecter significativement les performances économiques et justifier par là même l'organisation d'un débat national sur la relocalisation des activités productives.

Le scénario décrit ici n'envisage pas l'avènement d'un changement de paradigme des modes de développement : le PIB par habitant devrait en effet gagner 41% entre 2010 et 2050, et la consommation, non pas s'orienter à la baisse, mais plutôt se redéployer vers des produits et services moins intensifs en énergie. Les politiques climatiques qui sont passées en revue, en renchérissant notamment les énergies fossiles, stimulent l'essor des techno-

logies sobres en carbone et limitent la demande d'énergie. Cela amène un abaissement de la facture énergétique d'ensemble et un plafonnement du budget énergétique des ménages. Ces mesures permettent par ailleurs de maîtriser les retombées négatives de la hausse des prix des combustibles fossiles. L'affectation d'une part grandissante des investissements à l'amélioration de l'efficacité énergétique stimule aussi la croissance du PIB et fait reculer le chômage. De ce point de vue, l'instauration d'une taxe carbone, en faisant grimper le coût des combustibles, porte les promesses d'une réorientation des flux financiers vers des options plus sobre en énergie. La transition vers une économie faiblement carbonée risque de rester lettre morte sans le recours à cet outil décisif, soutenu par la majorité des parties prenantes interrogées.

Le projet a mis en évidence des points de consensus sur le contenu des politiques de réduction des émissions, mais également des désaccords. Or, parmi les mesures divisant les parties prenantes, deux peuvent conditionner directement la réalisation du Facteur 4 : l'obligation de rénovation du parc immobilier existant, et la taxe carbone-énergie (en lieu et place de la taxe carbone). Le présent rapport souligne en outre la nécessité d'une action politique forte en faveur de la décarbonisation du système énergétique. Dans cette optique, il appartient aux parties prenantes et aux gouvernements d'établir conjointement la hiérarchie des valeurs et des actions en s'appuyant sur les données scientifiques et les préoccupations de la population. Si la question de la primauté des intérêts de long terme (par exemple, la sauvegarde des besoins des générations futures) sur les considérations court-termistes relève quant à elle de l'éthique et doit être soumise à l'examen de l'opinion publique, les connaissances scientifiques prouvent plus que jamais l'urgence de la situation et appellent à une action d'envergure dans les meilleurs délais.

Ce projet prouve par ailleurs à quel point l'obtention d'un consensus sur l'acceptabilité de mesures ambitieuses entre les parties prenantes est difficile, surtout si leur activité s'en ressent directement. En tout état de cause, la responsabilité ultime incombe au gouvernement de se comporter en médiateur pour opérer les changements conditionnant la réalisation des objectifs climatiques et forger les compromis permettant de surmonter de tels climaxes.★



Tableaux

synthétiques du scénario de réduction des émissions acceptable

Impact financier des politiques et mesures dans le scénario de réduction des émissions

	2010	2020	2030	2040	2050
TRANSPORT					
Écoredevance poids lourds	0	1.3	1.1	1.1	1.2
Taxe sur le kérosène	0	1.6	1.1	1.4	1.3
TIPP	23.8	21.4	17.9	13.4	12.9
INVESTISSEMENTS DANS LES INFRASTRUCTURES					
Transports urbains	+3 milliards d'€ par an entre 2012 et 2030			-	-
Transport ferroviaire	+3 milliards d'€ par an entre 2012 et 2030			-	-
Transport routier	-6 milliards d'€ par an entre 2012 et 2030			-	-
ÉLECTRICITÉ					
Recettes de la CSPE = financement des tarifs d'achat	2.9	1.9	7.2	17.8	12.7
SECTEUR RESIDENTIEL					
Crédit d'impôt	-	-3.3	-2.5	-0.8	-0.5
Éco-prêt	-	-3.3	-1.9	-0.6	-0.4
Construction	-	-9.5	-9.4	-7.7	-6.3
Rénovation	-	-14.9	-10.3	-3	-1.8
MESURES GLOBALES					
Taxe carbone	0	13.7	18.1	23.9	34.8
BILAN	26,7	8,9	21,3	45,5	53,9

Émissions sectorielles de CO₂ par rapport à 2010 (scénario de réduction des émissions)

	2020	2030	2040	2050
Industrie	-33%	-37%	-59%	-57%
Manufacture et services	-36%	-39%	-49%	-49%
Agriculture	-24%	-30%	-42%	-40%
Transport	-19%	-35%	-55%	-60%
Résidentiel	-44%	-62%	-72%	-75%
Électricité	49%	-68%	-100%	-86%
Total	-15%	-39%	-59%	-60%
Total (par rapport à 1990)	-31%	-50%	-67%	-68%

Mesures politiques acceptables dans le scénario de réduction des émissions (en Mtep)

Secteur résidentiel	Crédit d'impôts. Les dépenses de rénovation sont éligibles aux crédits d'impôt sur le revenu. L'augmentation du taux moyen et l'élargissement des critères d'éligibilité sont modélisés au cours de la période 2009-2050 en retenant un taux de crédit uniforme égal à 30% de l'investissement.
	Prêt à taux zéro pour la rénovation. Il s'applique aux programmes de rénovation moyennant un plafond de 30 000€ par logement. Le prêt s'étale sur une durée comprise entre 10 et 15 ans.
	Réglementation thermique des bâtiments neufs. Dès 2012, les nouvelles constructions se voient imposer un niveau maximal de consommation d'énergie primaire voisin de 50 kWh/m²/an (BBC). Les règles sont intensifiées après 2020 : les bâtiments neufs doivent alors devenir producteurs nets d'énergie (BEPOS).
	Représentation implicite des fonds de rénovation obligatoire dans les copropriétés et d'un mécanisme de financement à long terme par les tiers réduisant l'aversion au risque des agents.
	Biogaz. Cette source d'énergie connaît une pénétration graduelle entre 2012 et 2050, pour atteindre 17% de la consommation de gaz à l'horizon 2050.
Secteur des transports	Urbanisme. Les incitations économiques et la réglementation limitent la croissance de l'étalement urbain jusqu'en 2030. Au-delà, la densité urbaine repart à la hausse.
	Programme d'investissements dans les transports urbains. Le montant de ces programmes, qui se traduisent notamment par la mise en service de nouveaux bus et tramways, double à partir de 2012 pour une période de 15 ans.
	Télétravail. Il est estimé à un jour ouvré sur dix.
	Taux d'occupation des automobiles. Les incitations font passer le taux d'occupation des voitures en milieu urbain de 1,25 à 1,5.
	Taxe sur le kérosène. À partir de 2012, la consommation de kérosène pour le transport aérien est soumise à une taxation, dont le montant est fixé à 400€/tep.
	Taxe écologique sur les poids lourds. Cette écotaxe frappant la consommation de carburant liquide des poids lourds entre en vigueur en 2012. Ses recettes devraient rapporter 1,2 milliard d'€ au cours de l'année 2012.
	Programme d'investissements ferroviaires. Les investissements dans les infrastructures routières se limitent au seul entretien des infrastructures. Les flux financiers à destination du transport routier sont réorientés vers le transport ferroviaire pendant 20 ans.
	Tous les investissements réalisés dans les transports en commun proviennent d'une réaffectation partielle des investissements initialement consacrés aux infrastructures routières.
	Bonus-malus. Cette mesure, prolongée jusqu'en 2050, garantit chaque année l'équilibre financier du dispositif gouvernemental (résultat positif, ou tout au moins proche de zéro).
	Logistique. L'amélioration de la chaîne d'approvisionnement s'accompagne d'un découplage des besoins de transport de marchandises égal à 1% dans tous les secteurs.
Infrastructures. La part du mode de transport de marchandises par voie ferrée n'atteint que 20% en 2030 (hypothèse exogène).	
Électricité	Anticipation. Le secteur d'électricité connaît le taux exact de la taxe carbone en amont sur la totalité de la période et oriente ses investissements selon la hauteur cette taxe. Nucléaire existant et prolongement de durée de vie : La durée de vie de 40 GW des 63GW excitants est prolongé pour un coût de 0,7 Mrd€/GW.
	Biocarburants. Leur rythme de pénétration obéit au scénario figurant dans le World Energy Outlook 2006 : la production atteint environ 5 Mtep en 2020 et 16 Mtep en 2050 (respectivement 9% et 39% des produits pétroliers raffinés).
	Tarifs d'achat. L'incitation financière qu'ils procurent a pour vocation de faciliter la pénétration des technologies d'énergies renouvelables afin d'accélérer l'effet d'apprentissage. Ils décroissent normalement avec le temps avant d'être supprimés dès que les technologies présentent une compétitivité-prix similaire à celle des technologies conventionnelles.
	Gestion de la demande. Elle recouvre des mesures implicites (contrats interruptibles, compteurs intelligents) servant à lisser la courbe de demande.
	Interdiction du chauffage électrique à effet Joule. Bien qu'autorisé, l'entrée en vigueur de la réglementation thermique 2012 l'exclut de facto des options technologiques disponibles dans les bâtiments neufs (hors pompes à chaleur).
	Extension du réseau électrique. Le développement des capacités renouvelables justifie de nouveaux investissements dans le réseau électrique, et par là même l'augmentation du prix de l'électricité de 3€/MWh dans le scénario de mitigation.
	Anticipation. Le secteur d'électricité connaît le taux exact de la taxe carbone en amont sur la totalité de la période et oriente ses investissements.
Mesures politiques globales	Nucléaire existant et prolongement de durée de vie. La durée de vie de 40 GW des 63GW excitants est prolongé pour un coût de 0,7 Mrd€/GW.
	Taxe carbone. Son montant s'élève progressivement : de 32€/tCO ₂ en 2012, il passe successivement à 56€/tCO ₂ en 2020, 100€/tCO ₂ en 2030, puis 200€/tCO ₂ en 2040 et 300€/tCO ₂ en 2050.
	Tarification progressive. Pour tous les ménages, le dépassement du seuil de consommation de 60 kWh/m² déclenche une élévation de tarif de 5% à partir de 2014 et de 10% à compter de 2030.
	Recyclage des revenus de la taxe carbone. Les recettes tirées de l'instauration de la taxe carbone sont reversées aux ménages sur une base forfaitaire.

Consommation d'énergie primaire et finale dans le scénario d'atténuation (en Mtep)

	2010	2030	2050		2010	2030	2050
BOUQUET ÉNERGÉTIQUE PRIMAIRE				BOUQUET ÉNERGÉTIQUE FINAL			
Énergie primaire totale	234	178	166	Énergie finale	152	130	126
Biogaz	-	2	3	Biogaz	-	2	3
Biocarburants	-	8	16	Biocarburants	-	8	16
Charbon	11	6	6	Charbon	6	4	3
Électricité nucléaire	91	71	58	Électricité	46	46	52
Électricité renouvelable	10	18	28	Gaz	34	15	11
Gaz	40	23	15	Pétrole	66	50	39
Pétrole	82	50	40	Bois	-	3	3
Bois	-	3	3				

Note : dans le tableau ci-contre, la quantité d'énergie primaire biomasse (biogaz, biocarburants et bois) est égale à la quantité d'énergie finale : en effet, le modèle Imaclim-R ne représente pas la transformation de ces sources d'énergie et prend uniquement en compte les flux économiques.

