



HAL
open science

Elaboration et analyse macroéconomique d'un scénario bas carbone “ acceptable ”

Ruben Bibas, Sandrine Mathy, Meike Fink

► **To cite this version:**

Ruben Bibas, Sandrine Mathy, Meike Fink. Elaboration et analyse macroéconomique d'un scénario bas carbone “ acceptable ”. *Economie et Prévision*, 2016, 208-209, pp.77-104. 10.3406/ecop.2016.8200 . hal-01426322

HAL Id: hal-01426322

<https://hal.science/hal-01426322>

Submitted on 4 Jan 2017

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.

Elaboration et analyse macroéconomique d'un scénario bas carbone « acceptable »

Ruben Bibas¹, Sandrine Mathy², Meike Fink³

¹ Centre International de Recherche sur l'Environnement et le développement (CIRED)

² GAEL, CNRS, Grenoble INP, Inra, Université Grenoble-Alpes

³ Réseau Action Climat – France (RAC-F)

Résumé

Un double constat motive cette recherche: le déficit d'acceptabilité des politiques climatiques dans le cadre de la mise en œuvre du Facteur 4 (i.e. la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre (GES) en 2050 par rapport à 1990) d'une part et le déficit de crédibilité, de légitimité et d'appropriation des scénarios de réduction des émissions de GES d'autre part. Ces déficits constituent un frein majeur à la prise de décision politique. Pour dépasser ces limites, nous avons élaboré, au travers d'une concertation associant une trentaine de parties prenantes et une cinquantaine d'experts sectoriels, un processus de co-construction d'un scénario constitué de politiques de réduction des émissions de CO₂ considérées comme acceptables par des parties prenantes issues aussi bien du secteur privé, du secteur public et de l'Etat, des ONG, des associations de consommateurs, des syndicats, des banques ou des collectivités territoriales. Celles-ci ont largement contribué à la méthodologie d'élaboration du scénario par la définition d'un cahier des charges incluant la transparence des données, la nécessité d'explicitier les impacts économiques et financiers suite à la mise en œuvre de ces politiques et de mener des tests de sensibilité. L'ensemble des politiques considérées comme acceptables est intégré dans le modèle technico-économique Imaclim-R France. Ce modèle représente les mécanismes de court terme à l'œuvre dans une dynamique de transition énergétique et permet au travers de grandeurs physiques un dialogue avec les parties prenantes. Il évalue les impacts sociaux, économiques et financiers de politiques climatiques. Le scénario résultant de ce processus permet de réduire de 68% les émissions de CO₂ en 2050 par rapport à 1990, résultat proche de l'objectif de Facteur 4. Les mesures de réduction des émissions, dont la plus emblématique est la taxe carbone, sont bénéfiques pour l'emploi et la croissance économique, sauf à court terme. Elles permettent en outre de réduire rapidement et durablement le budget des ménages dédié aux services énergétiques. Ce résultat constitue un socle solide sur lequel construire l'acceptabilité des trajectoires Facteur 4. Des besoins de financement additionnels apparaissent néanmoins pour mettre en œuvre cette transition énergétique.

Introduction

La nécessité de réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre (GES) au niveau mondial s'est traduite en France dans la loi du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique (Loi POPE¹) par le Facteur 4, c'est-à-dire la division par 4 des émissions de GES à l'horizon 2050 par rapport à 1990. En 2007, l'Union Européenne a également adopté le Paquet Climat Energie fixant 3 objectifs à l'horizon 2020 : la réduction des émissions de GES de 20% par

¹ Loi n° 2005-781

rapport à 1990, le développement des énergies renouvelables (ENR) à hauteur de 20% dans le mix énergétique européen et l'amélioration de 20% de l'efficacité énergétique en Europe.

L'impératif de ces objectifs a constitué un socle commun pour les débats du Grenelle de l'Environnement initié dès 2007. Cependant, six ans plus tard, la mise en œuvre de politiques climatiques pour atteindre ces objectifs demeure limitée. Le rejet en 2000² et en 2009³ par le Conseil Constitutionnel du projet de taxe carbone, en partie du fait des trop nombreuses exonérations réclamées par différentes branches d'activités, en constitue un exemple symptomatique. Le retard dans la mise en œuvre de l'écoredevance poids lourds, pourtant décidée dès 2008 mais sans cesse repoussée, illustre également les barrières sociales qui paralysent la prise de décision dans ce domaine. Ainsi, l'existence de perdants dans la mise en œuvre de politiques de transition énergétique s'impose comme le point d'achoppement majeur du débat social autour du climat et de l'orientation énergétique. En effet, même si l'impact économique global d'une trajectoire bas carbone est positif, certaines activités économiques auraient néanmoins à souffrir à court ou à plus long terme de la mise en place de politiques climatiques (transport routier de marchandises, constructeurs automobiles...). De la même manière, si l'impact économique agrégé d'une trajectoire s'avère, sur toute la période jusqu'en 2050 ou même seulement pour partie, négatif pour la croissance ou l'emploi, son acceptabilité auprès de la population risque d'être minime, tout comme la volonté gouvernementale pour sa mise en œuvre. En ce sens, la réalisation d'un exercice de scénarisation peut permettre d'explicitier l'ensemble des conséquences économiques et sociales d'une trajectoire pour chacun des acteurs et ainsi ouvrir le débat sur les visions compatibles ou non avec les objectifs climatiques et énergétiques.

Or une telle évaluation économique de l'impact des politiques qui sous-tendent les trajectoires énergétiques nécessite le recours à des outils de modélisation économique permettant de représenter fidèlement chacune de ces politiques et leurs impacts tant sectoriels que sur les ménages ou encore sur les finances publiques. En 2010, sept exercices de scénarisation s'inscrivaient dans le cadre d'une trajectoire Facteur 4. Leur très large majorité ne s'appuyait pas sur de tels outils (Mathy et al., 2011), mais se cantonnait à une projection d'ingénieur du système énergétique, souvent dans une vision normative.

D'autre part, les outils utilisés pour développer ces scénarios font souvent office de boîte noire et se révèlent difficilement appropriables en dehors d'une communauté très restreinte de modélisateurs ou commanditaires. Les résultats ou recommandations auxquels ces scénarios aboutissent ouvrent alors le flanc à la critique par manque de transparence sur les hypothèses et sur les mécaniques représentées.

Ainsi, il est certain que les exercices qui reposent sur ces démarches de modélisation traditionnelles ne pourront avoir qu'un impact limité sur la prise de décision. Il est dès lors nécessaire d'élaborer des approches innovantes laissant une large place à la concertation pour aider la décision. van Asselt et Rijkens-Klomp (2002) et Wilcox (2003) listent un certain nombre de méthodes participatives dans différentes disciplines. Récemment plusieurs exercices et projets ont accordé une attention particulière à l'incorporation de telles méthodes pour l'analyse de scénarios ou pour la construction

² Décision n° 2000-441 DC du 28 décembre 2000 (pour atteinte au principe d'égalité devant l'impôt sans justification au regard des objectifs d'intérêt général poursuivis).

³ Décision n° 2009-599 DC du 29 décembre 2009 (pour rupture de l'égalité devant l'impôt).

de visions de long terme: Hulse et al. (2004) dans le domaine de l'usage des terres et de l'eau, Pahl-Wostl (2002) pour la gestion de l'eau, Patel et al. (2007) dans le domaine de la désertification. Dans les champs spécifiques de l'énergie et du climat, quelques exemples peuvent être cités. Dans le projet COOL (Climate OptiOns for the Long-term, Berk et al. 2002), les participants (décideurs issus de pays développés et en développement, parties prenantes impliquées dans les négociations internationales sur le changement climatique et scientifiques) ont exploré différentes options de politiques climatiques de long terme et leurs implications de court terme en se reposant sur une méthodologie de « back-casting ». Kasemir et al. (2000) proposent des méthodologies intégrant les parties prenantes de manière à réduire le champ des incertitudes sur les visions énergétiques et climatiques de long terme. Larsen et Gunnarson-Ostling (2009) mettent en œuvre un processus de participation de citoyens sur les liens entre réduction des émissions de GES et adaptation.

Néanmoins, aucun de ces exercices ne met en interaction les visions qualitatives ou recommandations émergeant du processus de participation avec une évaluation quantitative. Dans les rares exercices ayant tenté de faire ce lien, l'intégration des avis issus des processus de concertation dans les quantifications reste fruste. Ainsi, la Commission Européenne (2011) a mis en place une consultation du public en ligne pour l'élaboration de sa feuille de route. De la même manière, la *European Climate Foundation* a consulté des parties prenantes lors de l'élaboration de sa « Roadmap 2050 » (ECF, 2010). Au niveau français, la récente « Commission Trajectoire » présidée par C. de Perthuis (2011) a mené un exercice plus poussé encore de consultation des parties prenantes sur des recommandations de politiques associant le secteur privé, les organisations non gouvernementales, les syndicats et l'Etat. Toutefois, dans ces trois exercices, rien ne permet de savoir comment et dans quelle mesure les recommandations furent prises en compte dans les exercices de quantification et de modélisation.

Cet article présente une évaluation quantitative s'appuyant sur un modèle technico-économique de politiques climatiques émergeant d'un processus de participation avec les parties prenantes au dossier climat en France. Cette démarche vise à évaluer l'acceptabilité de la mise en œuvre du Facteur 4 en France par les parties prenantes. Pour cela, une méthodologie garantissant l'intégration transparente des contributions des parties prenantes dans le processus d'élaboration des scénarios est développée, afin (i) d'aboutir à des trajectoires bas carbone constituées de politiques acceptables, (ii) et de renforcer la légitimité et la crédibilité de la démarche et l'appropriation des résultats par un plus large public. Ces travaux (Bibas et al. 2012) ont été menés dans le cadre du projet ENCILowCarb⁴ (ENGaging Civil society in Low Carbon Scenarios) financé par le programme FP7 de la Commission Européenne. Ce dialogue s'est appuyé d'une part sur l'utilisation d'un modèle technico-économique « hybride » Imaclim-R France représentant une évolution des systèmes techniques cohérente avec les contraintes économiques, et d'autre part sur une méthodologie de concertation entre modélisateurs et parties prenantes.

L'article se structure en cinq parties. La première partie justifie le recours au modèle Imaclim-R France pour la concertation et la construction du scénario. La seconde partie présente le processus de concertation avec les parties prenantes et le déroulé du projet. La troisième partie dresse un bilan méthodologique et liste l'ensemble des politiques « acceptables » issues de la concertation. La

⁴ Le site du projet est accessible à cette adresse : <http://www.lowcarbon-societies.eu/>

quatrième partie décrit le scénario issu de la concertation. Une analyse de sensibilité de ce scénario est menée dans la dernière partie.

I. Le modèle Imaclim-R France, outil de dialogue entre modélisateur et parties prenantes pour la transition énergétique

Le côté novateur du projet réside dans le dialogue entre le processus de concertation et la quantification des propositions qui en émanent de manière à mener une évaluation économique d'une trajectoire constituée de politiques de transition énergétique « acceptables ». Contrairement à nombre de scénarios mis à disposition du débat énergie initié fin 2012, notre point de départ n'est pas normatif et reste purement descriptif : quelles seraient les réductions d'émissions atteintes par un ensemble de politiques considérées comme acceptables et quel en serait l'impact économique ? Les trajectoires qui seront décrites par cet ensemble de politiques n'ont aucune raison d'être optimales, par contre la crédibilité de la démarche repose en partie sur le réalisme des mécanismes économiques décrits au sein du modèle, de l'évolution des systèmes techniques qui soit cohérente avec les contraintes économiques et enfin de l'économie française représentée. Le modèle utilisé pour construire ces trajectoires doit répondre à certaines caractéristiques : d'une part, pouvoir représenter les mécanismes de court terme à l'œuvre dans une dynamique de transition énergétique ; d'autre part permettre au travers de grandeurs physiques un dialogue avec les parties prenantes. Nous justifions dans la suite de cette partie en quoi le modèle Imaclim-R France répond à ces attentes.

1. Imaclim-R France : faire le lien entre vision de long terme et mécanismes de court terme

Considérant le changement climatique comme un problème pour l'économie du long terme, la plupart des modèles mobilisés pour son analyse économique repose sur le paradigme néoclassique d'une croissance de long terme stabilisée, occultant les déséquilibres de court terme et les mécanismes de second rang. Les outils mobilisés sont fondés sur les concepts d'optimalité et d'équilibre avec une allocation optimale des ressources associée à un plein emploi des facteurs de production le long d'un chemin de croissance stabilisée. La boîte à outils néoclassique repose ainsi sur des hypothèses d'agents représentatifs ayant des comportements d'optimisation, une information parfaite et des anticipations parfaites, de marchés parfaits et de mobilité instantanée des facteurs. Ces concepts d'optimalité conduisent les modèles à produire nécessairement (i) des coûts nets de l'atténuation, impliquant un compromis direct entre activité économique et réduction des émissions, (ii) mais des coûts faibles du fait des fortes flexibilités et capacités d'adaptation de l'économie représentée. Or ceci occulte les aspérités du monde réel, et notamment le rôle des contraintes du court terme et des points de blocages dans l'évaluation de la transition vers des économies bas carbone.

C'est pourquoi l'architecture de modélisation Imaclim-R s'attache à permettre l'intégration d'éléments de second rang et la représentation de mécanismes de court terme dans un cadre de long terme. Les particularités du modèle reposent sur (i) une représentation de l'inertie du capital productif (technologies putty-clay) et des équipements des ménages, mais aussi des comportements des différents acteurs et (ii) l'intégration d'un certain nombre d'éléments de second rang dans le cœur macroéconomique du modèle, à savoir la rigidité des marchés du travail, les anticipations

imparfaites des acteurs pour leurs choix d'investissements et la possibilité d'utilisation incomplète des facteurs de production. Des déséquilibres endogènes engendrés par l'inertie dans l'adaptation à de nouvelles conditions économiques sont représentés par des rigidités introduites par une représentation des générations de capital disponible à chaque date avec des technologies putty-clay. Sur le court terme, la flexibilité principale réside dans le taux d'utilisation du capital productif, ce qui peut induire une sous- ou surutilisation des facteurs de production, du chômage et une rentabilité du capital inégale entre secteurs.

Pour ce faire, Imaclim-R est un modèle hybride d'équilibre général représentant l'économie française désagrégée en 15 secteurs⁵ et selon une hypothèse d'économie ouverte.

2. Imaclim-R France : un outil pour le dialogue avec les parties prenantes

La structure d'Imaclim-R France est conçue pour pouvoir incorporer des informations *bottom-up* dans un cadre macroéconomique *top down*. Ceci assure une représentation duale cohérente de la croissance et de son contenu matériel et technique. L'énergie est représentée, au travers de tableaux entrées-sorties de façon explicite à la fois en valeur monétaire et en quantité physique afin de pouvoir détailler le rôle spécifique des secteurs énergétiques et des usages finaux d'énergie, ainsi que leurs interactions avec le reste de l'économie. L'existence de variables physiques explicites (ex. nombre d'automobiles, de logements en copropriétés ou de maisons individuelles, rendement énergétique des technologies) permet en effet de prendre en compte de façon rigoureuse des informations sectorielles détaillant la façon dont les systèmes techniques et la demande finale se transforment sous l'effet de signaux économiques, facilitant ainsi un dialogue avec les non modélisateurs.

En termes techniques, le modèle peut être qualifié de « dynamique récursif » puisqu'il construit une trajectoire technico-économique en résolvant une succession d'équilibres statiques annuels de l'économie, reliés par des modules dynamiques. Les modules dynamiques (électricité, résidentiel, transports) font évoluer dans le temps les contraintes des équilibres statiques (en particulier les capacités productives et les coefficients entrée-sortie). Ils représentent l'accumulation du capital productif et son contenu technologique en fonction des signaux économiques, tels que les prix et les rentabilités des secteurs issus des équilibres statiques précédents. Ils comprennent la modélisation (i) de l'évolution du capital installé et des stocks d'équipements décrits en générations de capital et unités physiques, (ii) des choix technologiques des agents décrits par des choix discrets dans un portefeuille de technologies explicites pour les secteurs clés (production d'électricité, véhicules particuliers), ou représentés au travers de formes réduites de modèles *bottom-up*, et (iii) du changement technique induit pour l'énergie (courbes d'apprentissage).

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

⁵ Énergie (pétrole brut, pétrole raffiné, gaz, charbon et électricité), transport (transport routier de marchandises, transport par voie d'eau, transport aérien, transport de passagers et transport public routier de personnes), construction, industries intensives en énergie, agriculture et services.

3. Les politiques climatiques : quels mécanismes à l'œuvre ?

Nous détaillons ici les mécanismes économiques représentés dans Imaclim-R France sous l'effet de politiques climatiques : signaux prix, incitations à l'amélioration de l'efficacité énergétique, réglementation...

Les signaux prix, tels que la taxe carbone, représentent un choc sur les prix des biens ; soit directement s'il s'agit d'un bien énergétique, soit à travers une augmentation des coûts de production. Ce choc se propage à l'ensemble des prix dans l'économie *via* la structure de production, i.e. les consommations intermédiaires des secteurs productifs. Cette déformation du vecteur prix donne lieu à des effets directs sur la production, ainsi qu'à des effets retour (boucles de rétroaction).

Les effets directs sont :

(i) **un changement de la structure et du volume de la demande.** La déformation du vecteur prix change les parts de budget allouées à chaque type de consommation. Dans Imaclim-R, celles-ci sont déterminées par l'équipement des ménages (véhicules personnels et usages résidentiels) et les choix modaux de mobilité résultant de la maximisation de l'utilité sous contraintes de revenu et de temps passé dans les transports étant données les infrastructures disponibles. Ces déterminants sont caractérisés par divers degrés d'inertie (équipements, infrastructures mais aussi comportements) et une part des consommations est considérée comme besoin de base. Une augmentation des prix de l'énergie et des transports crée un effet de pincement sur la part de budget disponible pour les autres consommations. La variation du volume de consommation de chacun des biens résulte ainsi de la combinaison de la modification des parts de budget allouées à chaque poste de dépense, de la variation du prix du bien et du changement du pouvoir d'achat des ménages.

(ii) **une modification de la compétitivité des biens nationaux et donc du commerce international.** Une augmentation des prix de production relative aux prix internationaux conduit à une perte de compétitivité, à moins d'exportations et plus d'importations, et donc à une baisse de la production domestique.

Des boucles de rétroaction s'ajoutent à ces effets directs :

(i) **l'effet de la variation de la production et des prix de vente sur les revenus nominaux et réels des ménages.** Une variation de la production induit une modification des revenus des ménages via la variation du volume des salaires et la variation des profits des entreprises reversés aux ménages. L'effet volume des salaires est simplement lié à la variation d'activité des secteurs productifs par le coefficient d'input de travail par secteur évoluant selon la croissance de la productivité du travail d'une année sur l'autre. La variation des revenus du capital dans Imaclim-R résulte de même de la combinaison d'un effet volume, le volume de la production, et d'un effet prix, à travers les marges appliquées aux coûts de production. En retour, la modification des revenus des ménages conduit à une variation de leur volume de consommation finale, et donc de la production.

(ii) **la variation du volume d'investissement.** La variation de la production modifie le volume des investissements, du fait de la modification de l'épargne des ménages et de l'auto-investissement des entreprises. En retour, la modification du volume des investissements rétroagit sur le volume de la production.

(iii) la **variation des niveaux de salaires jouant en retour sur les prix**. Une courbes salaire-chômage relie négativement le niveau de salaire au niveau de chômage. Ceci amplifie la décroissance des revenus des salaires suite à une baisse de production de l'économie : une baisse de la production augmente le taux de chômage et induit donc une baisse des niveaux de salaires. L'amplification dépend de l'élasticité de la courbe salaire-chômage, qui peut être vue d'une certaine manière comme l'aptitude de l'économie à s'adapter en prix ou en quantités après un choc. La modification des salaires joue en retour sur le vecteur des prix à travers la part des coûts salariaux dans les coûts de production, ce qui restaure en partie la compétitivité et ajuste la balance commerciale. Cet effet entre également dans la boucle de rétroaction via les revenus des ménages.

Les deux premières boucles de rétroaction ont un effet amplificateur sur les variations de production, tandis que la troisième induit un effet modérateur puisqu'une diminution de la production entraîne des niveaux de salaires plus faibles, modère l'augmentation des prix de production et augmente donc la demande pour ce produit. Elle revêt donc une importance particulière dans l'ajustement d'une économie à un choc sur les prix.

Par ailleurs, la structure de la production induit un effet de propagation : une diminution de la production d'un bien donné entraîne une diminution de la production des autres biens et services du fait de la diminution de ses consommations intermédiaires.

Enfin, les revenus de la taxe carbone offrent des marges de manœuvre au décideur public et peuvent faire l'objet d'une négociation avec les parties prenantes. Ils peuvent être rendus aux ménages sous forme d'une compensation forfaitaire, permettre d'augmenter les dépenses publiques ou de réduire d'autres fiscalités ou encore de subventionner l'efficacité énergétique et les ENR par exemple.

Les politiques climatiques font évoluer le système énergétique du côté de l'offre, comme du côté de la demande. Les signaux prix et les incitations à l'efficacité énergétique modifient les rentabilités relatives des investissements et orientent ménages et activités productives vers des technologies et des équipements sobres en carbone pour lesquels le progrès technique et les effets d'apprentissages s'en trouvent accélérés. Ceci amortit en retour le choc sur les prix introduit par les signaux prix (mais permet par la même un effet rebond sur les consommations d'énergie) et s'accompagne généralement d'investissements supplémentaires. Par conséquent, l'impact global sur la trajectoire de demande finale en bien non énergétique et sur les niveaux de production dépendra de l'ampleur des coûts supplémentaires pour chacun des agents pour réduire leur consommation d'énergie ou le contenu carbone de leurs consommations. Il est donc possible, partant d'une économie offrant des potentiels d'amélioration de l'efficacité à bas coût, voire à coût négatif et une capacité d'adaptation rapide, voire anticipant le prix croissant de l'énergie, d'obtenir des gains pour les ménages et pour les activités productrices et *in fine* une plus forte croissance et un taux de chômage plus faible.

II. Organiser le dialogue avec les parties prenantes

1. Les parties prenantes

Le choix des parties prenantes participant au processus de concertation s'est appuyé sur une grille « pouvoir – intérêt » qui a permis de dresser le paysage des acteurs sectoriels (cf. Figure 1). Les parties prenantes sélectionnées se retrouvent prioritairement dans la partie droite de la grille : « Acteurs clefs » et « Acteurs concernés ». L'appréciation du degré d'intérêt et d'influence de chaque

acteur étant malgré tout subjective, des entretiens avec au moins trois experts du secteur ont permis de recouper les résultats. Une attention particulière a été portée à la sélection d'acteurs tant issus du secteur privé, qu'institutionnel, bancaire, associatif ou syndical (Tableau 1).

Figure 1 : Grille Pouvoir – Intérêt pour sélectionner les parties prenantes

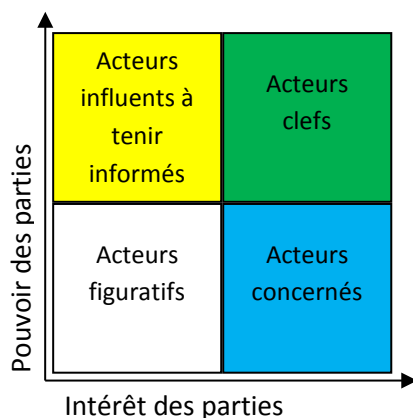


Tableau 1 : listes des parties prenantes ayant participé aux ateliers

| | |
|--------------------------------------|---|
| Collectivités territoriales | Région Ile de France |
| Secteur privé, opérateurs | GDF Suez Saint Gobain Energies demain SNCF Réseaux Ferrés de France (RFF) Valéo Electricité de France (EDF) Fédération Nationale des Transports Routiers (FNTR) Union Française d'Electricité (UFE) Electricité Réseau Distribution France (ERDF) Electricité de France (EDF) |
| ONG | Comité de Liaison des Energies Renouvelables (CLER) Association négaWatt |
| Associations de consommateurs | Union des Syndicats de l'Immobilier (UNIS) Association des Responsables de Copropriétés (UNARC) Fédération Nationale des Usagers de Transports (FNAUT) |
| Secteur bancaire/financement | Groupe BPCE Caisse des Dépôts et Consignation – climat |
| Syndicat, fédérations | FNSEA Confédération Française Démocratique du Travail (CFDT) Fédération Française du Bâtiment (FFB) Syndicat des Energies Renouvelables (SER) |
| Secteur public, Etat | Ademe Plan Urbanisme Construction Architecture (PUCA) de la Direction générale de l'Aménagement du Logement et de la Nature (DGALN / PUCA) Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC) |
| Autres | Stéphane Labranche, sociologue, Université Grenoble Véronique lamblin, Futuribles Marc Wielh, Wielh Consultant |

2. Déroulé du projet

Le processus de consultation des parties prenantes a suivi 6 étapes, tel que décrit dans la Figure 2 :

1. Ateliers d'experts sectoriels autour de l'outil de modélisation Imaclim-R France

Cette première étape vise à valider ou améliorer les hypothèses et les représentations sectorielles du modèle Imaclim-R. Ces ateliers d'experts ont réuni professionnels et chercheurs experts de chacun des secteurs (habitat, transports, électricité). Un atelier pour chacun de ces trois secteurs a été tenu, regroupant à chaque fois entre dix et quinze experts d'horizons différents.

Tableau 2 : Liste des organismes ayant participé aux ateliers sectoriels d'experts

| | Organisme |
|-------------|--|
| Habitat | Electricité de France (EDF), Laboratoire Techniques, Territoires et Sociétés (LATTs), Centre International de Recherche en Environnement et Développement (CIRED), Ademe, negaWatt, ENGREF, Agence Nationale de l'Amélioration de l'Habitat (ANAH), Plan Urbanisme Construction Architecture (PUCA) de la Direction générale de l'Aménagement du Logement et de la Nature , Ministère de l'Ecologie , du Développement durable et de l'Energie (MEDDE), Amorce (association nationale des collectivités, des associations et des entreprises pour la gestion des déchets, de l'énergie et des réseaux de chaleur), Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Mines ParisTech |
| Transport | negaWatt, Laboratoire d'Economie des Transports (LET), Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU), Groupement des Autorités Responsables de Transport (GART), Laboratoire Ville Mobilité Transports (LVMT), Institut du Développement Durable et des Relations Internationales (IDDRI), Centre International de Recherche en Environnement et Développement (CIRED) |
| Electricité | Réseaux et Transport de l'Electricité (RTE), Electricité de France (EDF), Commission de Régulation de l'Energie (CRE), Syndicat des Energies Renouvelables (SER), Gaz de France (GDF Suez), Ademe, negaWatt, Centre International de Recherche en Environnement et Développement (CIRED) |

2. Ateliers sectoriels avec les parties prenantes visant à la définition et l'identification de politiques climatiques acceptables

L'identification des politiques climatiques acceptables s'est appuyée sur des questionnaires sectoriels construits de manière à permettre à la fois l'exploitation dans le modèle des réponses ainsi qu'un libre champ aux propositions des parties prenantes⁶. Ces questionnaires visent à évaluer le degré de réalisme, d'efficacité et d'acceptabilité des mesures permettant de réduire les émissions de GES. Le nombre de participants à ces ateliers sectoriels a été volontairement restreint à une quinzaine, de manière à assurer une discussion structurée et un temps de parole équilibré entre les participants. Par convention, nous considérons comme acceptable une mesure recueillant l'assentiment de plus de la moitié des parties prenantes présentes.

3. Traduction des politiques acceptables dans le modèle Imaclim-R France
4. Elaboration d'un premier scénario «ACC #1»

⁶ Pour consulter questionnaires et réponses : <http://www.lowcarbon-societies.eu/index.php?id=25>

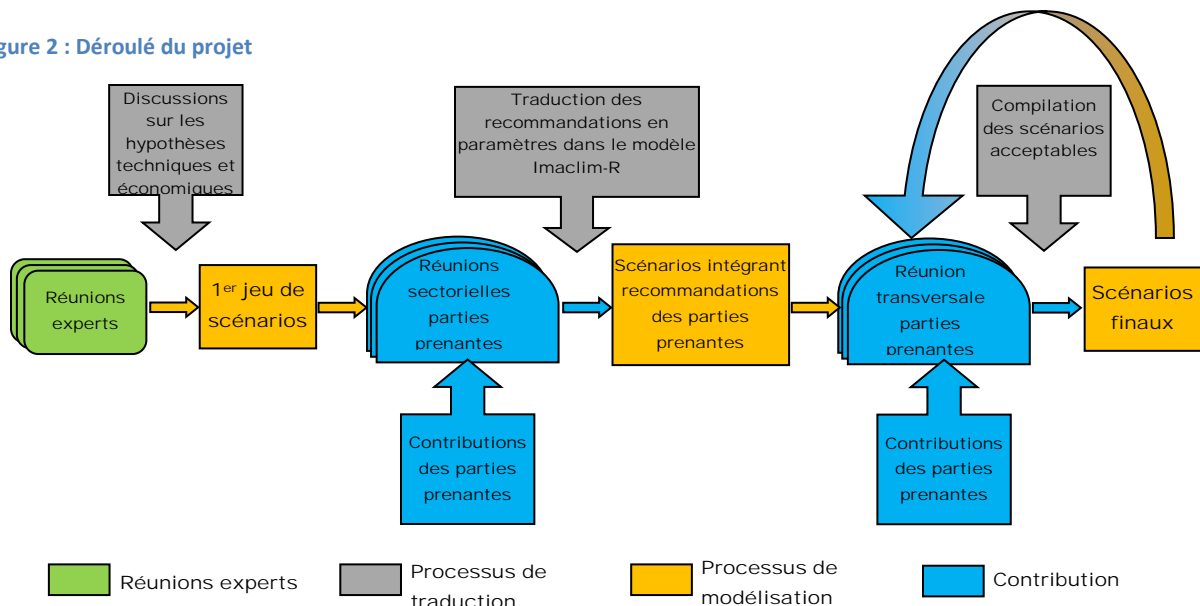
5. Atelier transversal visant à intégrer les remarques des parties prenantes sur le scénario « ACC #1 »

La réunion au sein d'un atelier intersectoriel de l'ensemble des parties prenantes ayant participé au processus permet tout d'abord d'aller au-delà des simples considérations sectorielles. Elle permet notamment de faire émerger des éléments de cohérence sur des problématiques multisectorielles telles que l'étalement urbain (habitat et transports) ou le chauffage électrique (habitat et électricité). Cet atelier vise également à évaluer le partage du fardeau entre les différents secteurs et à recueillir les réactions des parties prenantes sur l'acceptabilité de l'ensemble du scénario.

6. Elaboration d'un scénario « ACC#2 »

Les remarques et les demandes d'ajustement de certains paramètres sur la représentation des mesures de la part des parties prenantes ont été intégrées dans le scénario ACC#1 pour donner un scénario ACC#2. Ce scénario final sera dénommé simplement ACC dans la suite de l'article.

Figure 2 : Déroulé du projet



III. Retour sur le processus de concertation

1. Les difficultés rencontrées dans le dialogue entre modélisation et parties prenantes

a) Ouvrir la boîte de Pandore du modèle

Le modèle Imaclim-R France recourt à un ensemble de fonctions issues de la théorie économique décrivant notamment le fonctionnement des marchés et réduit l'individu à ses actes de consommation dont dépend son bien-être. Cette représentation n'est pas naturelle pour des non économistes. Or l'appropriation par les parties prenantes de la méthodologie du projet, et notamment du processus d'interaction entre les parties prenantes et le modèle est une des conditions d'adhésion au scénario qui en découle et donc de réussite du projet. L'un des principaux défis fut d'expliquer l'utilisation des résultats des questionnaires et leur traduction dans Imaclim-R France. A défaut de pouvoir détailler l'ensemble du modèle, l'accent a été porté sur les paramètres d'entrées et les variables de sorties du modèle, ainsi que sur certains mécanismes saillants de la

modélisation. Les positionnements vis-à-vis de la théorie économique (choix d'un modèle hybride intégrant la logique *top-down* et des modules *bottom-up*, recours à des coefficients techniques Léontieff inflexibles à court terme, etc.) ont été éludés.

b) Traduction des politiques et mesures au sein d'Imaclim-R France

Une fois la liste des mesures acceptables établie, la principale difficulté réside dans la traduction de ces politiques en tant que paramètres d'un modèle technico-économique. Pour certaines d'entre elles, la traduction est simple et se fait par la valeur d'un paramètre explicite du modèle (par exemple le niveau de taxe carbone ou de l'écoredevance poids lourds). Pour d'autres, qui ne renvoient pas à un paramètre explicite du modèle, la traduction doit s'appuyer sur des *proxys* qui laissent une certaine marge de manœuvre au modélisateur. Comme le montre le Tableau 3 listant les mesures ayant passé de cap de l'acceptabilité, peu de mesures ont nécessité une traduction implicite dans le modèle.

Exemple de traduction implicite de politique dans Imaclim-R France: les obstacles non financiers à la rénovation des logements

Parmi les obstacles majeurs à la rénovation des logements, les parties prenantes ont identifié l'aversion persistante des propriétaires particulièrement pour les propriétaires bailleurs à la réhabilitation de leur logement, même en présence d'incitations financières. L'accès des propriétaires aux incitations fiscales et aux subventions est en effet conditionné à un apport financier personnel important. Plusieurs solutions ont été recommandées par les parties prenantes pour surmonter cet obstacle : la création d'un fond de rénovation obligatoire dans les copropriétés ou d'un mécanisme de tiers-financement à long terme. Ces mécanismes n'étant pas représentables en tant que tel dans Imaclim-R France, une traduction implicite a été faite au travers de leur prise en compte dans l'évolution du degré d'aversion au risque des différents agents (propriétaires locataires, propriétaires non locataires, etc.) dans le taux d'actualisation spécifique à chacun de ces agents.

2. Circonscrire la notion d'acceptabilité

a) La sélection des mesures acceptables

Une mesure sectorielle spécifique a été retenue comme acceptable lorsqu'elle était plébiscitée par une majorité de parties prenantes participant à la réunion sectorielle. Ce seuil de 50% peut apparaître bas, toutefois au moins deux raisons le justifient. Certaines parties prenantes, ne se considérant pas légitimes pour se positionner sur l'acceptabilité de mesures particulières, s'abstenaient de répondre. L'absence de réponse peut alors être comprise comme un bulletin blanc, non retenu dans le décompte final dans une élection française. Une autre interprétation est que la partie prenante peut ne pas avoir d'avis institutionnel et aura donc à adapter son comportement à la politique mise en place. Enfin, le taux de 50% ne s'est pas révélé discriminant car une majorité des mesures structurelles du scénario ont recueilli presque l'unanimité, et peu nombreuses sont les mesures ayant polarisé le débat. Ainsi, la fixation d'un seuil plus élevé mais ne tenant compte que des réponses exprimées n'aurait pas conduit à un ensemble de mesures très différent de la liste établie dans le Tableau 3.

b) Scénario acceptable vs politiques acceptables

Le scénario ACC décrit dans la partie IV est un scénario construit par morceaux, en assemblant l'ensemble des mesures ayant passé le cap de l'acceptabilité tel que défini précédemment. A la différence des exercices de concertation ne s'appuyant pas sur un outil de modélisation, le recours

au modèle Imaclim-R France permet non seulement l'évaluation quantitative économique et environnementale de l'ensemble de ces politiques mais aussi la construction de la cohérence technico-économique de l'ensemble des politiques regroupées dans un même scénario.

Par contre rien ne permet d'affirmer que l'ensemble des mesures passant ce cap des 50% et regroupées au sein du scénario ACC puisse être considéré dans sa totalité comme acceptable par la majorité des parties prenantes :

- En effet, chacune des parties prenantes ne se reconnaît plus forcément dans l'ensemble des politiques actées comme acceptables par le processus, d'une part parce que chacune des parties prenantes ne s'est exprimée que sur son champ de compétences, celui-ci étant principalement sectoriel et d'autre part, parce que même au niveau sectoriel, les politiques intégrées comme acceptables au scénario ne recourent pas les politiques acceptables pour chacune des parties prenantes.
- D'autre part, les parties prenantes se sont prononcées sur l'acceptabilité des mesures sans avoir connaissance des impacts de ces mesures sur la trajectoire économique obtenue par le modèle. Le but du projet n'est donc pas que les parties prenantes se positionnent sur l'acceptabilité globale du scénario puisque l'évaluation économique au travers du modèle est totalement endogène étant donné un ensemble de politiques.

D'autres approches relatives à l'acceptabilité auraient pu être mises en œuvre :

- S'il est difficile de se mettre d'accord a priori sur la totalité des éléments d'un scénario, à force d'itérations avec les parties prenantes, il est possible de cheminer, sur la base de l'évaluation globale de l'ensemble des politiques, vers un socle commun de propositions (en ajustant à la marge les politiques considérées comme acceptables) que personne (ou presque) ne serait prêt à rejeter fortement. Le scénario final pourrait alors être considéré comme « acceptable » par la majorité des parties prenantes.
- Une autre approche serait d'établir pour chaque partie prenante un ensemble de politiques jugées acceptables grâce à l'évaluation économique et environnementale qu'offre Imaclim-R France. Les parties prenantes pourraient ainsi être regroupées en groupe de parties prenantes portant les mêmes ensembles de politiques et les mêmes (types de) scénarios « acceptables ». Dans ce cadre, il n'est pas assuré que la concertation entre ces groupes permette de cheminer vers un consensus large (i.e. sur la totalité du scénario) partagé, mais des éléments de consensus forts et de blocage peuvent émerger et alimenter le débat.

3. Résultat de la concertation

L'ensemble des mesures sectorielles et fiscales considérées comme acceptables à l'issue du processus de concertation des parties prenantes est listé dans le Tableau 3. Ces politiques sont détaillées de manière plus extensive en Annexe.

Tableau 3 : liste des mesures considérées comme acceptables et intégrées au scénario participatif et mode de traduction dans Imaclim-R (Exp : explicite et Imp : implicite)

| | |
|---|--|
| Résidentiel | |
| Aide à la rénovation thermique de l'habitat | <ul style="list-style-type: none"> - Renforcement crédit d'impôt développement durable (Exp) - Renforcement prêt à taux zéro pour la rénovation (Exp) - Obligation de fonds de rénovation pour les copropriétés (Imp) - Développement des systèmes de tiers financeurs (Imp) |

| | |
|---|--|
| Réglementation thermique dans le neuf | - 50kWh/m ² /an après 2012 (Exp) - Bâtiment à énergie positive après 2020 (Exp) |
| Offre d'énergie | - Développement significatif du biogaz (17 % du gaz réseau en 2050) (Exp) |
| Mise en place d'un tarif progressif sur les consommations d'énergies (Exp et Imp) | |
| Transports | |
| Infrastructures | - Investissements doublés dans les transports urbains pendant 20 ans après 2012 (3Mrds €/an) (Exp) - Investissements dans les transports ferroviaires de 3Mrds €/an pendant 20 ans (Exp) - Pas de développement du réseau routier, investissements dans le réseau routier limités à la maintenance (Exp) - Ralentissement de l'étalement urbain jusqu'en 2030 (Imp) - Accroissement de la densité urbaine moyenne à partir de 2030 (Imp) |
| Diminution de la demande | - Développement du télétravail (1 jour travaillé sur 10) (Exp) - Augmentation du taux d'occupation des voitures dans les aires urbaines de 1,25 à 1,5 (Exp) - Taxe sur le kérosène (Exp) - Eco-redevance poids-lourds (Exp) - Découplage annuel des besoins de transports de marchandises (Exp) |
| Véhicules | - Renforcement du bonus-malus pour accélérer le changement technique et la pénétration des véhicules conventionnels performants et hybrides ; bilan financier annuel neutre pour l'État (Exp) - Agro-carburants de 1 ^e et 2 ^e génération : 5 Mtep en 2020 (9 % de la consommation de carburant) - 16 Mtep en 2050 (39 %) (Exp) |
| Secteur électrique | |
| Maîtrise de la demande d'énergie | - Renforcement de l'efficacité énergétique dans les usages finaux (Exp) - Interdiction du chauffage électrique (Exp) - Mise en place d'un tarif progressif (Exp et Imp) |
| Développement des ENRs | - Tarif d'achat jusqu'à ce que les technologies atteignent la rentabilité économique sans soutien (Exp) |
| Technologies | - Pour les 40GW les plus récents, extension de 20 ans de la durée de vie des centrales nucléaires existantes (Exp) - Interdiction du développement des gaz de schiste (Exp) |
| Fiscalité | |
| Taxe carbone | - 32 €/tCO ₂ en 2012 – 56 €/tCO ₂ en 2020 – 100 €/t CO ₂ en 2030 – 300 €/t CO ₂ en 2050 ; payée par les ménages et les activités économiques sur toutes les consommations d'énergies fossiles, reversée de manière forfaitaire aux ménages (Exp) |

La mise en œuvre de la taxe carbone⁷ dans le scénario ACC a recueilli l'unanimité. Cette taxe est payée par l'ensemble des secteurs et des ménages pour chacune de leurs consommations d'énergies fossiles. En revanche, il n'a pas été possible de dégager une majorité sur l'affectation des revenus de la taxe carbone. L'option de reversement forfaitaire aux ménages ayant recueilli le plus de voix a été privilégiée dans les résultats présentés par la suite. Néanmoins, dans la dernière partie de l'article, nous reviendrons sur les deux autres options sollicitées par les parties prenantes : la baisse des charges sur le travail et les subventions aux ENR et à l'amélioration de l'efficacité énergétique. Nous interprétons cette unanimité sur l'inclusion de la taxe carbone dans les politiques acceptables comme la conséquence d'une faiblesse de l'exercice. En effet, les parties prenantes sollicitées sont peu représentatives de la population du fait d'un niveau de sensibilisation et de connaissance du dossier climatique et d'un revenu supérieurs à la moyenne impliquant un plus fort consentement à payer pour réduire les émissions de GES.

Au-delà de la taxe carbone, un certain nombre de mesures visant à réduire les subventions implicites aux énergies carbonées (exonération fiscale sur le kérosène, avantages fiscaux pour les transporteurs routiers) ont elles aussi réuni une quasi-unanimité.

⁷ Fixée selon les préconisations du rapport d'A. Quinet de 2009, extrapolée au-delà de 2030 et dont la progressivité permettant anticipation et adaptation des comportements est affichée.

Dans le secteur résidentiel, les parties prenantes ont insisté sur la distinction nécessaire entre les différentes composantes du parc et sur les approches spécifiques qu'elles devront susciter dans le cadre d'un vaste chantier de rénovation thermique. Le parc de logement social est apparu comme le plus mature pour cela du fait de sa structuration et de son approche programmatique. Néanmoins, les discussions ont clairement montré la nécessité de disposer notamment pour les copropriétés de systèmes de tiers financement et de garantie et de fonds de rénovation. La question de l'obligation de rénovation thermique lors des changements d'occupants a été abordée, mais il a manqué peu de voix pour son intégration au scénario.

Dans le secteur des transports, au-delà des mesures fiscales mentionnées dans le Tableau 3, les aspects mis en avant par les parties prenantes, concernent :

- la forte inertie dans l'aménagement du territoire et les faibles capacités d'outils incitatifs à la redensification de l'espace qui puissent être acceptables.
- la quasi-unanimité pour une vision des transports individuels motorisés fondée sur un véhicule à motorisation essence ou diesel mais qui soit très efficace et des véhicules hybrides pour des usages mixtes (rural et urbain). Le véhicule électrique resterait cantonné à des marchés de niche (autopartage, flottes captives).

La question des technologies de production d'énergie a souvent été polarisante dans les débats sur les scénarios mais aucune technologie n'a été rejetée de manière unanime, hormis le recours aux gaz de schiste. En revanche, une grande majorité des parties prenantes a insisté sur la nécessité d'avoir recours à un mix énergétique équilibré ne créant pas une forte dépendance de la trajectoire à une technologie en particulier.

Au-delà de la définition des politiques « acceptables », les parties prenantes se sont également prononcées en faveur d'autres garde-fous nécessaires pour garantir la crédibilité, la légitimité et la robustesse du processus et des résultats :

- Au-delà de l'impact agrégé sur la croissance économique, l'impact sur l'emploi, sur la facture énergétique et très spécifiquement sur le budget des ménages sont indispensables pour enrichir la discussion autour de l'acceptabilité des mesures et des trajectoires.
- La transparence des données.
- La transparence sur le contexte socio-économique mondial et national encadrant le scénario pour la France : évolution des modes de consommation, niveau de coordination international sur le changement climatique, prix des énergies fossiles, orientation du progrès technique...
- La nécessité de mener des tests de sensibilité au-delà d'un scénario central, étant données les incertitudes multiples encadrant l'élaboration d'un scénario (évolution du prix des énergies, technologies...).

Ce cahier des charges est pris en compte dans la construction du scénario et dans la présentation des résultats par la suite.

IV. Le scénario ACC issu de la concertation

Nous décrivons tout d'abord le contexte socio-économique mondial et national encadrant à la fois le scénario de référence et le scénario ACC. 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'absence d'un accord climatique à l'échelle internationale n'exclut pas 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 suit celle décrite dans le World Energy Outlook 2011 ; les cours du pétrole brut grimpent à 160€/baril en 2050. La demande soutenue et la croissance des prix pour les énergies fossiles stimulent l'innovation technologique dans le domaine des ENR et de l'efficacité énergétique.

1. Le scénario de référence

Dans le scénario de référence, aucune mesure supplémentaire en faveur du climat par rapport à celles existantes aujourd'hui n'est considérée et certains dispositifs fiscaux disparaissent durant les premières années de la période considérée (2010-50) : il en est ainsi des politiques de soutien à la rénovation thermique qui disparaissent rapidement. Ainsi, des trois objectifs du paquet climat-énergie, seul celui portant sur les énergies renouvelables est respecté.

Le scénario de référence est marqué d'un point de vue économique et d'un point de vue énergétique par une prolongation des tendances actuelles. Le secteur tertiaire représente entre 2010 et 2050 un peu plus des $\frac{3}{4}$ de l'économie française et l'industrie environ 18%. L'augmentation des prix de l'énergie à la fois pour les activités productives et pour les ménages alimente les gains en efficacité énergétique. L'intensité énergétique finale du PIB diminue régulièrement de 1% par an environ, soit là aussi une baisse tendancielle par rapport aux 20 années passées. Ainsi, malgré un PIB de 60% supérieur en 2050 par rapport à 2010, la consommation d'énergie finale n'augmente que de 7%. L'augmentation des usages spécifiques de l'électricité dans le résidentiel et le tertiaire mais aussi l'évolution à long terme des prix relatifs de l'énergie induisent un renforcement graduel de la part de l'électricité dans le mix énergétique final. En effet, à l'horizon de 10 ans, sous l'effet de cette forte croissance de la demande dans le résidentiel et le tertiaire et du besoin de renouvellement d'une partie du parc nucléaire existant, le prix de l'électricité augmente fortement, mais à long terme ce prix se stabilise à un niveau 35% supérieur au niveau de 2010, soit une moindre croissance de prix que pour les autres formes d'énergies fossiles (Figure 4).

Le besoin de renouvellement de capacité de production d'électricité donne lieu à la construction de nouvelles centrales nucléaires, mais aussi de centrales thermiques fortement émettrices de CO₂. Par conséquent, les émissions de CO₂ énergétique augmentent significativement à moyen terme, tandis qu'à plus long terme, elles se stabilisent à 294 MtCO₂, soit une baisse de 7% par rapport à 2010 ou encore de -24% par rapport à 1990.

L'ensemble des politiques introduites dans le scénario ACC déforment le scénario de référence et conduisent à des réductions d'émissions de CO₂ énergétique de 60%/2010 (-68%/1990). Dans la partie suivante, nous détaillons l'impact de ces politiques acceptables au niveau sectoriel.

2. Impacts sectoriels des politiques acceptables⁸

a) Secteur résidentiel

Réglementation thermique, rénovation thermique des logements les moins performants et substitution des sources d'énergie diminuent les niveaux de consommation d'énergie et les émissions de CO₂ liées au **chauffage**⁹. Au-delà de l'impact des réglementations thermiques ambitieuses pour le neuf, la structure du parc de logements existants est profondément modifiée. Alors que dans le scénario de référence, la répartition du parc selon les étiquettes énergie reste relativement stable (hormis la disparition graduelle de l'étiquette G dont le stock est démoli au cours de la période), les incitations économiques (éco-PTZ, crédit d'impôt) et les effets d'apprentissage, tous deux à l'origine d'une baisse des coûts de rénovation thermique, ainsi que la taxe carbone (renchérissant le prix de l'énergie et donc rentabilisant plus rapidement une rénovation thermique) permettent une disparition des logements les plus énergivores (classes D à G) au profit de la généralisation de la classe C. En revanche, les rénovations thermiques plus ambitieuses (classes A et B) restent marginales. D'autre part, les fonds de travaux obligatoires pour la réhabilitation des bâtiments en copropriété, de même que l'instauration de mécanismes de tiers-financement, ne suffisent pas à atténuer suffisamment l'aversion au risque des propriétaires de maisons individuelles et de logements en copropriétés. Le rythme de rénovation thermique est en effet bien supérieur dans le logement social, fraction du parc immobilier la plus structurée et pour laquelle la prise de décision est rendue moins complexe que dans les copropriétés.

Cette amélioration de l'efficacité énergétique du parc s'accompagne d'une substitution massive (induite par l'évolution des prix relatifs des différentes énergies finales de chauffage) du gaz et du fioul par l'électricité comme énergie de chauffage : environ 7 millions de pompes à chaleur sont installées en 2050.

En 2050, pour le chauffage, la quantité d'énergie finale par mètre carré est divisée par 3,2¹⁰, la quantité d'énergie finale totale par 2,4 par rapport à 2010. Dans le scénario de référence, les émissions de CO₂ diminuent de 30% environ par rapport à 2010, dans ACC, elles sont divisées par 4.

Pour les **usages spécifiques de l'électricité**, comportements plus sobres et amélioration renforcée de l'efficacité énergétique des équipements permettent de ramener la hausse de la consommation entre 2010 et 2050 de 43% dans le scénario de référence à 19% dans ACC.

b) Transport de passagers

Les mesures mises en œuvre ne représentent pas une contrainte radicale sur la mobilité globale¹¹. Celle-ci n'est en effet que faiblement impactée par rapport au scénario de référence : dans le

⁸ L'ensemble des hypothèses de coûts ayant conduit à ces trajectoires de référence et de réduction des émissions est donné en annexe.

⁹ Le parc résidentiel est ventilé par vecteur énergétique (électricité, gaz, fioul, bois, charbon), par étiquette énergétique de la classe A (<50 kWh/m²/an) à la classe G (> 450 kWh/m²/an) et par type de propriétaires et de logement (propriétaires occupants ou bailleurs de maisons individuelles, propriétaires occupants ou bailleurs de logements collectifs et logements sociaux).

¹⁰ Il est à noter que 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 du secteur, calculé par le modèle sur la base d'une fonction comportementale, est négatif jusqu'en 2034 et est au plus égal à 4% en 2042. Il est en effet limité par le prix élevé des énergies fossiles et les mesures fiscales supplémentaires (tarification progressive de l'électricité, instauration d'une taxe carbone sur le fioul et le gaz).

scénario de référence, la mobilité individuelle stagne à l'horizon 2030 et augmente de 9% à l'horizon 2050. Dans le scénario de référence cette augmentation est principalement attribuable aux transports routiers individuels.

Dans ACC, la mobilité individuelle diminue de 4,5% en 2030 et augmente de 3% en 2050 par rapport à 2010. Cette diminution à la marge de la mobilité par rapport à la référence résulte de la combinaison du renchérissement des carburants du fait de la taxe carbone et de la taxe sur le kérosène, de l'inertie dans le développement des alternatives à la route et du développement du télétravail.

Ces contraintes sur la mobilité sont progressivement levées par :

- (i) une baisse des consommations spécifiques des automobiles de 70% en 2050 par rapport à 2010 (elles ne baissent que de 20% dans le scénario de référence) sous l'effet conjugué d'un progrès technique induit par le bonus-malus, et de la taxe carbone ;
- (ii) la pénétration des agrocarburants qui diminuent l'impact de la taxe carbone sur le prix des carburants ;
- (iii) le développement de transports collectifs ;
- (iv) l'augmentation du nombre d'occupants dans les automobiles.

c) Transport de marchandises

Les émissions liées au **transport de marchandises** diminuent de 40% entre 2010 et 2050 dans ACC contre 15% dans le scénario de référence. Ceci est dû à la combinaison :

- (i) d'une moindre augmentation du trafic de transport de marchandises par rapport au scénario de référence (+15% dans ACC contre 40% dans le scénario de référence par rapport à 2010) du fait d'optimisations logistiques (meilleur remplissage des camions par exemple) et d'un léger découplage du contenu en transports des biens produits ;
- (ii) de l'amélioration de l'efficacité énergétique du transport routier par unité de marchandises transportées par rapport à la référence sous l'effet des signaux prix (taxe carbone et écoredevance poids-lourds) ;
- (iii) du report modal vers le rail (la part du rail atteint 20% dans le scénario ACC dès 2030, alors qu'elle stagne dans le scénario de référence) ;
- (iv) d'une pénétration des agrocarburants à hauteur de 12% dans le scénario ACC en 2050.

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

d) Le secteur électrique

Dans le secteur de l'**électricité**, la demande est déterminée par l'agrégation horaire des demandes d'électricité provenant de chacun des secteurs et des ménages. Certains de ces usages sont captifs, principalement les usages spécifiques de l'électricité dont la progression dépend de la combinaison des gains d'efficacité énergétique, des comportements de sobriété induits soit par le signal prix, soit par une sensibilisation à la maîtrise de la demande d'énergie et enfin des dynamiques d'équipement. Pour les autres segments de la demande, la substitution d'énergie vers l'électricité dépend de

¹¹ La mobilité globale est l'ensemble des distances parcourues par l'ensemble des personnes, la mobilité individuelle, l'ensemble des distances parcourues pour chaque personne.

l'évolution des prix relatifs des énergies en tenant compte des inerties propres à chacun des secteurs.

Dans le scénario ACC, la demande d'électricité (Figure 3) croît régulièrement de 49Mtep en 2010 jusqu'à atteindre un palier de 60Mtep en 2035 (+0,7%/an), puis elle stagne jusqu'en 2050. Cette tendance est très différente de l'évolution de la demande d'électricité du scénario de référence qui connaît une forte hausse de la demande jusqu'en 2020 (+2,5%/an), suivie d'une légère baisse jusqu'en 2035 du fait d'un prix de l'électricité élevé, et enfin d'une hausse de 1,5%/an pour atteindre plus de 80Mtep en 2050. Cette hausse dans le scénario de référence reste néanmoins moins marquée que celle connue depuis 1973, période pendant laquelle la demande d'électricité a triplé.

Cette moindre croissance de la demande dans ACC par rapport au scénario de référence résulte de la combinaison:

- (i) De gains supplémentaires en efficacité énergétique notamment pour les usages spécifiques de l'électricité (réglementation), pour les secteurs industriels et tertiaires ;
- (ii) D'une sobriété renforcée du fait de la taxe carbone, de la tarification progressive et d'une plus forte sensibilisation ;
- (iii) D'une baisse drastique des exportations énergétiques tandis que les importations restent inférieures à 12 TWh ;
- (iv) De l'interdiction du chauffage électrique à effet Joule¹².

Ces effets sont contrebalancés par :

- (v) Une substitution énergétique importante vers l'électricité dans l'industrie et le tertiaire du fait de l'évolution des prix relatifs ;
- (vi) Un déploiement important d'usages spécifiques de l'électricité dans le tertiaire et pour les ménages ;
- (vii) Le déploiement des pompes à chaleur dans le résidentiel.

Au niveau de l'offre, les hypothèses technologiques sont les suivantes :

- Sur le **nucléaire existant** : dans les 2 scénarios, une partie (les 23 GW les plus anciens) des centrales nucléaires est mise au rebus entre 2012 et 2024 une fois la durée de fonctionnement de 40 ans atteinte. Les 2 scénarios prévoient une **prolongation de la durée de vie de 20 ans** des centrales nucléaires existantes pour les 40GW les plus récentes pour un coût de 700 M€/GW. Entre 2012 et 2024, dans les 2 scénarios, la capacité des centrales nucléaires existantes en 2010 diminue donc d'un tiers pour atteindre 40GW.
- Les scénarios de référence et ACC ne suivent pas les mêmes hypothèses de **soutien au déploiement des ENR**. Alors que dans le scénario de référence, les tarifs d'achat (payés par les

¹² Au-delà de la moindre croissance de la demande, la pointe de demande électrique est également diminuée. Les pointes de demande correspondent aux moments dans l'année pendant lesquels la demande est maximale. Elles surviennent l'hiver principalement à cause de la forte demande en chauffage électrique. Ainsi des moyens de production d'électricité ne fonctionnent dans l'année que pour faire face à cette demande de pointe. Un enjeu est donc « d'aplatir » la courbe de charge de manière à limiter les phénomènes de pointe et les besoins en moyens de production de pointe. L'interdiction du chauffage électrique à effet Joule, ainsi que des mesures « d'effacement de la demande » (telles que la tarification Effacement jour de pointe pratiquée jusqu'à récemment) y contribuent dans le scénario ACC.

consommateurs au travers de la Contribution au Service Public de l'Électricité - CSPE) ne permettent qu'un développement limité des ENR, soit environ 150TWh, dans ACC, les tarifs d'achat et une réglementation favorable au déploiement des ENR permettent d'exploiter un potentiel bien supérieur (un peu plus de 300TWh).

Le besoin de production résiduel (hors ENR et centrales nucléaires existantes) pour répondre à la demande est fourni par du nucléaire (3^{ème} génération) et/ou des centrales thermiques selon la rentabilité de chacune de ces technologies avec ou sans politiques « acceptables » (Figure 3).

Ainsi, pour répondre à la baisse de la capacité de production des centrales nucléaires existantes d'ici 2024, dans le scénario de référence, ce sont principalement des centrales thermiques au gaz qui sont construites. Dans ACC, d'une part, le développement plus massif des ENR induit une demande résiduelle inférieure ; d'autre part la taxe carbone bouleverse l'ordre de rentabilité des technologies. Des réacteurs nucléaires de 3^{ème} génération sont construits et des centrales au gaz (plus flexibles que les centrales nucléaires) viennent en appui pour répondre à la variabilité horaire de la demande.

En fin de période (après 2035), dans le scénario de référence, de nouvelles centrales de 3^{ème} génération sont construites pour combler l'écart entre demande fortement croissante d'un côté et de l'autre la production des ENR, des centrales nucléaires dont la durée de vie est prolongée et des centrales au gaz. Dans ACC, la demande résiduelle, une fois soustraits les productions des centrales nucléaires (prolongées et 3^{ème} génération installées avant 2035) et des ENR, est très faible. Des centrales au gaz dont certaines équipées de système de capture et stockage de carbone (CSC), technologie rendue rentable par la taxe carbone, sont construites pour combler ce faible écart. Ceci explique la décarbonisation presque totale du secteur électrique en fin de période dans ACC.

Les ENR constituent 50% de la production en 2050 dans le scénario ACC, contre 20% en 2020. Dans le scénario de référence, leur part reste stable autour de 20% tout au long de la période.

Le prix de l'électricité au consommateur final correspond au coût moyen de production couvrant le déploiement des capacités nouvelles, les coûts en combustibles, la CSPE et les autres taxes. L'évolution du prix de l'électricité (Figure 4) reflète les dynamiques de l'offre décrites ci-dessus. Ainsi, les premières années sont marquées dans les 2 scénarios par une forte hausse du prix de l'électricité du fait (i) d'un besoin massif d'investissement dans la prolongation de la durée de vie des centrales nucléaires et dans de nouvelles capacités (pour remplacer le parc vieillissant de centrales nucléaires existantes), (ii) du développement des ENR et des tarifs d'achat payés au travers de la CSPE, (iii) pour l'utilisation des centrales thermiques du coût des combustibles fossiles dont le cours est croissant sur toute la période, (iv) de la taxe carbone le cas échéant.

Cette hausse perdure jusqu'en 2033 dans le scénario de référence et atteint 100%/2010 alors que dans ACC, elle s'arrête en 2020 à +41%/2010. Cette moindre hausse est en partie due à un recours limité aux combustibles fossiles dont le prix augmente fortement pendant cette période et à des diminutions des coûts d'investissements dans les ENR du fait de plus forts effets d'apprentissage. Il est important de noter que l'évolution de la demande de pointe augmente fortement dans le scénario de référence nécessitant à la fois des investissements supplémentaires dans des capacités de production qui ne seront utilisées que quelques heures dans l'année et des dépenses liées aux coûts en combustibles. Les mesures de maîtrise de la demande de l'électricité et de report horaire de la demande introduites dans ACC visant à « aplanir » la courbe de charge amoindrissent

significativement ce phénomène. Par la suite, dans les deux scénarios, les prix de l'électricité convergent vers 160€/MWh, soit une hausse de 34% par rapport à 2011.

Figure 3 : Mix énergétique dans la production d'électricité et désagrégation sectorielle de la demande d'électricité

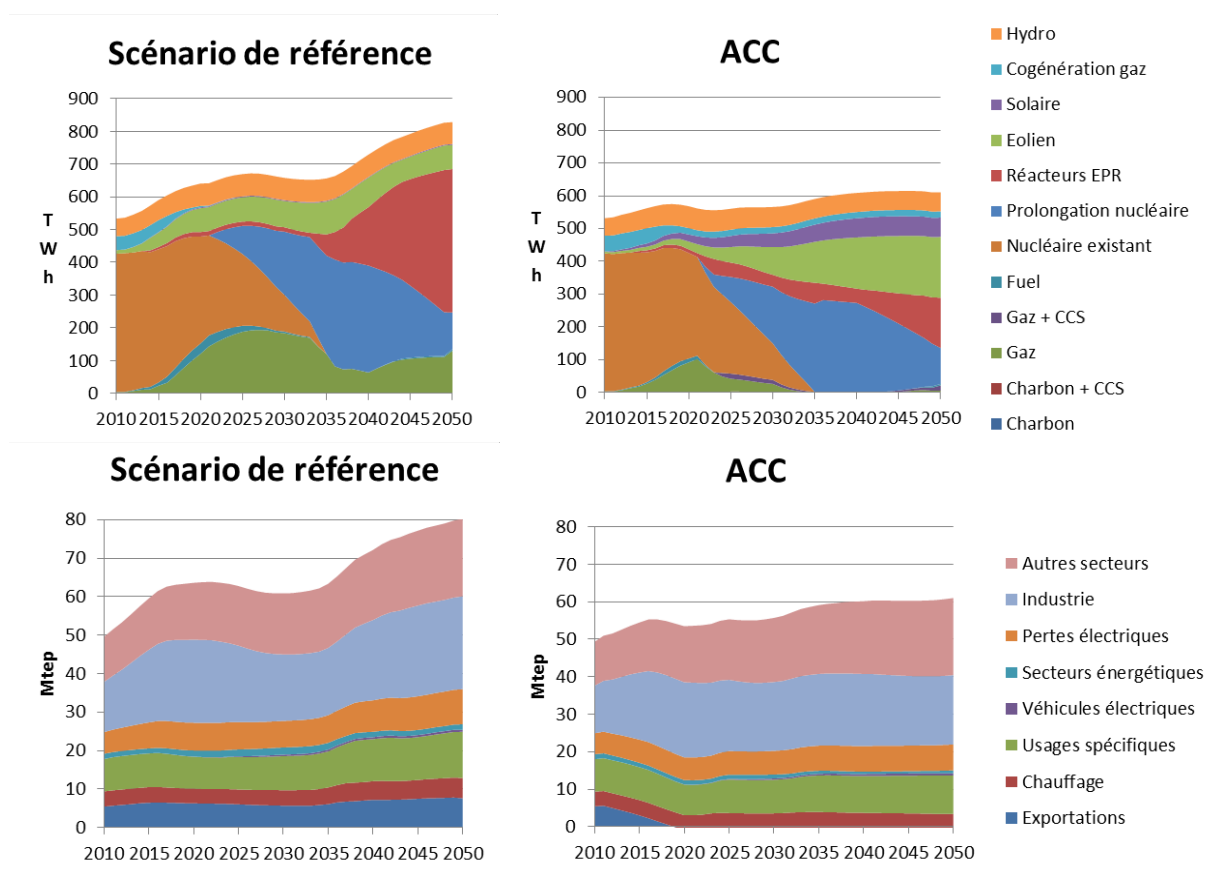
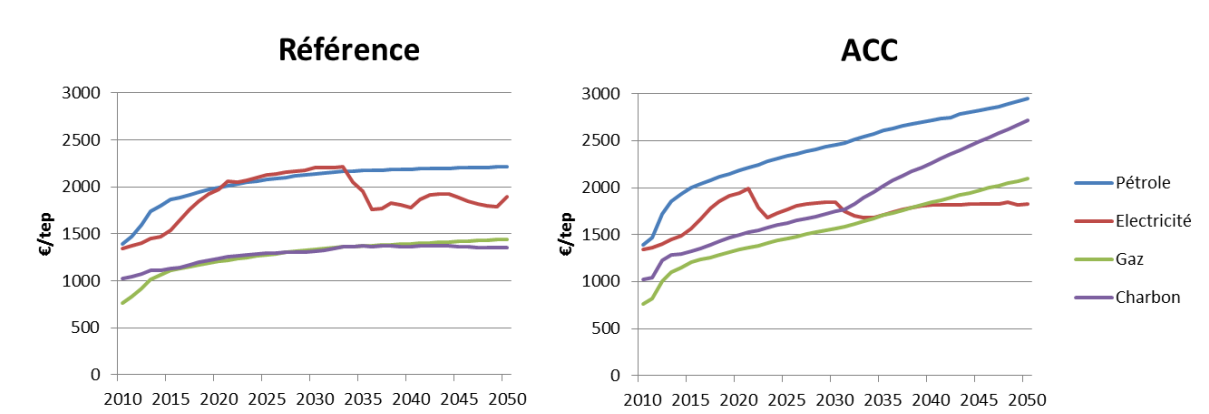


Figure 4 : Prix des énergies finales aux ménages



a) Industrie

Dans l'industrie, la décarbonisation est le résultat combiné de gains en efficacité énergétique accélérés et amplifiés par la taxe carbone, et d'une substitution massive vers l'électricité induite par les prix relatifs des énergies. Alors que dans le scénario de référence, les gains d'efficacité énergétique sont de 22% et 39% en 2030 et 2050, dans ACC, ils sont respectivement de 32% et 46%.

À la fin de la période, l'application de l'ensemble de ces mesures jugées acceptables par les parties prenantes se traduit par une diminution à 126 MtCO₂ des émissions énergétiques de CO₂, soit une

baisse de 68% par rapport à 1990. La **Erreur ! Référence non valide pour un signet.** présente la contribution de chacun des secteurs. Le différentiel d'émissions séparant la réalisation du Facteur 4 du scénario de réduction d'émissions s'élève à 28 MtCO₂. Pourtant, jusqu'en 2042, les émissions de CO₂ suivent une trajectoire permettant l'atteinte du Facteur 4 avec notamment des réductions en 2020 supérieures à 30% par rapport à 1990. Mais le rythme des réductions ralentit vers la fin de la période et les émissions stagnent à 126 MtCO₂. Des mesures supplémentaires au-delà du paquet de politiques « acceptables » considérées dans ce scénario sont donc nécessaires pour atteindre le Facteur 4 sur le segment des émissions de CO₂ énergétique.

Figure 5 : Emissions de CO₂ énergétique, consommation d'énergie finale par secteur et par type d'énergie dans le scénario de référence et dans le scénario ACC. Réductions d'émissions sectorielles dans le scénario ACC par rapport à 2010

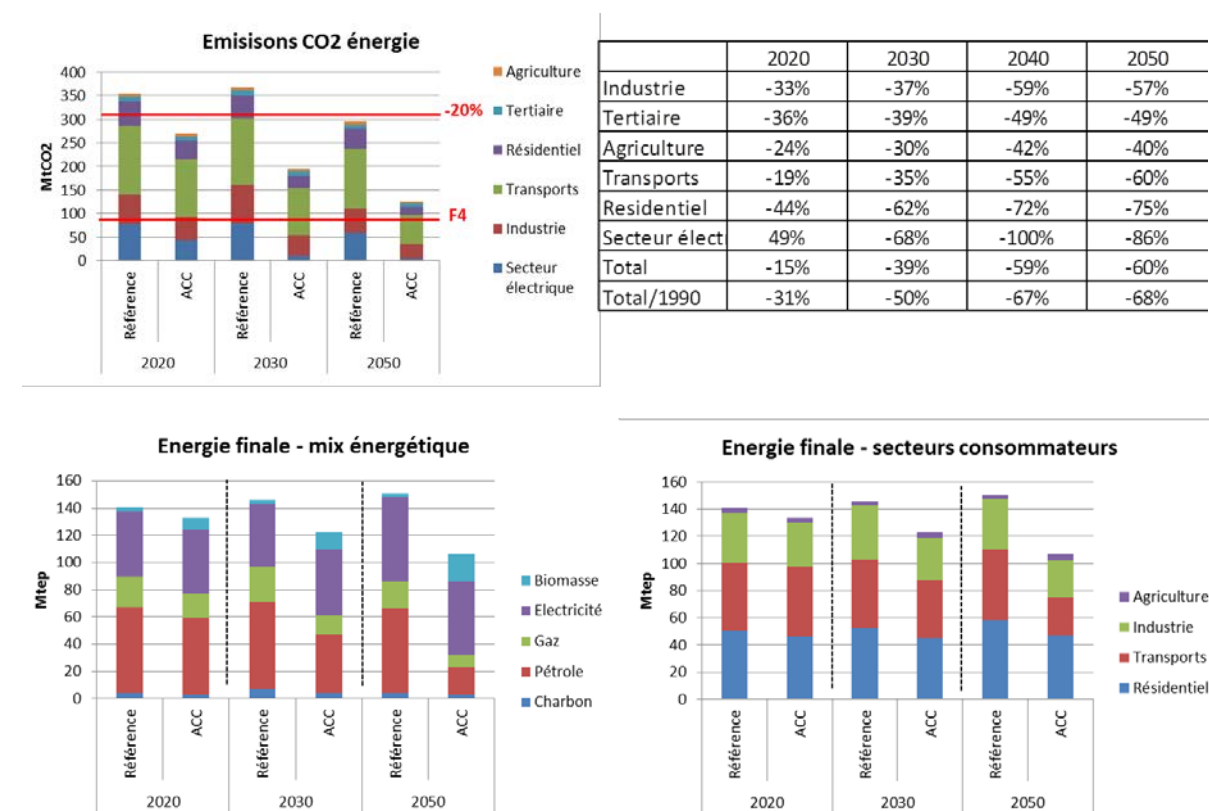
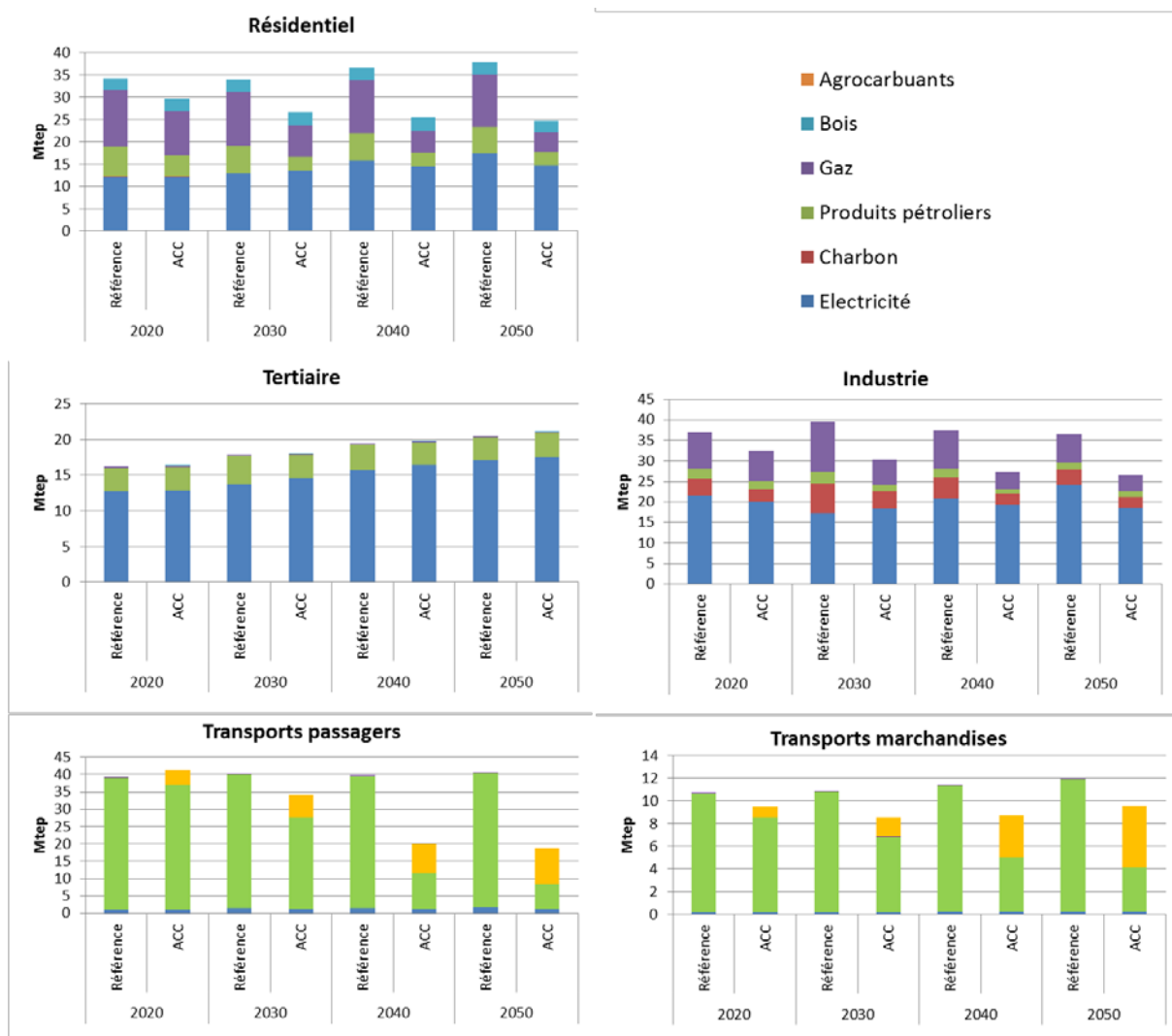


Figure 6 : Consommations d'énergie finale par secteur et par type d'énergie dans le scénario ACC



3. Impact macroéconomique des politiques acceptables

La prise en compte des effets directs et des rétroactions des politiques intégrées au scénario ACC tels que décrits dans les parties I et III, conduisent dans Imacim-R France :

(i) Pour les **ménages**, à une évolution de la part budgétaire dédiée aux services énergétiques¹³ et de la demande finale de biens et services non énergétiques. Sous l'effet de la mise en œuvre de la taxe carbone principalement et en attendant la pénétration des mesures d'efficacité énergétique et le changement structurel de l'économie, la part budgétaire dédiée aux services énergétiques des ménages (Figure 7) augmente par rapport au scénario de référence jusqu'en 2020, mais cette hausse reste limitée à 3%. Par la suite, elle diminue par rapport au scénario de référence et en valeur absolue jusqu'en 2040, puis elle se stabilise à un niveau 30% inférieur au scénario de référence. En corollaire, la demande finale de biens et services non énergétiques diminue en quantité jusqu'en 2020 par rapport au scénario de référence (baisse au maximum de 0,5%), puis augmente par rapport à ce même scénario régulièrement pour atteindre 5% de plus que dans le scénario de référence en 2050.

¹³ Elle comprend à la fois les dépenses de carburant et d'énergie consommés directement pour les usages domestiques des ménages, mais également les surcoûts liés à la rénovation thermique du résidentiel et les dépenses pour les transports collectifs.

(ii) pour **le secteur industriel**, à une baisse de la part des coûts énergétiques dans les coûts de production par rapport au scénario de référence. Ils représentent 3% des coûts en 2010. Dans le scénario de référence, cette part augmente fortement jusqu'en 2035 pour atteindre 5%, sous l'effet de la hausse des prix de l'énergie, et ce malgré des gains en efficacité énergétique significatifs. Dans le scénario ACC, elle est ramenée à 4% en 2035. Par la suite, dans les deux scénarios, les coûts énergétiques convergent vers 4% des coûts de production.

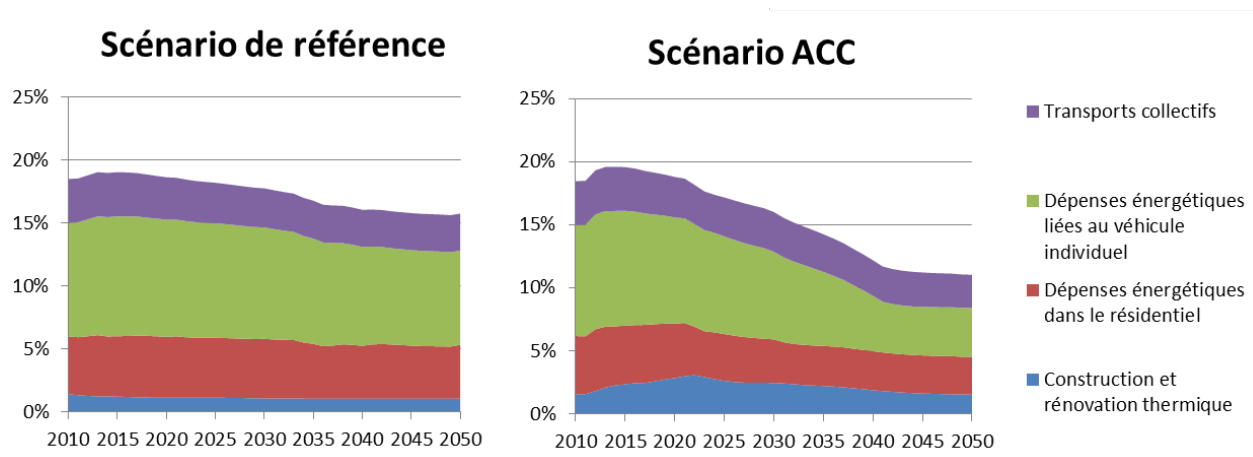
(iii) à un gain de **compétitivité**. L'impact sur la compétitivité par rapport au scénario de référence est positif puisque l'indice de compétitivité internationale défini comme le rapport du prix français au prix mondial du bien industriel s'améliore sur toute la période.

(iv) à une baisse significative de **la facture énergétique**. L'essor des énergies non fossiles combiné à l'adoption de mesures d'efficacité énergétique constitue une protection contre les effets d'une hausse des prix de l'énergie importée. Dans le scénario de référence, les importations d'énergie se chiffrent à plus de 5% du PIB entre 2019 et 2035 ; dans le scénario ACC elles atteignent leur valeur maximale en 2020 (4,7%), pour retomber ensuite à un niveau stable (1,7%) après 2040.

La prise en compte de l'ensemble de ces effets conduit à des gains modérés mais réels de croissance et d'emploi sauf à court terme (jusqu'en 2017), notamment en raison de l'instauration de la taxe carbone dès 2012 qui n'est pas anticipée par les ménages. L'effet est particulièrement avantageux entre 2025 et 2035, période de forte décroissance du coût des services et biens énergétiques. L'impact de ce surplus de croissance induit une baisse du taux de chômage de 2% entre 2010 et 2030 et de 1% entre 2010 et 2050 par rapport au scénario de référence.

Il convient de noter que l'ampleur des impacts sur la croissance dépend du paramétrage du modèle, notamment pour le taux de croissance de la productivité du travail et le comportement des ménages et des secteurs productifs ; néanmoins, les mécanismes à l'œuvre dans le cadre de la mise en œuvre de ces politiques « acceptables » avec d'autres paramétrages demeurent ceux décrits ici. Les pertes de croissance observées en début de période pourraient néanmoins être allégées en permettant une anticipation par les agents des mesures fiscales et notamment de la taxe carbone par les ménages, ce qui accélérerait pendant cette période le changement structurel de l'économie.

Figure 7 : parts budgétaires des ménages dédiées aux services énergétiques et coûts énergétiques et compétitivité dans l'industrie



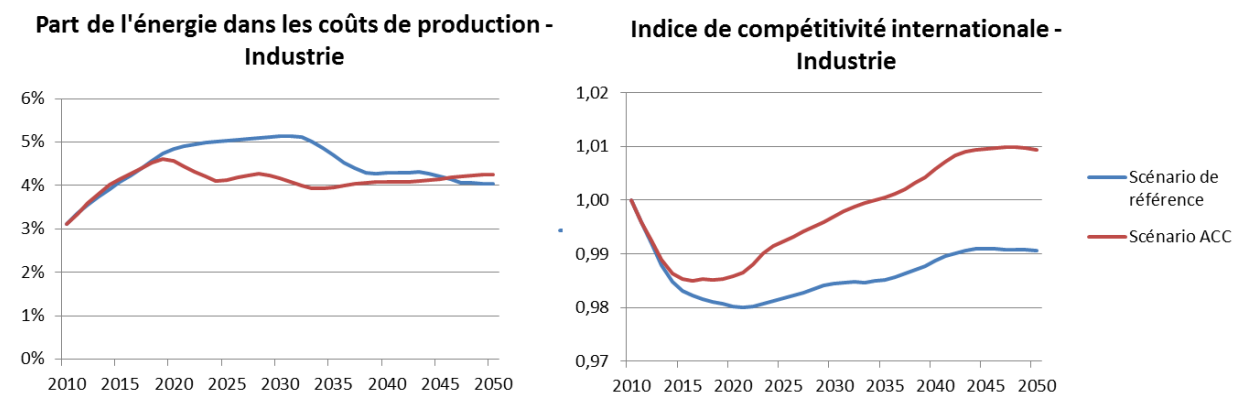


Figure 8 : Indicateurs macroéconomiques

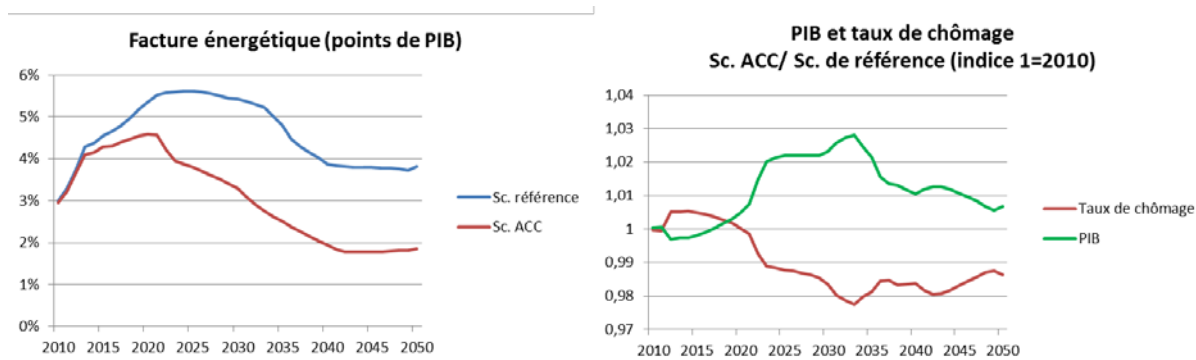


Tableau 4 : Croissance économique dans le scénario de référence et dans le scénario ACC

| | | 2010 | 2020 | 2030 | 2050 |
|---------------------------------|---------------|---------|---------|---------|---------|
| Revenu par habitant | Sc. Référence | 1 | 1,06 | 1,17 | 1,40 |
| | Sc. ACC | 1 | 1,07 | 1,19 | 1,41 |
| | | 2010-20 | 2020-30 | 2030-50 | moyenne |
| Taux de croissance annuel moyen | Sc. Référence | 1,19 | 1,29 | 1,2 | 1,22 |
| | Sc. ACC | 1,24 | 1,47 | 1,11 | 1,24 |

4. Le financement de la transition énergétique

Le Tableau 5 reprend l'ensemble des mesures fiscales et incitatives du scénario ACC de manière à établir un bilan comptable du financement de la transition énergétique. Il met également en avant, le manque à gagner de l'Etat sur les recettes de la TIPP qui baissent mécaniquement avec la diminution des consommations de produits pétroliers¹⁴. Le niveau de revenu de la taxe carbone est également mentionné, mais n'entre pas dans le total car son produit est affecté (dans ce cas précis sous forme d'un transfert forfaitaire vers les ménages). En revanche, ce tableau agrégé ne distingue pas les recettes ou dépenses supplémentaires qui incombent au budget de l'Etat d'un côté ou aux collectivités territoriales de l'autre. Le bilan brut (sans tenir compte de la baisse de la TIPP) est négatif dans un premier temps avec un besoin de financement annuel de l'ordre de 2 à 4 Mds €, puis positif après 2030. Le bilan net (en tenant compte de la baisse de la TIPP) est par contre négatif tout au long de la période, la baisse des revenus de la TIPP constituant une part croissante de ce bilan négatif, ce qui ne sera pas sans poser de problème de financement aux collectivités territoriales.

¹⁴ Le tableau ne fait pas état par contre de l'impact sur le budget de l'Etat et des organismes sociaux de l'évolution de l'emploi et donc des charges pesant sur l'emploi et du financement de la protection sociale.

Relevons que l'ampleur des revenus de la taxe carbone peut offrir des marges de manœuvre en diversifiant son affectation pour financer une part de ces financements additionnels requis par la transition énergétique.

Tableau 5 : Impact financier annuel des mesures du scénario ACC (milliards d'euros) par rapport au scénario de référence

| | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|---------------------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|
| Ecoredevance poids lourds | 0,0 | 1,3 | 1,1 | 1,1 | 1,2 |
| Taxe kérosène | 0,0 | 1,6 | 1,1 | 1,4 | 1,3 |
| Transports urbains | 0,0 | 3,0 | 3,0 | 0,0 | 0,0 |
| Transports ferroviaires | 0,0 | 3,0 | 3,0 | 0,0 | 0,0 |
| Transports routiers | 0,0 | -6,0 | -6,0 | 0,0 | 0,0 |
| Crédit d'impôt | 0,0 | -3,3 | -2,5 | -0,8 | -0,5 |
| Eco-prêt | 0,0 | -3,3 | -1,9 | -0,6 | -0,4 |
| Total | 0,0 | -3,7 | -2,2 | 1,1 | 1,6 |
| Manque à gagner TIPP | 0,0 | -2,4 | -5,9 | -10,4 | -10,9 |
| Taxe carbone | 0,0 | 13,7 | 18,1 | 23,9 | 34,8 |

NB - le tableau se lit comme suit : en 2020, les revenus pour l'Etat de l'écoredevance poids lourds et de la taxe sur le kérosène s'élèvent respectivement à 1,3 et 1,6 Mrds €. Les besoins d'investissements dans les transports urbains et ferroviaires représentent chacun 3 Mrds € qui sont prélevés sur le montant des investissements dédiés dans le scénario de référence aux transports routiers. Le crédit d'impôt et l'éco-prêt pour favoriser la rénovation thermique du parc de bâtiments coûtent à l'Etat chacun 3,3 Mrds €. Au total, l'ensemble de ces mesures et de ces investissements représentent donc un coût agrégé de 3,7 Mrds €, et la baisse des revenus de la TIPP découlant de la baisse des consommations de produits pétroliers 2,4Mrds €. D'autre part, les revenus de la taxe carbone se montent à 13,7 Mrds €, mais ils sont reversés aux ménages de manière forfaitaire.

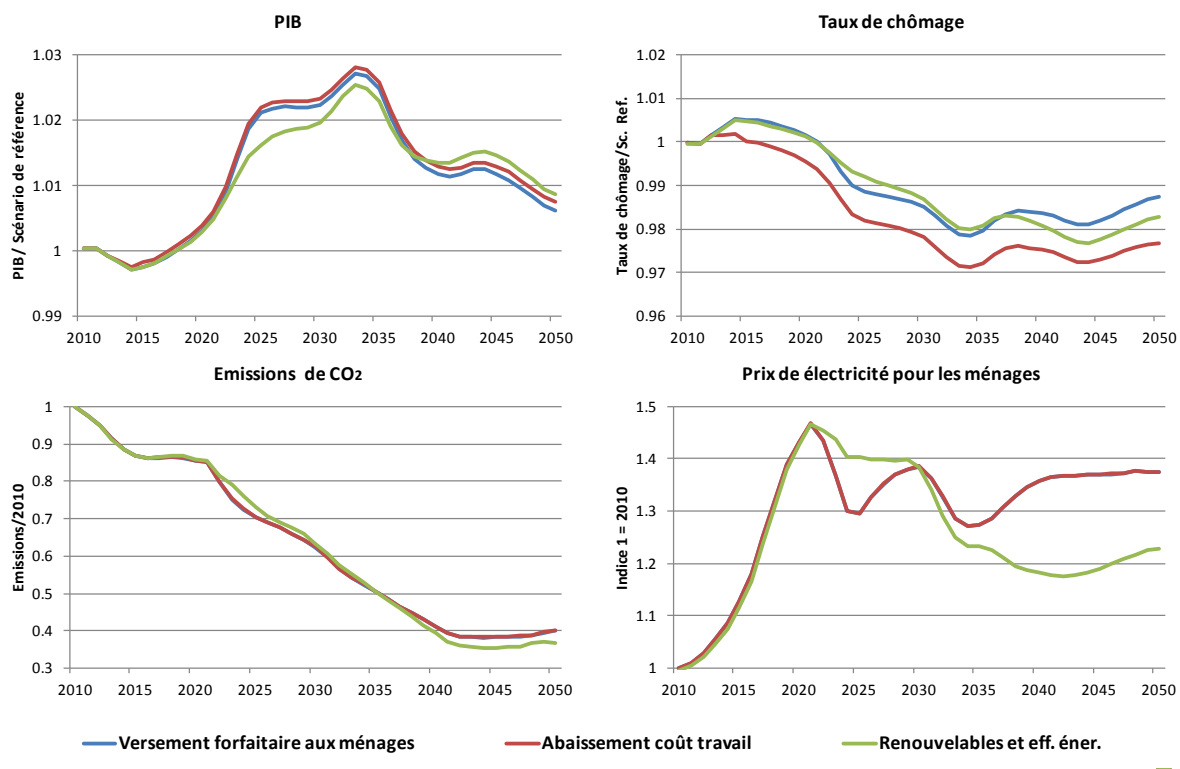
V. Tests de sensibilité

Cette dernière partie évalue la robustesse des résultats du scénario ACC. Comme évoqué par les parties prenantes, un des buts de ces analyses de sensibilité est de distinguer lors d'une concertation, les jeux d'hypothèses qui méritent d'être débattus en raison de leur impact significatif et ceux dont l'influence est marginale sur les résultats et pour lesquels les désaccords ne doivent pas constituer des points de blocage.

1. Affectation des revenus de la taxe carbone

La taxe carbone constitue une des mesures les plus emblématiques des politiques « acceptables ». Son impact marginal dans le scénario ACC représente à lui seul entre 30 et 50% des réductions entre 2020 et 2030 et 20% en 2050. Dans le scénario décrit précédemment, les revenus de la taxe carbone sont reversés aux ménages de manière forfaitaire. Deux autres options ont cependant été mentionnées par les parties prenantes sans qu'aucune ne se démarque de manière significative plus que les 2 autres : i) le recyclage sous la forme de subventions au développement des ENR et à l'amélioration de l'efficacité énergétique, et ii) l'affectation du produit de la taxe à l'abaissement des charges pesant sur le coût du travail.

Figure 9 : Impact du mode de recyclage de la taxe carbone



Les graphiques de la Figure 9 présentent l'impact économique des trois variantes. A long terme, le recyclage vers le soutien au développement des ENR et à l'amélioration de l'efficacité énergétique (le prix inférieur de l'électricité diminuant la part budgétaire dédiée aux services énergétiques) a l'effet le plus positif sur la croissance du PIB, tout en conduisant simultanément aux réductions d'émissions les plus importantes. 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.

2. Prix des énergies fossiles

Le scénario ACC s'appuie sur les projections de prix des énergies fossiles du *World Energy Outlook* (AIE, 2011). Deux autres jeux d'hypothèses sont considérés : des prix 30% inférieurs et 30% supérieurs aux prix du WEO¹⁵. Sans surprise, plus les prix de l'énergie sont élevés, plus les réductions d'émissions le sont, et inversement. 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 le 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, le jeu des prix relatifs des différentes énergies favorisant une substitution du pétrole, du charbon et de l'électricité vers le gaz. À plus long terme, les émissions totales de CO₂ n'enregistrent qu'un recul de 60% par rapport à 1990. 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 rénovation thermique ne suffisent pas à induire une transition significative vers les classes énergétiques supérieures. Par contre, la décarbonisation du secteur électrique est complète puisque le prix de l'électricité restant

¹⁵ Nous n'avons pas considéré l'hypothèse d'une baisse du prix du gaz pouvant refléter le recours aux gaz de schiste car cette option technologique a été rejetée par la quasi-totalité des parties prenantes.

supérieur à celui du gaz tout au long de la période, la demande d'électricité est plus faible et entraîne un allègement des contraintes sur le déploiement d'une offre décarbonée.

Dans le scénario haut, la décarbonisation du secteur électrique est également plus élevée que dans le cas médian, mais pour des raisons différentes : les technologies équipées de CSC deviennent compétitives et atténuent les émissions issues de la production d'électricité fossile.

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

Tableau 6 : Réductions d'émissions de CO2 par rapport à 1990 selon le jeu d'hypothèses du prix de l'énergie

| | 2020 | 2050 |
|-------------|------|------|
| Bas (-30%) | -25% | -60% |
| Médian | -31% | -68% |
| Haut (+30%) | -31% | -74% |

NB : le tableau se lit comme suit : si les prix de l'énergie restent bas (soit ici 30% inférieurs aux projections du WEO 2011), l'ensemble des politiques introduites dans le scénario ACC permettraient de réduire les émissions de CO2 de 25% en 2020 et 60% en 2050 par rapport à 1990.

3. Hypothèses technologiques

Les hypothèses sur le progrès technologique sont déterminantes dans l'évaluation des trajectoires de réduction des émissions. Nous testons ici les paramètres suivants¹⁶ (Tableau 7) : 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 ENR et la disponibilité des agrocarburants. Dans l'alternative pessimiste pour les agrocarburants, les recherches ne permettent pas de développer des agrocarburants de seconde génération, alors 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. Dans l'alternative pessimiste, le coût des ENR ainsi que les tarifs d'achat, décroissent deux fois moins vite que dans le scénario décrit. Les tests de sensibilité se portent sur chacune de ces alternatives prises de manière isolée et sur le cumul simultané de ces 5 alternatives technologiques (pessimisme technologique).

À moyen comme à long terme, l'impossibilité d'avoir recours aux agrocarburants constitue le paramètre ayant l'impact le plus fort sur les réductions d'émissions. Les autres paramètres (qui concernent tous le secteur électrique) pris l'un indépendamment des autres ont peu d'impact sur les réductions d'émissions. L'impact de l'alternative sans CSC est très limité du fait du faible recours à cette technologie qui n'intervient qu'après 2040 dans le scénario ACC. Les autres alternatives conduisent à un renchérissement du prix de l'électricité et pour les alternatives portant sur les ENR et la prolongation de la durée de vie des centrales nucléaires existantes à une modification du mix énergétique dans le secteur électrique (Tableau 8). L'impact global sur les niveaux d'émissions est la combinaison :

¹⁶ Les valeurs prises pour ces tests de sensibilité sont données en annexe.

- D'un effet à la hausse via un report des consommations d'électricité vers d'autres formes d'énergies
- D'un effet à la baisse via l'effet négatif sur la croissance (induit par un surcoût de l'énergie sur le budget des ménages et sur les coûts de production) entraînant une moindre demande d'énergie.

Ceci se traduit par un impact limité sur les niveaux d'émissions par rapport à ACC. Ce résultat souligne que le scénario ACC ne repose pas sur le pari du déploiement d'une technologie en particulier.

En revanche, lorsque ces paramètres sont combinés tous ensemble, les réductions d'émissions sont bien moindre puisqu'elles n'atteignent en 2050 que -53% par rapport à 1990, loin du Facteur 4. Par contre, comme toutes les alternatives technologiques, hormis 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 ACC qu'après 2020, les réductions d'émissions en 2020 dans le scénario « pessimisme technologique » sont proches du scénario ACC. L'écart sur les émissions est alors déterminé par la seule alternative sur les agrocarburants. A plus long terme, dans le scénario « pessimisme technologique », les mesures jugées comme acceptables par les parties prenantes ne permettraient alors pas d'atteindre le Facteur 4, même si les réductions d'émissions en 2020 restent significatives.

Tableau 7 : Robustesse du scénario ACC face aux incertitudes technologiques - Émissions, prix de l'électricité et impacts macroéconomiques (par rapport à 1990)

| | Réductions d'émissions CO2 (/1990) | | Prix électricité (€/MWh) | | PIB (/ACC) | | Taux de chômage (/ACC) | | Dépenses énergie ménages (/ACC) | |
|----------------------|------------------------------------|------|--------------------------|------|------------|-------|------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| | 2020 | 2050 | 2030 | 2050 | 2020 | 2050 | 2020 | 2050 | 2020 | 2050 |
| ACC | -31% | -68% | 1081 | 1100 | - | - | - | - | - | - |
| Sans agrocarb. | -28% | -61% | 1109 | 1087 | -0,2% | -1,2% | 0,3% | 1,2% | 0,3% | 0,4% |
| Sans CSC | -32% | -67% | 1110 | 1077 | 0,0% | 0,2% | 0,0% | -0,1% | 0,0% | -0,3% |
| EPR cher | -33% | -65% | 1151 | 1217 | 0,1% | -1,1% | -0,1% | 0,8% | -0,4% | 2,7% |
| Pro. nucléaire exist | -31% | -67% | 1090 | 1153 | 0,0% | -0,2% | 0,0% | 0,2% | 0,0% | 0,6% |
| ENR cher | -31% | -66% | 1085 | 1163 | 0,0% | -0,2% | 0,0% | 0,3% | 0,0% | 0,9% |
| Tous ensembles | -28% | -53% | 1169 | 1332 | -0,2% | -2,3% | 0,2% | 2,4% | 0,4% | 4,3% |

Tableau 8 : - Impacts des incertitudes technologiques sur les investissements cumulés (2010-2050) dans le secteur électrique (GW)

| | Gaz sans CSC | Gaz avec CSC | EPR | Charbon | Turbine fuel | Total |
|----------------------|--------------|--------------|------|---------|--------------|-------|
| ACC | 14,4 | 7,2 | 22,8 | 2,2 | 7,2 | 53,8 |
| Sans agrocarb. | 16,8 | 6,4 | 24,5 | 0,7 | 7,2 | 55,6 |
| Sans CSC | 16,8 | 0 | 27,7 | 0 | 7,2 | 51,7 |
| EPR cher | 19,2 | 12,8 | 8,2 | 4,4 | 7,2 | 51,8 |
| Pro. nucléaire exist | 14,4 | 7,2 | 21,2 | 2,2 | 7,2 | 52,2 |
| ENR cher | 14,4 | 7,2 | 21,2 | 2,2 | 7,2 | 52,2 |
| Tous ensembles | 24,8 | 0 | 11,4 | 0 | 9,6 | 45,8 |

Conclusion

Le point de départ du projet européen *Engaging Civil Society in Low Carbon Scenarios* (ENCILowCarb) était le constat d'un double déficit : déficit de crédibilité, de légitimité et d'appropriation des scénarios de réduction des émissions de GES au-delà d'un cercle restreint de modélisateurs ou de porteurs d'intérêt, et déficit d'acceptabilité des politiques climatiques. Pour dépasser ces barrières à des politiques plus vertueuses, nous avons élaboré et mis en pratique, au moyen d'une concertation associant experts sectoriels et parties prenantes, un processus de co-construction d'un scénario de réduction des émissions de CO₂ intégrant des mesures considérées comme acceptables par les parties prenantes. Les parties prenantes ont également largement contribué à la méthodologie d'élaboration du scénario en fixant un cahier des charges qui inclut la nécessaire transparence des données, des tests de sensibilité et la nécessité d'en expliciter les conséquences économiques et financières.

Le scénario central auquel la concertation aboutit ne permet pas d'atteindre le Facteur 4, mais il s'en rapproche avec 68% de réduction des émissions de CO₂ en 2050 par rapport à 1990. Les mesures de réduction des émissions sont bénéfiques pour l'emploi et la croissance économique, sauf à court terme principalement du fait de l'imposition de la taxe carbone dès 2012, qui n'est pas anticipée. Une meilleure anticipation de celle-ci et un affichage gouvernemental clair permettraient de diminuer significativement cet impact de court terme. Ces mesures permettent ainsi de réduire la vulnérabilité des ménages et de l'économie à la hausse des prix de l'énergie. Elles permettent également de réduire rapidement et durablement le budget des ménages dédié aux services énergétiques, ce résultat constituant un socle solide sur lequel construire l'acceptabilité des trajectoires Facteur 4. Néanmoins, ces résultats agrégés ne permettent pas d'évaluer l'impact des politiques sur le budget des ménages selon les classes de revenus et n'abordent donc pas les questions d'équité et notamment de précarité énergétique. Enfin, le bilan financier agrégé des mesures montre un besoin de financement additionnel, ainsi que d'une compensation de la baisse des revenus de la TIPP.

Par ailleurs, une des particularités de ce scénario réside dans le caractère équilibré du mix énergétique et l'absence de recours à une quelconque utopie technologique. Aucune technologie ne détermine en effet à elle seule la trajectoire. Les tests de sensibilité menés permettent ainsi d'étudier les nombreuses incertitudes qui encadrent le déploiement du Facteur 4 et de distinguer d'un côté celles qui comptent et méritent débat de celles qui n'ont qu'un impact marginal sur les trajectoires.

Au-delà, plusieurs questions restent ouvertes concernant la méthodologie utilisée. L'acceptabilité représentée ici reste éloignée de l'acceptabilité sociale. Le nombre restreint de personnes consultées est bien inférieur au nombre de personnes usuellement regroupées en panels par les instituts de sondage. D'autre part, les parties prenantes consultées sont issues de catégories socioprofessionnelles ayant un niveau de revenu et d'éducation sans doute au-dessus de la médiane nationale, et sont particulièrement informées sur le changement climatique. Leur consentement à payer pour freiner celui-ci (via une taxe carbone par exemple) est sans aucun doute supérieur à la moyenne. Néanmoins, cet exercice de co-construction de scénario fondé sur la concertation, qui nourrit les paramètres d'un modèle technico-économique, fournit une preuve méthodologique par l'exemple qu'un tel processus peut être mis en place. La même méthodologie pourrait ainsi être reprise en consultant un panel représentatif, à la manière des conférences de citoyens, de façon à

évaluer réellement l'acceptabilité économique et sociale de trajectoires Facteur 4. Cette démarche nécessiterait un temps de formation à la fois à la problématique énergie-climat et à des bases de modélisation, mais elle permettrait de nourrir le débat énergie engagé par le président de la République.

Remerciements

Le projet ENCIlowcarb a été financé par le 7^{ème} PCRD de la Commission Européenne. Les auteurs remercient Thomas Bolognesi, Christophe Cassen, Elsa Mosseri, Philippe Quirion et les deux reviewers anonymes pour leur relecture et leurs commentaires qui ont contribué à enrichir le texte.

Références

Berk, M. M., JG van Minnen, B. Metz, W. Moomaw, MGJ den Elzen, DP van Vuuren, and J. Gupta. *Climate OptiOns for the Long Term (COOL)-Global Dialogue Synthesis Report*, 2002.

Bibas, Ruben, Sandrine Mathy, and Meike Fink. *Élaboration D'un Scénario Bas Carbone Pour La France : Une Approche Participative Pour Intégrer L'acceptabilité Sociale et Économique*. CIREN RAC-F, 2012.

De Perthuis, Christian, Johanne Buba, Aurélien Million, Pascale Scapecchi, and Olivier Teissier. *Trajectoires 2020 - 2050 Vers Une Économie Sobre En Carbone : Rapport Du Comité Présidé Par Christian de Perthuis*. Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement, 2011.

European Climate Foundation. *Roadmap 2050: A Practical Guide to a Prosperous, Low-Carbon Europe*, 2010. http://www.roadmap2050.eu/attachments/files/Volume1_fullreport_PressPack.pdf.

European Commission. *Impact Assessment Accompanying Document to "A Roadmap for Moving to a Competitive Low Carbon Economy in 2050."* Technical report, Communication of the European Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions., 2011. http://ec.europa.eu/clima/documentation/roadmap/docs/sec_2011_288_en.pdf.

Hulse, David W., Allan Branscomb, and Susan G. Payne. "Envisioning Alternatives: Using Citizen Guidance to Map Future Land and Water Use." *Ecological Applications* 14, no. 2 (2004): 325–341.

Kasemir, B., U. Dahinden, Å G. Swartling, R. Schüle, D. Tabara, and C. C. Jaeger. "Citizens' Perspectives on Climate Change and Energy Use." *Global Environmental Change* 10, no. 3 (2000): 169–184.

Larsen, Katarina, and Ulrika Gunnarsson-Östling. "Climate Change Scenarios and Citizen-participation: Mitigation and Adaptation Perspectives in Constructing Sustainable Futures." *Habitat International* 33, no. 3 (2009): 260–266.

Mathy, Sandrine, Meike Fink, and Ruben Bibas. "Quel Rôle Pour Les Scénarios Facteur 4 Dans La Construction de La Décision Publique?" *Développement Durable et Territoires* 2, no. 1 (2011).

Pahl-Wostl, C. "Participative and Stakeholder-based Policy Design, Evaluation and Modeling Processes." *Integrated Assessment* 3, no. 1 (2002): 3–14.

Patel, Mita, Kasper Kok, and Dale S. Rothman. "Participatory Scenario Construction in Land Use Analysis: An Insight into the Experiences Created by Stakeholder Involvement in the Northern Mediterranean." *Land Use Policy* 24, no. 3 (2007): 546–561.

Quinet, Alain. *La Valeur Tutélaire Du Carbone*. Centre d'Analyse Stratégique, 2009. <http://www.strategie.gouv.fr/content/rapport-de-la-mission-la-valeur-tutelaire-du-carbone>.

Van Asselt Marjolein, B. A., and Nicole Rijkens-Klomp. "A Look in the Mirror: Reflection on Participation in Integrated Assessment from a Methodological Perspective." *Global Environmental Change* 12, no. 3 (2002): 167–184.

Wilcox, D., 2003. *The Guide to Effective Participation*. Partnership Books, Brighton.

VI. Annexes

1. Description des mesures considérées comme acceptables par les parties prenantes

a) Mesures acceptables dans le 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 actuellement éligibles aux crédits d'impôt sur le revenu, à raison d'un taux de 15 et 50% du montant des investissements. Une augmentation du taux moyen et un élargissement des critères d'éligibilité par rapport au dispositif de subvention actuel 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-PT Z). 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. Mécanismes de diminution de l'aversion au risque : création de fonds de rénovation obligatoire dans les copropriétés et d'un mécanisme de tiers-financement à long terme.

4. Tarification progressive. Elle vise à réduire les consommations d'électricité en augmentant le tarif de l'électricité au-delà d'un certain seuil de consommation : au-delà de 60 kWh/m², le prix du kilowattheure supplémentaire est de 5% supérieur à partir de 2014, puis de 10% après 2030.

5. Réglementation thermique des bâtiments neufs. Dès 2012, les nouvelles constructions doivent se soumettre au label BBC (Bâtiment Basse Consommation) avec un niveau maximal de consommation d'énergie primaire de 50 kWh/m²/an. Après 2020, c'est le label BEPOS (Bâtiment à Energie Positive) qui s'applique.

6. Taxe carbone. La taxe carbone entre en vigueur dès 2012 à une valeur de 32€/tCO₂. Elle suit une augmentation progressive : 56€/tCO₂ en 2020, 100€/tCO₂ en 2030, 200€/tCO₂ en 2040, puis 300€/tCO₂ en 2050. Les revenus de la taxe carbone sont reversés aux ménages de manière forfaitaire.

b) Mesures acceptables dans le secteur des transports

1. Transport urbain et local

Urbanisme. En raison du phénomène d'inertie, les mesures visant à limiter l'étalement urbain (mesures fiscales, réglementation) n'auront un impact significatif qu'à compter de 2030, date à partir de laquelle, la densité urbaine repartira modérément à la hausse.

Programme d'investissements dans les transports urbains. Le montant de ces programmes est doublé à partir de 2012 par rapport aux dernières années pour une durée de 15 ans. La modernisation du réseau ferroviaire est également intégrée dans ces investissements pour intensifier le trafic à l'échelle régionale et développer l'intermodalité. L'inertie est prise en compte dans le délai de construction des réseaux.

Télétravail. Il représente dès 2020 en moyenne sur l'ensemble de la population active un jour de travail sur dix.

Taux d'occupation des automobiles. Les incitations à la mise en œuvre de plans de déplacements entreprise et au covoiturage augmentent le taux d'occupation des voitures en milieu urbain de 1,25 à 1,5 dès 2020.

2. Trajets de longues distances

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

Taxe sur le kérosène. À partir de 2012, la consommation de kérosène¹⁷ pour le transport aérien est soumise à une taxe dont le montant est fixé à 400€/tep, taux proche du taux de TIPP appliqué sur le carburant pour les véhicules particuliers ou encore équivalent à 130€/tCO2 environ.

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 tous les 5 ans vise à stimuler la pénétration des véhicules propres (classes A+, A et B) tout en garantissant chaque année l'équilibre financier du dispositif.

Evolution de la motorisation. Les véhicules électriques se cantonnent à des marchés de niche participant à la mobilité urbaine sous la forme de système d'autopartage, avec un taux de pénétration limité à 5% du parc total de véhicules en 2050. Les véhicules hybrides entament une percée massive après 2030.

Agrocarburant. 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).

3. Transport de marchandises

Écoredevance poids lourds. Cette taxe sur la consommation de carburant liquide des poids lourds entre en vigueur dès 2012. Ses recettes devraient rapporter 1,3 milliard d'€ la première 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.

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. Le degré d'inertie étant jugé relativement élevé dans le secteur, nous nous en tenons à l'hypothèse exogène en vertu de laquelle la part du mode de transport de marchandises par voie ferrée n'atteint que 20% en 2030.

¹⁷ Elle était jusqu'à présent exonérée de taxe.

Taxe carbone. La taxe carbone entre en vigueur dès 2012 à une valeur de 32€/tCO₂. Elle suit une augmentation progressive : 56€/tCO₂ en 2020, 100€/tCO₂ en 2030, 200€/tCO₂ en 2040, puis 300€/tCO₂ en 2050. Les revenus de la taxe carbone sont reversés aux ménages de manière forfaitaire.

c) Mesures acceptables dans le secteur des transports

Tarification progressive. Elle vise à réduire les consommations d'électricité en augmentant le tarif de l'électricité au delà d'un certain seuil de consommation : au-delà de 60 kWh/m², le prix du kilowattheure supplémentaire est de 5% supérieur à partir de 2014, puis de 10% après 2030.

Tarifs d'achat garantis pour les énergies renouvelables. L'incitation financière qu'ils procurent a pour vocation de faciliter la pénétration des énergies renouvelables afin d'accélérer l'effet d'apprentissage. Ils décroissent parallèlement au coût d'investissement de chacune des technologies d'électricité renouvelable et sont supprimés dès que les technologies offrent une compétitivité-prix similaire à celle des technologies conventionnelles.

Contribution au service public de l'électricité (CSPE). Le niveau de la CSPE payé par les consommateurs sur le tarif de l'électricité pour financer les tarifs d'achat est fixé annuellement et son évolution suit celle des versements effectués aux producteurs d'électricité renouvelable au titre des tarifs d'achat garantis.

Taxe carbone. La taxe carbone entre en vigueur dès 2012 à une valeur de 32€/tCO₂. Elle suit une augmentation progressive : 56€/tCO₂ en 2020, 100€/tCO₂ en 2030, 200€/tCO₂ en 2040, puis 300€/tCO₂ en 2050. Les revenus de la taxe carbone sont reversés aux ménages de manière forfaitaire.

Gestion de la demande. Les pics de consommation fragilisant la sûreté d'approvisionnement sont atténués par le biais de contrats interruptibles autorisant le fournisseur à suspendre unilatéralement l'approvisionnement pendant une courte durée, par des mesures d'incitations à des reports de consommation et par le renforcement de l'efficacité énergétique des équipements. Notons par ailleurs que la baisse de la consommation liée au chauffage électrique par effet Joule a pour effet d'alléger la charge de pointe.

Interdiction du chauffage électrique par effet Joule dans les constructions neuves.

Prolongation de la durée de vie des centrales nucléaires. 23 GW des centrales nucléaires les plus anciennes 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 nucléaire installée sont exploités jusqu'à l'âge de 60 ans pour un coût d'investissement additionnel de 0,7 mrd€/GW. 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.

Importations/exportations. Les exportations d'électricité tendent rapidement vers 0. Les importations servent uniquement à satisfaire les pics de consommation dus à la demande de chaleur l'hiver

2. Chiffres clés

Les hypothèses ci-dessous sont exogènes.

| | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Population (Millions) | 62,881 | 65,962 | 68,532 | 70,734 | 72,275 |
| Taille ménage | 2,6 | 2,4 | 2,3 | 2,2 | 2 |
| Prix du pétrole (\$2004/tep) | 492,07 | 922,44 | 1050,5 | 1119,5 | 1171,6 |
| Prix de gaz (\$2004/tep) | 357,64 | 670,44 | 763,54 | 813,69 | 851,53 |
| Prix du charbon (\$2004/tep) | 173,69 | 261,19 | 303,54 | 377,29 | 377,29 |
| Prix du CO2 (€04/tCO2) | 32 | 56 | 100 | 200 | 300 |

a) Secteur électrique

| | | Charbon | Charbon + CSC | Cycle Combiné Gaz | Cycle Combiné Gaz + CSC | Fuel | Turbine à Combustible Fuel | Turbine à Combustible Gaz | Prolongation durée de vie centrales | EPR | Eolien on shore | Eolien offshore | Centrales solaires | Solaire décentralisé |
|--------------------------------|-----------|---------|---------------|-------------------|-------------------------|------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------|------|-----------------|-----------------|--------------------|----------------------|
| Coût d'investissement (€/kW) | 2010 | 1200 | 1975 | 610 | 1160 | 1200 | 335 | 330 | 700 | 2900 | 1200 | 2400 | 3000 | 4500 |
| | 2020 | 1200 | 1880 | 610 | 1070 | 1200 | 335 | 330 | 700 | 2900 | 1085 | 1961 | 1796 | 2694 |
| | 2030 | 1200 | 1790 | 610 | 980 | 1200 | 335 | 330 | 700 | 2900 | 981 | 1602 | 1075 | 1613 |
| | 2040 | 1200 | 1690 | 610 | 890 | 1200 | 335 | 330 | 700 | 2900 | 888 | 1309 | 644 | 966 |
| | 2050 | 1200 | 1600 | 610 | 800 | 1200 | 335 | 330 | 700 | 2900 | 803 | 1070 | 386 | 578 |
| rendement | | 0,46 | 0,38 | 0,54 | 0,4 | 0,46 | 0,38 | 0,38 | | | | | | |
| temps de construction (années) | | 4 | 4 | 2 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1 | 7 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| durée de vie | | 40 | 40 | 30 | 30 | 40 | 30 | 20 | 40 | 25 | 25 | 25 | 25 | |
| facteur de disponibilité | printemps | 0,95 | 0,95 | 0,97 | 0,97 | 0,95 | 1 | 1 | 0,97 | 0,97 | 0,72 | 0,6 | 0,9 | 0,94 |
| | été | 0,93 | 0,93 | 0,95 | 0,95 | 0,93 | 1 | 1 | 0,95 | 0,95 | 0,75 | 0,67 | 0,8 | 0,88 |
| | automne | 0,93 | 0,93 | 0,95 | 0,95 | 0,93 | 1 | 1 | 0,95 | 0,95 | 0,82 | 0,7 | 0,7 | 0,82 |
| | hiver | 0,95 | 0,95 | 0,97 | 0,97 | 0,95 | 1 | 1 | 0,97 | 0,97 | 0,75 | 0,67 | 0,85 | 0,91 |

Ces hypothèses sont exogènes.

b) Secteur résidentiel

Ces chiffres sont endogènes au modèle. Les coûts de réhabilitation sont calibrés en 2008 et décroissent dans le temps avec la quantité de rénovation cumulée au cours du temps, selon une fonction classique d'apprentissage par la pratique ou *learning-by-doing*.

| | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Evolution nombre de logements | | | | | |
| construction | 378.610 | 325.930 | 290.880 | 248.140 | 205.330 |
| destruction | 83.000 | 79.000 | 76.000 | 74.000 | 72.000 |
| Evolution m2/logement, hab/logement | | | | | |
| m2/logement | 90,1 | 90,4 | 90,7 | 91,1 | 91,5 |

| | | | | | |
|--|--------|------|--------|--------|-------|
| hab/logement | 2,56 | 2,42 | 2,32 | 2,25 | 2,19 |
| nb réhabilitations thermiques dans l'ancien | | | | | |
| nb réhabilitations étiquettes A et B | 59601 | | 24822 | 18244 | 29302 |
| autres réhabilitations | 601751 | | 394810 | 164674 | 88663 |
| | | | | | |
| coût moyen réhabilitation vers étiquette A et B (€/m2) | 723 | 596 | 556 | 472 | 450 |
| Surcoût construction neuve/RT2005 (€/m2) | | | | | |
| BBC | 250 | | | | |
| BEPOS | 550 | | | | |

c) Secteur des transports

Les données concernant le parc de véhicules et l'impact du bonus-malus sont calibrées sur : Ademe, 2011 : **Véhicules particuliers** vendus en France. Evolution du marché, caractéristiques environnementales et techniques.

Les données concernant les coûts d'investissements dans les infrastructures nécessaires sont issues des discussions avec les experts et du questionnaire sectoriel sur les transports. Les données concernant les données de trafic par mode et les dotations en infrastructures sont issues des comptes de transports.

3. Hypothèses des tests de sensibilité

| | Référence | ACC | Pessimisme techno | Source |
|-----------------------------------|---|-------------|---|--|
| CSC | Disponible Surcoût : Centrales charbon : de +750€/kW en 2010 à 400€/kW en 2050 Centrales gaz : de +550€/kW en 2010 à 200€/kW en 2050 | | Indisponible | Projected Costs of Generating Electricity – 2010 Edition, Agence Internationale de l'Energie, 2010 Atelier Experts électricité |
| EPR | 2900€/kW | | 4500€/kW | Idem |
| Prolongation centrales nucléaires | 700€/kW | | 1400€/kW | EDF |
| ENR | Décroissance moyenne du coût d'investissement de 60% entre 2010 et 2050 | | Décroissance moyenne du coût d'investissement de 30% entre 2010 et 2050 | Solar Photovoltaics Competing in the Energy Sector: On the road to competitiveness, EPIA, 2011. Projected Costs of Generating Electricity – 2010 Edition, Agence Internationale de l'Energie, 2010 Atelier Experts électricité |
| Agrocarburants | Indisponibles | Disponibles | Indisponibles | Hypothèses de coûts et potentiels : WEO, AIE 2011. |