



**HAL**  
open science

# Un scénario bas carbone "acceptable" pour la France: Élaboration participative et analyse macroéconomique

Ruben Bibas, Sandrine Mathy, Meike Fink

► **To cite this version:**

Ruben Bibas, Sandrine Mathy, Meike Fink. Un scénario bas carbone "acceptable" pour la France: Élaboration participative et analyse macroéconomique. 2012. halshs-00797980

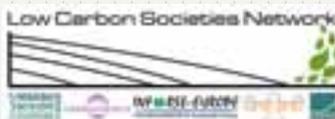
**HAL Id: halshs-00797980**

**<https://shs.hal.science/halshs-00797980>**

Submitted on 7 Mar 2013

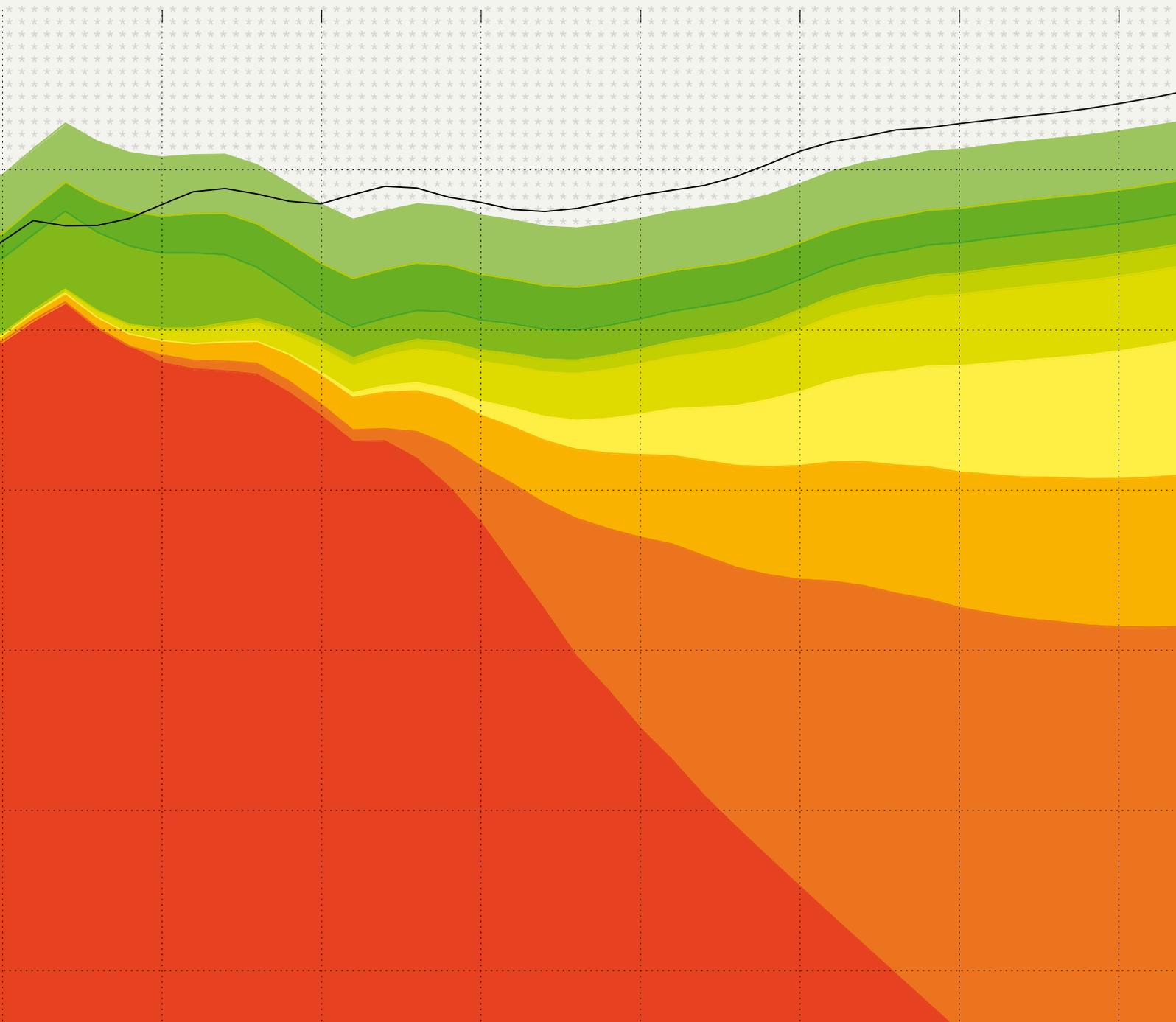
**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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



# Un scénario bas carbone «acceptable» pour la France

Élaboration participative  
et analyse macroéconomique



# Sommaire

<b>1. Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2. Méthodologie de conception de scénarios collaboratifs</b>	<b>4</b>
I. La nécessité d'impliquer les parties prenantes	4
II. L'outil de modélisation Imaclim-R France	5
III. Description de la démarche de conception des scénarios collaboratifs	6
<b>3. Le scénario énergétique bas carbone « acceptable » pour la France</b>	<b>9</b>
<b>Introduction</b>	<b>9</b>
<b>SECTEUR RÉSIDENTIEL</b>	<b>10</b>
I. État des lieux	10
II. Représentation du secteur résidentiel dans Imaclim-R France	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
<b>SECTEUR TRANSPORT</b>	<b>17</b>
I. État des lieux	17
II. Représentation du secteur des transports dans Imaclim-R France	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
<b>INDUSTRIE ET SERVICES</b>	<b>22</b>
I. État des lieux	22
II. Représentation des secteurs productifs dans Imaclim-R France	22
III. Évolution de la consommation d'énergie du secteur de l'industrie	23
<b>SECTEUR ÉLECTRIQUE</b>	<b>24</b>
I. État des lieux	24
II. Représentation du secteur électrique dans Imaclim-R France	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
<b>IMPACTS MACROÉCONOMIQUES ET RÉSULTATS DU SCÉNARIO</b>	<b>29</b>
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 <sub>2</sub> dans le scénario de réduction des émissions	33
V. Les facteurs clés des réductions d'émissions de CO <sub>2</sub>	34
Réductions d'émissions et périmètre des émissions	35
<b>4. Comment concilier acceptabilité et Facteur 4 ?</b>	<b>36</b>
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
<b>5. Analyses de sensibilité</b>	<b>42</b>
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
<b>6. Conclusion</b>	<b>45</b>
<b>7. Tableaux synthétiques du scénario acceptable de réduction des émissions</b>	<b>46</b>

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, DGEC, 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 à l'équipe du projet ENCI-Lowcarb.

Mars 2012

## Auteurs

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

## Mise en page

www.solennmarrel.fr



Cette publication présente les principaux résultats du projet européen de recherche ENCI-LowCarb (Engaging Civil Society in Low-carbon Scenarios). Pour plus d'information : [www.enci-lowcarb.eu](http://www.enci-lowcarb.eu)

7<sup>e</sup> Programme-cadre de la Communauté européenne pour des actions de recherche, de développement technologique et de démonstration.

Le travail de recherche a été financé par le 7<sup>e</sup> Programme-cadre de recherche (FP7/2007-2013) sous le contrat n° 213106. Le contenu de ce rapport ne représente pas le point de vue des institutions de l'Union européenne.

# Introduction

## Ce document présente les résultats pour la France 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<sup>1</sup>**.

Le projet s'attache avant tout à développer une méthodologie garantissant l'intégration transparente des contributions de « 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 évaluer, au delà de la faisabilité technique et économique d'un scénario, son acceptabilité sociale. En effet, si certains scénarios publiés à l'heure actuelle s'appuient 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 prix 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.

Dans les pages qui suivent, le CIRED et le RAC-F ont le plaisir de vous présenter le scénario de

réduction des émissions de CO<sub>2</sub> pour la France, fruit 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).

Chacune de ces parties prenantes a du définir ou sélectionner les mesures acceptables pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. L'ensemble de ces contributions a ensuite été intégré dans le modèle technico-économique Imaclim-R France pour bâtir un scénario à la fois cohérent sur les plans économique et technique et acceptable pour les parties prenantes. Ce scénario « acceptable » permet de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 68% en 2050 par rapport à 1990. Les mesures acceptables par les parties prenantes permettent donc de se rapprocher significativement du Facteur 4 mais non de l'atteindre.

La suite du rapport est organisée de la manière suivante. Le **chapitre 2** décrit la méthodologie utilisée pour l'élaboration des scénarios collaboratifs. Le **chapitre 3** décrit le scénario de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> issu des contributions et discussions avec les parties prenantes. Le **chapitre 4** aborde les mesures politiques supplémentaires permettant d'atteindre effectivement le Facteur 4 et explore également d'autres déterminants des émissions de CO<sub>2</sub>. Le **chapitre 5** présente des analyses de sensibilité. Enfin, le **chapitre 6** conclut le rapport.

**Les scénarios développés dans cette publication ne reflètent en aucun cas les opinions du CIRED ou du RAC-F.** Le scénario « acceptable » du chapitre 3 résulte des discussions avec les parties prenantes consultées tout au long du processus de création du scénario. À ce titre, ce scénario ne représente pas non plus les visions individuelles de chacun des contributeurs. En outre, les scénarios additionnels développés aux chapitres 4 et 5 s'éloignent du scénario « acceptable » dans le but d'explorer les mesures possibles pour atteindre des réductions d'émissions plus ambitieuses et les incertitudes inhérentes à la modélisation prospective 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 Imaclim-R France, dont l'objectif 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 Imaclim-R après discussions avec les parties prenantes et les experts sectoriels. Il est important de faire remarquer que les valeurs numériques, sorties du modèle n'ont bien évidemment pas de 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.

<sup>1</sup> 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](http://www.enci-lowcarb.eu)



# Méthodologie de conception de scénarios collaboratifs

## I. La nécessité d'impliquer les parties prenantes

On ne peut que se réjouir que ces dernières années aient vu se développer un certain nombre de scénarios énergétiques associant des consultations publiques ou des contributions des parties prenantes. Mais 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 pour l'élaboration des scénarios énergétiques ? ». En premier lieu, associer des parties prenantes permet de bénéficier de leur propre expertise technique, économique, de leur retour d'expérience du terrain, de confronter les points de vue et de faire émerger les sujets créant controverse. En second lieu, ces échanges permettent de mettre en lumière les clivages et obstacles majeurs qui s'opposent à la mise en œuvre d'une société décarbonée. De la même manière, ces discussions permettent de faire émerger les éléments de consensus sur les solutions (technologiques et politiques) et de définir les contours d'une stratégie gagnante se basant sur ces convergences. Enfin, en renforçant le sentiment d'avoir contribué d'une manière essentielle à l'élaboration 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 effective des contributions des parties prenantes lors de l'élaboration des scénarios justifient donc la mise en place d'une méthodologie ouverte de consultation dans le cadre de ce projet. Le défi consiste à éviter de cantonner la participation des parties prenantes à des contributions unilatérales, telles que les consultations en ligne. Les scénarios ne pourront refléter fidèlement leurs points de vue qu'à la condition que le processus gagne en

interactivité. 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 effective des scénarios.

Le caractère novateur du projet ENCI-LowCarb réside donc essentiellement dans le processus mis en place plutôt que dans le contenu du scénario énergétique qui en résulte. L'hypothèse retenue ici est que, si les contributions des parties prenantes nationales (même amendées par celles des autres acteurs) sont intégrées de manière explicite dans le processus de modélisation, 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 le soutien en faveur des politiques inscrites dans le scénario, dans la vision qui y est portée et dans sa cohérence interne.

Relever ce défi implique une double imprégnation culturelle entre les parties prenantes et le modélisateur. Capacité doit être donnée aux parties prenantes de comprendre et d'interroger le modélisateur sur le fonctionnement et les paramètres clés du modèle. Pour cela, le modélisateur doit être en mesure de rendre tangibles pour les parties prenantes les paramètres et variables du modèle.

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. C'est une condition nécessaire pour que les conclusions des consultations menées avec les parties prenantes soient transposables en paramètres techniques du modèle et que les parties prenantes reconnaissent dans la transposition en paramètre ou variable du modèle leur contribution. Dans ce cadre, il est important que les parties prenantes acceptent et valident les limites de la modélisation qui n'est pas une image à échelle 1 du monde réel. De la même manière, les modélisateurs doivent être ouverts au regard critique qui peut être porté par les parties prenantes et tirer des discussions les éléments déterminants qui devront être traduits dans le modèle pour refléter au maximum la vision des parties prenantes.

## Acceptabilité sociale ou acceptabilité des parties prenantes ?

Centré sur l'« acceptabilité des parties prenantes », le projet ENCI-LowCarb a exclu de son champ d'analyse l'« acceptabilité sociale », dont les différents aspects ne peuvent être abordés dans le cadre du projet. En rapport avec les systèmes énergétiques, l'acceptabilité sociale revêt trois dimensions (Wüstenhagen 2007<sup>2</sup>) : (i) l'acceptabilité sociopolitique, c'est-à-dire acceptabilité des technologies et des politiques par le public, les principaux intervenants et les décideurs politiques, (ii) l'acceptabilité communautaire des projets locaux, et (iii) l'acceptabilité du marché, à savoir le processus d'adoption de produits innovants faiblement émetteurs par les consommateurs et les investisseurs. L'acceptabilité 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 de dimension spatiale.

Le travail de modélisation a ainsi été guidé par deux grands principes :

- ★ **Acceptabilité** : obtention d'un niveau élevé d'acceptabilité par les parties prenantes.
- ★ **Réalisme** : prise en compte des contraintes techniques et économiques.

L'un des défis majeurs rencontrés dans le projet ENCI-LowCarb pour concevoir les scénarios a été l'emploi de modèles hybrides macroéconomiques (IMACLIM-R<sup>3</sup> en France et REMIND-D<sup>4</sup> en Allemagne), souvent présentés comme de véritables « boîtes noires »<sup>5</sup>. Il nous apparaît donc utile ici de rappeler dans les 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., puisque la forme de l'outil de modélisation façonne de fait le dialogue avec les parties prenantes.★

## II. L'outil de modélisation Imaclim-R France

Imaclim-R France<sup>6</sup> 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, production et distribution de gaz, de 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 « d'ingénieur » en projetant l'évolution conjointe de l'économie et du système énergétique entre 2004 et 2050. Si les modèles économiques s'appuient sur une représentation fidèle de la dynamique économique mais représentent imparfaitement le système énergétique, les modèles d'ingénieur donnent pour leur part la priorité à une représentation détaillée des technologies et du système énergétique, mais avec une représentation fruste des contraintes et dynamiques économiques (en particulier l'interaction entre les prix et la demande d'énergie et de matières premières).

Imaclim-R France est hybride dans le sens où le modèle s'attache à une représentation fine à la fois des dynamiques et contraintes économiques et sectorielles et des technologies (inertie des systèmes techniques, rendements...). Une des forces du modèle est la cohérence entre évolution des systèmes techniques et contraintes et dynamiques économiques. L'énergie est formellement représentée à la fois en valeurs et en quantités physiques, ce qui permet d'isoler le rôle respectif des secteurs énergétiques, ainsi que leur interaction avec le reste de l'économie. L'existence de variables physiques spécifiques (par exemple 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

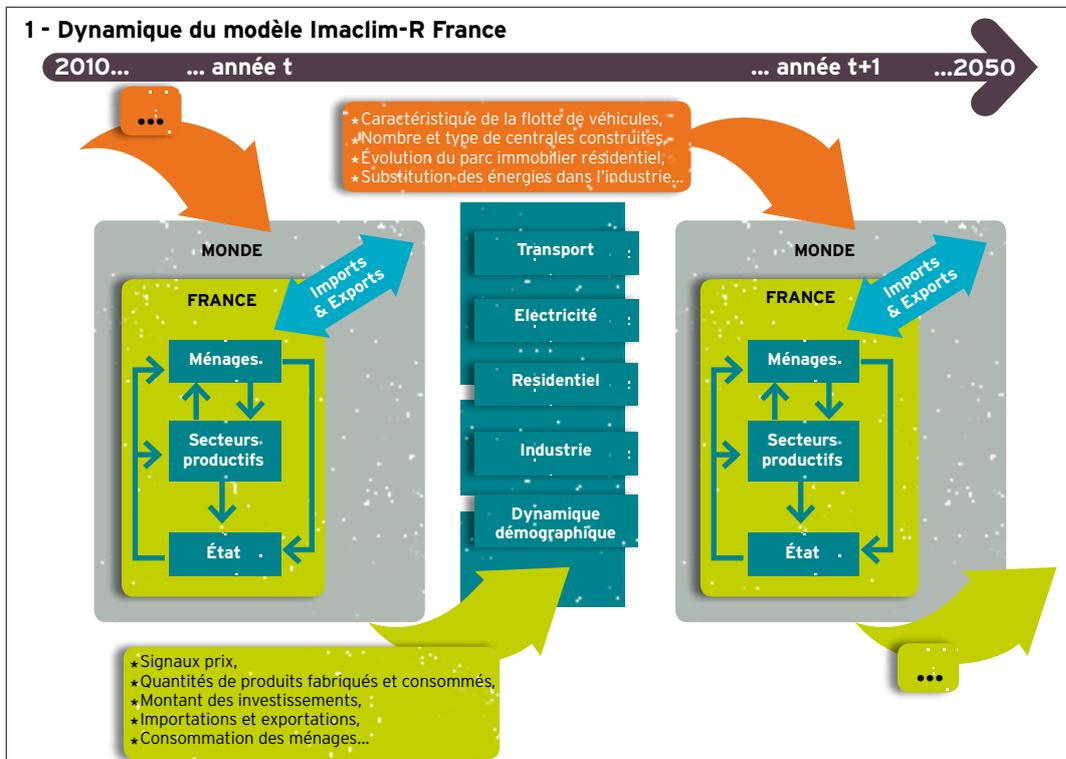
2- Wüstenhagen R, Wol-sink, M, Bürer MJ 2007, 'Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept', *Energy Policy*, vol. 35, no. 5, pp. 2683-2691.

3- [www.imaclim.com/centre-cired.fr/spip.php?article129&lang=env](http://www.imaclim.com/centre-cired.fr/spip.php?article129&lang=env)

4- [www.pik-potsdam.de/research/sustainable-solutions/models/remind](http://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- Imaclim-R France appartient à la famille de modèles Imaclim développée par le CIRED.



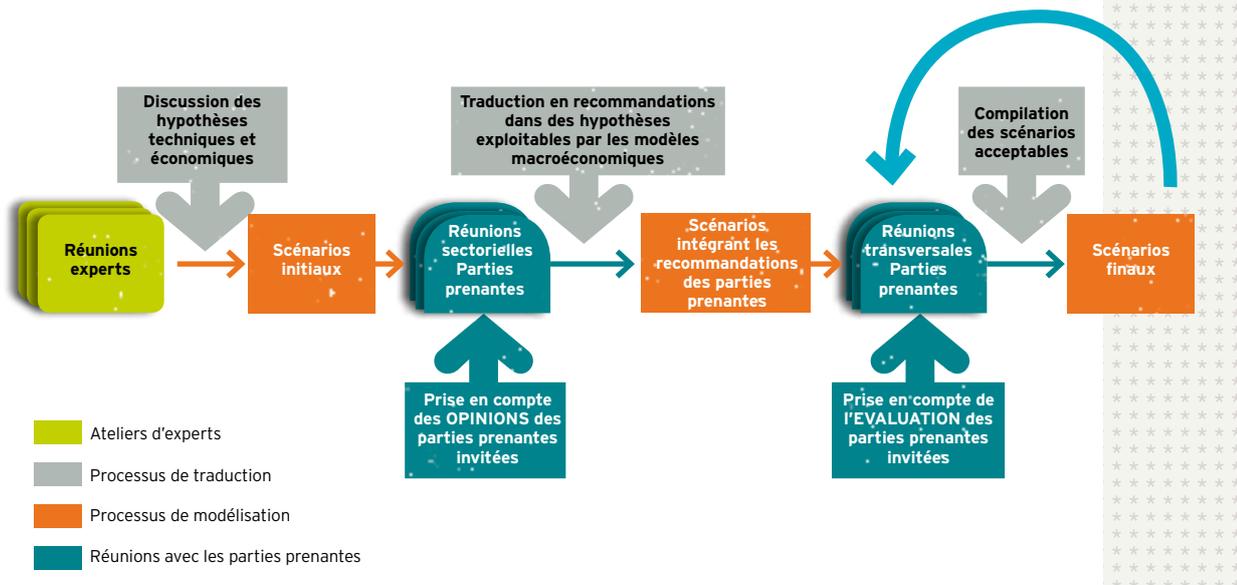
incitations économiques sur la demande finale et les systèmes techniques. Chaque année, l'évolution technicoéconomique fournit un bilan comptable et physique équilibré, duquel découle un certain nombre d'indicateurs (PIB, prix sectoriels, investissements sectoriels, consommation des ménages de chaque secteur, taux de chômage, commerce international, etc.). La relation entre deux équilibres annuels consécutifs s'opère à l'aide de « modules sectoriels dynamiques » (module électrique, 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).

Imaclim-R France est un modèle en économie ouverte. Les prix des énergies fossiles sont exogènes tirés dans le cadre du projet du World Energy Outlook publié par l'Agence internationale de l'énergie en 2011. Imaclim-R France ne représente que les émissions de CO<sub>2</sub> 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 France repose sur une logique récursive exploitant des modules sectoriels dynamiques nous a incités à adopter un schéma de réunions avec les experts puis les parties prenantes de chacun des secteurs pour lesquels la décarbonisation se traduira par une transformation structurelle profonde. Une fois les contributions sectorielles introduites dans Imaclim-R France, un séminaire transversal à l'ensemble des secteurs a été organisé pour permettre une meilleure compréhension des interactions entre l'ensemble des secteurs. Le sous-chapitre suivant décrit ce processus en détail. ✨



## 2 - Processus de création des scénarios collaboratifs



## III. Description de la démarche de conception des scénarios collaboratifs

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

1. Ateliers d'experts.
2. Identification et choix des parties prenantes nationales.
3. Ateliers sectoriels avec les parties prenantes.
4. Traduction des contributions des parties prenantes dans le paramétrage du modèle.
5. Séminaire transversal intersectoriel.

### 1. Ateliers d'experts

Dans un souci de réalisme économique et technique de l'outil de modélisation, des ateliers réunissant les experts sectoriels (résidentiel, transport, électricité) ont été organisés pour corriger et actualiser les hypothèses (potentiels techniques, coûts d'investissements, courbes d'apprentissage, etc.). La dynamique intrinsèque des modules sectoriels

au sein du modèle (investissements dans le secteur électrique ou mutation du secteur résidentiel) a été également discutée.

### 2. Identification des parties prenantes nationales

La sélection des parties prenantes jouant un rôle essentiel dans les secteurs énergétiques considérés (habitat, transport, électricité) s'est appuyée sur une grille « influence-intérêt ». Cette approche permet de dresser le paysage des acteurs sectoriels et d'identifier les principales parties prenantes à intégrer dans le processus. 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 leur niveau d'influence<sup>7</sup>. Les parties prenantes sélectionnées dans le cadre de ce projet se retrouvent prioritairement dans les cases de la partie droite du carré : « Acteurs clés » et « Acteurs concernés ». L'appréciation du degré d'intérêt et d'influence de chaque acteur étant assez subjective, les entretiens ont été renouvelés avec au moins trois experts du secteur pour recouper les résultats.

#### Organisation des entretiens :

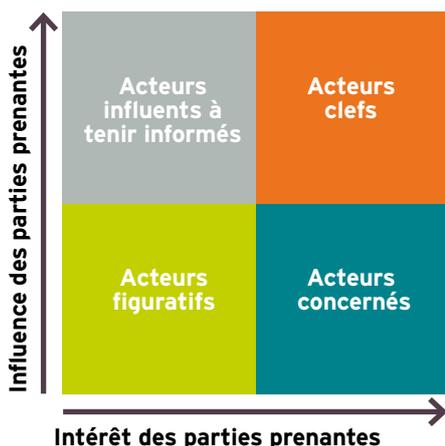
- I. Discussion sur les principaux enjeux du secteur.
- II. Elaboration d'une liste des acteurs selon différentes typologies (entreprises privées, ministères, associations, syndicats, banques, etc.).
- III. Cartographie des acteurs identifiés sur la grille influence-intérêt.

### 3. Ateliers sectoriels avec les parties prenantes sur l'acceptabilité

Pour bâtir des scénarios affichant une « acceptabilité » élevée, l'équipe du projet ENCI-LowCarb a invité des parties prenantes nationales à des réunions sectorielles (transport, habitat, électricité).

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

## 3 - Grilles « influence-intérêt »



### Exemple de traduction de mesure « acceptable » en paramètres de modélisation : 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 Imacim-R France, de modifier le degré d'aversion au risque des différents agents (propriétaires bailleurs, propriétaires occupants, etc.).

À l'occasion de ces réunions, chacun d'entre eux a pu exprimer sa vision de l'évolution des choix technologiques, des mesures politiques et des incitations économiques jugés nécessaires, efficaces et acceptables pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. Afin d'éviter toute mauvaise interprétation a posteriori et de garder toute la mémoire des discussions, 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 et permettre à tout le monde de s'exprimer.

#### Les réunions se sont déroulées en trois phases :

1. Présentation de la méthodologie du projet.
2. Introduction aux spécificités et enjeux carbone du secteur.
3. Discussion avec les parties prenantes sur l'acceptabilité des mesures.

Un questionnaire a été rédigé pour chacun des secteurs couverts au cours de cette troisième phase. Chacun de ces questionnaires appelait à la fois des réponses formatées de manière à ce que les réponses soient facilement exploitables par les modélisateurs et des réponses non formatées reflétant la teneur de la discussion et des débats entre les parties prenantes.

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

Après la revue et l'évaluation des contributions des parties prenantes leur intégration aux paramètres du modèle est une étape déterminante du processus de construction du scénario. Les informations réunies lors des ateliers sectoriels ont été « traduites » par les partenaires du 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 cloisonnée qu'est l'approche sectorielle de la première série de réunions entre parties prenantes, une réunion intersectorielle a permis d'aborder les interactions et arbitrages intersectoriels et la question du partage des réductions entre secteurs. En effet la problématique incontournable de « l'étalement urbain » ne peut être abordée de manière exhaustive qu'en mettant en lien lieu de résidence et transports domicile-travail. De la même manière, la question controversée en France du « chauffage électrique » est transversale au logement et à l'électricité. La décomposition du système énergétique en sous-secteurs au début de l'exercice s'imposait néanmoins pour structurer les discussions autour des mesures politiques.

Le premier objectif de la réunion transversale était de recueillir les réactions des participants sur le « scénario acceptable » et sur leur appréciation de la manière dont les modélisateurs avaient intégré leurs contributions. Après quoi, les réactions, commentaires, ajustements nécessaires 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 niveau de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> 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.★

# Un scénario bas carbone « acceptable » pour la France

# 3



## Introduction

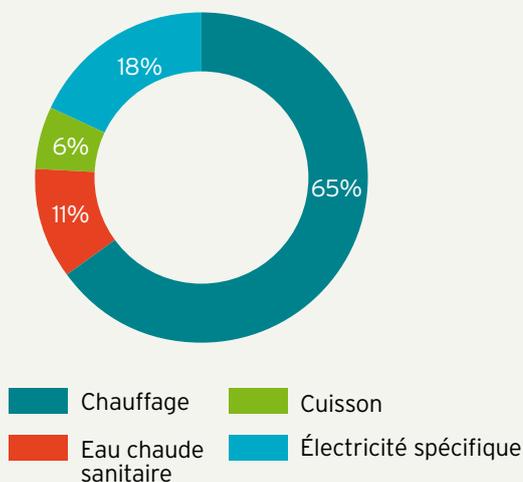
**L**e scénario détaillé dans les pages suivantes repose sur l'approche collaborative décrite à la partie 2. Les variables techniques, économiques et politiques ayant servi à son élaboration ont été directement définies par les parties prenantes en collaboration avec l'équipe de modélisation.

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 plus large de participants, voire la consultation de citoyens.

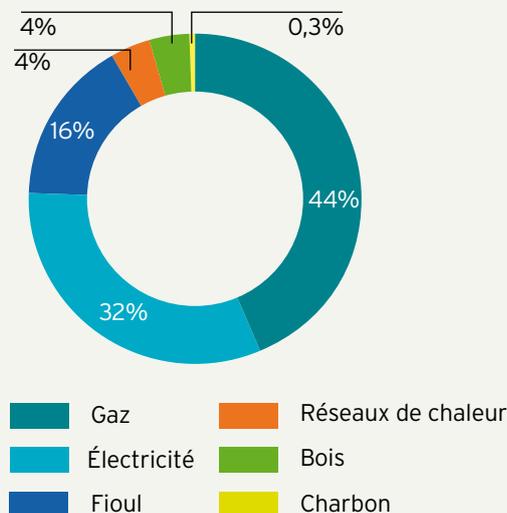
Le scénario développé et présenté ici repose sur un groupe de mesures politiques et de technologies jugées « acceptables » par la majorité des parties prenantes consultées. Les sous-chapitres suivants traitent des composantes sectorielles du scénario (résidentiel, transport, industrie et tertiaire) aussi 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)



5 - Mix énergétique du chauffage dans le secteur résidentiel énergie finale (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 fournit presque exclusivement des immeubles d'habitation.

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 a été construit avant l'entrée en vigueur de la première réglementation thermique en 1975.

## I. État des lieux

**E**n 2009, le secteur résidentiel représentait 16% des émissions totales de CO<sub>2</sub>. 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.

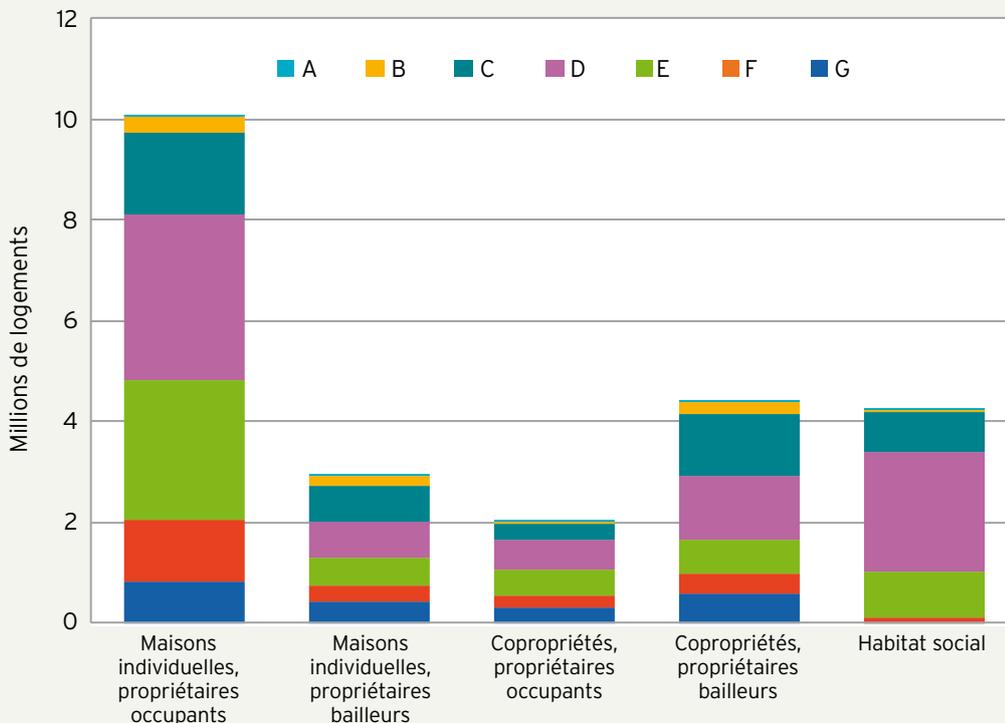
L'enjeu principal de toute politique climatique et énergétique future, aussi bien à l'échelle du secteur qu'à l'échelle nationale, sera d'améliorer les performances des bâtiments et d'accélérer leur rythme de rénovation. À l'heure actuelle, les deux tiers des bâtiments qui existeront en 2050 sont en 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/m<sup>2</sup>/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 France

### 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), 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/m<sup>2</sup>/an, à la classe G, une consommation d'énergie primaire supérieure à 450 kWh/m<sup>2</sup>/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/m<sup>2</sup>/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/m<sup>2</sup>/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, notamment 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 à 2012 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/m<sup>2</sup>. 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 totale de gaz à l'horizon 2050, soit 3 Mtep.

#### 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/m<sup>2</sup>/an. Après 2020, c'est le label BEPOS qui s'applique.

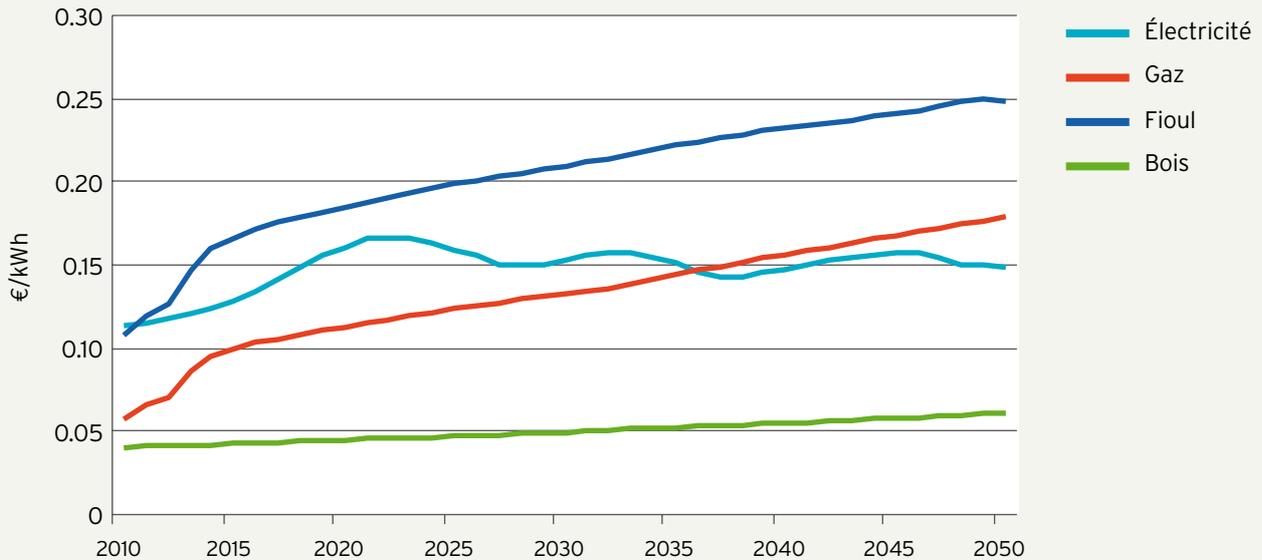
#### 6. Taxe carbone

Cet instrument économique est intégré au scénario dès 2012 à une valeur de 32€/tCO<sub>2</sub>. La taxe subit par la suite une élévation graduelle : 56€/tCO<sub>2</sub> en 2020, 100€/tCO<sub>2</sub> en 2030, 200€/tCO<sub>2</sub> en 2040, puis 300€/tCO<sub>2</sub> 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 lors des changements d'occupants est encore loin de faire l'unanimité chez les parties prenantes, une minorité non négligeable s'y déclare favorable. Son entrée en vigueur accélérerait la transition énergétique 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 malgré le niveau d'incitations économiques et les 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 pour ces rénovations ambitieuses.

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/m<sup>2</sup>/an la consommation énergétique des logements consommant actuellement plus de 230 kWh/m<sup>2</sup>/an d'ici 2020<sup>8</sup>. Ajoutons que cette fraction du parc immobilier est aussi la plus structurée et

n'est donc pas confrontée aux mêmes défis 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 (environ 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.

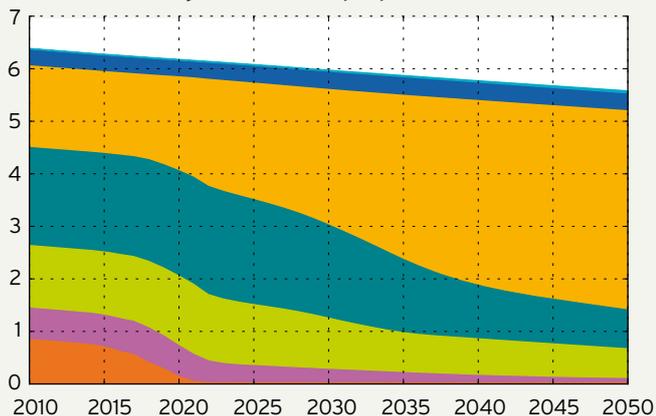
Sur la base d'une fonction comportementale, le modèle calcule<sup>9</sup> l'effet rebond (c'est-à-dire l'écart entre la consommation d'énergie théorique et la consommation réelle) entraîné par les économies d'énergie en cas de rénovation thermique ou de construction de bâtiments neufs performants. Dans 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 rebond : celui-ci est négatif jusqu'en 2034 et est au plus égal à 4% en 2042.

<sup>8</sup> Ces chiffres expriment la quantité d'énergie primaire consommée.

<sup>9</sup> 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.

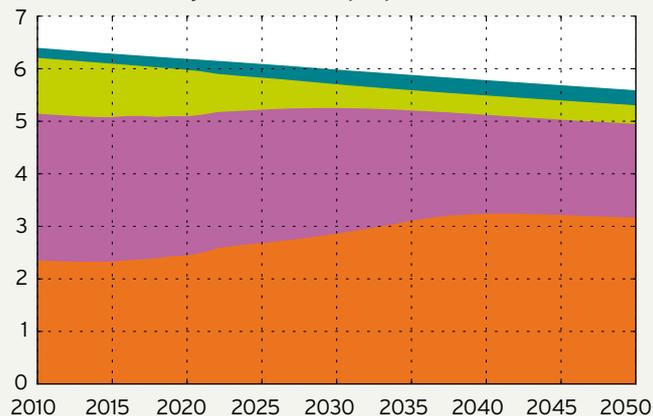
## ÉTIQUETTES ÉNERGIE

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

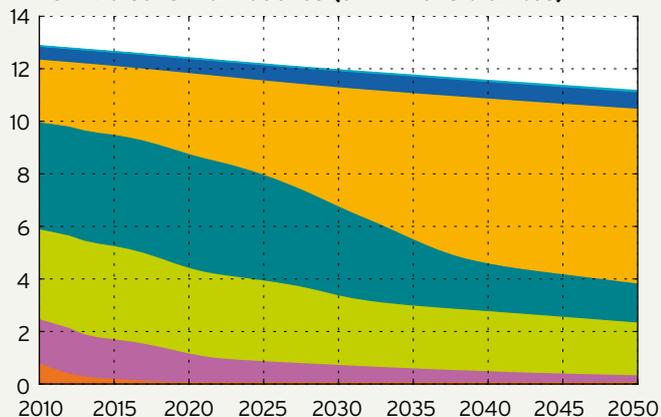


## MIX ÉNERGETIQUE

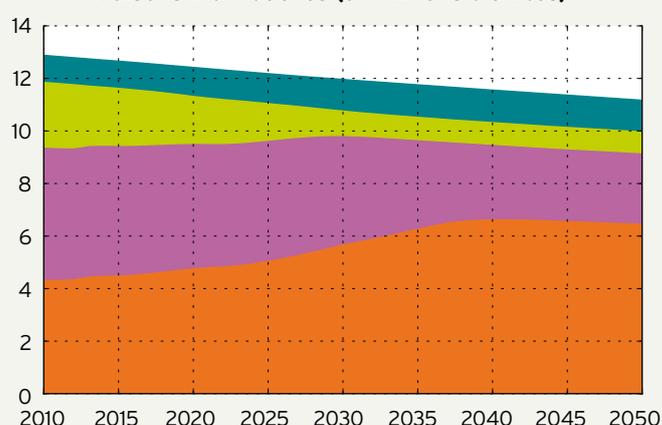
9 - Parc de logements en copropriété (en millions d'unités)



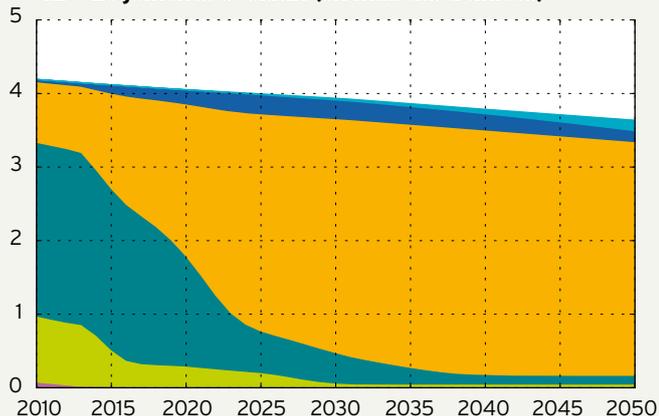
10 - Maisons individuelles (en millions d'unités)



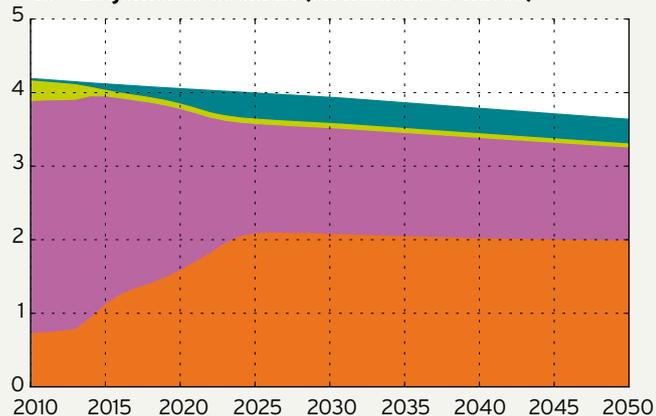
11 - Maisons individuelles (en millions d'unités)



12 - Logements sociaux (en millions d'unités)

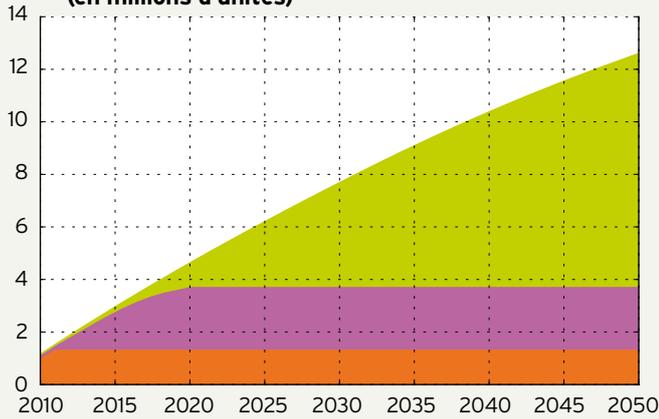


13 - Logements sociaux (en millions d'unités)



## ÉTIQUETTES ÉNERGIE

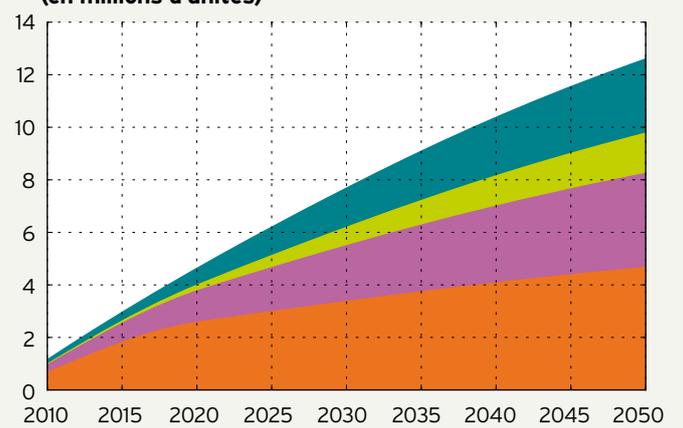
14 - Parc de logements construit après 2007 (en millions d'unités)



BEPOS BBC RT2005

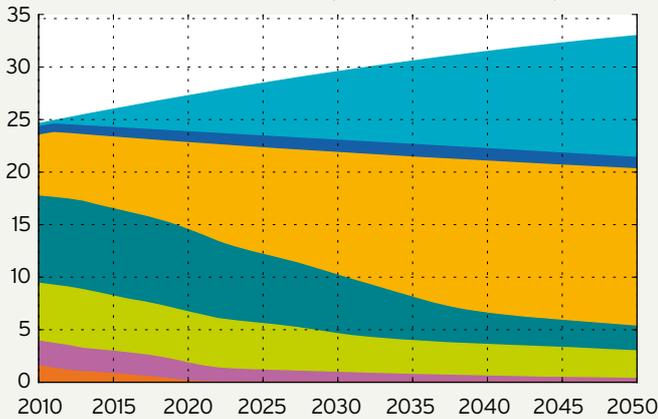
## MIX ÉNERGETIQUE

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



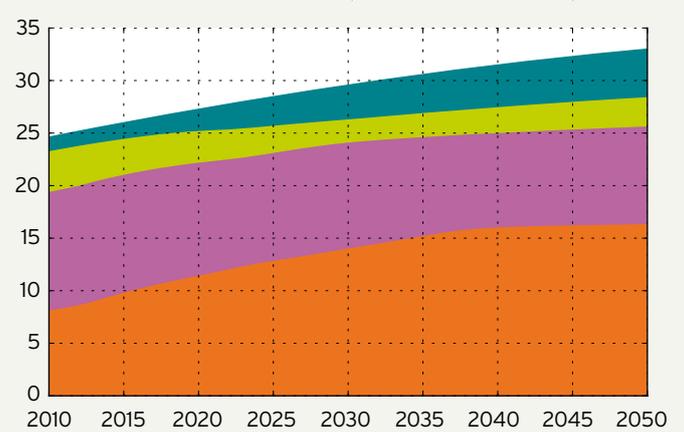
Bois Gaz  
Fioul Électricité

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



A (<50 kWh/m²/an) E (231 à 330kWh/m²/an)  
B (51 à 90 kWh/m²/an) F (331 à 450 kWh/m²/an)  
C (91 à 150 kWh/m²/an) G (> 450 kWh/m²/an)  
D (151 à 230 kWh/m²/an)

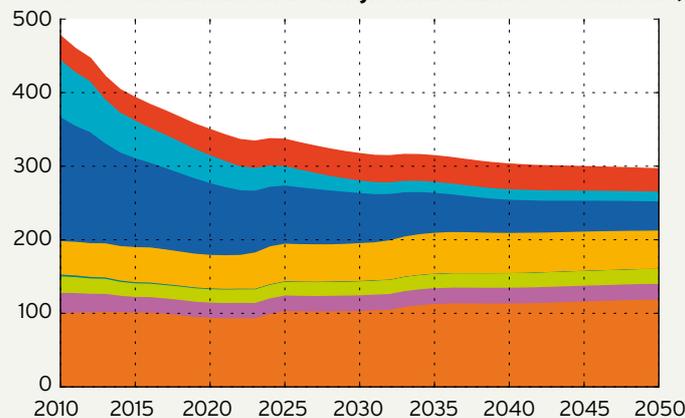
17 - Parc immobilier total (en millions d'unités)



Bois Gaz  
Fioul Électricité

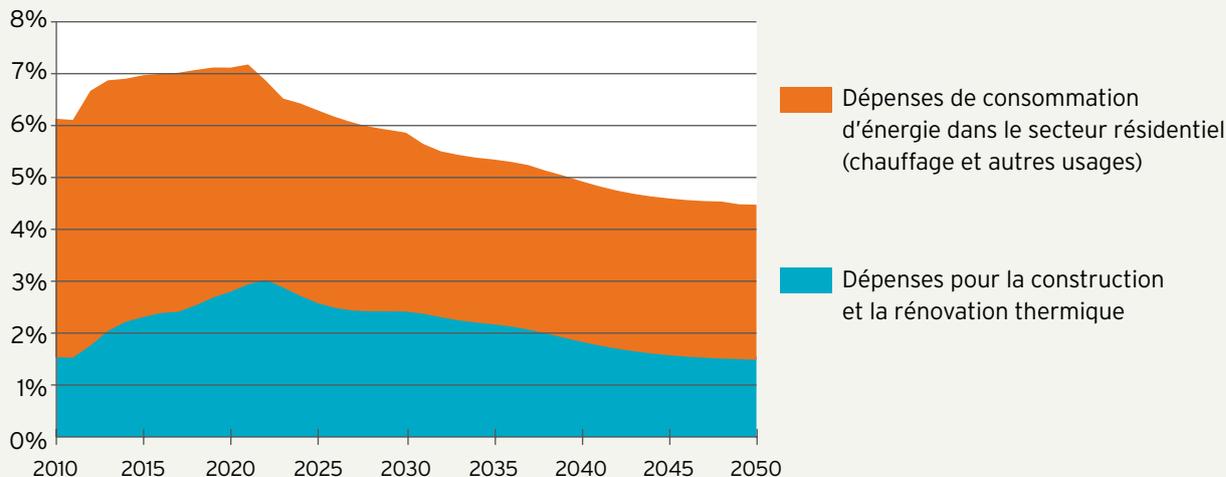
## CONSOMMATION

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



Bois - chauffage Charbon - autres usages  
Fioul - chauffage Fioul - autres usages  
Gaz - chauffage Gaz - autres usages  
Électricité - chauffage Électricité - autres usages

### 19 - Part du budget des ménages affectée aux services énergétiques dans le logement



**10-** La consommation électrique spécifique renvoie à la consommation d'électricité liée à d'autres usages résidentiels, majoritairement imputable aux appareils électriques (éclairage, électroménager, multimédia et chauffage 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 cuisson et aux appareils de chauffage d'appoint) reste stable. La consommation d'électricité spécifique<sup>10</sup> s'inscrit quant à elle en légère hausse à l'échéance 2050 (+24% par rapport à 2010). Cela s'explique par un renforcement des progrès réalisés en matière d'efficacité énergétique (induit par une augmentation de 40% des prix de l'électricité entre 2010 et 2020 couplée à un renforcement de la réglementation), qui sont plus que compensés par 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 CO<sub>2</sub> du secteur résidentiel (à l'exclusion des émissions générées par la production d'électricité, qui relèvent du secteur électrique) diminuent 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 au cours du temps. Les ménages supportent la part la plus importante des coûts entraînés par la réhabilitation du secteur et la construction de logements énergétiquement performants.

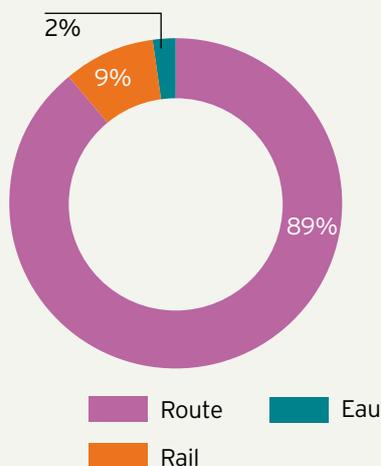
Au cours du scénario, les dépenses affectées par les ménages à la consommation d'énergie dans leur logement, à la rénovation et à la construction de logements résidentiels passent de 6% en 2010 à 4,5% en 2050 de leur budget total. Elles culminent en 2020. Les mesures d'efficacité énergétique réduisent 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. ★

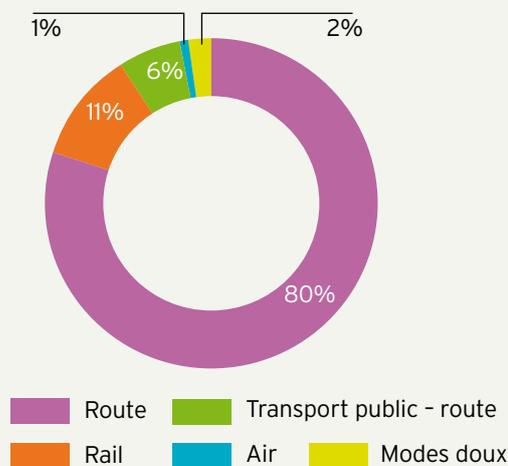
	2020	2030	2040	2050
Coût des incitations du gouvernement (en milliards d'€)				
<b>Crédit d'impôts</b>	3,3	2,5	0,8	0,5
<b>Éco-prêt</b>	3,3	1,9	0,6	0,4
Surcoût pour les ménages (en milliards d'€)				
<b>Construction</b>	9,5	9,4	7,7	6,3
<b>Rénovation</b>	14,9	10,3	3	1,8

# Secteur transport

20 - Parts modales du transport de marchandises - 2010 (% tkm)



21 - Parts modales du transport de passagers - 2010 (% pkm)



## I. État des lieux

En 2010, le secteur des transports était responsable de 33% des émissions de CO<sub>2</sub>, soit une hausse de 16% par rapport à 1990. La première source d'émissions est la combustion de carburant pour le transport routier, mode de transport largement prépondérant pour les personnes et les 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%), 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%, ce qui représente néanmoins une hausse de 25% des quantités d'énergie consommée.

L'analyse des investissements réalisés au cours des dernières décennies montre à quel point le transport routier a été favorisé: le réseau autoroutier s'est en effet accru de 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 de 1 574 km à 1 847 km seulement (même si, au cours de cette période, le nombre de personnes transportées bondissait de 146%).

Notons, enfin, que si le trafic de fret a décliné d'environ 15% sous l'effet de la crise économique

de 2009, il a tendance à retrouver lentement son niveau d'avant crise.

### 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 reportée).
- \* 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 France

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 (transport aérien<sup>11</sup>, 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 par chacune des infrastructures, 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, et plus la vitesse y décroît (sa capacité étant limitée par les investissements qui lui ont donné naissance).

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. Des investissements dans des nouvelles infrastructures augmentent la capacité du mode concerné et donc la vitesse moyenne qui y est attachée.

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 routes vers l'extension des infrastructures et capacités de 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 selon les classes énergie 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 par passager.km 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 avions.

- \* 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 -0,4<sup>12</sup> 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 progrès technologiques, les reports modaux (notamment celui du fret terrestre sur le rail) et les modifications structurelles du secteur, attribuables à l'évolution du poids relatif des matières acheminées dans chacun de ses sous-secteurs.

Dans Imaclim-R France, la **demande de transport de marchandises** est la somme des demandes 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 réduction des émissions, 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 des 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 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 alloué à ces programmes, qui verront notamment la mise en service de nouveaux réseaux de 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 retenue 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 report des investissements du transport routier vers le transport ferroviaire pendant 20 ans par rapport à la situation actuelle 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 (taux qui n'est pas très éloigné du taux de TIPP sur le carburant pour les véhicules soit environ 130€/tCO<sub>2</sub>).

#### 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 de 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 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 par rapport à 9% en 2010.

**Taxe carbone.** Cet instrument économique est intégré au scénario dès 2012 à une valeur de 32€/tCO<sub>2</sub>. Elle subit par la suite une élévation graduelle : 56€/tCO<sub>2</sub> en 2020, 100€/tCO<sub>2</sub> en 2030, 200€/tCO<sub>2</sub> en 2040, puis 300€/tCO<sub>2</sub> en 2050. Dans ce scénario, les recettes tirées de l'instauration de la taxe carbone sont reversées aux ménages sur une base forfaitaire. ✱

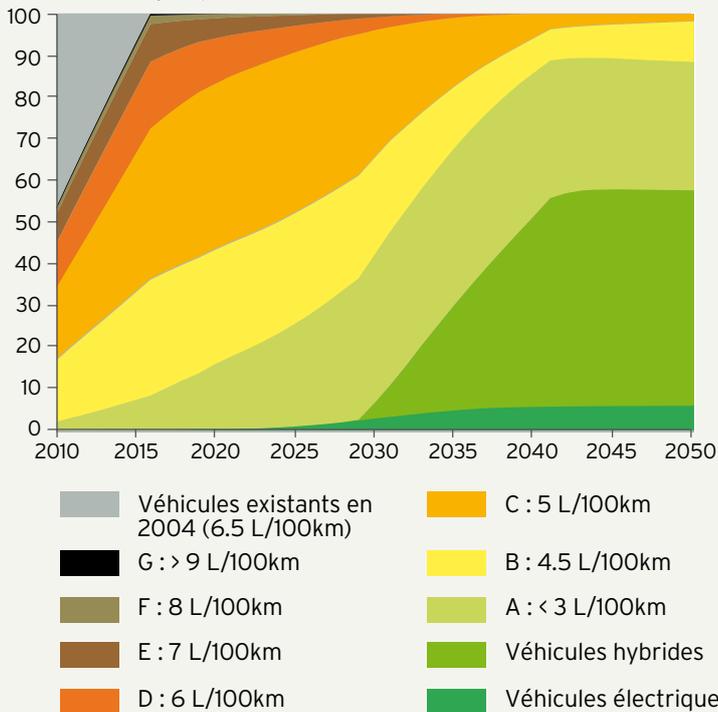
### IV. Évolution de la consommation d'énergie du secteur des transports

Ce scénario inclut trois stratégies de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> pour le transport de passagers : (i) une limitation de l'augmentation des besoins de mobilité individuelle par des mesures d'aménagement du territoire et de planification urbaine, (ii) le développement des alternatives au transport individuel motorisé et (iii) des incitations à la décarbonisation des véhicules particuliers.

#### 1. Pénétration des véhicules décarbonés

Le calibrage du dispositif de bonus-malus entre 2010 et 2050 répond à la nécessité d'atteindre l'équilibre financier pour le gouvernement. 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

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



**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.**

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 extender<sup>13</sup> » entament une percée massive après 2030, leur usage préférentiellement citadin se doublant de la possibilité d'effectuer des trajets beaucoup plus longs.

### 2. Essor des agrocarburants

Concernant le développement des agrocarburants, le scénario reprend l'hypothèse du World Energy Outlook 2006. En 2030, 147 Mtep d'agrocarburants 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, et atteint 16 Mtep

en 2050 (respectivement 9% et 39% des produits pétroliers raffinés). Une rupture technologique survient aux alentours de 2030 et l'éthanol de première génération, issu des sucres et de l'amidon agricoles, cède la place aux agrocarburants 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 conventionnels<sup>14</sup>).

### 3. Évolution de la mobilité individuelle

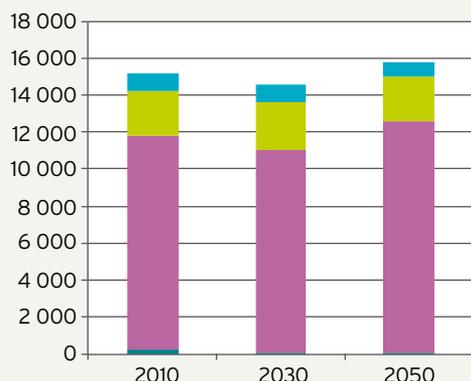
De manière générale, le scénario de réduction des émissions se caractérise par un léger renforcement de la mobilité individuelle à long terme (+3% par rapport 2010), comme en atteste l'accroissement de la mobilité totale des personnes (+19%). Néanmoins, à moyen terme (2030), le renchérissement de l'énergie 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 réduction des émissions de CO<sub>2</sub> 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.

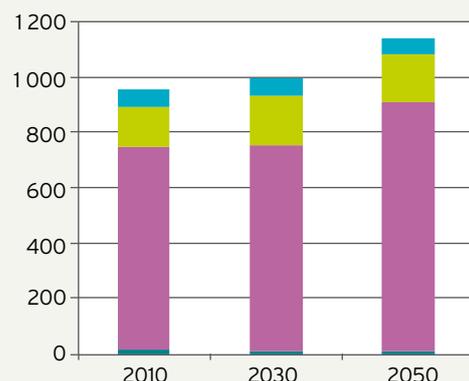
### 4. Mobilité urbaine et locale

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 mobi-

## 23 - Mobilité individuelle annuelle totale (en km/pass)



## 24 - Mobilité globale annuelle (en Gp.km)



Transport non motorisé      Voitures personnelles  
Transport collectif      Avion

lité urbaine totale correspondent aux tendances démographiques en milieu urbain et à l'étalement urbain. Ce dernier connaît deux moments successifs: 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 permet d'amortir les impacts économiques pour le porte monnaie des ménages liés à l'augmentation du prix du pétrole.

### 5. Mobilité de longue distance

La constance du budget temps combinée avec l'augmentation de la congestion des transports urbains contribue à limiter le temps disponible pour les longs trajets. Ceci est renforcé par le renchérissement du transport aérien (taxe sur le kérosène et taxe sur le carbone) et l'inertie frappant le développement des alternatives à la route. Il s'agit là d'une des causes du repli de la mobilité totale des personnes d'ici 2030. Au-delà de cette date, la capacité des transports ferroviaires augmente et les contraintes temporelles s'assouplissent partiellement.

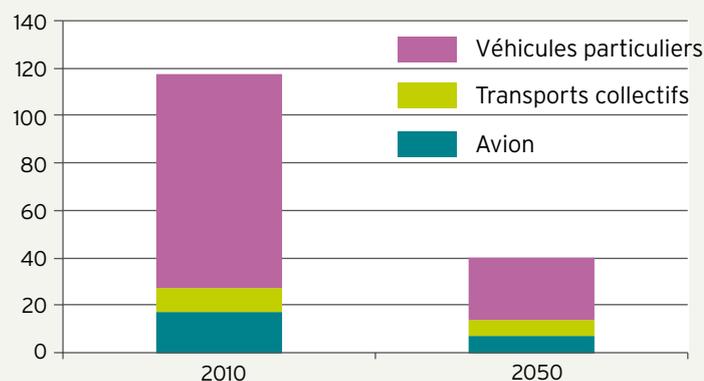
Les émissions du transport de personnes chutent de 66% entre 2010 et 2050, sous l'effet conjugué (i) d'une baisse moyenne de 70% de la consommation de carburant par les automobiles individuelles, (ii) de la pénétration des agrocarburants et (iii) d'une augmentation de 19% du nombre de passagers-kilomètre. 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%.

## 25 - Émissions du transport de passagers (en MtCO<sub>2</sub>)



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

Au total, les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur des transports (personnes et marchandises) chutent de 60% entre 2010 et 2050, la consommation d'énergie finale de 41%. ✪

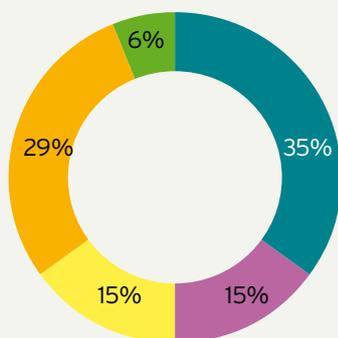
## V. Coûts des investissements et des politiques dans le secteur des transports

Les mesures fiscales appliquées aux transports exercent un effet positif sur les finances de l'État, 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 dans les infrastructures s'effectuent pour leur part à périmètre financier constant, seule leur répartition modale étant affectée jusqu'en 2030. Les 6 milliards d'euros soustraits aux investissements routiers sont alloués pour moitié au développement de transports en commun urbains, pour moitié aux transports ferroviaires. ✪

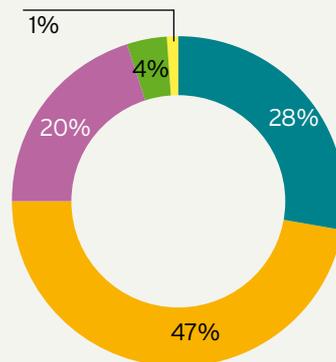
	2010	2020	2030	2040	2050
<b>Mesures fiscales (en milliards d'€)</b>					
<b>Écoredevance poids lourds</b>	0	1,3	1,1	1,1	1,2
<b>Taxe sur le kérosène</b>	0	1,6	1,1	1,4	1,3
<b>Effet sur le produit de la taxe intérieure de consommation sur les produits pétroliers</b>	23,8	21,4	17,9	13,4	12,9
<b>Taxe carbone</b>	0	0	13,7	18,1	34,8
<b>Investissements en infrastructures</b>					
<b>Transports urbains</b>	+3 milliards d'€ par an entre 2012 et 2030				
<b>Transport ferroviaire</b>	+3 milliards d'€ par an entre 2012 et 2030				
<b>Transport routier</b>	-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 part de l'industrie dans la consommation d'énergie finale 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 renvoient aux émissions issues de la combustion des combustibles fossiles d'une part, et aux émissions des réactions chimiques (comme la calcination du carbonate de calcium pour la production de ciment) de l'autre. La réduction de ces émissions peut se faire soit via l'évolution des procédés eux-mêmes, soit en recourant à la technologie de capture et de séquestration du carbone (CSC), pour autant qu'elle soit mature. La crise économique actuelle 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 : ainsi les émissions de la sidérurgie 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> en 2010 (pour 67 Mtep), contre 28% (pour 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.

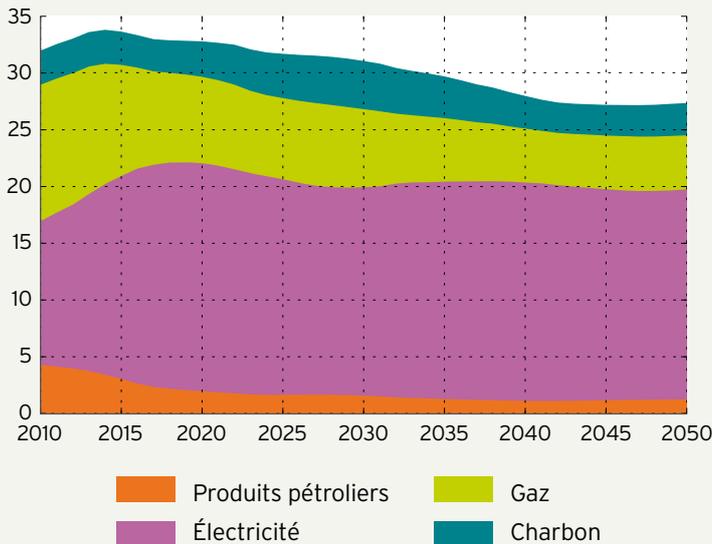
### 2. Les services

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 CO<sub>2</sub> du secteur tertiaire se sont accrues d'environ 9% entre 1990 et 2010, passant de 28 MtCO<sub>2</sub> à 31 MtCO<sub>2</sub>.\*

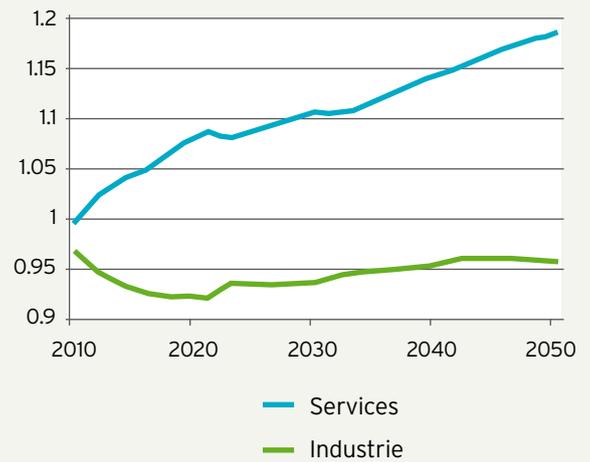
## II. Représentation des secteurs productifs dans Imaclim-R France

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 France. 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 France est donc la somme 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 industries intensives en énergie au profit de l'industrie manufacturière moins intensive en énergie ou des

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



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



services). Trois mécanismes représentent le changement technique : (i) le progrès technique autonome suivant une tendance historique, (ii) une tendance structurelle à la baisse 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 réduction des émissions, le gain en efficacité énergétique du fait du progrès technique autonome est augmenté de manière exogène 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 industriel<sup>15</sup> représente approximativement 26% de la consommation finale d'énergie en 2010. Cette part reste inchangée 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 tendanciellement 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%<sup>16</sup>.

La part relative des différentes énergies 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'en 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 CO<sub>2</sub><sup>17</sup> (23 MtCO<sub>2</sub> 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 secteur<sup>18</sup>.

Le graphique 29 atteste du renforcement de la compétitivité de la France par rapport à l'offre mondiale<sup>19</sup> : plus l'indice est haut, plus la concurrence joue en faveur de la France (sans fournir d'indicateur quantifié, 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.

Le résultat obtenu découle de l'évolution du coût de l'énergie au sein des coûts de production des secteurs industriel et tertiaire. Dans le secteur tertiaire, les progrès en matière d'efficacité énergétique abaissent 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.

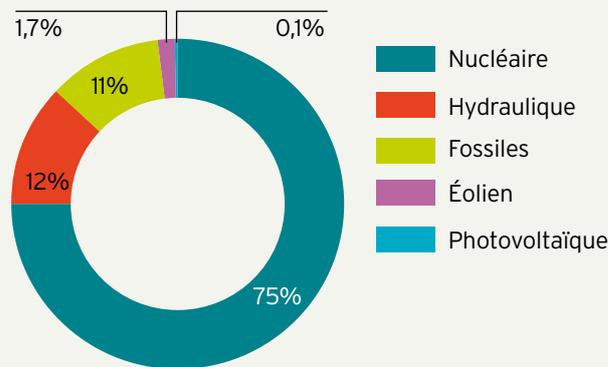
**17-** Les émissions industrielles correspondent aux émissions directes (hors génération d'électricité).

**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 ( $=\frac{180}{120}$ ), 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 quelques 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%, 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 MtCO<sub>2</sub> (10% des émissions totales de CO<sub>2</sub>) ont été émises par le secteur électrique, contre seulement 31 MtCO<sub>2</sub> (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 sans surprise significativement 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 et dans 90% des constructions neuves. 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, multimédia...) sur la consommation d'énergie finale totale.

### Objectifs climatiques et énergétiques :

L'objectif fixé par la législation française<sup>20</sup> 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 objectif<sup>21</sup> 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 Imaclim-R France

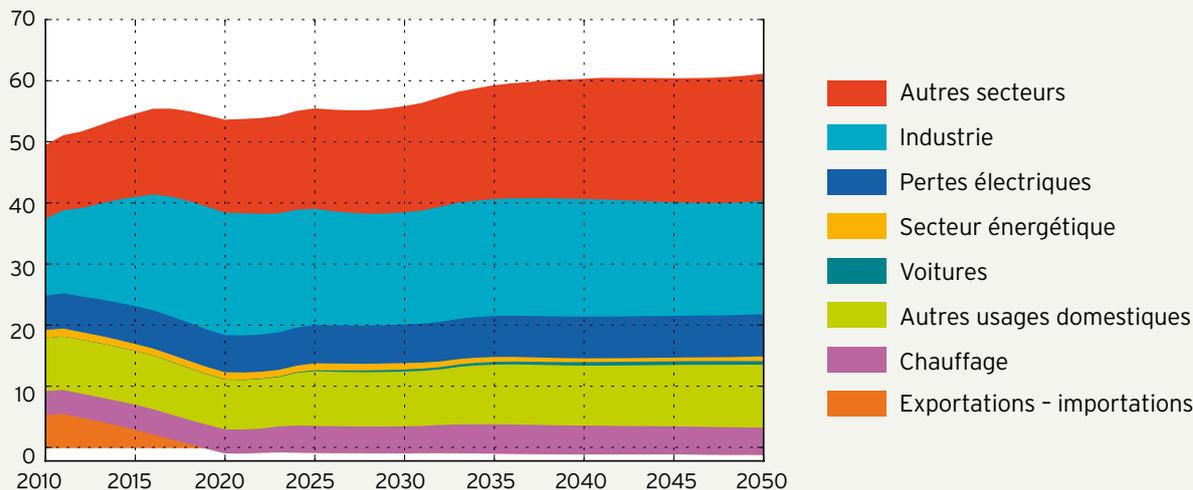
Le module électrique d'Imaclim-R France vise à représenter les spécificités du secteur électrique français. La prise en compte de la demande horaire permet de refléter les spécificités de la demande selon les usages et notamment l'impact du chauffage électrique en période de pointe, l'évolution du prix 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 Imaclim-R France, la demande finale de chaque secteur et des consommateurs est agrégée pour reconstituer la demande horaire totale. Les variations saisonnières de la consommation de chauffage électrique sont reflétées au travers de la forme de la courbe de demande horaire. Pour chaque année, la demande horaire est ensuite exprimée sous la forme d'une monotone de charge<sup>22</sup> en classant le besoin de capacité de production d'électricité par ordre décroissant en fonction de leur nombre d'heures annuel de fonctionnement. Il devient ainsi possible de distinguer les trois grands types de demande : 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 représente les inves-



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



**Gestion de la demande.** Les pics de consommation peuvent être atténués soit en renforçant les capacités couvrant les besoins en période de pointe (centrales au fioul, hydroélectriques ou de pompage-turbinage), soit par le biais de contrats 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 de diminuer 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 est censée exclure *de facto* le chauffage électrique par effet Joule, mais pas les pompes à chaleur.

**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.\*

## 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 du gaz vers l'électricité.

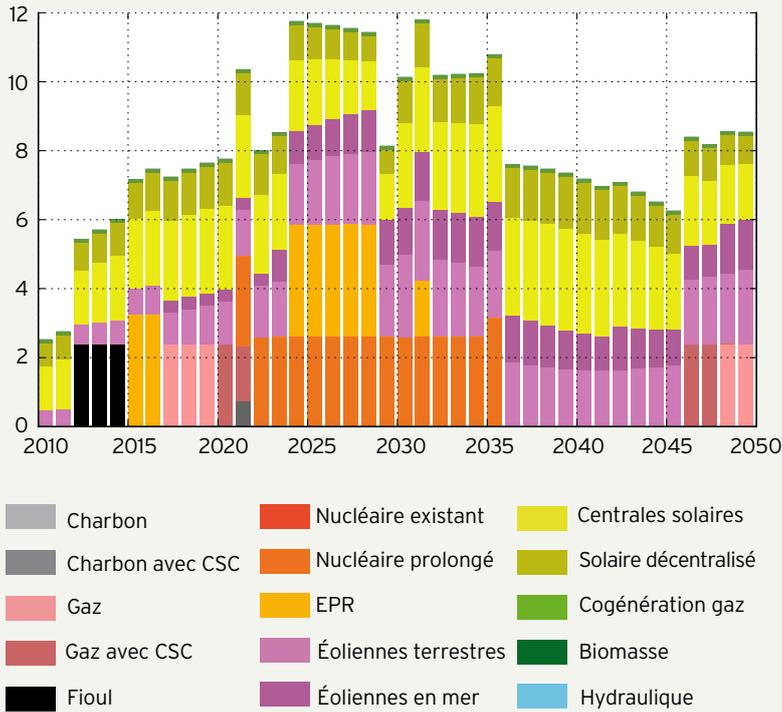
La construction de capacités de production d'électricité visant à exporter de l'électricité a été rejetée par les parties prenantes. De ce fait, le volume des exportations décline rapidement dans le scénario. La France, qui perd ainsi son statut d'exportatrice nette d'électricité après 2020, recourt 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.

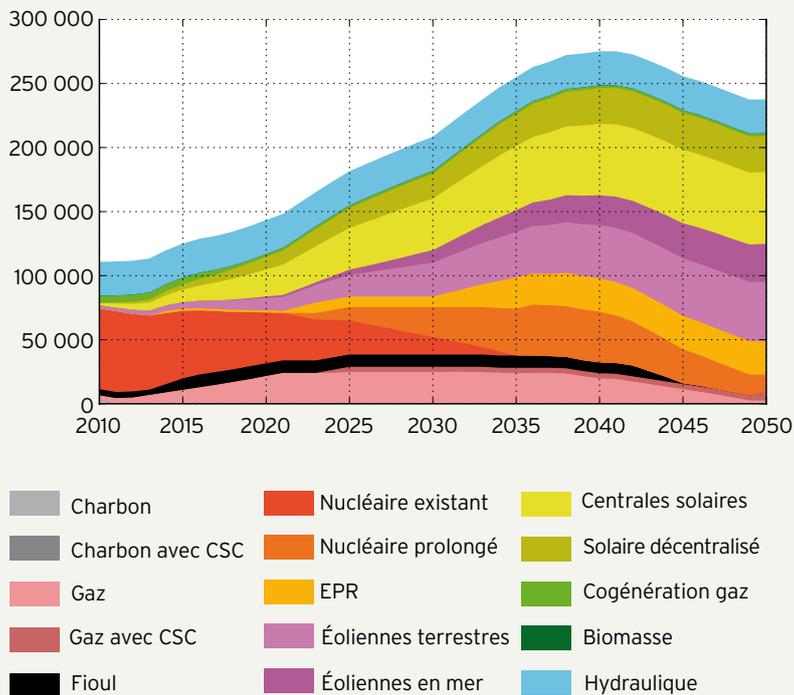
Dans le secteur résidentiel, la consommation d'énergie servant au chauffage s'inscrit en légère hausse au fur et à mesure de la généralisation des pompes à chaleur au détriment du gaz. Les usages résidentiels autres que le chauffage principal refluent dans un premier temps, passant de 9 à 8 Mtep en 2020, 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



### 34 - Investissements dans les nouvelles capacités (GW)



### 35 - Capacités existantes (MW)



du même coup la montée en flèche des émissions du secteur électrique (+49%). Ce constat souligne l'urgence 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<sup>27</sup>. Après 2040, la seconde phase de démantèlement des centrales nucléaires 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. ✪

#### 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

<sup>27</sup>- 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.

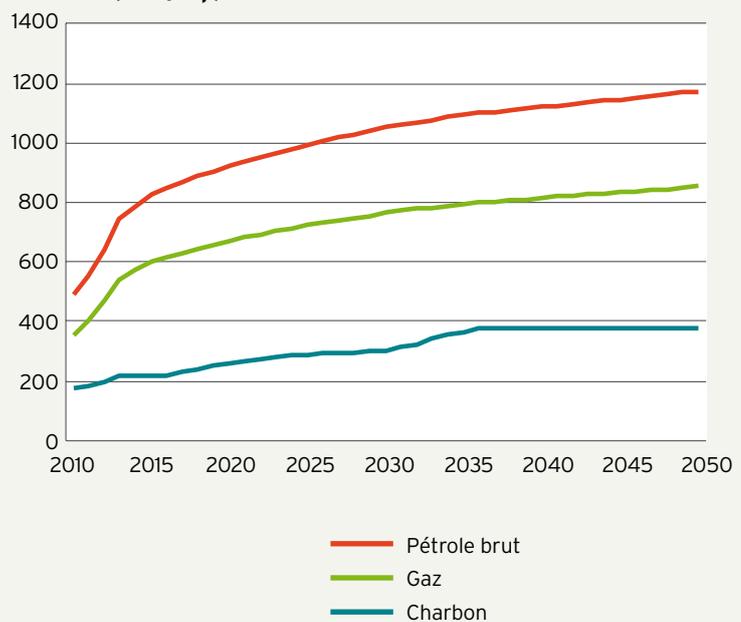
# Impacts macroéconomiques et résultats du scénario

## 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, à la requête des parties prenantes ; 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 - Scénario d'évolution du prix mondial des énergies fossiles (en €/tep)



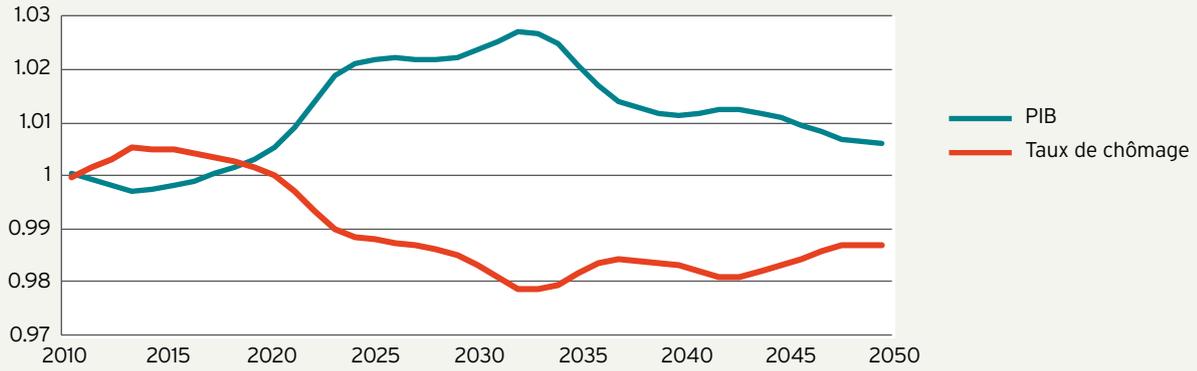
## II. Dynamique macroéconomique du scénario de réduction d'émissions

### 1. Taux de croissance économique

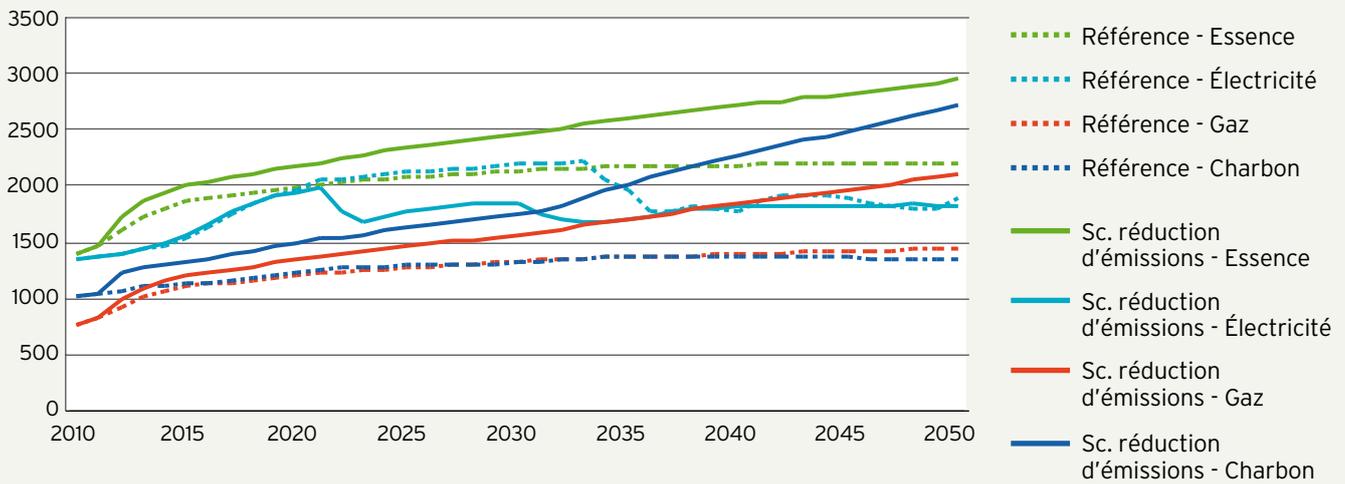
Par convention, dans Imacsim-R, le moteur de croissance économique est constitué par la dynamique démographique exogène et les taux de croissance de la productivité du travail. La croissance est alimentée par le rythme des investissements et leur distribution entre les différents secteurs. Des déséquilibres 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

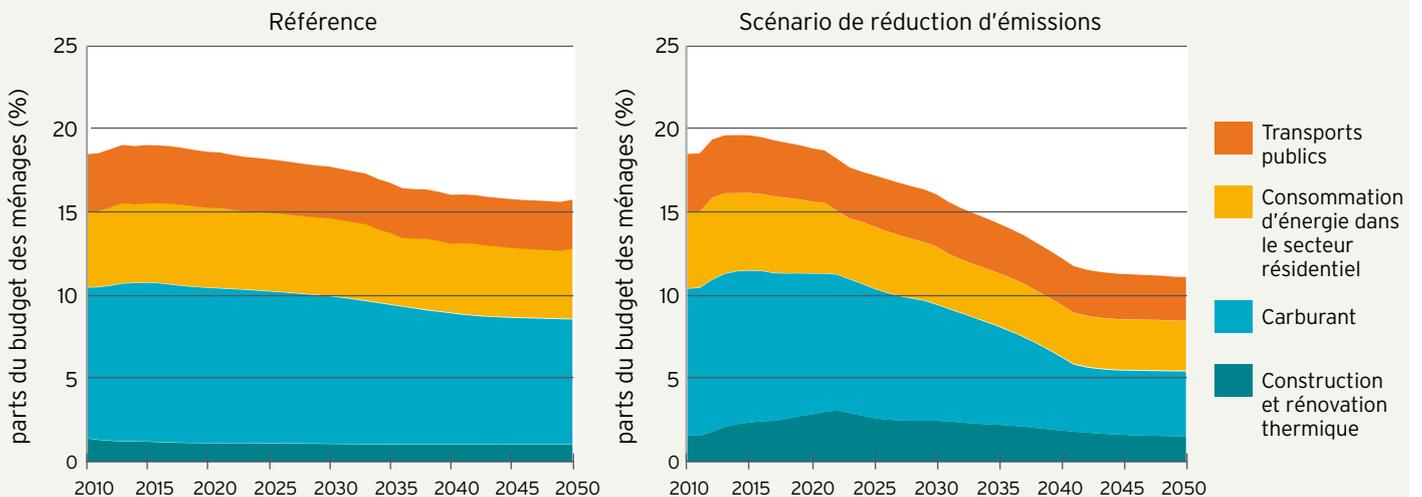
**37 - Évolution des indicateurs macroéconomiques dans le scénario de réduction d'émissions par rapport au scénario de référence (base 1 en 2010)**



**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
<b>Référence</b>	1,19	1,29	1,2	1,22
<b>Sc. réduction d'émissions</b>	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 :

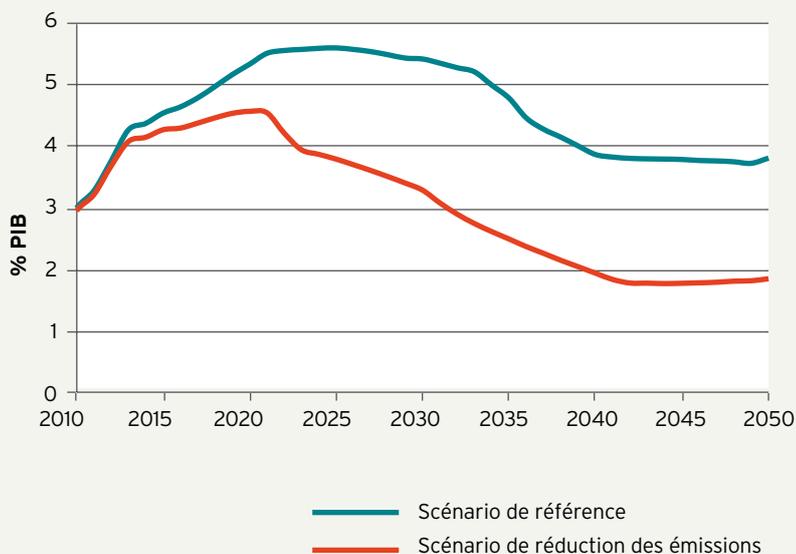
- \* dans le budget des ménages (la montée des coûts de construction et de rénovation thermique ne compensant pas les gains),
- \* dans les industries de services peu intensives en énergie, ce qui améliore la compétitivité des produits français à l'international.

## 2. Efficacité énergétique, dépendance aux importations et facture énergétique

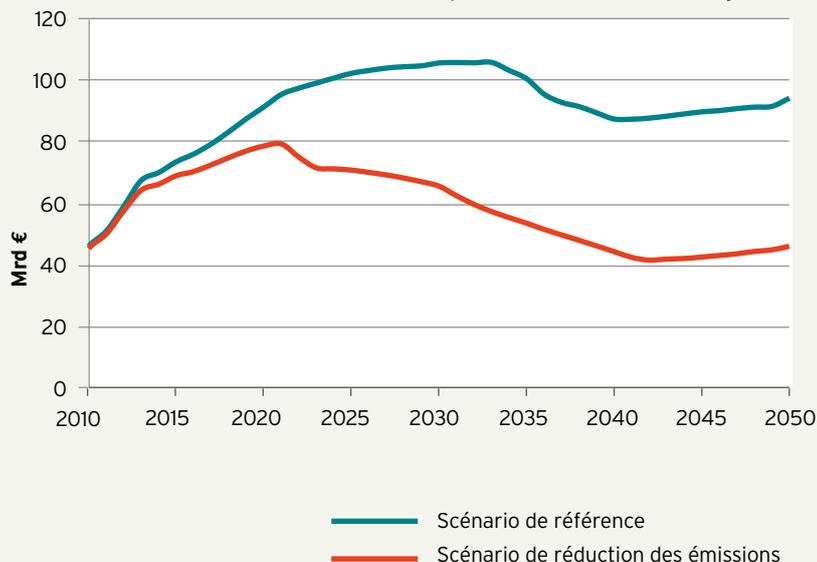
L'essor des énergies non fossiles, concomitant de l'adoption de mesures d'efficacité énergétique, constitue une protection contre les répercussions négatives induites par la hausse des prix de l'énergie notamment à l'égard de la dépendance de la France aux importations énergétiques. Dans le scénario 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. \*

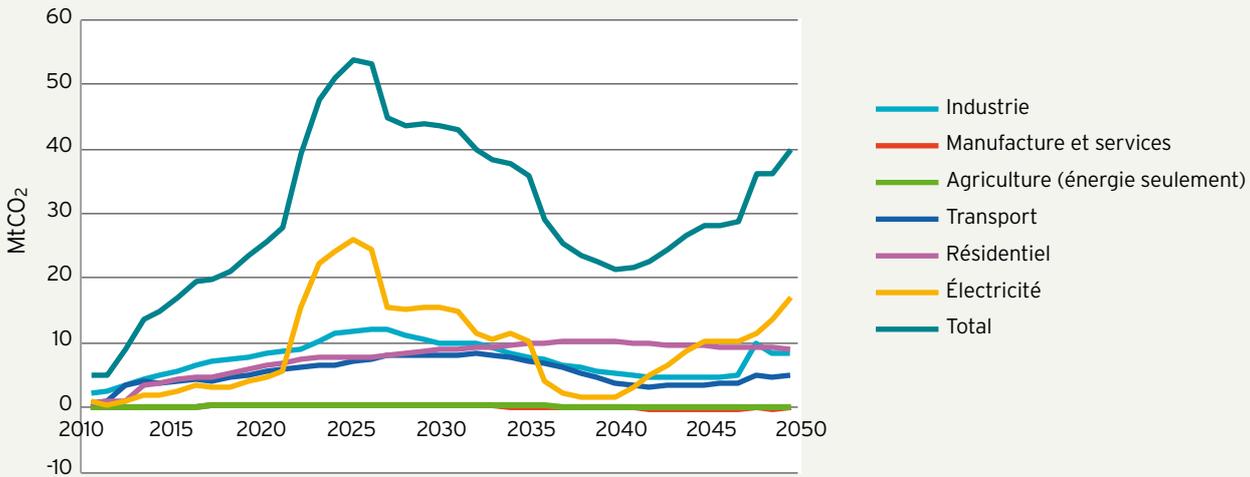
40 - Évolution de la facture énergétique (en points de PIB)



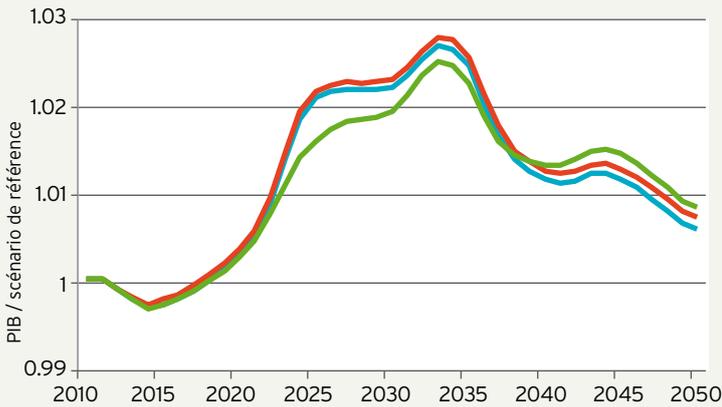
41 - Évolution de la valeur des importations nettes d'énergie



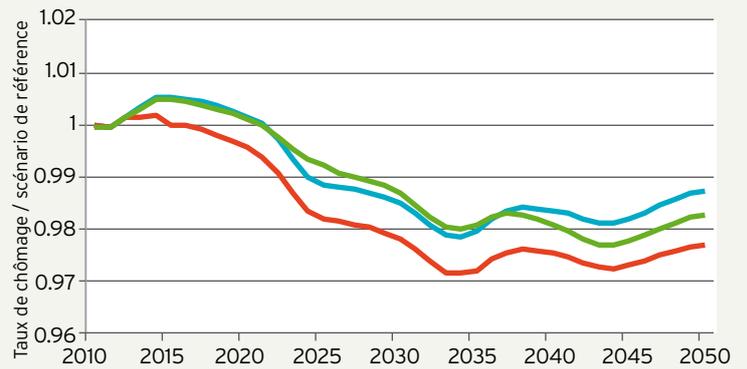
#### 42 - Réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> annuelles induites par la taxe carbone



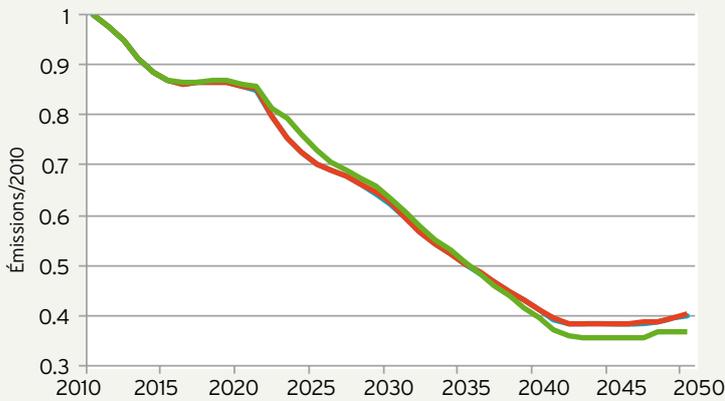
#### 43 - Évolution du PIB en fonction de l'option de recyclage du produit de la taxe carbone



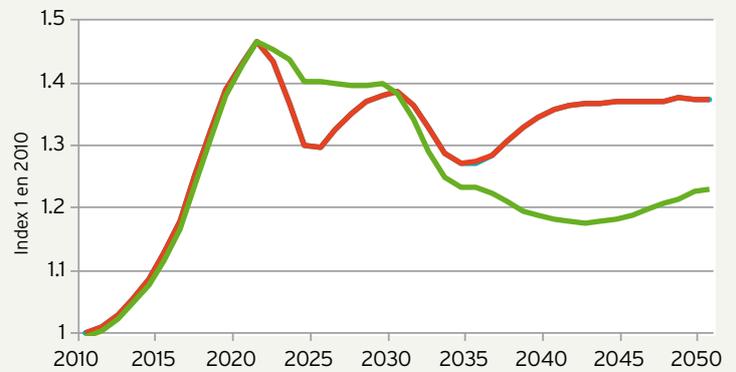
#### 44 - Évolution du taux de chômage en fonction de l'option de recyclage du produit de la taxe carbone



#### 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 ?

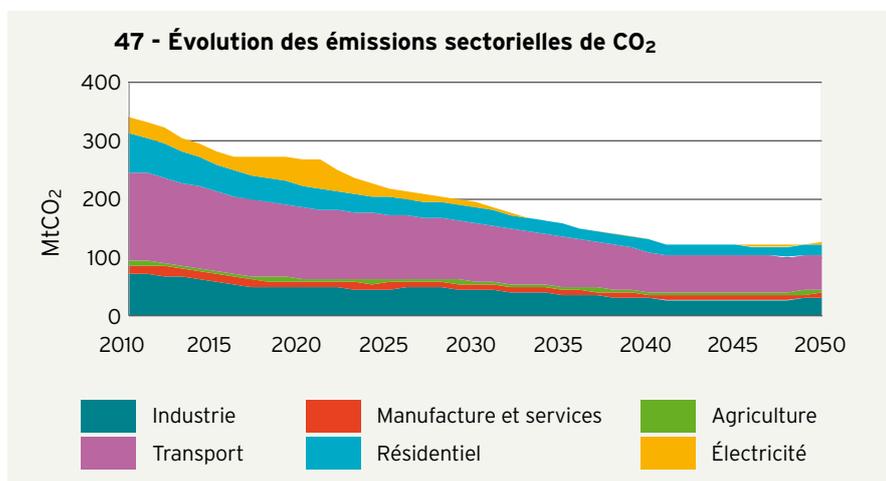
#### 1. L'impact de la taxe carbone sur les réductions d'émissions

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 Quinet<sup>28</sup> jusqu'en 2030 (32€/tCO<sub>2</sub> en 2012, 56€/tCO<sub>2</sub> en 2020, 100€/tCO<sub>2</sub> en 2030); elle est par la suite extrapolée jusqu'en 2050 (200€/tCO<sub>2</sub> en 2040 et 300€/tCO<sub>2</sub> 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 au 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. ✪

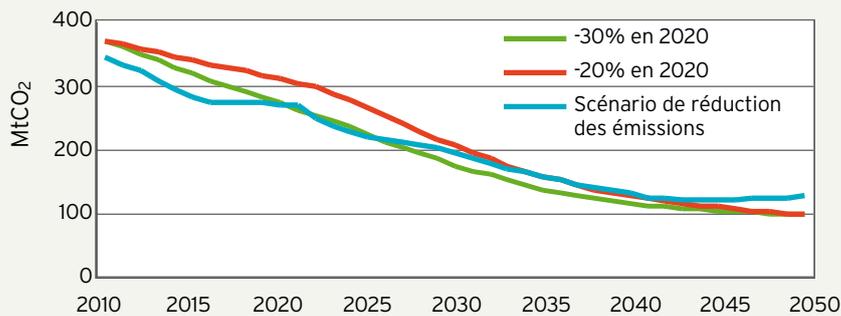
### IV. Réductions des émissions de CO<sub>2</sub> dans le scénario « acceptable »

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 MtCO<sub>2</sub> des émissions énergétiques de CO<sub>2</sub>. Le tableau suivant précise la part imputable aux différents secteurs dans cette baisse de 60% des rejets par rapport à 2010 (68% par rapport à 1990).

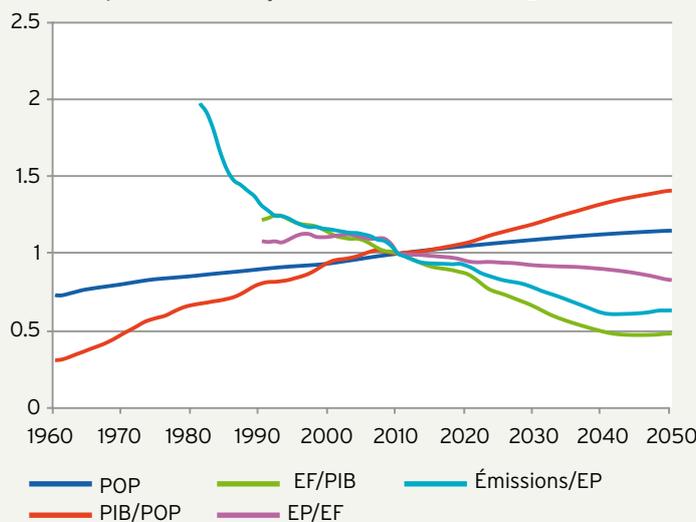
Évolution des émissions sectorielles de CO<sub>2</sub> par rapport à 2010 (scénario de de réduction des émissions)

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

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



**49 - Décomposition de Kaya des émissions de CO<sub>2</sub> (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 au soutien pour 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 MtCO<sub>2</sub>, soit la moitié du total des rejets de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050.

Le différentiel d'émissions séparant la réalisation du Facteur 4 du scénario de réduction d'émissions se monte à 28 MtCO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub> 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 ralentit vers la fin de la période et provoque la stagnation des émissions au niveau de 126 MtCO<sub>2</sub>. ★

## V. Les facteurs clés des réductions d'émissions de CO<sub>2</sub>

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

$$CO_2 = POP \times \frac{PIB}{POP} \times \frac{EF}{PIB} \times \frac{EP}{EF} \times \frac{CO_2}{EP} \quad [\text{équation}]$$

$$tCO_2 = \text{hab} \times \frac{\text{€}}{\text{hab}} \times \frac{\text{Mtep}}{\text{€}} \times \frac{\text{Mtep}}{\text{Mtep}} \times \frac{tCO_2}{\text{Mtep}} \quad [\text{unités}]$$

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 49 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 CO<sub>2</sub> 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'accélère 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 CO<sub>2</sub> d'origine énergétique : en d'autres termes, exception faite de celles se rapportant à l'énergie, les émissions attribuables à l'agriculture ne sont pas prises en compte, ce qui laisse de côté 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 uniquement sur 69%<sup>29</sup> 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.

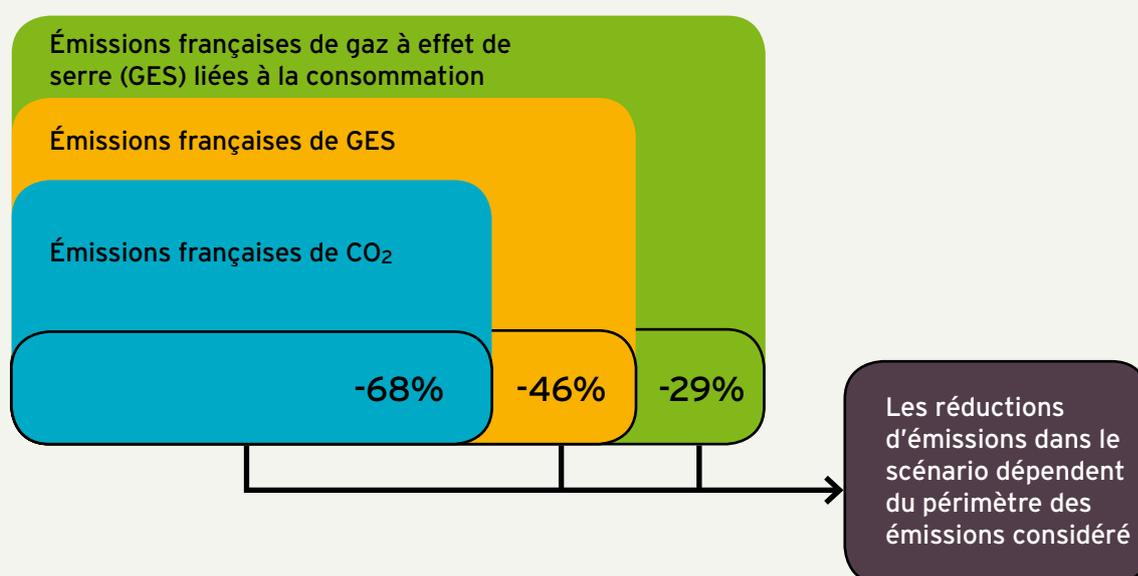
La réduction de 68% des émissions de CO<sub>2</sub> d'ici 2050 correspond ainsi à une baisse de 46% des émissions totales de GES en France et de 29% des émissions totales de GES liées à la consommation sur le territoire français<sup>30</sup>. Outre les incertitudes caractérisant la transition énergétique, 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. D'autre part, 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.★

<sup>29</sup>- CITEPA (2011) « Inventaire des émissions en France ».

<sup>30</sup>- Edgar C. 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)

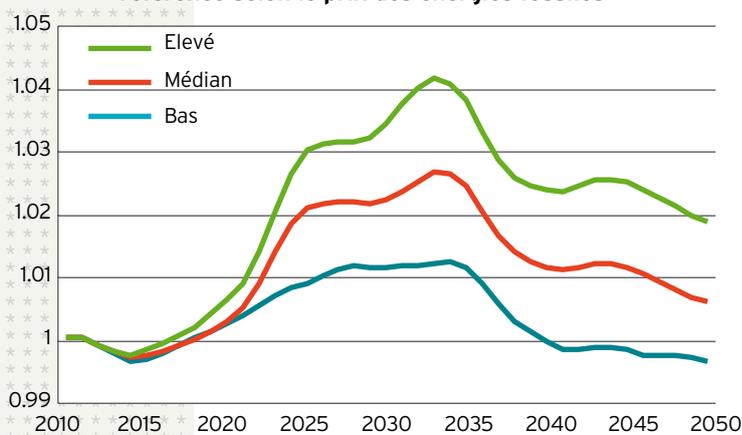


# 4

## Comment réconcilier acceptabilité et Facteur 4 ?

**A**près 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 CO<sub>2</sub>. 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. D'autre part, nous explorons également d'autres mesures moins « acceptables » mais qui permettraient d'atteindre un Facteur 4.

**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

**D**ans 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 CO<sub>2</sub> 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.

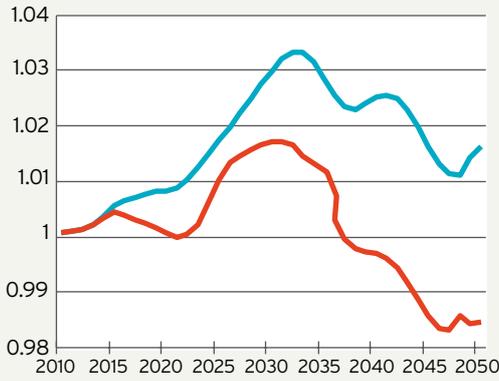
Ainsi, avec l'hypothèse de prix bas de l'énergie, le prix de l'électricité reste supérieur à celui du gaz tout au long de la période. La diminution de la demande qui s'ensuit permet un relâchement des contraintes freinant la décarbonisation du secteur électrique ainsi la décarbonisation du secteur électrique est complète.

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

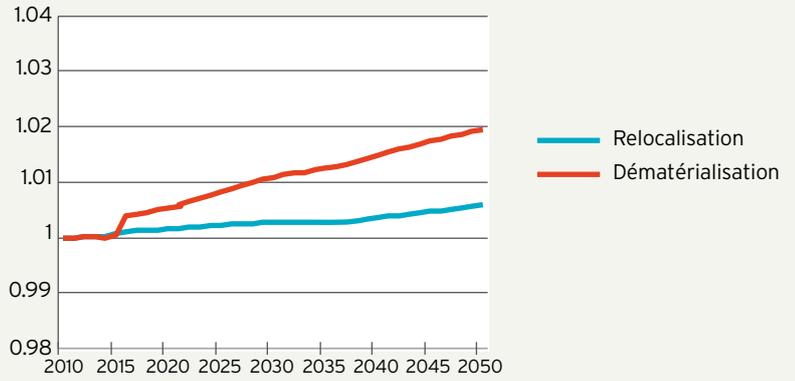
**Réduction des émissions totales et sectorielles par rapport à 2010 en fonction du prix des énergies fossiles**

	2020			2030			2040			2050		
	Bas	Médian	Haut	Bas	Médian	Haut	Bas	Médian	Haut	Bas	Médian	Haut
<b>Industrie<sup>31</sup></b>	-33%	-33%	-33%	-38%	-37%	-53%	-48%	-59%	-67%	-57%	-57%	-77%
<b>Tertiaire<sup>32</sup></b>	-34%	-36%	-38%	-40%	-39%	-59%	-44%	-49%	-64%	-47%	-49%	-67%
<b>Agriculture</b>	-19%	-24%	-20%	-26%	-30%	-48%	-30%	-42%	-58%	-33%	-40%	-61%
<b>Transport</b>	-8%	-19%	-19%	-22%	-35%	-37%	-38%	-55%	-57%	-54%	-60%	-65%
<b>Résidentiel</b>	-28%	-44%	-37%	-43%	-62%	-61%	-54%	-72%	-74%	-65%	-75%	-79%
<b>Électricité</b>	-61%	49%	-53%	-34%	-68%	-43%	-99%	-100%	-100%	-100%	-86%	-99%
<b>Total</b>	-18%	-15%	-24%	-26%	-39%	-43%	-45%	-59%	-64%	-57%	-60%	-71%
<b>Total /1990</b>	-25%	-31%	-31%	-33%	-50%	-48%	-50%	-67%	-67%	-60%	-68%	-74%

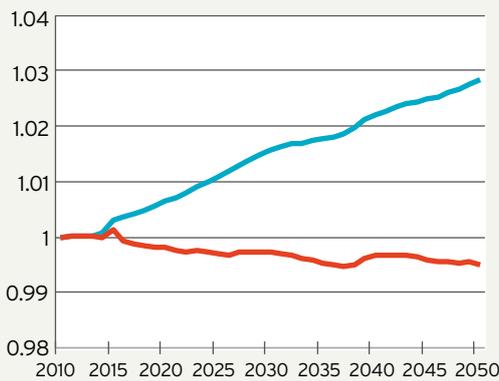
**51 - Évolution des émissions de CO<sub>2</sub>**  
(par rapport au scénario « acceptable »\*)



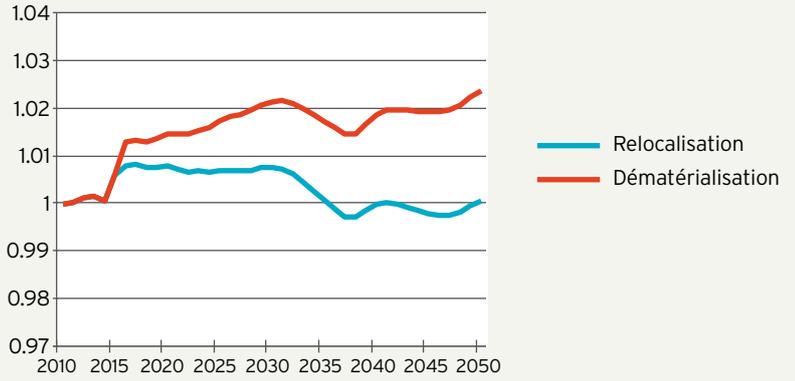
**52 - Évolution du PIB**  
(par rapport au scénario « acceptable »\*)



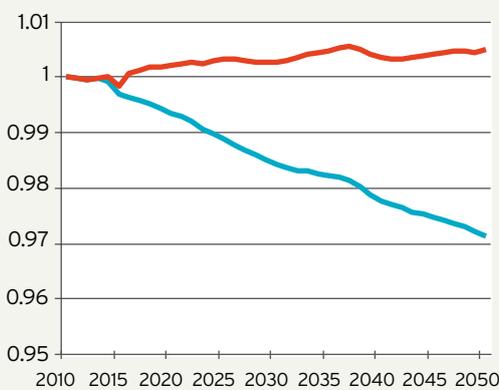
**53 - Évolution de l'indice des prix à la consommation**  
(par rapport au scénario « acceptable »\*)



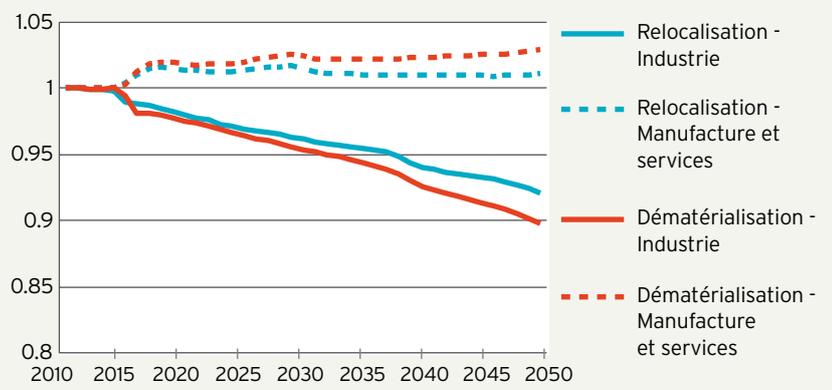
**54 - Évolution de la consommation finale**  
(par rapport au scénario « acceptable »\*)



**55 - Évolution de l'indice de compétitivité**  
(par rapport au scénario « acceptable »\*)



**56 - Évolution de la production**  
(par rapport au scénario « acceptable »\*)



\* présenté au chapitre 3

par rapport au scénario avec les prix médians 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 de prix des énergies fossiles, la croissance du PIB obtenue dans les scénarios de réductions d'émissions est toujours supérieure à 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 dématérialisation<sup>33</sup> 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 relocalisation<sup>34</sup> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 TAF 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 la TAF. Le niveau de taxation est fonction de l'écart existant entre l'intensité carbone 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 TAF, l'autre combinant la TAF aux hypothèses précédemment émises de dématérialisation et de relocalisation.

L'instauration d'une TAF induit logiquement un renforcement direct de la compétitivité internationale, mais également un renchérissement des biens de consommation. La TAF 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 CO<sub>2</sub>.

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 CO<sub>2</sub> 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 ?

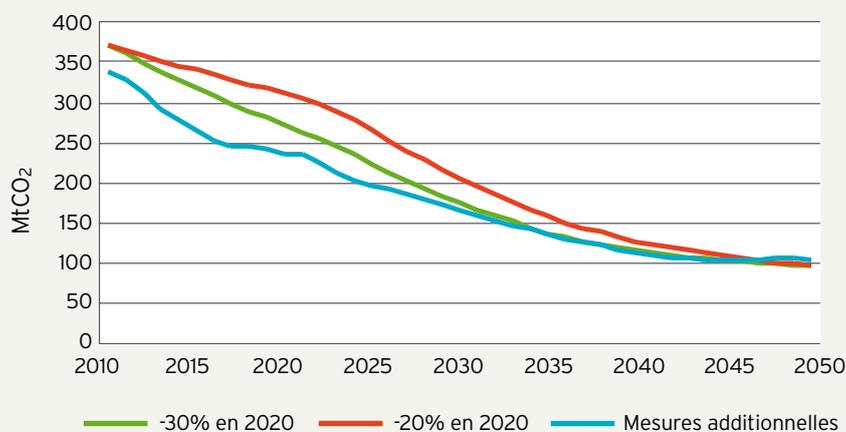
Des mesures complémentaires, jugées acceptables par un peu moins de 50% des parties prenantes sont envisagées ici pour intensifier les réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> :

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



Réductions d'émissions par secteur (par rapport à 2010) dans le scénario avec mesures additionnelles				
	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

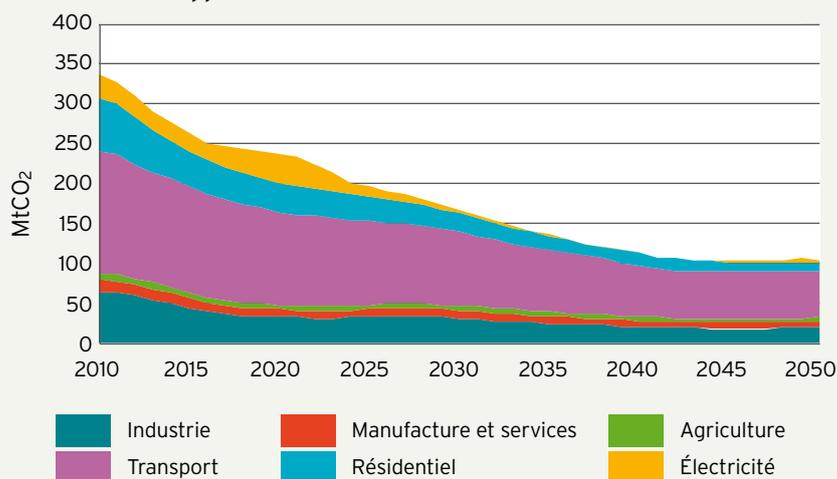


Le nombre total de logements réhabilités reste inférieur à 200 000 unités d'ici 2020, avant de grimper progressivement pour atteindre les 900 000 unités par an à l'horizon 2040. Par la suite, le rythme annuel de rénovations ralentit. Au terme de la période d'étude, 16,1 millions de bâtiments sont rénovés.

### 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 CO<sub>2</sub> 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 d'un côté la demande d'électricité et de l'autre côté 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 (transports et industries intensives 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,



# 5

# 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 <sup>e</sup> et 2 <sup>e</sup> 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	<b>4500</b>	700	disponibles	- X%
	Prolongation chère	disponible	2900	<b>1400</b>	disponibles	- X%
	Sans agrocarburants	disponible	2900	700	<b>indisponibles</b>	- X%
	Renouvelables chers	disponible	2900	700	disponibles	<b>- X/2%</b>
	Pessimisme technologique	<b>indisponible</b>	<b>4500</b>	<b>1400</b>	<b>indisponibles</b>	<b>- X/2%</b>

### 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.

Nous évaluons dans ce qui suit, la sensibilité du « scénario acceptable » à chacune de ces alternatives prises indépendamment les unes des autres. L'alternative « pessimisme technologique » appliquée au « scénario acceptable » ainsi qu'au scénario

avec mesures additionnelles (dorénavant noté AMA) désigne le cumul simultané de toutes les alternatives sur le déploiement de l'offre. 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 l'impact sur les réductions d'émissions de 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 » 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

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

	Réductions d'émissions CO <sub>2</sub> (/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
<b>Scénario acceptable</b>	-31%	-68%	1081	1100	-	-	-	-	-	-
<b>Sans CSC</b>	-32%	-67%	1110	1077	0,0%	0,2%	0,0%	-0,1%	0,0%	-0,3%
<b>EPR cher</b>	-33%	-65%	1151	1217	0,1%	-1,1%	-0,1%	0,8%	-0,4%	2,7%
<b>Prolongation chère</b>	-31%	-67%	1090	1153	0,0%	-0,2%	0,0%	0,2%	0,0%	0,6%
<b>Sans agrocarburants</b>	-28%	-61%	1109	1087	-0,2%	-1,2%	0,3%	1,2%	0,3%	0,4%
<b>Renouvelables chers</b>	-31%	-66%	1085	1163	0,0%	-0,2%	0,0%	0,3%	0,0%	0,9%
<b>Pessimisme technologique</b>	-28%	-53%	1169	1332	-0,2%	-2,3%	0,2%	2,4%	0,4%	4,3%

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

	Gaz sans CSC		Gaz avec CSC		EPR		Charbon avec CSC		Fioul		Total	
<b>Scénario acceptable</b>	<b>14,4</b>		<b>7,2</b>		<b>22,82</b>		<b>2,22</b>		<b>7,2</b>		<b>53,84</b>	
<b>Sans CSC</b>	16,8	(2,4)	0	(-7,2)	27,71	(4,9)	0	(-2,2)	7,2	(0)	51,7	(-2,1)
<b>EPR cher</b>	19,2	(4,8)	12,8	(5,6)	8,1	(-14,6)	4,4	(2,2)	7,2	(0)	51,7	(-2)
<b>Prolongation chère</b>	14,4	(0)	7,2	(0)	21,1	(-1,6)	2,2	(0)	7,2	(0)	52,2	(-1,6)
<b>Sans agrocarburants</b>	16,8	(2,4)	6,4	(-0,8)	24,4	(1,7)	0,7	(-1,5)	7,2	(0)	55,5	(1,8)
<b>Renouvelables chers</b>	14,4	(0)	7,2	(0)	21,1	(-1,6)	2,2	(0)	7,2	(0)	52,2	(-1,6)
<b>Pessimisme technologique</b>	24,8	(10,4)	0	(-7,2)	11,4	(-11,4)	0	(-2,2)	9,6	(2,4)	45,8	(-8)

«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 pour le prix de l'électricité 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 le 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 du prix de l'électricité 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 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 sur une utilisation non négligeable du gaz, au moins comme une énergie de transition.

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

	Réductions d'émissions CO <sub>2</sub> (/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
<b>AMA</b>	-44%	-75%	1179	1600	-	-	-	-	-	-
<b>Scénario AMA pessimisme technologique</b>	-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
<b>Scénario AMA</b>	14,4	2,4	0	0	2,4	<b>19,2</b>
<b>Scénario AMA +Pessimisme technologique</b>	14,4	2,4	0	0	4,8	<b>21,6</b>

Les autres paramètres ont des impacts beaucoup plus limités. La capacité totale installée est toujours au même niveau, mettant en exergue l'importance croissante 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 (pessimisme technologique), le coût élevé 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 également.

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

# Conclusion

**L**effort collaboratif de création de scénarios développé dans le cadre du projet Encilow-Carb 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 et acceptables 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 Facteur 4 sans pour autant l'atteindre. En 2020, le scénario de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> conduit à une baisse de 33% des émissions de CO<sub>2</sub> par rapport à 1990. Ce résultat est plus ambitieux que l'objectif européen de 20%. Néanmoins, l'application de l'ensemble des mesures ne permet de réduire les émissions que de 68%. 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 technologies sobres en carbone et limitent la demande d'énergie. Cela entraîne un abaissement de la facture énergétique d'ensemble et un plafonnement de

la part du budget des ménages dédié aux services énergétiques. 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 prix des combustibles, porte les promesses d'une réorientation des flux financiers vers des options plus sobres en énergie. La transition vers une économie faiblement carbonée risque de rester lettre morte sans le recours à ce signal prix, défendu par la grande majorité des parties prenantes interrogées.

Le projet a mis en évidence des éléments de consensus sur le contenu des politiques de réduction des émissions, mais également des désaccords. 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). La mise en œuvre de ces 2 mesures permet en outre, par leur action sur la limitation de la croissance de la demande en énergie de réduire la dépendance des réductions des émissions au progrès technologique et à la disponibilité des technologies non carbonées. Le présent rapport souligne ainsi la nécessité d'une action politique forte et volontaire 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 climats.★





# Tableaux

## synthétiques du scénario acceptable de réduction des émissions

Impact financier des politiques et mesures dans le scénario de réduction des émissions en (milliards d'euros)

	2010	2020	2030	2040	2050
<b>TRANSPORT</b>					
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
<b>INVESTISSEMENTS DANS LES INFRASTRUCTURES</b>					
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			-	-
<b>ÉLECTRICITÉ</b>					
Recettes de la CSPE = financement des tarifs d'achat	2,9	1,9	7,2	17,8	12,7
<b>SECTEUR RESIDENTIEL</b>					
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
<b>MESURES GLOBALES</b>					
Taxe carbone	0	13,7	18,1	23,9	34,8
<b>BILAN</b>	<b>26,7</b>	<b>8,9</b>	<b>21,3</b>	<b>45,5</b>	<b>53,9</b>

Émissions sectorielles de CO<sub>2</sub> 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	<b>Crédit d'impôts.</b> Les dépenses de rénovation thermique 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.
	<b>Prêt à taux zéro pour la rénovation thermique.</b> 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.
	<b>Réglementation thermique des bâtiments neufs.</b> Dès 2012, les nouvelles constructions se voient imposer un niveau maximal de consommation d'énergie primaire voisin de 50 kWh/m <sup>2</sup> /an (BBC). Les règles sont intensifiées après 2020 : les bâtiments neufs doivent alors devenir producteurs nets d'énergie (BEPOS).
	Représentation implicite des <b>fonds de rénovation thermique obligatoire dans les copropriétés</b> et d'un <b>mécanisme de financement à long terme par les tiers</b> réduisant l'aversion au risque des agents.
	<b>Biogaz.</b> 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	<b>Urbanisme.</b> 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.
	<b>Programme d'investissements dans les transports urbains.</b> 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.
	<b>Télétravail.</b> Il est estimé à un jour ouvré sur dix.
	<b>Taux d'occupation des automobiles.</b> Les incitations font passer le taux d'occupation des voitures en milieu urbain de 1,25 à 1,5.
	<b>Taxe sur le kérosène.</b> 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.
	<b>Taxe écologique sur les poids lourds.</b> 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.
	<b>Programme d'investissements ferroviaires.</b> 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 <b>investissements supplémentaires réalisés dans les transports en commun</b> proviennent d'une réaffectation partielle des <b>investissements initialement consacrés aux infrastructures routières.</b>
	<b>Bonus-malus.</b> Cette mesure, prolongée jusqu'en 2050, garantit chaque année l'équilibre financier du dispositif gouvernemental.
	<b>Logistique.</b> L'amélioration de la chaîne d'approvisionnement s'accompagne d'un découplage annuels des besoins de transport de marchandises égal à 1% dans tous les secteurs.
	<b>Infrastructures.</b> La part du mode de transport de marchandises par voie ferrée n'atteint que 20% en 2030 (hypothèse exogène).
Électricité	<b>Anticipation.</b> Les acteurs du secteur de l'électricité anticipent parfaitement l'évolution de la taxe carbone sur la totalité de la période et orientent leurs investissements selon son niveau.
	<b>Nucléaire.</b> Existant et prolongation de durée de vie : la durée de vie de 40 GW des 63GW existants est prolongée de 20 ans pour un coût de 0,7 Mrd€/GW.
	<b>Agrocarburants.</b> 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).
	<b>Tarifs d'achat.</b> 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.
	<b>Gestion de la demande.</b> Elle recouvre des mesures implicites (contrats interruptibles, compteurs intelligents) servant à lisser la courbe de demande.
	<b>Interdiction du chauffage électrique à effet Joule.</b> 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).
	<b>Extension du réseau électrique.</b> Le développement des capacités renouvelables justifie de nouveaux investissements dans le réseau de transport électrique, et par là même l'augmentation du prix de l'électricité de 3€/MWh dans le scénario de réduction des émissions. Le réseau de distribution devrait également être amélioré, pouvant induire une dépense additionnelle du même ordre de grandeur.
Mesures politiques globales	<b>Taxe carbone.</b> Son montant s'élève progressivement : de 32€/tCO <sub>2</sub> en 2012, il passe successivement à 56€/tCO <sub>2</sub> en 2020, 100€/tCO <sub>2</sub> en 2030, puis 200€/tCO <sub>2</sub> en 2040 et 300€/tCO <sub>2</sub> en 2050.
	<b>Tarification progressive.</b> Pour tous les ménages, le dépassement du seuil de consommation de 60 kWh/m <sup>2</sup> déclenche une élévation de tarif de 5% à partir de 2014 et de 10% à compter de 2030.
	<b>Recyclage des revenus de la taxe carbone.</b> 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 « acceptable » (en Mtep)

	2010	2030	2050
<b>BOUQUET ÉNERGÉTIQUE PRIMAIRE</b>			
Énergie primaire totale	234	178	166
Biogaz	-	2	3
Agrocarburants	-	8	16
Charbon	11	6	6
Électricité nucléaire	91	71	58
Électricité renouvelable	10	18	28
Gaz	40	23	15
Pétrole	82	50	40
Bois	-	3	3

	2010	2030	2050
<b>BOUQUET ÉNERGÉTIQUE FINAL</b>			
Énergie finale	152	130	126
Biogaz	-	2	3
Agrocarburants	-	8	16
Charbon	6	4	3
Électricité	46	46	52
Gaz	34	15	11
Pétrole	66	50	39
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.

