

n° 58

Novembre

2011

LOGEMENT
CONSTRUCTION

Evaluation des mesures du Grenelle de l'Environnement sur le parc de logements

ÉCONOMIE ET ÉVALUATION



Présent
pour
l'avenir

Collection « Études et documents » du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD)

Titre du document : Evaluation des mesures du Grenelle de l'Environnement sur le parc de logements français

Directrice de la publication : Françoise Maurel

Auteur(s) : Louis-Gaëtan Giraudet ; Céline Guivarch ; Philippe Quirion (CIRED)
Lucile Penot-Antoniou (pour la note introductive du CGDD)

Coordination et contact CGDD : Lucile Penot-Antoniou

Date de publication : Novembre 2011

Remerciements : Les auteurs remercient Benoît **Allibe** et Marie-Hélène **Laurent** d'EDF R&D pour leur appui dans la modélisation des comportements de consommation, Linda **Aliane**, Alain **Bernard**, Domitille **Bonnefoi**, Guillaume **Coron** et Jean-Marc **Moulinier** du Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement (MEDDTL), Eric **Lagandré** de l'Agence nationale de l'habitat (ANAH) et Christophe **Cassen**, Dominique **Finon**, Stéphane **Hallegatte** et Vincent **Viguié** du CIRED pour leurs commentaires sur une version précédente de ce rapport.

Ce document n'engage que ses auteurs et non les institutions auxquelles ils appartiennent.
L'objet de cette diffusion est de stimuler le débat et d'appeler des commentaires et des critiques.

SOMMAIRE

<i>Résumé</i>	3
PREMIERE PARTIE : Note du CGDD	5
<i>Synthèse et discussion de l'étude réalisée par le CIREC</i>	5
<i>Résumé</i>	6
<i>Introduction</i>	8
<i>1. Principales caractéristiques du modèle du CIREC</i>	9
<i>2. Évaluation de l'efficacité énergétique des politiques isolées</i>	11
<i>3. Évaluation de l'efficacité énergétique des politiques en bouquet</i>	13
<i>4. Éléments d'appréciation sur les évaluations réalisées avec le modèle du CIREC</i>	14
<i>5. Estimation de l'impact des facteurs complémentaires</i>	20
<i>6. Conclusion : les résultats de l'étude sont robustes</i>	22
<i>7. Annexe</i>	23
DEUXIEME PARTIE : Rapport du CIREC	25
<i>Évaluation des mesures du Grenelle de l'environnement sur le parc de logements français</i>	25
<i>Objet de l'étude</i>	26
<i>Résumé</i>	27
<i>Introduction</i>	28
<i>1. La maîtrise de la demande d'énergie dans le bâtiment résidentiel : tendances passées et enjeux futurs</i>	29
1.1 Impact des mesures de MDE de 1974 aux années 2000	29
1.1.1 Une décroissance continue de la consommation unitaire de chauffage	29
1.1.2 Une tendance soutenue par la réglementation thermique des bâtiments neufs.....	30
1.2 La nouvelle donne issue du Grenelle de l'environnement	31
1.2.1 Les années 2000 : la MDE comme réponse à l'enjeu climatique	31
1.2.2 Les objectifs et moyens définis par le Grenelle de l'environnement.....	31
<i>2. Res-IRF, un modèle de la performance énergétique du parc de logements français</i>	32
2.1 Enjeux de modélisation	32
2.2 Vue d'ensemble du modèle Res-IRF	33
2.2.1 Représentation technologique du parc de logements	33
2.2.2 Déterminants des choix d'efficacité énergétique.....	34
2.2.3 Dynamique des coûts et taux de rénovation endogène	36
2.2.4 Sobriété et effet rebond	37
2.2.5 Bouclage macroéconomique	38
2.3 Scénario de référence	39

3. Mode d'action des politiques du Grenelle de l'environnement	40
3.1 Paramétrage des politiques	41
3.1.1 Crédits d'impôt développement durable (CIDD).....	41
3.1.2 Eco-prêts à taux zéro pour la rénovation énergétique (EcoPTZ).....	41
3.1.3 Réglementation thermique pour les bâtiments neufs (RT2012-2020).....	41
3.1.4 Obligation de rénovation (OR).....	42
3.1.5 Taxe carbone ou contribution climat-énergie (CCE).....	42
3.2 Efficacité comparée des politiques	46
4. Evaluation globale des politiques du Grenelle de l'environnement	50
4.1 Bouquet avec mesures existantes (AME).....	50
4.2 Bouquets avec mesures supplémentaires (AMS).....	51
5. Discussion	54
5.1 Une évaluation positive	54
5.1.1 Unités d'évaluation.....	54
5.1.2 Critères d'évaluation.....	54
5.2 Eléments non modélisés	55
5.2.1 Energies renouvelables.....	55
5.2.2 Mesures complémentaires.....	55
5.3 Scénarios volontaristes	56
6. Conclusion	58
7. Annexes	60
7.1 Annexe 1 : Equations principales du modèle.....	60
7.2 Annexe 2 : Construction de la courbe d'utilisation.....	65
7.3 Annexe 3 : Eléments complémentaires de paramétrage.....	67
Bibliographie	69
Références complémentaires	71
Liste des tableaux	72
Liste des figures	73
Liste des sigles	74

Résumé

La France s'est engagée à réduire les consommations d'énergie du parc des bâtiments existants de 38 % en 2020 par rapport à 2008, objectif « Grenelle -38 % », et à diviser les émissions de CO2 par quatre en 2050 par rapport à 1990, objectif « Facteur 4 ».

Pour atteindre ces objectifs, le Grenelle de l'environnement a mis en avant un certain nombre de leviers réglementaires et incitatifs.

Cette étude, réalisée par le CIREDD pour le compte du CGDD au Ministère de l'Écologie, a pour objectif d'analyser l'impact de ces différents instruments sur la consommation d'énergie pour le chauffage des logements. Mesures existantes (crédit d'impôt développement durable, éco-prêt à taux zéro, réglementation thermique) et mesures supplémentaires (obligation de rénovation, contribution climat énergie) sont évaluées grâce au modèle Res-IRF du CIREDD. Ce modèle prend en compte l'efficacité énergétique des logements et leur évolution dans le temps sous l'effet de rénovations; il modélise également de façon originale les comportements de chauffage des ménages.

Les premières simulations suggèrent que les politiques considérées ne suffisent pas à atteindre les objectifs ambitieux fixés par la France. Ces résultats sont sensibles aux hypothèses retenues. En introduisant des hypothèses plus optimistes (ex : prix des rénovations plus faible) et en prenant en compte des facteurs complémentaires au modèle (ex : bois), un travail de ré-estimation sur la base du modèle du CIREDD a permis d'obtenir des résultats plus proches des objectifs du Grenelle.

Abstract

France has committed to reduce energy consumption of existing buildings from 38% in 2020 compared to 2008, target "Grenelle -38%", and to divide CO2 emissions by four in 2050 compared to 1990, target "Factor 4".

To achieve these objectives, the "Grenelle de l'environnement" has highlighted a number of regulatory and incentive policies.

This study, conducted by the CIREDD for the CGDD, aims to analyse the impact of these instruments on the energy consumption for heating. Existing measures (tax credit for sustainable development, eco-interest loan, thermal regulation) and additional measures (obligation to renovate, climate and energy contribution) are estimated using the CIREDD's model, Res-IRF. This model takes into account the energy efficiency of homes and their evolution over time as a result of renovations. It models also, in an original way, the heating behaviour of households.

The first simulations show that the policies considered are not sufficient to achieve the ambitious goals set by France. These results are sensitive to assumptions. By introducing more optimistic assumptions (eg lower prices renovations) and taking into account additional factors to the model (eg wood), a re-estimation based on the CIREDD's model has yielded results closer to the objectives of the Round Table.

PREMIERE PARTIE : Note du CGDD

Synthèse et discussion de l'étude réalisée par le CIREC

Avertissement : les résultats de cette note peuvent présenter quelques différences mineures avec ceux retenus dans le rapport du CIREC. Ces variations s'expliquent du fait que ce ne sont pas exactement les mêmes hypothèses qui ont été utilisées entre la note et le rapport¹. Les ordres de grandeurs et les conclusions restent cependant identiques.

¹ Dans le rapport du CIREC, le modèle utilisé est rattaché au modèle d'équilibre général IMACLIM. Cette version n'était pas disponible pour le CGDD. Par conséquent, le CGDD a réalisé des estimations avec une autre version du modèle retenant des hypothèses de variation de prix des énergies légèrement différentes.

Résumé

Sur la base d'un modèle hybride énergie-économie, le centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED) a réalisé à la demande du Commissariat général au développement durable (CGDD) une évaluation des mesures du Grenelle de l'environnement au regard des objectifs français à atteindre dans le secteur du logement : objectif « Grenelle -38 % » (réduction de 38 % de la consommation d'énergie primaire en 2020 / 2008) et objectif « Facteur 4 » (division par quatre des émissions de CO2 en 2050 / 1990).

Le périmètre d'étude correspond à la consommation d'énergie pour le chauffage (électricité, gaz, fioul ; hors bois et réseaux de chaleur) dans le parc résidentiel français.

D'après les simulations réalisées, les instruments existants (réglementation thermique -RT-, éco-prêt à taux zéro -éco-PTZ-, crédit d'impôt développement durable -CIDD-) n'ont qu'un effet mesuré en termes d'économie d'énergie et d'émissions de CO2 évitées. Le bouquet de politiques avec mesures existantes (AME) permet de réduire la consommation unitaire d'énergie primaire dans le parc résidentiel existant de 8,5 % en 2020 / 2008. C'est très légèrement mieux que dans un scénario de référence sans aucune politique énergétique (-7 %), mais cela reste loin de l'objectif « Grenelle -38 % ». Les gains en termes d'émissions de CO2 évités sont de 25 % en 2050 / 1990 ce qui est insuffisant pour atteindre l'objectif « Facteur 4 ».

En complétant ce bouquet avec une mesure supplémentaire telle que la Contribution Climat Énergie -CCE- (AMS1), une obligation de rénovation à l'occasion d'une mutation -OR- (AMS2) ou bien les deux (AMS3), des économies d'énergies supplémentaires sont réalisées mais ne permettent toujours pas d'atteindre les objectifs nationaux. L'introduction de la CCE (AMS1) réduit de l'ordre de 15 % la consommation unitaire d'énergie primaire dans le parc résidentiel existant en 2020 / 2008 ; les émissions de CO2 évités diminuent quant à elles de 45 % en 2050 / 1990. L'ajout d'une obligation de rénovation (AMS3) permet de dépasser -50 % d'émissions de CO2 en 2050.

Le tableau ci-dessous synthétise les résultats obtenus avec le modèle du CIRED en appliquant les bouquets de mesures décrits ci-dessus.

	Nombre de rénovations par an dans le parc existant (milliers de logements)	Gains effectifs (avec effet rebond) unitaires d'énergie primaire par rapport à 2008*						Gains totaux théoriques (sans effet rebond) d'énergie finale par rapport à 2008*		Emissions de CO2 par rapport à 1990		
		Unitaires sur le parc existant		Unitaires sur le neuf		Unitaires sur le parc total		Totaux théoriques		2020	2050	
		2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050			
Objectifs de référence			-38%	-75%							-75%	
Ref Scénario de référence	270,6	269,5	-7,1%	-13,2%	-1,8%	-4,1%	-11,7%	-22,1%	-10,7%	-27,4%	4,9%	0,4%
<i>Scénarios Grenelle</i>												
AME CIDD+EcoPTZ+RT	395,9	267,6	-8,5%	-14,9%	-41,4%	-78,0%	-17,5%	-41,8%	-18,6%	-43,8%	-2,8%	-24,6%
AMS1 AME+CCE	422,4	294,6	-15,9%	-33,4%	-44,3%	-81,4%	-23,9%	-54,0%	-20,9%	-47,7%	-12,8%	-44,8%
AMS2 AME+OR	814,1	341,7	-10,9%	-20,5%	-41,4%	-78,0%	-19,5%	-45,2%	-21,3%	-56,2%	-5,1%	-29,9%
AMS3 AME+CCE+OR	828,9	345,6	-18,3%	-37,7%	-44,3%	-81,4%	-26,0%	-56,7%	-23,6%	-59,7%	-15,3%	-51,7%

* Les gains sont négatifs

Consommation d'énergie et résultats complémentaires dans les différents scénarios

D'après ces simulations, les mesures visant à accélérer les rénovations (CIDD, éco-PTZ ou OR) ne sont réellement efficaces que si elles sont couplées avec un signal prix comme la CCE qui agit sur le comportement des ménages et est donc de nature à limiter l'effet rebond (i.e. les ménages augmentent leur confort thermique après une opération de rénovation thermique), qui peut effacer de 5 à 50 % des économies d'énergies « théoriques ».

Les hypothèses retenues dans la modélisation et les simulations jouent un rôle critique dans les résultats obtenus : prix des énergies peu dynamiques, hypothèses de coûts des rénovations plutôt élevés, non prise en compte des énergies renouvelables ni des impacts « positifs » en terme de besoins de chauffage du changement climatique, parc des logements sociaux non considéré de manière distincte du parc résidentiel privé.

En introduisant des hypothèses alternatives et prenant en compte des facteurs complémentaires au modèle, une nouvelle estimation sur la base du modèle du CIREDD a permis d'obtenir des résultats plus proches des objectifs du Grenelle. Ce travail a retenu les hypothèses suivantes :

- les rénovations dans les logements sociaux sont prises en compte de façon distincte. Le rythme de rénovations dans ce secteur est cohérent avec le scénario Grenelle du COMOP 2 et le scénario « plan bâtiment Grenelle »
- les rénovations tendanciennes « légères » qui ne permettent pas de gagner au moins une classe énergétique du diagnostic de performance énergétique (DPE), sont prises en compte jusqu'en 2050, en se fondant sur les niveaux de rénovations observés de 1973 à 2005
- les prix des rénovations sont réduits de 50 % par rapport à ceux utilisés dans les premières simulations (alignement sur les hypothèses ADEME)
- les évolutions des prix des énergies sont plus dynamiques, conformément aux dernières projections énergétiques en cours sous l'égide de la DGEC et du CGDD (les prix de l'électricité, du gaz et du fioul augmentent respectivement de 51 %, 87 % et 52 % entre 2007 et 2050)
- l'adaptation au changement climatique est introduit via une diminution de la demande d'énergie finale de 6 % en 2020 et de 24 % en 2050 par rapport à 2010 (cf M. Isaac & D.P. Van Vuuren)
- les énergies renouvelables sont représentées avec l'introduction du bois comme énergie de chauffage. L'hypothèse retenue est celle du scénario « Bois/Gaz/Elec » de l'étude « Habitat facteur 4 » de l'IDDRI (+41,1 TWh en énergie finale en 2050 / 2005)

Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus à l'aide de ces nouvelles hypothèses :

		Consommation réelle unitaire d'énergie finale sur le parc total (kWh / m ²)	Economie d'énergie finale réelle unitaire par rapport au scénario de référence (kWh / m ²)	Economie d'énergie finale réelle unitaire par rapport au scénario AME (kWh / m ²)	Emissions totales de CO2 (MtCO2)	Variation des émissions de CO2 par rapport à 1990
2008	Référence	104,6	-	-	60,5	-
2020	<i>Objectifs</i>	55	-	-	-	-
	Référence	89	-	-	58	5%
	AME (CIDD + ECOPTZ + RT)	83	-6	-	54	-3%
	Rénovations dans les logements sociaux	87	-2	-2	55	-1%
	Rénovations tendanciennes	83	-6	-6	54	-2%
	Prix des rénovations plus faible	86	-3	-3	56	2%
	Prix des énergies plus élevé - CCE	85	-4	-4	55	0%
	Changement climatique	83	-6	-5	58	5%
	Bois	89	0	0	53	-4%
	Total 1 (actions sur le bâti: AME + Réno. tendanciennes + Prix des réno. plus faible + Réno. dans les logements sociaux)	72	-17	-11	43	-23%
	Total 2 (Total 1+ actions sur le comportement de chauffage: CEE)	69	-20	-14	40	-27%
	Total 3 (Total 2+ prise en compte du changement climatique)	64	-25	-19	38	-32%
	2050	<i>Objectifs</i>	-	-	-	14
Référence		73	-	-	55	0%
AME (CIDD + ECOPTZ + RT)		55	-18	-	42	-25%
Rénovations dans les logements sociaux		69	-4	-4	52	-6%
Rénovations tendanciennes		56	-18	-18	42	-24%
Prix des rénovations plus faible		68	-5	-5	52	-6%
Prix des énergies plus élevé - CCE		57	-16	-12	43	-22%
Changement climatique		55	-18	-13	42	-24%
Bois		73	0	0	46	-16%
Total 1 (actions sur le bâti: AME + Réno. tendanciennes + Prix des réno. plus faible + Réno. dans les logements sociaux)		28	-45	-27	12	-78%
Total 2 (Total 1+ actions sur le comportement de chauffage: CEE)		22	-51	-33	7	-87%
Total 3 (Total 2+ prise en compte du changement climatique)		16	-57	-39	3	-94%

Introduction

Le centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED) a réalisé en 2010, pour le compte du Commissariat général au développement durable (CGDD), une étude portant sur les principales mesures du Grenelle de l'environnement dans le secteur du logement. Celle-ci analyse l'impact de différents instruments, économiques et réglementaires existant mais aussi ceux qui pourraient être mobilisés ultérieurement (crédit d'impôt, éco-PTZ, réglementation thermique, taxe carbone, etc.), au regard des objectifs nationaux de réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂.

Le périmètre d'étude correspond à la consommation d'énergie pour le chauffage (électricité, gaz, fioul ; hors bois et réseaux de chaleur) dans le parc résidentiel français. Cette consommation d'énergie représente environ deux tiers de la demande d'énergie dans les logements.

A partir de simulations effectuées sur ce périmètre, l'étude conclut que les politiques considérées, même celles cumulant l'ensemble des outils envisagés, ne suffisent pas à réduire la consommation d'énergie primaire dans les proportions fixées par le Grenelle (- 38 % en 2020 par rapport à 2008), ni à diviser par quatre les émissions de CO₂ en 2050 par rapport à 1990 (objectif « Facteur 4 »).

- Les instruments qui existent actuellement (réglementation thermique -RT-, éco-prêt à taux zéro -éco-PTZ-, crédit d'impôt développement durable -CIDD-) n'ont qu'un effet mesuré en termes d'économie d'énergie et d'émissions de CO₂ évitées (même si l'éco-PTZ et le CIDD sont supposés s'appliquer sur l'ensemble de la période 2008-2020). La consommation unitaire d'énergie primaire diminue de 8,5 % en 2020 / 2008 avec la mise en place de ces trois instruments. C'est très légèrement mieux que dans un scénario de référence sans aucune politique énergétique (-7 %), mais cela reste loin de l'objectif « Grenelle -38 % ». De même, en termes d'émissions de CO₂, elles restent bien en-dessous des objectifs à atteindre : -25 % d'émissions de CO₂ avec RT, éco-PTZ et CIDD en 2050 / 1990 alors que l'objectif facteur 4 correspond à une baisse de 75 %.
- En complétant les instruments incitatifs actuels avec une contribution climat énergie (taxe carbone) progressant régulièrement jusqu'en 2050, les résultats restent en deçà des objectifs : -15 % pour les consommations unitaires des bâtiments résidentiels existant en 2020 et -45 % pour les émissions de CO₂ en 2050. L'ajout d'une obligation de rénovation permet juste de dépasser -50 % d'émissions de CO₂ en 2050.

Le comportement de chauffage, modélisé par un effet rebond (i.e. les ménages augmentent leur confort thermique après une opération de rénovation thermique), explique en partie la faiblesse des impacts. L'étude estime que l'effet rebond efface une part importante des économies d'énergie, de l'ordre de 5 à 50 %. Ces résultats dépendent fortement des hypothèses retenues : prix des énergies peu dynamiques dans les simulations réalisées par le CIRED, hypothèses de coûts des rénovations plutôt élevés, non en compte des énergies renouvelables ni des impacts « positifs » en terme de besoins de chauffage du changement climatique, parc des logements sociaux non considéré de manière distincte du parc résidentiel privé.

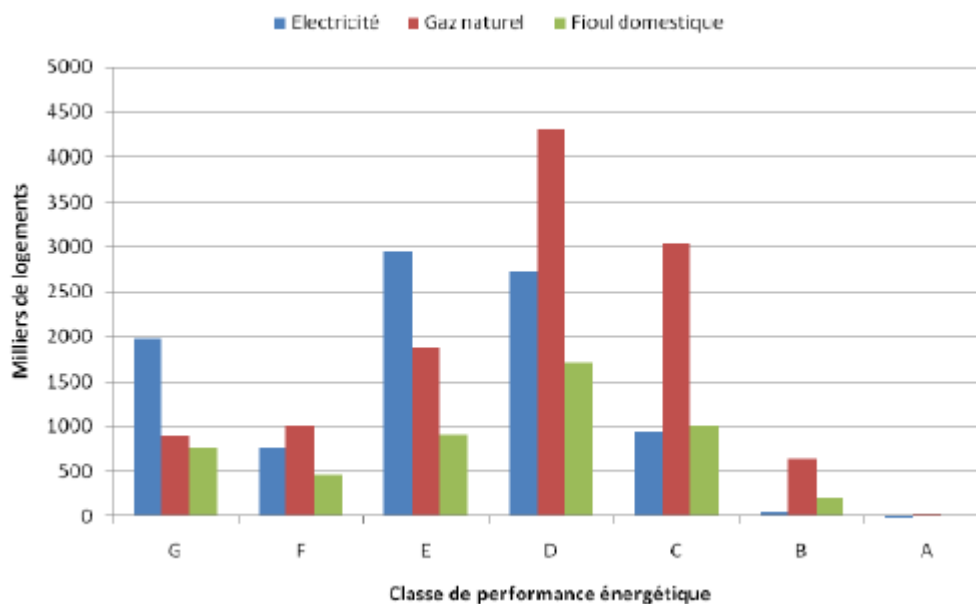
En retenant des hypothèses alternatives, on peut obtenir des résultats plus proches des objectifs du Grenelle, par exemple une baisse des émissions de CO₂ de l'ordre de 70 % à 90 % en 2050 par rapport à 1990. Ces estimations complémentaires ne modifient pas les principaux messages de l'étude du CIRED : alors même que le secteur résidentiel-tertiaire est réputé avoir des coûts d'abattement relativement faibles, les objectifs ambitieux de la France dans ce secteur ne pourront vraisemblablement être atteints que par la mobilisation de l'ensemble des leviers disponibles y compris un signal prix ad hoc.

Après une description de la modélisation utilisée par le CIRED et des principaux résultats, la note s'attache à identifier et quantifier les phénomènes et arguments qui pourraient réduire l'écart entre les trajectoires projetées dans l'étude du CIRED et les objectifs affichés par le France en termes de consommation d'énergie et d'émission de CO₂ dans le secteur du logement.

1. Principales caractéristiques du modèle du CIRED

Pour évaluer les consommations énergétiques et les émissions de CO₂ du parc de logement, le CIRED a développé un modèle hybride énergie-économie appelé Res-IRF². Celui-ci représente le parc sur la période 2008-2050 en se basant sur sa structure actuelle. Les évolutions de la taille du parc sont notamment en lien avec la démographie et les évolutions de ses performances énergétiques en fonction des comportements des ménages.

Le parc est ventilé suivant les performances énergétiques des logements, données par leur classe de diagnostic de performance énergétique (DPE, en kWh/m²/an). A l'année de calage du modèle, 2007, la structure du parc est issue des données de l'ANAH (Marchal, 2008). Le CIRED utilise plusieurs sources pour calibrer son modèle. Les Chiffres clés du bâtiment (CCB, ADEME) et les données du CEREN permettent de caler les consommations d'énergie pour le chauffage dans le parc résidentiel. La description du parc (maisons individuelles, logements collectifs, propriétaires, locataires, surface) est basée sur les données de l'enquête logement 2006 de l'INSEE (SOEs) ainsi que sur celles du CEREN. Seule la consommation de chauffage dans le parc résidentiel est analysée ; l'énergie pour le chauffage est choisie parmi l'électricité, le gaz et le fioul.



Graphique 1 : Structure du parc de logements en 2007 d'après les données de l'ANAH (Marchal, 2008)

	Maisons individuelles	Logements collectifs
Propriétaires occupants	45,2%	11,9%
Propriétaires bailleurs	11,2%	31,7%

Tableau 1 : Répartition par type d'habitation et statut des habitants en 2007

² Res-IRF est le module résidentiel France d'IMACLIM-R, modèle climatique développé par ailleurs au CIRED.

A noter que le parc social, non représenté de façon distincte du parc privé dans le modèle, représente environ 15 % de l'ensemble des logements en France.

La structure du parc évolue dans le temps suivant plusieurs mécanismes.

Les constructions neuves sont déterminées par les besoins en superficie supplémentaire résultant de l'accroissement de la population (projection INSEE), de la diminution de la taille des ménages et de l'augmentation de la superficie moyenne des logements (suivant une élasticité aux revenus des ménages). A cette projection il faut ajouter les besoins destinés à compenser les sorties du parc : 0,35 % du parc par an (Allaire et al., 2008) et par hypothèse, ce sont les logements les plus énergivores qui sortent en priorité (Traisnel et al., 2001). Le parc « neuf », qui recouvre l'ensemble des logements à partir de 2008, comprend, suivant le scénario envisagé, trois catégories de performance énergétique : RT 2005, BBC et BEPOS³. En 2050, dans une situation de référence (où aucune politique énergétique ne serait mise en place) le parc neuf représenterait 38 % de la surface de l'ensemble du parc logement ; autrement dit, 62 % de la surface du parc de 2050 correspondrait à des logements construits avant 2008.

Par ailleurs, l'amélioration de l'efficacité énergétique du parc existant résulte de deux choix : réaliser des investissements dans la rénovation énergétique ; changer d'énergie de chauffage. Ces mesures sont représentées par des transitions de classes énergétiques qui suivent une fonction qui attribue à chaque option de rénovation une probabilité de choix inversement proportionnelle à son coût total sur le cycle de vie. Celui-ci prend en compte le coût de transition entre deux classes du DPE, les dépenses d'énergies cumulées et actualisées théoriquement associées à la classe d'arrivée et des coûts de transition « intangibles »⁴. La rentabilité relative des transitions de classe énergétique détermine à la fois la quantité et la qualité des rénovations. La dynamique est induite par les variations des prix des énergies et soutenue par l'apprentissage du côté de l'offre de technologies (« learning-by-doing » : les coûts de transitions décroissent avec la quantité cumulée de rénovations) et les phénomènes d'imitation du côté de la demande (baisse des coûts intangibles avec la quantité cumulée de rénovations). La rentabilité recherchée par les ménages dépend de leur statut (propriétaire ou locataire) et du type d'habitation (maison individuelle ou immeuble collectif). Les subventions distribuées par les politiques vont avoir pour effet de diminuer le coût des rénovations et par conséquent, d'améliorer la rentabilité des investissements. Le CIREN s'est appuyé sur les données du CCB, de la SOFRES mais également de l'enquête OPEN⁵ de l'ADEME pour calibrer cette dynamique.

Au delà de l'efficacité énergétique du logement, le modèle prend également en compte le comportement de chauffage des ménages. Plus le logement est mal isolé, plus le ménage est supposé limiter sa consommation (baisse de la température de confort, absence de chauffage dans certaines pièces du logement, etc.) pour contenir la facture énergétique. A l'inverse, lorsque le logement est bien isolé, le ménage peut relâcher cette contrainte. Cette modélisation est conforme à ce que montrent les études empiriques et explique l'effet rebond : lorsque le logement est rénové, les gains énergétiques réels sont inférieurs aux gains énergétiques théoriques calculés sur la seule base du DPE. Le calibrage de ces comportements est fait sur la base de travaux récents menés conjointement par EDF et le CIREN.

Les bouquets de politiques modélisés dans Res-IRF combinent subventions (CIDD et éco-PTZ), réglementations (RT2012-2020 et obligation de rénovation -OR) et contribution climat énergie (CCE) ou taxe carbone. Les politiques sont paramétrées de la façon suivante dans le modèle :

- CIDD : une subvention est mise en place de 2009 à 2020 pour représenter le crédit d'impôt⁶. Elle s'applique uniquement au parc existant, comme une réduction de 30 % du coût d'investissement pour toute transition vers une classe énergétique supérieure, plafonnée à 8 000 € par logement.
- éco-PTZ : c'est une subvention, mise en place de 2009 à 2020, sur le coût de transition de classe énergétique correspondant au montant total des intérêts d'un prêt conventionnel de dix ans à 4 %. Par exemple, une rénovation de 15 000 € bénéficie d'une subvention de 3 490 €, sachant que le bénéficiaire va payer 1 500 € pour chacune des dix annuités, au lieu de 1 849 € dans le cas d'un prêt

³ Il s'agit des réglementations thermiques : la RT2005 est celle qui s'impose aujourd'hui, celle de 2012-2013 imposera les bâtiments basse consommation (BBC) et celle de 2020 les bâtiments à énergie positive (BEPOS)

⁴ Les coûts intangibles sont un paramètre de calibrage : ils sont ajoutés aux coûts financiers pour permettre aux fonctions de décision de reproduire les comportements observés à l'année de base. Ils peuvent être assimilés à l'imperfection d'information qui existe pour les agents sur les différentes options de rénovations.

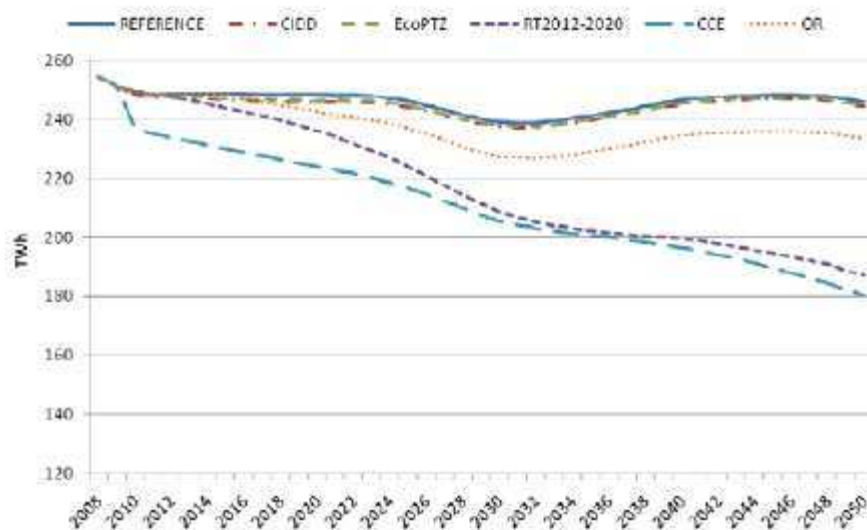
⁵ OPEN : Observatoire Permanent de l'amélioration Énergétique du logement ; 2006-2008

⁶ Le modèle étant calé sur 2007, il tient compte du CIDD qui existait antérieurement à l'année 2007.

conventionnel à 4 %. Le montant prêté correspond au coût d'investissement total, déduction faite des crédits d'impôt et plafonné à 30 000 € par logement.

- RT2012-2020 : elles sont représentées dans Res-IRF comme des restrictions successives du choix d'investissement des bâtiments neufs aux seules options d'efficacité énergétique réglementaires en 2012⁷ et 2020.
- OR : à chaque changement d'occupant du logement (locataire ou propriétaire), les propriétaires de logements de classe énergétique inférieure au seuil de la classe C doivent effectuer des travaux de rénovation permettant d'atteindre au minimum la classe C. Le taux de rénovation, déterminé de façon endogène dans le modèle, est forcé pour les logements situés sous le seuil afin de correspondre aux cycles de changement d'occupant. L'obligation est imposée aux logements classés G en 2016, aux logements classés F en 2020, aux logements classés E en 2024 et enfin aux logements de classe D en 2028.
- CCE (taxe carbone) : la valeur du carbone utilisée dans Res-IRF suit les recommandations du rapport Quinet : fixée à 32 €/tCO₂ en 2010, elle augmente de 5,8 % par an jusqu'en 2030 puis de 4 % par an ensuite, pour valoir 217 €/tCO₂ en 2050. Ses revenus sont versés forfaitairement aux ménages. La taxe carbone est parfaitement anticipée dans le modèle à partir de l'année où elle est mise en place.

2. Évaluation de l'efficacité énergétique des politiques isolées



Graphique 2 : Consommation d'énergie finale de chauffage des logements, cas de politiques isolées

Le scénario de référence ne comprend aucune mesure du Grenelle, en particulier la norme thermique de construction reste la RT2005 sur l'ensemble de la période. Il suit une projection exogène de la population (INSEE) et répond aux deux seules dynamiques de revenu et de prix des énergies. Celles-ci sont endogènes, elles résultent du couplage de Res-IRF à IMACLIM-R8 France mais sont déterminées par un scénario de prix du pétrole mondial dérivé de l'Annual Energy Outlook 2008 (U.S. EIA, 2008).

Les politiques isolées du Grenelle sont supposées mises en place séparément ; le modèle donne les résultats en termes d'économies d'énergie primaire/finale, d'émissions de CO₂ évitées, d'effet rebond, de nombre de

⁷ Les travaux du CIREC sont antérieurs à la parution du décret n° 2010-1269 du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions, qui fixe l'entrée en vigueur de la réglementation dans les bâtiments d'habitation au 1^{er} janvier 2013.

⁸ IMACLIM-R : modèle d'équilibre général développé par le CIREC. Res-IRF est le module résidentiel France d'IMACLIM-R

rénovations et de structure du parc. Une partie de ces résultats est présentée dans le tableau qui suit (surlignés en jaune figurent les objectifs à atteindre).

	Nombre de rénovations par an dans le parc existant (milliers de logements)		Gains effectifs (avec effet rebond) unitaires d'énergie primaire par rapport à 2008*						Gains totaux théoriques (sans effet rebond) d'énergie finale par rapport à 2008*		Emissions de CO2 par rapport à 1990	
			Unitaires sur le parc existant		Unitaires sur le neuf		Unitaires sur le parc total		Totaux théoriques			
	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050
<i>Objectifs de référence</i>												
Ref	Scénario de référence		-38%	-75%								-75%
<i>Politiques isolées</i>												
CIDD	Crédit d'impôt DD		-7,8%	-13,9%	-1,8%	-4,1%	-12,3%	-22,5%	-13,1%	-28,8%	3,4%	-0,2%
EPTZ	Eco-prêt à taux zéro		-7,7%	-13,8%	-1,8%	-4,1%	-12,2%	-22,5%	-12,6%	-28,5%	3,7%	-0,1%
RT	Réglementation neuf 2012-20		-7,1%	-13,2%	-4,4%	-7,8,0%	-16,4%	-40,7%	-13,8%	-41,1%	0,0%	-23,3%
CCE	Taxe carbone		-14,5%	-32,1%	-7,1%	-21,8%	-18,4%	-38,2%	-13,0%	-32,1%	-5,8%	-27,1%
OR	Obligation de rénovation		-9,6%	-19,0%	-1,8%	-4,1%	-13,8%	-25,7%	-13,6%	-41,2%	2,3%	-5,5%

* Les gains sont négatifs

Tableau 2 : Consommation d'énergie et résultats complémentaires dans les différents scénarios

D'après la figure 2, en termes d'économies d'énergie, le CIDD et l'éco-PTZ engendrent de faibles réductions d'émissions. L'évolution des consommations d'énergie finale pour chacune de ces politiques est très proche de celle du scénario de référence. Suivant le tableau 1, avec la mise en place de l'éco-PTZ ou du CIDD, le nombre de rénovations, inférieur à 350 000 / an sur la période 2010-2020, est en dessous des objectifs du Grenelle (400 000 rénovations / an). Les gains sur la consommation primaire unitaire dans le parc existant sont de l'ordre de 8 % en 2020 par rapport à 2008, 14 % en 2050 / 2008 ; c'est à peine un point de plus que la situation de référence et très loin de l'objectif Grenelle de réduction de 38 %. En termes d'émissions de CO2 évitées, ces mesures conduisent à une baisse quasi-nulle : -0,1 % en 2050 par rapport à 1990. L'abandon à partir de 2020 de ces deux outils dans la simulation explique en partie ces mauvais résultats, l'effet rebond vient également limiter l'impact des rénovations. Tant qu'ils sont en place, ces instruments permettent néanmoins d'augmenter le nombre et la qualité des rénovations (50 à 70 000 rénovations de plus que dans le scénario de référence).

L'obligation de rénovation a le plus fort impact quant au nombre et à la qualité des rénovations. Le nombre de rénovations est plus que doublé en 2020 par rapport à la situation de référence avec cette politique. Mais l'OR, si elle fixe le seuil d'obligation à l'étiquette C, conduit à un effet rebond particulièrement élevé (56 % en 2050 par rapport à 2008⁹, 23 points de plus que la référence). Les économies d'énergie restent loin des objectifs à atteindre (-5,5 % d'émissions de CO2 en 2050 / 1990), même si elles sont plus importantes que celles avec CIDD ou éco-PTZ.

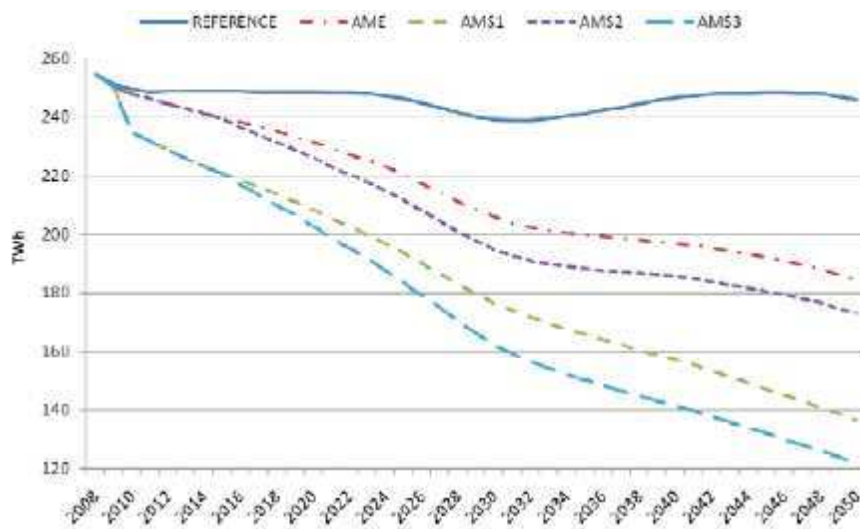
La RT2012-2020 est une des politiques les plus performantes (-23 % d'émissions de CO2 en 2050 / 1990) car elle agit fortement sur l'efficacité du parc neuf, sur lequel l'effet rebond est faible parce que la performance initiale est très bonne.

Avec la RT2012-2020, la CCE est la politique la plus performante : -27 % d'émissions de CO2 en 2050 / 1990. Elle augmente légèrement le taux de rénovations sur l'ensemble de la période et améliore leur qualité. L'effet de la CCE sur la structure du parc neuf est faible, elle agit essentiellement sur le comportement de chauffage des ménages (réduction de la facture énergétique).

⁹ Cela signifie qu'en moyenne sur l'ensemble du parc, le rapport entre l'énergie réellement consommée et l'énergie théoriquement nécessaire pour le chauffage augmente de 56 % entre 2008 et 2050.

3. Évaluation de l'efficacité énergétique des politiques en bouquet

Les résultats qui suivent présentent les estimations du modèle Res-IRF pour des bouquets de politiques énergétiques.



Graphique 3 : Consommation d'énergie finale de chauffage des logements

	Nombre de rénovations par an dans le parc existant (milliers de logements)		Gains effectifs (avec effet rebond) unitaires d'énergie primaire par rapport à 2008*						Gains totaux théoriques (sans effet rebond) d'énergie finale par rapport à 2008*		Emissions de CO2 par rapport à 1990			
			Unitaires sur le parc existant		Unitaires sur le neuf		Unitaires sur le parc total		Totaux théoriques					
	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050		
Objectifs de référence														
Ref	Scénario de référence		270,6	269,5	-7,1%	-13,2%	-1,8%	-4,1%	-11,7%	-22,1%	-10,7%	-27,4%	4,9%	0,4%
Scénarios Grenelle														
AME	CIDD+EcoPTZ+RT		395,9	267,6	-8,5%	-14,9%	-41,4%	-78,0%	-17,5%	-41,8%	-18,6%	-43,8%	-2,8%	-24,6%
AMS1	AME+CCE		422,4	294,6	-15,9%	-33,4%	-44,3%	-81,4%	-23,9%	-54,0%	-20,9%	-47,7%	-12,8%	-44,8%
AMS2	AME+OR		814,1	341,7	-10,9%	-20,5%	-41,4%	-78,0%	-19,5%	-45,2%	-21,3%	-56,2%	-5,1%	-29,9%
AMS3	AME+CCE+OR		828,9	345,6	-18,3%	-37,7%	-44,3%	-81,4%	-26,0%	-56,7%	-23,6%	-59,7%	-15,3%	-51,7%

* Les gains sont négatifs

Tableau 3 : Consommation d'énergie finale et résultats complémentaires dans les différents scénarios

Le bouquet avec mesures existantes (AME : CIDD + éco-PTZ + RT2012-2020) permet d'atteindre environ 400 000 rénovations par an jusqu'en 2020, mais cela ne suffit pas à atteindre l'objectif de réduction de 38 % de la consommation unitaire du parc existant à l'horizon 2020. Les gains en termes d'émissions de CO2 évitées sont de 25 % en 2050 / 1990, légèrement supérieurs à ceux de la RT seule. La combinaison de ces trois politiques permet de générer légèrement plus d'économies que si elles étaient mises en place séparément (il y a un léger

effet sur-additif car la superposition de deux subventions ouvre la possibilité de réaliser des travaux plus importants).

Ajouter une mesure supplémentaire telle que la CCE (AMS1), l'OR (AMS2) ou bien les deux (AMS3) génère des économies d'énergie supplémentaires mais ne permet pas d'atteindre les objectifs nationaux. Au vu des résultats, les mesures visant à accélérer les rénovations (CIDD, éco-PTZ ou OR) ne sont réellement efficaces que si elles sont couplées à un instrument comme la CCE qui agit sur les comportements de chauffage des ménages et est donc de nature à limiter l'effet rebond.

L'étude conclut que les politiques considérées ne suffiraient pas à réduire la consommation d'énergie dans les proportions attendues par le Grenelle ou le « facteur 4 ». Toutefois, les résultats du modèle dépendent des hypothèses retenues. De plus, Res-IRF ne prend pas en compte un certain nombre de facteurs qui pourraient sensiblement contribuer à s'approcher des objectifs et qui sont explorés dans la partie suivante.

4. Éléments d'appréciation sur les évaluations réalisées avec le modèle du CIREDD

L'analyse du modèle Res-IRF permet d'avancer plusieurs arguments susceptibles d'expliquer, en partie, le décalage important qui existe entre les trajectoires mises en évidence par l'étude du CIREDD et les objectifs que s'est fixés la France, en termes d'économie d'énergie et d'émissions de CO₂ dans le parc résidentiel-tertiaire. Les différents éléments de discussion sont examinés dans les paragraphes ci-dessous ; ils font l'objet, dans la mesure du possible, de tentative de quantification dans le chapitre suivant.

La comparaison avec les résultats présentés dernièrement par l'IDDRI dans « Habitat Facteur 4 : étude d'une réduction des émissions de CO₂ liées au confort thermique dans l'habitat à horizon 2050 »¹⁰ permet d'illustrer un certain nombre de ces points. Dans cette l'étude de l'IDDRI, les objectifs de réduction de 38 % des consommations du parc existant en énergie primaire en 2020 et de division par 4 des émissions de CO₂ en 2050 semble pouvoir être atteints dans le cadre de scénarios « techniques » très volontaristes. Ce relatif optimisme s'explique notamment par l'absence de prise en compte de contrainte économique dans cette étude, au contraire de celle du CIREDD.

4.1 Un périmètre d'étude restreint

Le modèle CIREDD limite son périmètre d'étude au parc de logement résidentiel et à la consommation énergétique liée au chauffage pour les seules énergies : électricité, gaz et fioul.

Il ignore les consommations d'énergie liées à la production d'eau chaude sanitaire (ECS), au refroidissement, à l'éclairage, aux auxiliaires (ventilateurs, pompes), à la cuisson et à l'électricité spécifique. Ces dernières représentent environ un tiers de l'ensemble de la consommation finale dans les résidences principales¹¹ et sont responsables de l'essentiel de la croissance au cours des dernières années ; le chauffage représente quant à lui 70 % de la consommation finale du parc de logements.

Les énergies renouvelables ne sont pas non plus prises en compte dans le modèle. La part du bois et des énergies renouvelables (EnR) dans la consommation d'énergie finale pour le poste de chauffage des résidences principales est pourtant non négligeable ; elle s'élève à 24 %¹² en 2005 (contre 73 % pour l'électricité, le gaz et le fioul).

Enfin, les objectifs du Grenelle sont associés à l'ensemble du parc résidentiel-tertiaire. En termes d'émissions de CO₂, le parc résidentiel représente 67 %¹³ des émissions du résidentiel-tertiaire. 33 % des émissions issues du

¹⁰ « Habitat Facteur 4 : étude d'une réduction des émissions de CO₂ liées au confort thermique dans l'habitat à horizon 2050 » dans la revue CLIP de l'IDDRI, paru en novembre 2010

¹¹ Source : ADEME / CEREN / Observatoire de l'énergie

¹² Sources : DGEMP 2003 et calage EDF/GDF SUEZ à partir des données du CEREN ; p.27

¹³ Source : CITEPA / inventaire CCNUCC décembre 2008

parc tertiaire ne sont donc pas comptabilisées dans le modèle. Quant au parc social, il n'est pas isolé dans le modèle. Ce dernier représente environ 15 % du parc résidentiel.

Toutefois, la baisse de consommation résidentielle de chauffage reste un indicateur a priori optimiste des potentialités d'atténuation du changement climatique dans le bâtiment. Par conséquent, si les objectifs sont loin d'être réalisés avec ce périmètre restreint, il reste peu de marge pour les atteindre en élargissant le périmètre.

Dans l'étude de l'IDDRI, le périmètre considéré est plus large : le chauffage et l'ECS sont pris en compte, représentant 81 % de la consommation finale des logements en 2006 ; les EnR sont supposées pénétrer très largement le parc aussi bien pour le chauffage (avec notamment le bois et les PAC¹⁴) que pour l'ECS (avec le solaire thermique, le bois et les PAC). La part des EnR (bois, solaire thermique, PAC) dans les consommations finales est très importante dans chacun des scénarios modélisés (de 36 % à 64 % en 2020 suivant les scénarios). Pour autant, le rythme de rénovation nécessaire pour mettre en œuvre tous ces systèmes de chauffage EnR est très élevé, entre 500 000 à 600 000 par an. Ce rythme est loin d'être atteint dans le modèle CIREC, il est même supérieur à ce qui avait été envisagé dans l'évaluation ex ante du Grenelle de l'environnement.

Il faut souligner que l'étude de l'IDDRI s'appuie sur une démarche en grande partie « déductive » : le taux de rénovation, par exemple, est fixé de façon exogène au niveau qui assure que la totalité du parc de logements est rénovée en 2050. Le CIREC s'appuie sur une démarche plus « inductive » : le taux de rénovation est endogène et varie en fonction des déterminants économiques (prix de l'énergie, coûts de rénovation, etc.).

4.2 Le parc de logements sociaux

Le modèle Res-IRF ne représente pas de façon spécifique les logements sociaux. En d'autres termes, le parc social, qui représente 15 % de l'ensemble du parc, évolue de la même manière que le parc privé dans le modèle. Or, il est vraisemblable que le parc social réagisse différemment ; les offices HLM, sociétés d'économie mixte ou communes possédant les logements sociaux peuvent mener des programmes de rénovation, sans rencontrer les mêmes difficultés de mise en œuvre que dans les copropriétés.

L'objectif fixé dans le Grenelle de l'environnement (Comop 2) est la rénovation des 800 000 logements les plus énergivores (classes E, F, G) d'ici 2020, afin de les porter aux performances D. Le « plan bâtiment Grenelle »¹⁵, qui lie l'État, la Caisse des Dépôts et l'Union sociale pour l'habitat à travers des conventions, va plus loin ; l'objectif est d'amener tous les logements sociaux en classe C. Un « éco-prêt logement social » été mis en place pour faciliter le financement de ces opérations.

Sur la base du scénario Grenelle du Comop 2, on estime que les consommations d'énergie primaire dans le parc social diminueraient de 22 kWh/m² en 2020 par rapport à 2008 (hors effet rebond) ; sur la base du « plan bâtiment Grenelle », ces consommations diminueraient de 68 kWh/m² en 2050 par rapport à 2008.

4.3 Les améliorations tendanciennes

Schématiquement, la réhabilitation du parc de logements se fait à travers deux types de rénovations : les rénovations « lourdes » ou « importantes » qui permettent aux logements rénovés de gagner au moins une classe énergétique ; et toutes les autres « petites » rénovations correspondant aux gestes de rénovation courante (changement de chaudière ou de fenêtres par exemple) qui améliorent de façon tendancielle la qualité thermique du parc (sans faire gagner nécessairement une classe énergétique).

Si le premier type de rénovations est bien considéré dans le modèle du CIREC, les « petites » rénovations en sont exclues du fait du choix de modélisation. D'après l'étude OPEN (campagne 2009), la part des rénovations énergétiques ayant la meilleure qualité est de 4 %, celle des rénovations de moins bonne qualité est de 24 % et celle de qualité intermédiaire de 72 %. Ces chiffres ne permettent pas de connaître précisément la part des rénovations « lourdes » mais sous-entendent que leur part est relativement faible au regard de l'ensemble des travaux de rénovation. Cependant, en termes de gains énergétiques, les rénovations « lourdes » ou de qualité représentent une part prépondérante.

¹⁴ Les pompes à chaleur (PAC) sont implicitement représentées dans Res-IRF par un coût d'investissement plus élevé pour la construction de logements BBC chauffés à l'électricité qu'au gaz naturel ou au fioul domestique.

¹⁵ <http://www.plan-batiment.legrenelle-environnement.fr/index.php/g-les-4-secteurs/le-parc-des-logements-sociaux>

Dans le passé, sur la période 1973-2005, la consommation d'énergie finale unitaire pour le chauffage a décliné de 41 % soit, -1,6 % par an. En appliquant ce taux jusqu'en 2050, la consommation unitaire d'énergie finale baisserait de 50 % en 2050 par rapport à 2008. Dans le modèle, qui considère uniquement les rénovations « lourdes », la baisse en situation de référence n'est que de 30 % environ. Cet écart ne reflète toutefois pas seulement la prise en compte des « petites » rénovations, il dépend également du rythme de construction du parc neuf, de sa qualité thermique et de la pénétration des différents vecteurs énergétiques. Par ailleurs, le taux de baisse de -1,6 % / an mesuré dans le passé devrait avoir tendance à diminuer puisque le potentiel pour réaliser de petites rénovations, les plus faciles à entreprendre, devrait décroître.

4.4 Des coûts de rénovation élevés

Pour évaluer la rentabilité des investissements de rénovation, le modèle Res-IRF utilise une matrice de coûts de travaux permettant de passer d'une classe énergétique du DPE à une autre (cf annexe). Cette matrice, construite « à dire d'experts », enregistre des coûts relativement élevés par rapport à la matrice proposée par l'ADEME, dans laquelle les coûts sont moins élevés de 40 à 70 % en moyenne. Il subsiste de grandes incertitudes sur ce point et seul un retour d'expérience sur un grand nombre d'opérations permettrait de fixer cette matrice de façon précise.

La faible mobilisation d'un instrument comme l'éco-PTZ depuis sa mise en place semble toutefois montrer que les opérations de rénovation sont peu rentables pour les ménages (le coût d'investissement est élevé par rapport à l'économie d'énergie accessible) ou, en tous cas, ont des temps de retour longs qui dissuadent de les réaliser dans un contexte d'incertitude sur le prix des énergies.

On souhaite néanmoins évaluer l'impact d'une forte baisse des coûts de rénovation sur les résultats de l'étude CIREC. A défaut de pouvoir modifier la matrice des coûts (il faudrait en même temps refaire le calibrage du modèle), on simule un scénario intégrant une subvention de l'ensemble des travaux à hauteur de 50 %. Les coûts de rénovation ressentis par les ménages sont donc inférieurs de moitié (hors coûts intangibles). Les résultats sont sensiblement plus favorables que dans le scénario de référence, même s'ils n'atteignent pas les objectifs : le nombre de rénovations annuelles dépassent 416 000 en 2020, la baisse des consommations unitaires dans l'existant à l'horizon 2020 est de l'ordre de 10 % et les émissions de CO2 diminuent de 6 % en 2050. Diviser le coût des rénovations par deux conduit à un rythme de rénovation et d'économie d'énergie environ 1,5 fois supérieur à celui du scénario de référence. Cela s'explique par la présence des coûts intangibles qui eux, n'ont pas été modifiés.

	Nombre de rénovations par an dans le parc existant (milliers de logements)		Gains effectifs (avec effet rebond) unitaires d'énergie primaire par rapport à 2008*						Gains totaux théoriques (sans effet rebond) d'énergie finale par rapport à 2008*		Emissions de CO2 par rapport à 1990	
			Unitaires sur le parc existant		Unitaires sur le neuf		Unitaires sur le parc total		Totaux théoriques			
	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050
Objectifs de référence			-38%	-75%								-75%
Ref Scénario de référence	270,6	269,5	-7,1%	-13,2%	-1,8%	-4,1%	-11,7%	-22,1%	-10,7%	-27,4%	4,9%	0,4%
Subvention de 50% de 2009 à 2050	416,8	335,5	-9,8%	-22,6%	-1,8%	-4,1%	-14,0%	-27,9%	-17,7%	-38,1%	0,8%	-6,3%

* Les gains sont négatifs

Tableau 4 : Consommation d'énergie et résultats complémentaires suivant différents scénarios de subvention

4.5 Des prix des énergies qui pourraient croître plus vite

Le scénario de prix de l'énergie, issu du modèle IMACLIM-R du CIRED, est basé sur une évolution modérée des prix à l'horizon 2050 par rapport à d'autres projections récentes, notamment celle de la DGEC réalisée dans le cadre de ses projections 2030¹⁶.

En situation de référence (sans aucune politique énergétique mise en place), avec le scénario de prix des énergies d'IMACLIM-R (« ref_IMACLIM »), les économies d'énergie primaire unitaire sur le parc existant en 2050/2008 sont de 13 % environ ; avec le scénario de prix des énergies de la DGEC (« ref_DGEC »), elles sont de l'ordre de 37 %. Un prix plus élevé rend à la fois les rénovations plus rentables et, surtout, limite l'effet rebond, de la même manière que l'instauration d'une contribution climat énergie (cf. ci-dessous). Un troisième scénario de prix est testé en situation de référence (« ref_mix ») où les prix du gaz et de l'électricité sont ceux de la DGEC et le prix du fioul, celui obtenu par IMACLIM-R, correspondant aux scénarios de prix les plus dynamiques des deux premiers scénarios. Dans ce dernier cas, les économies d'énergie primaire unitaire sur le parc existant sont du même ordre que celles avec le scénario de prix DGEC mais, les émissions de CO2 évitées sont plus importantes : -21 % en 2050 / 1990 contre -13 % avec les prix DGEC. Le prix du fioul plus élevé entraîne des substitutions importantes vers l'électricité ou le gaz, moins émetteurs de CO2 (dans le parc neuf notamment).

	Nombre de rénovations par an dans le parc existant (milliers de logements)		Gains effectifs (avec effet rebond) unitaires d'énergie primaire par rapport à 2008*						Gains totaux théoriques (sans effet rebond) d'énergie finale par rapport à 2008*		Emissions de CO2 par rapport à 1990	
	2020	2050	Unitaires sur le parc existant		Unitaires sur le neuf		Unitaires sur le parc total		Totaux théoriques		2020	2050
			2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050		
<i>Objectifs de référence</i>			-38%	-75%								-75%
Ref_IMACLIM	270,6	269,5	-7,1%	-13,2%	-1,8%	-4,1%	-11,7%	-22,1%	-10,7%	-27,4%	4,9%	0,4%
Ref_DGEC	283,1	294,5	-11,8%	-36,9%	-0,4%	-21,6%	-15,0%	-40,4%	-8,6%	-25,5%	10,7%	-12,5%
Ref_mixe	276,5	284,8	-14,4%	-36,2%	-5,8%	-23,8%	-18,2%	-41,3%	-10,7%	-28,1%	0,3%	-20,8%

* Les gains sont négatifs

Tableau 5 : Consommation d'énergie et résultats complémentaires en scénario de référence avec deux séries de prix des énergies différentes

¹⁶ La comparaison détaillée est présentée en annexe ; les prix sont donnés en 2007 et ainsi que la croissance projetée entre 2007 et 2050 (entre parenthèses figurent les hypothèses IMACLIM-R) :

- électricité : 0,114 €/kWh en 2007 ; +51 % entre 2007 et 2050 (0,120 €/kWh ; -16 %)
- gaz : 0,052 €/kWh ; +87 % (0,050 €/kWh ; +19 %)
- fioul : 0,065 €/kWh ; +38 % (0,106 €/kWh ; +52 %)

Les parts des différentes énergies de chauffage (en énergie finale) sont en 2005 de 33 % pour le fioul, 54 % pour le gaz et 12 % pour l'électricité.

4.6 La modélisation des instruments incitatifs

L'analyse montre que la modélisation des outils incitatifs tels que l'éco-PTZ, le CIDD et la taxe carbone utilisée dans Res-IRF semble relativement pertinente.

Le CIDD, existant depuis 2005, est représenté sous forme de subvention dans le modèle (réduction de 30 %¹⁷ des coûts de rénovation vers une classe supérieure, plafonnée à 8 000 €). Son paramétrage correspond à l'année 2008 et ne peut prendre en compte les évolutions constantes du CIDD (évolutions quant aux équipements éligibles au CIDD et aux taux de crédit par équipement). Aussi, le modèle ne permet pas de réaliser une analyse détaillée du dispositif, ni par équipement, ni dans le temps. L'exemple du nombre de rénovations illustre ce fait. D'après le modèle, le CIDD entraînerait près de 95 000 rénovations supplémentaires par an (pour un total de l'ordre de 350 000/an) ; dans la réalité, le CIDD a permis de réaliser un million de travaux en 2005 et jusqu'à 1,7 millions en 2008, dont une partie aurait été réalisée sans le dispositif¹⁸ (effet d'aubaine). La représentation du dispositif reste toutefois pertinente dans une approche d'ensemble puisque les dépenses fiscales obtenues avec le modèle (environ 2 milliards d'euros par an) sont du même ordre que celles enregistrées dans les premières années de mise en place du CIDD ; le modèle agrège en quelque sorte les différents gestes de rénovation financés par le CIDD dans des bouquets de travaux de plus grande envergure susceptibles d'entraîner au moins un saut de classe de DPE (cf. 4.3).

L'éco-PTZ est également représenté dans Res-IRF comme une subvention au coût de rénovation (subvention égale au montant des intérêts d'un prêt conventionnel de 10 ans à 4 % soit environ 20 % du montant des travaux). Cet outil, mis en place en 2009 pour compléter le CIDD, avait pour principal objectif de desserrer la contrainte de financement des ménages ; le subventionnement du coût des travaux ne venait qu'en deuxième objectif. Toutefois, l'expérience montre que les établissements de crédit responsables des dossiers considèrent l'éco-PTZ comme un prêt classique ; ils considèrent que les baisses de factures énergétiques générées par les travaux de rénovation ne sont pas suffisantes pour garantir à elles seules le remboursement du prêt. De plus, le montage d'un dossier éco-PTZ semble représenter une contrainte aussi bien du côté de l'offre (les établissements de crédit estiment que les contrôles de dossier représentent des difficultés techniques et du temps passé qu'ils estiment insuffisamment rémunérés) que de la demande (plutôt que de fournir l'ensemble des justificatifs, les ménages préfèrent parfois utiliser un prêt classique, dans un contexte où les taux de crédit sont relativement bas). Finalement, la représentation de l'éco-PTZ sous forme de subvention semble relativement pertinente. D'ailleurs, le modèle évalue que l'éco-PTZ génère environ 70 000 rénovations supplémentaires par an, ce qui est cohérent avec le rythme constaté en 2009 (95 000) et 2010 (75 000).

Des travaux d'évaluation portant sur ces deux instruments sont en cours, ils pourraient fournir des éléments complémentaires pour leur modélisation et leur calibrage.

La CCE, ou taxe carbone, est représentée dans Res-IRF comme une taxe pesant sur le prix des énergies fossiles, avec un niveau conforme aux recommandations du rapport Quinet : la valeur du carbone atteint 217 €/tCO₂ en 2050. Par ailleurs, la taxe est parfaitement anticipée par les ménages. Ce paramétrage semble approprié pour représenter la CCE. Les analyses ci-dessus ont montré que la taxe carbone agit principalement sur les comportements des ménages. Si elle ne permet pas d'augmenter fortement le nombre de rénovations, elle contribue à limiter la consommation d'énergie en augmentant leur prix. En situation de référence, les élasticité de consommation unitaire au prix des énergies, qui ressortent du modèle, sont comprises entre -0,5 et -0,6¹⁹ à long terme. Ces élasticité semblent relativement élevées par rapport à ce que l'on trouve dans la littérature. Dans une étude récente du CGDD, « Modélisation économétrique des consommations de chauffage des logements en France »²⁰, les élasticité à long terme au prix de l'énergie sont comprises entre -0,2 et -0,3 toutes énergies confondues et sont dans une fourchette de -0,4 à -0,7 pour l'électricité. Ces élasticité élevées qui résulte du modèle Res-IRF expliquent pourquoi les outils agissant sur le prix des énergies, tels que la CCE (ou des prix d'énergie plus élevés), sont efficaces ; leurs effets pourraient être surestimés.

Quant à la mise en œuvre des réglementations thermiques futures, RT2012-2020, le modèle considère que les consommations réelles sont conformes aux consommations théoriques. L'expérience montre qu'il faut toujours

¹⁷ En 2008, le dispositif a bénéficié à 1,6 millions de foyers pour un taux de subvention équivalent à 32 % (INSEE 2010)

¹⁸ D'après l'analyse des résultats de l'enquête 2009 de l'Observatoire permanent de l'amélioration énergétique des logements (OPEN), 21 % des ménages ayant bénéficié du crédit d'impôt considéraient qu'ils n'auraient pas effectué de travaux en l'absence de cette aide.

¹⁹ Une élasticité de consommation unitaire d'énergie finale au prix de -0,5 signifie qu'une augmentation du prix de l'énergie de 10 % réduit la consommation de 5 %.

²⁰ Études & documents : « Modélisation économétrique des consommations de chauffage des logements en France », P. Têtu, L. Penot-Antoniou ; publié en mai 2010 par le CGDD

quelques années d'apprentissage pour que les bâtiments respectent réellement les normes ; seul un suivi de la mise en place de ces normes et de ces bâtiments permettra de bien calibrer la consommation réelle par rapport à la consommation théorique.

4.7 Comportement de chauffage et effet rebond

L'étude du CIREN modélise de façon endogène les comportements des ménages, aussi bien dans leurs choix d'investissement que dans leurs comportements de chauffage, ce qui constitue une originalité très intéressante du modèle. Cela permet en particulier de mesurer l'effet rebond associé aux rénovations.

L'effet rebond mesuré dans le modèle correspond à l'évolution du ratio entre la consommation réelle de chauffage des logements et la consommation d'énergie finale théoriquement nécessaire au chauffage. Suivant les scénarios, il évolue dans une fourchette de 5 % à 50 %²¹, ce qui signifie concrètement que 5 % à 55 % des économies d'énergie théoriques réalisées par des investissements d'efficacité énergétique (rénovations et constructions neuves) sont effacées par les comportements de chauffage (amélioration du confort). Les auteurs de l'IDDRI confirment dans leur étude « Facteur 4 » que l'introduction d'un effet rebond dans leur modèle pourrait effacer une part importante des économies d'énergie assurées par la réhabilitation du parc existant ; ils citent une fourchette de 20 à 30 %, sans pour autant apporter de justification quantitative (Sorrel et al., 2009).

Ceci étant, il convient de noter que loin d'être une pure perte, l'effet rebond correspond à une augmentation du confort, en particulier pour les ménages, en général modestes qui étaient contraints de restreindre leur consommation et de maintenir la température de leur logement en dessous de la référence de 19°C. Cette moindre efficacité des instruments sur le volet environnemental est donc associée à un impact positif dans le domaine social, dans une certaine mesure.

4.8 L'adaptation au changement climatique n'est pas prise en compte

Toutes les évaluations sont réalisées à climat constant. Or, le réchauffement climatique devrait modifier, à l'horizon 2050, les besoins de chauffage à la baisse (et les besoins de climatisation à la hausse).

D'après M. Isaac et D. P. van Vuuren dans « Modeling global residual residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change », avec une technologie qui progresse dans le temps mais sans marquer de rupture, la demande d'énergie de chauffage en Europe devrait diminuer de 25 % de 2000 à 2050 suite au réchauffement climatique. *A contrario*, la demande d'énergie pour le refroidissement (climatisation) devrait augmenter de 261 % sur la même période²². En moyenne, la demande d'énergie pour le chauffage, nette des effets de hausse de climatisation, représente une baisse potentielle de 6 % de demande d'énergie finale en 2020 par rapport à 2010 et de 24 % en 2050 par rapport à 2010. L'intégration mécanique de cette baisse abaisserait de l'ordre de 25 % les consommations de chauffage et les émissions de CO₂ associées.

Le changement climatique représente indéniablement un « potentiel d'économie » supplémentaire; toutefois il augmente les besoins de climatisation, relativement mal connus en Europe, et réduit la rentabilité potentielle des investissements d'efficacité énergétique dans les bâtiments.

4.9 D'autres politiques énergétiques non prises en compte

Seules certaines mesures existantes sont étudiées dans le modèle. D'autres incitations telles que l'introduction de règles permettant de partager les charges entre bailleurs et locataires ou la réglementation thermique dans l'existant, etc, ne sont pas prises en compte. Elles pourraient avoir des effets supplémentaires en termes de nombre de rénovations et d'efficacité des rénovations et par conséquent, d'économies d'énergies. La difficulté rencontrée dans les copropriétés (30 % du total des logements) pour réaliser des travaux est également un

²¹ Fourchette de l'effet rebond calculée à horizon 2050. La valeur basse de la fourchette est enregistrée dans le cas de la mise en place d'une CCE ; la valeur haute est relevée avec la mise en place de l'OR.

²² D'après cette étude, en moyenne de 1971 à 1991, le nombre de degrés jours liés au chauffage et au refroidissement étaient respectivement de 2 924 et 127 en Europe. En 2100, ils devraient atteindre des valeurs de 1 880 et 419.

élément important qu'il faudrait pouvoir considérer et adresser avec des outils appropriés. Ces difficultés sont prises en compte dans le modèle Res-IRF via les taux d'actualisation différenciés.

5. Estimation de l'impact des facteurs complémentaires

La prise en compte de facteurs complémentaires permettrait, on l'a dit, d'améliorer les résultats obtenus par le CIRED avec le modèle Res-IRF. L'exercice qui suit tente de quantifier ces impacts en termes de consommations unitaires d'énergie finale et d'émissions de CO₂.

Dans un premier temps, les facteurs additionnels (rénovations dans les logements sociaux, rénovations tendanciennes, prix des rénovations plus faibles -de 50 %-, introduction du bois, prix des énergies plus élevés -scénario mixte du 4.5²³-, réchauffement climatique) sont considérés de manière isolée. Dans un second temps, ils sont cumulés suivant différentes associations.

Le premier regroupement, « Total 1 » dans le tableau 6 ci-dessous, cumule les actions sur le bâti (rénovations du parc social, rénovations tendanciennes, prix des rénovations plus faibles et forte pénétration du bois) aux mesures existantes.

« Total 2 » ajoute aux effets du premier groupe (« Total 1 ») ceux liés au comportement de chauffage (prix des énergies plus élevés qui serait équivalent à la mise en place d'une CCE) .

« Total 3 » ajoute à tous ces effets (« Total 2 ») celui du changement climatique.

L'introduction du bois n'a pas d'impact en termes d'énergie finale consommée, en revanche il permettrait d'éviter l'émission de 9 millions de tonnes de CO₂ à horizon 2050²⁴. Cet effet est intégré dans chacun des trois scénarios de cumul en termes d'émissions de CO₂.

²³ Scénario « mix » des prix de l'énergie : les prix sont donnés en 2007 et ainsi que la croissance projetée entre 2007 et 2050 :

- électricité : 0,114 €/kWh en 2007 ; +51 % entre 2007 et 2050
- gaz : 0,052 €/kWh ; +87 %
- fioul : 0,106 €/kWh ; +52 %

²⁴ Cette estimation de 9 MtCO₂ évitées en 2050 est calculée sur la base du scénario « Bois/Gaz/Elec » de l'IDDRI où la part du bois est la plus grande en 2050 par rapport aux autres scénarios (+41,1 TWh ef en 2050 / 2005). Elle semble tout à fait compatible avec les orientations de la PPI chaleur qui prévoit une augmentation de la pénétration de la biomasse dans le résidentiel-tertiaire de +4,2 Mtep en 2020 / 2006 (soit environ 50 TWh supplémentaires par rapport à 2006).

		Consommation réelle unitaire d'énergie finale sur le parc total (kWh / m²)	Economie d'énergie finale réelle unitaire par rapport au scénario de référence (kWh / m²)	Economie d'énergie finale réelle unitaire par rapport au scénario AME (kWh / m²)	Emissions totales de CO2 (MtCO2)	Variation des émissions de CO2 par rapport à 1990
2008	Référence	104,6	-	-	60,5	-
	<i>Objectifs</i>	55	-	-	-	-
	Référence	89	-	-	58	5%
	AME (CIDD + ECOPTZ + RT)	83	-6	-	54	-3%
	Rénovations dans les logements sociaux	87	-2	-2	55	-1%
	Rénovations tendanciennes	83	-6	-6	54	-2%
	Prix des rénovations plus faible	86	-3	-3	56	2%
	Prix des énergies plus élevé ~ CCE	85	-4	-4	55	0%
	Changement climatique	83	-6	-5	58	5%
2020	Bois	89	0	0	53	-4%
	Total 1 (actions sur le bâti: AME + Réno. tendanciennes + Prix des réno. plus faible + Réno. dans les logements sociaux)	72	-17	-11	43	-23%
	Total 2 (Total 1+ actions sur le comportement de chauffage: CEE)	69	-20	-14	40	-27%
	Total 3 (Total 2+ prise en compte du changement climatique)	64	-25	-19	38	-32%
	<i>Objectifs</i>	-	-	-	14	-75%
	Référence	73	-	-	55	0%
	AME (CIDD + ECOPTZ + RT)	55	-18	-	42	-25%
	Rénovations dans les logements sociaux	69	-4	-4	52	-6%
	Rénovations tendanciennes	56	-18	-18	42	-24%
	Prix des rénovations plus faible	68	-5	-5	52	-6%
	Prix des énergies plus élevé ~ CCE	57	-16	-12	43	-22%
	Changement climatique	55	-18	-13	42	-24%
2050	Bois	73	0	0	46	-16%
	Total 1 (actions sur le bâti: AME + Réno. tendanciennes + Prix des réno. plus faible + Réno. dans les logements sociaux)	28	-45	-27	12	-78%
	Total 2 (Total 1+ actions sur le comportement de chauffage: CEE)	22	-51	-33	7	-87%
	Total 3 (Total 2+ prise en compte du changement climatique)	16	-57	-39	3	-94%

Tableau 6 : Comparaison des consommations unitaires d'énergie finale dans différents scénarios

Note de lecture :

Les lignes « objectifs » correspondent aux objectifs à atteindre :

- « Grenelle -38 % » : l'objectif de 38 % d'économie d'énergie primaire en 2020/2008 sur le parc existant se traduit, sur la base d'un scénario AME intégrant les RT2012 et RT2020, par une consommation unitaire d'énergie finale de 55 kWh/m² en 2020.
- « Facteur 4 » : l'objectif d'une baisse de 75 % d'émissions de CO2 en 2050/1990 correspond à une émission de 14 MtCO2 en 2050.

En situation de référence, sans aucune politique énergétique mise en œuvre, la consommation unitaire d'énergie finale sur l'ensemble du parc est de 73 kWh/m² en 2050 ; les émissions de CO2 sont de 55 millions de tonnes de CO2. A l'horizon 2050, le changement climatique (modélisé par une baisse de -25 % des besoins de chauffage à horizon 2050) entraînerait une baisse de 18 kWh/m² de la consommation unitaire d'énergie finale par rapport au scénario de référence pour atteindre un niveau de 55 kWh/m² (baisse de 13 kWh/m² par rapport au scénario AME). Les émissions de CO2 seraient de 42 millions de tonnes de CO2 en 2050 ce qui correspond à une baisse des émissions de 24 % par rapport aux émissions de 1990.

A l'horizon 2020, les actions sur le bâti (scénario AME complété par les rénovations tendanciennes, les rénovations dans le parc social, un prix des rénovations plus faibles et l'introduction du bois) peuvent avoir un impact sensible en termes d'économie d'énergie finale et permettraient d'approcher l'objectif « Grenelle -38 % » : 58 kWh/m² d'énergie finale soit 3 kWh/m² de plus par rapport à l'objectif. Cependant, le cumul des effets de ces mesures est discutable. Il est par exemple possible que le surcroît de rénovations suscité par les prix de travaux plus faibles soient partiellement inclus dans les rénovations « tendanciennes » ou dans les rénovations du parc social. L'introduction d'un prix des énergies plus élevé (CCE) semble indispensable pour que l'objectif « Grenelle -38 % » soit atteint en 2020. Il semble raisonnable d'ajouter l'effet de la CCE à ceux sur le bâti car celle-ci agit essentiellement sur le comportement de chauffage comme un effet de contrainte additionnelle.

A horizon 2050, les actions sur le bâti permettent d'atteindre le « facteur 4 » puisque les émissions seraient ramenées à 12 Mt CO₂. Comme discuté plus haut, le cumul de ces effets n'est toutefois pas totalement assuré. Compléter les actions sur le bâti avec un prix des énergies plus élevé (action sur le comportement de chauffage) conduirait à dépasser l'objectif « facteur 4 » : -87 % d'émissions de CO₂ en 2050/1990. Il est vraisemblable néanmoins que si les logements atteignent de telles performances énergétiques, l'effet d'une taxe carbone sur le comportement de chauffage joue moins. Enfin, l'ensemble combinant tous les facteurs complémentaires (actions sur le bâti, actions sur le comportement de chauffage et prise en compte du changement climatique) conduirait à dépasser largement l'objectif. Concernant les économies d'énergies escomptées grâce au changement climatique, il est fort possible qu'elles ne s'ajoutent pas entièrement aux actions sur le bâti et sur celles de la CCE ; l'effet rebond pourrait en effet réduire les gains attendus ; le moindre besoin de chauffage ne réduirait pas la consommation de chauffage et le confort serait augmenté.

Si cet exercice d'évaluation reste théorique, il donne des ordres de grandeur des impacts des facteurs complémentaires au modèle et permet d'espérer l'atteinte des objectifs du Grenelle à horizon 2050 à condition que les mesures correspondantes soient bien mises en place (CCE, rénovations du parc social, soutien à la biomasse, etc.).

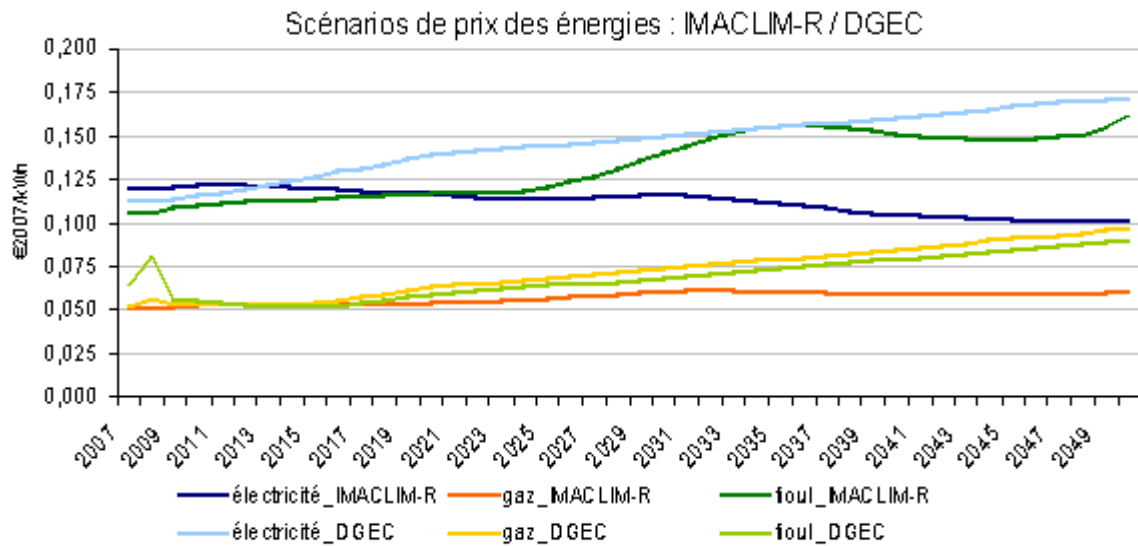
6. Conclusion : les résultats de l'étude sont robustes

Au-delà des résultats précis de l'étude, la principale conclusion à retenir tient à ce que les objectifs ambitieux de la France en matière d'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel-tertiaire ne pourront vraisemblablement être atteints que par la mobilisation de l'ensemble des leviers disponibles. Même dans ce secteur où les coûts d'abattement sont réputés faibles, des incitations fortes semblent nécessaires pour stimuler l'investissement et modifier les comportements à un niveau suffisant, notamment pour contrecarrer l'effet rebond qui a été négligé dans la plupart des études antérieures.

Même s'ils obtiennent des résultats plus optimistes, les auteurs de l'étude de l'IDDRI estiment également, mais suivant un raisonnement déductif, nécessaire de tenir un rythme soutenu de réhabilitation de 500 à 600 000 logements par an (au-dessus du rythme préconisé dans le Grenelle) et de mettre en œuvre de manière systématique des bouquets de mesures techniquement envisageables. Ils insistent sur l'importance d'opérations programmées à large échelle, allant au-delà des instruments incitatifs actuellement disponibles, qui ont plutôt vocation à favoriser les opérations individuelles et laissent à l'écart, de fait, une part importante du parc.

Enfin, cette étude, si elle permet de faire des progrès sensibles dans la modélisation du comportement des ménages, appelle des approfondissements dans la connaissance statistique (coûts de rénovation, description fine des caractéristiques énergétiques du parc et des caractéristiques des habitants) et dans la compréhension de certains phénomènes (comportement de chauffage des ménages, impact du changement climatique).

7. Annexe



Graphique 4 : comparaison des projections de prix des énergies de IMACLIM-R et de la DGEC

Classe énergétique d'arrivée

		F	E	D	C	B	A
Classe énergétique de départ	G	50	150	300	500	750	1 050
	F		110	260	460	710	1 010
	E			170	370	620	920
	D				230	480	780
	C					290	590
	B						350
	A						

Tableau 7 : Matrice des coûts de transition (€/m²)



DEUXIEME PARTIE : Rapport du CIRED

Evaluation des mesures du Grenelle de l'environnement sur le parc de logements français

Impact des mesures existantes et supplémentaires sur la consommation de chauffage

Rapport pour le Commissariat général au développement durable

Version définitive, 1^{er} novembre 2010

Objet de l'étude

Cette étude a été réalisée par le Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED) pour le compte du Commissariat général au développement durable (CGDD). Elle a été conduite par Louis-Gaëtan Giraudet, Céline Guivarch et Philippe Quirion (CIRED) et dirigée par Jean-Jacques Becker, Olivier Teissier et Lucile Penot-Antoniou (CGDD).

Les auteurs remercient Benoît Allibe et Marie-Hélène Laurent d'EDF R&D pour leur appui dans la modélisation des comportements de consommation, Linda Aliane, Alain Bernard, Domitille Bonnefoi, Guillaume Coron et Jean-Marc Moulinier du Ministère de l'écologie, du développement durable, des Transport et du Logement (MEDDTL), Eric Lagandré de l'Agence nationale de l'habitat (ANAH) et Christophe Cassen, Dominique Finon, Stéphane Hallegatte et Vincent Viguié du CIRED pour leurs commentaires sur une version précédente de ce rapport.

Les résultats et analyses présentés dans cette version finale n'engagent que les auteurs.

Résumé

Le gouvernement français a fixé l'objectif de diviser par quatre des émissions de CO₂ domestiques en 2050 par rapport à leur niveau de 1990 et l'objectif « Grenelle -38 % » de réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments existants de 38 % en 2020 par rapport à 2008. Pour atteindre ces objectifs dans le secteur résidentiel, qui représente les deux tiers de la consommation d'énergie du bâtiment, le crédit d'impôt développement durable (CIDD) pour l'achat de biens efficaces en énergie et l'éco-prêt à taux zéro (EcoPTZ) pour la rénovation énergétique ont été mis en œuvre, tandis que la réglementation thermique a été fixée à des niveaux ambitieux pour 2012 et 2020 (RT2012-2020). Des mesures supplémentaires, comme une obligation de rénovation (OR), ont été discutées dans les comités opérationnels du Grenelle de l'environnement. Enfin, la mise en place d'une taxe carbone ou contribution climat-énergie (CCE), qui paraît compromise à court terme, continue à être considérée par certaines parties prenantes.

La présente étude analyse l'impact de ces politiques sur la consommation d'énergie pour le chauffage (hors bois et réseaux de chaleur), qui représente deux tiers de la demande d'énergie dans les logements, et les émissions de CO₂ associées. Elle utilise un modèle hybride énergie-économie qui intègre des caractéristiques propres au problème de la maîtrise de la demande d'énergie (MDE), en particulier l'effet rebond (i.e. une amélioration du niveau de confort concomitante à une hausse des performances énergétiques) et certaines barrières à l'efficacité énergétique telles que l'information imparfaite ou le « dilemme propriétaire-locataire ».

Une première comparaison des politiques prises séparément montre que si toutes permettent d'améliorer l'efficacité énergétique du parc résidentiel, seule la taxe carbone limite l'effet rebond, obtenant ainsi les meilleures performances de MDE. Dans un second temps, l'évaluation de différentes combinaisons de mesures existantes (CIDD, EcoPTZ et RT2012-2020) et supplémentaires (OR et CCE à 32 €/tCO₂ en 2010) montre que certains instruments peuvent avoir des effets légèrement sur-additifs, notamment l'obligation de rénovation et la taxe carbone. Toutefois, la combinaison la plus exhaustive des politiques étudiées ne permet pas d'atteindre les objectifs nationaux sur le périmètre du chauffage résidentiel. Par conséquent, des politiques plus ambitieuses sont modélisées dans une étape finale.

L'étude conclut aux recommandations suivantes :

1. *Maintenir jusqu'en 2020 au moins les mesures existantes (CIDD et EcoPTZ) et mettre en œuvre rapidement des mesures supplémentaires*
2. *Fixer les mesures supplémentaires à des niveaux suffisamment ambitieux pour assurer des synergies au sein de la politique globale de MDE*
3. *Compléter cette politique visant principalement l'efficacité énergétique par des mesures encourageant la sobriété des comportements de consommation d'énergie*

Au-delà de ces recommandations, l'étude plaide également pour approfondir les évaluations, aussi bien ex-ante que ex-post, afin d'améliorer la connaissance des mécanismes en jeu et le pilotage des politiques de MDE.

Introduction

Le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) identifie le bâtiment résidentiel et tertiaire comme le secteur représentant le plus fort potentiel d'atténuation du changement climatique au niveau mondial (GIEC, 2007, p. 16). Appliqué aux bâtiments français, qui concentrent 43 % de la consommation d'énergie finale et 23 % des émissions de CO₂ en 2007, ce constat ouvre d'importantes perspectives de lutte contre le changement climatique. Il fut largement repris lors des consultations collectives du Grenelle de l'environnement, qui aboutirent à fixer l'objectif législatif de réduire la consommation d'énergie des bâtiments existants de 38 % d'ici 2020 (loi Grenelle 1²⁵, article 5).

Outre sa contribution à la lutte contre le changement climatique, la réduction de la consommation d'énergie peut accroître le pouvoir d'achat des ménages et renforcer l'indépendance énergétique nationale. Pourtant, les décisions privées des consommateurs d'énergie ne permettent généralement pas de maximiser ces bénéfices collectifs. On observe un sous-investissement dans les technologies efficaces en énergie, en dépit d'une rentabilité de long terme établie par les critères usuels du calcul économique. L'existence d'un tel « potentiel sans regret » (ou *energy efficiency gap*) est liée à des dysfonctionnements des marchés de l'efficacité énergétique (information imparfaite sur les performances des équipements, incitations contradictoires entre propriétaire et locataire d'un même logement, *etc.*) et à des déviations par rapport à la rationalité parfaite postulée dans le modèle microéconomique de base (anticipations myopes des prix des énergies, rationalité limitée, *etc.*) (Quirion, 2004 ; Ben Jelloul, 2010). A ces problèmes d'efficacité énergétique, qui portent sur les décisions d'investissement, s'ajoutent des problèmes de *sobriété*, portant sur les comportements d'utilisation des technologies consommatrices d'énergie. En particulier, l'amélioration de la performance énergétique du bâtiment s'accompagne souvent d'une utilisation accrue de l'infrastructure de chauffage. Il n'est pas rare, par exemple, qu'un occupant augmente la température intérieure de son logement à la suite de travaux d'isolation. L'écart qui en résulte entre les économies d'énergie réelles et les économies théoriquement réalisables dans l'hypothèse d'une utilisation de l'infrastructure inchangée est qualifié d'« effet rebond ».

La mobilisation du potentiel sans regret et l'atténuation de l'effet rebond appellent une politique intégrée de maîtrise de la demande d'énergie (MDE), qui promeut à la fois l'efficacité et la sobriété énergétiques²⁶ (Laponche, 2002 ; Negawatt, 2005). Historiquement, l'effort consacré à la MDE a été largement proportionné au prix des énergies (Martin *et al.*, 1998 ; Leray et de La Roncière, 2002). En réponse au premier choc pétrolier, une réglementation thermique pour les constructions neuves et un crédit d'impôt pour l'achat de biens efficaces en énergie sont mis en place pour encourager l'efficacité énergétique, tandis que l'application de l'heure d'été vise la sobriété des comportements. A partir du contre-choc pétrolier de 1986, le faible prix du pétrole détourne l'action publique de son objectif d'allègement de la facture énergétique. La MDE est délaissée, comme l'illustre la réorientation du crédit d'impôt vers les mesures de réhabilitation lourdes, sans garantie d'économies d'énergie, davantage destinée à soutenir la filière du bâtiment. L'émergence de la question climatique au cours des années 2000 apporte une justification nouvelle à la MDE et amorce une relance que l'on peut supposer durable et déconnectée des aléas de court terme du prix du pétrole.

Dans la poursuite des travaux des comités opérationnels du Grenelle de l'environnement, des mesures importantes sont mises en œuvre à partir de 2009 dans le domaine résidentiel, où sont consommés les deux tiers de l'énergie du secteur du bâtiment. Le crédit d'impôt est réévalué et la réglementation thermique fixe des niveaux de performance énergétique ambitieux pour les constructions neuves à partir de 2012²⁷ et 2020. Ces instruments traditionnels sont complétés par un éco-prêt à taux zéro pour la rénovation des logements. D'autres mesures innovantes sont évoquées pour une mise en œuvre plus tardive et incertaine. Si le principe d'une obligation de rénovation préconisé par le comité opérationnel n'a pas encore été repris, celui d'une taxe carbone, décidé par le Président de la République²⁸, paraît aujourd'hui abandonné, à la suite de l'annulation par le Conseil constitutionnel du projet de loi de finances voté par le Parlement.

²⁵ Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement

²⁶ La substitution d'énergies fossiles par des énergies renouvelables est un outil supplémentaire de MDE, non abordé ici.

²⁷ Ces travaux sont antérieurs à la parution du décret n° 2010-1269 du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions, qui fixe l'entrée en vigueur de la réglementation dans les bâtiments d'habitation au 1^{er} janvier 2013.

²⁸ Discours de M. le Président de la République à l'occasion de la restitution des conclusions du Grenelle de l'Environnement, Palais de l'Elysée, Jeudi 25 Octobre 2007

L'objectif de la présente étude est d'évaluer l'efficacité des principales mesures existantes (crédit d'impôt, éco-prêt à taux zéro, réglementation thermique 2012-2020) et supplémentaires (obligation de rénovation, taxe carbone) au regard de l'objectif « Grenelle -38 % » d'une réduction de la consommation d'énergie des bâtiments existants de 38 % d'ici 2020 et l'objectif plus général « Facteur 4 » d'une division par quatre des émissions de gaz à effet de serre (GES) en France en 2050 par rapport à leur niveau de 1990, fixé par la loi POPE²⁹. Cette visée prospective est précédée d'une visée théorique. En présence d'instruments nouveaux, et compte tenu des difficultés à évaluer les politiques de MDE passées (Martin *et al.*, 1998), les développements préliminaires de l'étude cherchent à expliciter les mécanismes d'action des différents instruments de MDE et les effets d'interaction qui peuvent se produire lorsqu'ils sont mis en place simultanément.

Cette étude se concentre sur la consommation de chauffage, qui représente les deux tiers de l'énergie consommée dans le logement et qui est le principal usage impacté par les politiques de MDE. Les résultats sont fondés sur des simulations réalisées à l'aide du modèle Res-IRF³⁰, conçu pour intégrer les déterminants technologiques et économiques propres à la consommation résidentielle d'énergie, en lien avec le modèle d'équilibre général IMACLIM-R développé au CIRED.

Le rapport d'étude est organisé de la façon suivante. Le chapitre 1 rappelle le contexte actuel et passé de la MDE. Le chapitre 2 présente les grandes lignes du modèle Res-IRF et discute la projection de référence. Le chapitre 3 analyse les simulations au cas par cas des différents instruments de MDE. Le chapitre 4 compare l'efficacité de différents bouquets de mesures existantes et supplémentaires. Le chapitre 5 discute ces résultats et l'apport potentiel d'autres mesures. En conclusion figurent des recommandations d'action publique pour la MDE.

1. La maîtrise de la demande d'énergie dans le bâtiment résidentiel : tendances passées et enjeux futurs

1.1 Impact des mesures de MDE de 1974 aux années 2000

Mise en place à partir de 1974, la MDE est véritablement élevée au rang de politique intégrée en 1982, au plus fort du deuxième choc pétrolier, avant de tomber dans l'oubli après 1986 et la détente des marchés du pétrole (Leray et de La Roncière, 2002). Sur l'ensemble de cette période, la dépense publique consacrée aux économies d'énergie est nettement corrélée au prix du pétrole brut importé (Martin *et al.*, 1998, p.22). L'attention fluctuante portée par les pouvoirs publics à la MDE a-t-elle permis de générer des économies par rapport à la tendance spontanée de la consommation résidentielle d'énergie ?

1.1.1 Une décroissance continue de la consommation unitaire de chauffage

Entre 1973 et 1993, la consommation d'énergie finale des résidences principales a diminué de 2,9 %, malgré une croissance du parc de 33 % en nombre de logements et de 49 % en superficie. Si les usages spécifiques de l'électricité ont progressé plus vite que le parc (126 %), les consommations d'énergie pour l'eau chaude sanitaire et la cuisson ont progressé de manière quasi-similaire au parc (53 % et 46 %), tandis que la consommation d'énergie pour le chauffage a baissé de 14 %. Entre 1973 et 1993, la décroissance de la consommation unitaire (par m²) d'énergie pour le chauffage est de 31 % dans les logements « anciens » construits avant 1975 et de près de 50 % dans le cas des logements construits après cette date par rapport à la consommation moyenne de 1973 (Martin *et al.*, 1998, p.208-212).

Malgré une stagnation, voire une décroissance du prix moyen de l'énergie, la consommation unitaire d'énergie finale pour le chauffage continue à décroître après 1993. A cette tendance est associée une forte pénétration du gaz naturel et de l'électricité au détriment du fioul et du charbon (ADEME, 2008, p.45). Sur la période 1973-2005, la décroissance de la consommation unitaire est de 29 % par logement et de 41 % par mètre carré (soit un taux annuel d'environ 2 %). Elle est particulièrement forte depuis 2001 (Girault, 2008).

²⁹ Loi n°2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique

³⁰ Res-IRF désigne le *module résidentiel d'IMACLIM-R France*. IMACLIM est un modèle d'équilibre général développé au CIRED (Combet *et al.*, 2009). IMACLIM-R est un modèle hybride liant récursivement le modèle IMACLIM à des modules de simulation technologiques (Crassous, 2008 ; Sassi, 2008 ; Guivarch, 2010). La version française d'IMACLIM-R représente la France en économie ouverte.

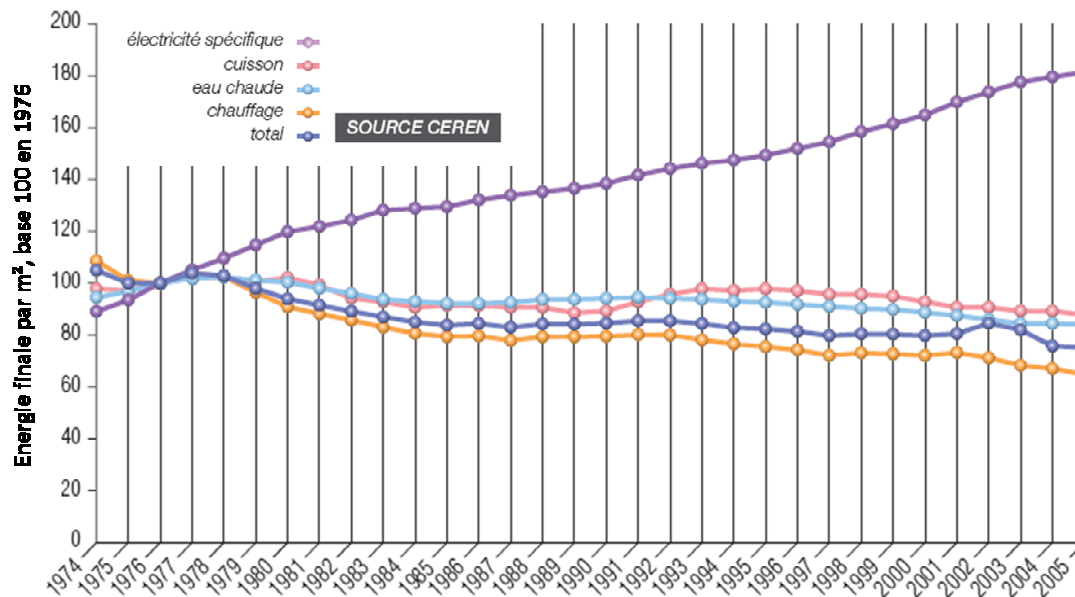


Figure 1 : Evolution passée de la consommation unitaire d'énergie des logements, par usage (ADEME, 2008)

1.1.2 Une tendance soutenue par la réglementation thermique des bâtiments neufs

Les travaux effectués en 1998 par l'instance d'évaluation de la maîtrise de l'énergie, présidée par Yves Martin, n'ont pas permis de quantifier les économies d'énergie directement attribuables aux mesures mises en place à partir de 1974. Néanmoins, la constance observée dans la réduction de la consommation unitaire de chauffage suggère une dynamique naturelle, déconnectée des dépenses publiques variables consacrées à la MDE. Elle est généralement attribuée au renouvellement du parc par la construction neuve, estimée à 1 % du stock total par an (Traisnel, 2001). Une fraction de ces nouvelles constructions vient compenser la sortie annuelle du parc d'environ 0,3 à 0,4 % des logements existants, principalement par démolition (Allaire *et al.*, 2008). La pénétration annuelle de constructions neuves dans le parc de bâtiments, notamment en substitution de logements existants généralement mal isolés, explique que, rapportée à la surface totale du parc, la consommation d'énergie pour le chauffage décroisse continuellement. Cette évolution est néanmoins conditionnée à un certain niveau de performance énergétique des constructions neuves. En ce sens, on peut considérer que les réglementations thermiques qui se sont succédées en 1974, 1989, 2000 et 2005 ont eu un impact direct sur la consommation d'énergie pour le chauffage.

La réduction de la consommation unitaire de chauffage est également importante dans les logements « anciens », en réponse aux investissements de rénovation et aux changements de comportement. Le crédit d'impôt sur le revenu pour les économies d'énergie a été mis en place dès 1974. Il vise d'abord à encourager l'achat d'équipements économes, l'isolation, les systèmes de contrôle du chauffage et le remplacement de chaudière pour les seuls propriétaires occupants. Souvent modifié, il est fondu en 1987 dans un dispositif qui encourage les « grosses réparations et assimilées ». Davantage destiné à soutenir l'activité du bâtiment, ce changement amoindrit la visée d'économies d'énergie du crédit d'impôt. En 20 ans, le dispositif a bénéficié à 1,3 million de contribuables, pour une dépense fiscale annuelle de 700 millions de francs de 1994 (soit 135 millions d'euros de 2009). Les travaux encouragés ont concerné l'énergie dans 44 % des cas, répartis entre isolation et systèmes de contrôle (12,6 %), chaudières (18,6 %) et fenêtres (12,8 %). L'effet d'aubaine lié au soutien de travaux considérés comme inéluctables est estimé à 40 % par le rapport Martin. En conséquence, s'il n'a pas été possible d'évaluer les économies d'énergie directement imputables aux investissements ayant donné lieu aux crédits d'impôt, l'impact du dispositif est vraisemblablement très modeste.

L'impact d'autres mesures comme les fonds spéciaux grands travaux destinés en priorité au parc social et les aides de l'Agence nationale de l'habitat (ANAH) n'a pas non plus pu être quantifié. La réglementation sur la performance minimale des chaudières est considérée comme un échec, en raison de l'absence d'information et

d'un seuil de performance trop bas. En définitive, seule la réglementation thermique des bâtiments neufs peut être jugée comme une mesure de MDE effective sur la période 1973-1998.

1.2 La nouvelle donne issue du Grenelle de l'environnement

1.2.1 Les années 2000 : la MDE comme réponse à l'enjeu climatique

La signature du Protocole de Kyoto par la France en 1998 et les engagements pris par la suite au niveau européen amènent les pouvoirs publics à reconsidérer la MDE. La relance commence par la réévaluation de la réglementation thermique en 2000 puis en 2005. Le Plan Climat élaboré en 2004 définit l'objectif d'atteindre le « Facteur 4 », qui suppose de réduire les émissions de GES de 75 % en 2050 par rapport à leur niveau de 1990. De nouvelles mesures sont discutées, comme la réorientation du crédit d'impôt en faveur du développement durable et la mise en place des certificats d'économies d'énergie (CEE), qui obligent les fournisseurs d'énergie à réaliser des économies d'énergie, en y associant des mécanismes de marché. Ces mesures et l'objectif « Facteur 4 » sont inscrits dans la loi POPE, qui marque l'entrée en vigueur en 2005 des engagements pris par la France au titre du Protocole de Kyoto.

C'est véritablement lors du Grenelle de l'environnement en 2007 que la MDE est consacrée comme priorité d'action publique dans la lutte contre le changement climatique. La consommation d'énergie dans le bâtiment résidentiel est discutée dans différents comités opérationnels (COMOP) : le COMOP1 « bâtiments neufs publics et privés », présidé par Alain Maugard, le COMOP2 « logements sociaux et rénovation urbaine », présidé par Philippe Van de Maele et le COMOP3 « rénovation des bâtiments existants », présidé par Philippe Pelletier. Un certain nombre de mesures recommandées dans les COMOP sont reprises dans les lois Grenelle 1 et Grenelle 2³¹ et leur application est depuis suivie par les directions techniques du MEDDTL. L'élaboration de mesures supplémentaires est pilotée par le Plan Bâtiment Grenelle, présidé par Philippe Pelletier.

1.2.2 Les objectifs et moyens définis par le Grenelle de l'environnement

Reprenant l'une des conclusions de la table ronde finale, le COMOP3 définit un des objectifs phares du Grenelle de l'environnement, inscrit à l'article 5 de la loi Grenelle 1 :

« L'Etat se fixe comme objectif de réduire les consommations d'énergie du parc des bâtiments existants d'au moins 38 % d'ici à 2020 ».

La loi ne précise pas si l'objectif est défini en énergie primaire ou finale, ni s'il est défini en intensité ou en valeur absolue. Ces lacunes rendent plusieurs interprétations possibles. La plus élémentaire laisse penser que l'objectif s'applique à la consommation *totale* d'énergie *finale* des bâtiments *résidentiels et tertiaires*, existant *lors de la promulgation de la loi*, c'est-à-dire avant 2009. L'interprétation la plus vraisemblable, qui figure dans les documents officiels accompagnant l'article de loi (Pelletier, 2008, p.27 ; Plan Climat, 2009, p.39), favorise plutôt la consommation d'énergie primaire unitaire (par mètre carré). L'objectif « Grenelle -38 % » correspond en réalité à une réduction de la consommation moyenne du parc de bâtiments construits avant 2009 de 240 à 150 kWhep/m²/an, soit un déplacement de la performance énergétique moyenne de la fourchette basse de la classe E (231 à 330 kWhep/m²/an) à la fourchette haute de la classe C (91 à 150 kWhep/m²/an) du diagnostic de performance énergétique (DPE). Les points de passage -12 % en 2012 et -70 à -80 % pour 2050 sont également définis par le COMOP3. Appliqué à la consommation d'énergie finale pour le chauffage dans les logements, l'ordre de grandeur de -38 % est de 1,5 fois la décroissance tendancielle : la prolongation sur 12 années (2008 à 2020) de la consommation unitaire de chauffage correspond à une diminution de 20 à 30 %, selon que l'on se réfère à l'évolution récente (-3,3 % en 2006 par rapport à 2005) ou à la moyenne des 30 dernières années (environ 2 %/an).

Pour atteindre cet objectif, le COMOP3 définit 47 mesures. Seules sont abordées ici les mesures qui ont été modélisées au cours de l'étude. Le renforcement du crédit d'impôt développement durable (CIDD), dont l'éligibilité est étendue aux propriétaires bailleurs, s'accompagne de la mise en place d'un éco-prêt à taux zéro pour la rénovation énergétique des logements (EcoPTZ) par la loi de finances de 2009³². Selon la logique

³¹ Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement

³² Loi n° 2008-1425 du 27 décembre 2008 de finances pour 2009

d'« aider puis contraindre, mesurer et garantir », le COMOP3 recommande l'inscription dans la loi du principe d'une obligation de rénovation, dont les modalités doivent être définies par des études complémentaires. Ce principe n'a finalement pas été inscrit dans la loi Grenelle 1.

Le COMOP1 définit de façon largement consensuelle la nouvelle réglementation thermique, qui fixe la performance énergétique minimale des constructions neuves au niveau « bâtiment basse consommation » (BBC) en 2012 et au niveau « bâtiment à énergie positive (BEPOS) en 2020. Enfin, la mise en place d'une taxe carbone ou « contribution climat énergie » (CCE) est décidée par le Président de la République, qui s'y était engagé en signant le Pacte écologique de Nicolas Hulot en 2007. Inscrite dans le projet de loi de finances de 2009, elle est votée par le Parlement avant d'être annulée par le Conseil constitutionnel, qui juge qu'en exemptant les installations industrielles couvertes par le système communautaire d'échange des quotas d'émissions (SCEQE), au sein duquel les quotas sont attribués gratuitement, elle viole le principe de l'égalité devant l'impôt. Le principe d'une taxe carbone n'a pas été repris depuis par le gouvernement.

2. Res-IRF, un modèle de la performance énergétique du parc de logements français

2.1 Enjeux de modélisation

L'évaluation prospective de ces mesures suppose l'emploi d'un modèle qui intègre les déterminants technologiques et économiques propres à la consommation résidentielle d'énergie. Dans le paysage actuel des modèles de demande d'énergie dans le logement, la description technologique du parc à l'état courant peut atteindre un très bon niveau de détail. En revanche, la prise en compte des processus dynamiques d'évolution des technologies est plus limitée. La description des comportements économiques, quant à elle, se résume en général à des calculs élémentaires d'investissement dans l'efficacité énergétique. Les barrières à l'investissement liées aux imperfections de marché et de comportement sont parfois introduites sous la forme réduite d'un taux d'actualisation élevé, et les effets de sobriété sont la plupart du temps ignorés.

Le modèle Res-IRF a pour vocation de progresser vers une meilleure prise en compte du progrès technologique sur la performance énergétique des logements et des écarts explicites à la rationalité et l'information parfaites postulées dans le modèle économique de base. Pour ce faire, il est construit selon une architecture flexible de simulation *bottom-up*, qui permet d'incorporer avec une grande simplicité des processus empiriques assis sur des données d'origine diverse (travaux académiques, ingénierie, dires d'expert, etc.) et le plus souvent incomplètes. Trois éléments distinctifs président à son développement :

- Les comportements de sobriété énergétique sont nettement séparés des décisions portant sur l'efficacité énergétique du logement. Cette distinction, qui s'appuie sur des travaux récents d'EDF R&D, permet notamment d'évaluer l'effet rebond associé à la consommation de chauffage.
- Les principales barrières à l'efficacité énergétique sont représentées par des moyens alternatifs au taux d'actualisation uniforme élevé. Le taux d'actualisation est différencié par type d'investisseur afin de prendre en compte les incitations contradictoires (ou « dilemme ») auxquelles sont soumis les propriétaires et locataires d'un même logement. L'information imparfaite sur les différentes options d'efficacité prend la forme de « coûts intangibles » qui varient dans le temps par effet d'imitation.
- Le détail technologique est limité mais il respecte les réalités technico-économiques fondamentales, telles que les rendements décroissants de la rénovation énergétique ou les synergies qui existent entre la qualité de l'enveloppe et la performance du système de chauffage. Un effort particulier est consacré à la représentation du progrès technologique induit par l'apprentissage (*learning-by-doing*). Ces effets influencent la dynamique de long terme via l'emploi d'un taux de rénovation endogène.

Le modèle se concentre sur les consommations d'électricité, de gaz naturel et de fioul domestique pour le chauffage, qui représentent 92 % des 276,5 TWh d'énergie finale (hors bois) consommée dans les résidences principales pour cet usage. La consommation d'énergie primaire et les émissions de CO₂ sont déduites des sorties formulées en énergie finale en utilisant les coefficients de conversion du DPE détaillés en annexe 3. Dans le cas particulier de l'électricité, les coefficients retenus sont 2,58 unités d'énergie primaire par unité d'énergie finale et 180 grammes de CO₂ émis par kilowattheure (kWh) d'énergie finale consommé.

2.2 Vue d'ensemble du modèle Res-IRF

L'identité (1) exprime la demande d'énergie pour le chauffage E_{fin} (en kWh/an) comme le produit de trois termes : la superficie des résidences principales S (en m^2) ; l'efficacité énergétique du parc E_{conv}/S (en kWh/ m^2 /an), représentée par la consommation unitaire théoriquement réalisable à comportement conventionnel (température de chauffage constante de $19^\circ C$, etc.) ; la sobriété énergétique E_{fin}/E_{conv} , qui correspond au rapport entre la consommation d'énergie réelle et conventionnelle, ou taux d'utilisation de l'infrastructure de chauffage.

$$E_{fin} = S \frac{E_{conv}}{S} \frac{E_{fin}}{E_{conv}} \quad (1)$$

La description qui suit se concentre sur les déterminants de la performance énergétique des logements existants. La performance des constructions neuves obéit à des processus très similaires. Les équations et paramètres principaux du modèle sont détaillés en annexe 1 et 3.

2.2.1 Représentation technologique du parc de logements

Res-IRF décrit la dynamique du parc de résidences principales sous l'effet de la construction neuve et de la rénovation des bâtiments existants. Le stock de logements (S), désagrégé par type d'énergie principale de chauffage et par classe de performance du DPE, est calibré en 2007 à partir des données de l'ANAH (Marchal, 2008).

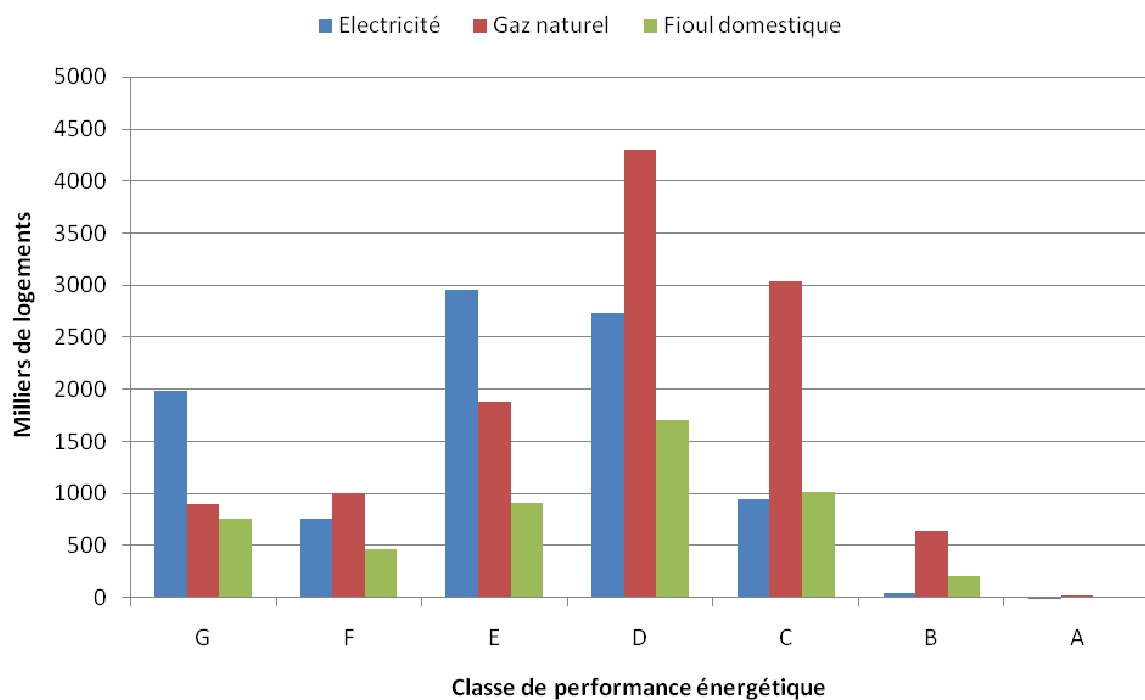


Figure 2 : Structure du parc de logements en 2007 d'après les données de l'ANAH (Marchal, 2008)

L'infrastructure de chauffage n'est pas décrite explicitement. La performance énergétique des logements est directement donnée par leur classe DPE (E_{conv}/S), implicitement réalisée par des bouquets de mesures sur l'enveloppe et le système de chauffage. La performance du « parc existant », construit avant 2008, varie de la classe G, la moins efficace (plus de 450 kWh/m²/an) à la classe A, la plus efficace (moins de 50 kWh/m²/an)³³. Chaque année, le nombre de constructions neuves est déterminé par les besoins en superficie supplémentaire résultant de : (i) l'accroissement de la population, selon une projection exogène de l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE, 2006) ; (ii) la diminution de la taille des ménages, selon un scénario exogène propre ; (iii) l'augmentation de la superficie moyenne des logements, déterminée par une élasticité au revenu des ménages. A cette projection s'ajoutent les besoins destinés à compenser les sorties du parc, fixées d'après Allaire *et al.* (2008) à 0,35 %/an, en suivant l'hypothèse de Traisnel *et al.* (2001) qu'elles portent en priorité sur les plus mauvaises classes énergétiques.

Le « parc neuf », qui recouvre l'ensemble des logements construits à partir de 2008, comprend trois catégories de performance énergétique : le niveau de la réglementation thermique 2005 (RT2005, de 250 à 120 kWh/m²/an, selon le climat local), le niveau BBC (moins de 50 kWh/m²/an) et le niveau BEPOS, pour lequel la consommation d'énergie primaire est inférieure à la quantité d'énergie renouvelable produite.

2.2.2 Déterminants des choix d'efficacité énergétique

L'amélioration de l'efficacité énergétique du parc existant résulte d'investissements dans la rénovation énergétique et de substitution d'énergie de chauffage. Ces mesures sont représentées par des transitions de classes énergétiques (par exemple, de G à F,..., A; de F à E,..., A, *etc.*), gouvernées par une fonction dérivée de modèles économétriques de type *logit* qui attribue à chaque option de rénovation une probabilité de choix inversement proportionnelle à son coût sur le cycle de vie. Le coût sur le cycle de vie de chaque option prend en compte le coût de la transition entre la classe de départ et d'arrivée, les dépenses d'énergie cumulées et actualisées théoriquement associées à la classe d'arrivée, et des coûts de transition dits « intangibles ».

Dans le contexte actuel d'information très parcellaire sur les coûts de rénovation, les données utilisées résultent davantage d'une construction que d'une estimation. La matrice de coûts de transition utilisée satisfait aux conditions suivantes : i) les coûts marginaux de rénovation sont croissants³⁴, ce qui signifie que la différence de coût entre deux transitions successives augmente (par exemple, depuis la classe G, le surcoût d'une transition en B par rapport à C est de 250 €/m², tandis qu'il est de 200 €/m² pour rénover en C plutôt qu'en D) ; (ii) les transitions sont sous-additives, c'est-à-dire qu'il est toujours préférable de faire une transition directe (i.e. une rénovation globale) qu'une succession de rénovations de moindre ampleur équivalente à la même transition ; (iii) le coût du passage de G à A est proche du coût d'une construction neuve³⁵ (environ 1 200 €/m²).

³³ Les plages de valeurs correspondant à chaque classe de performance sont détaillées à l'annexe 3, tableau 8. Le modèle est calibré sur la borne inférieure de ces plages de consommation, avec une valeur fixée à 750 kWh/m²/an pour la classe G.

³⁴ Comme le montre, au Royaume-Uni, les travaux du Building Research Establishment (BRE, 2005).

³⁵ Pour les constructions neuves, la matrice de coûts exposée à l'annexe 3 (tableau 6) suppose : (i) un surcoût de 15 % pour les constructions BBC et de 30 % pour les constructions BEPOS par rapport au coût d'une construction RT2005 ; (ii) par rapport aux autres énergies, un coût des constructions chauffées à l'électricité plus faible pour le niveau RT2005 et plus élevé pour le niveau BBC, afin de représenter le fait que dans le premier cas, des convecteurs électriques de piètre efficacité mais au coût d'investissement faible sont installés, tandis que dans le second, les pompes à chaleur sont privilégiées.

		Classe énergétique d'arrivée					
		F	E	D	C	B	A
Classe énergétique de départ	G	50	150	300	500	750	1 050
	F		110	260	460	710	1 010
	E			170	370	620	920
	D				230	480	780
	C					290	590
	B						350

Tableau 1 : Matrice des coûts de transition (€/m²)

Les dépenses d'énergie associées à chaque option de rénovation sont anticipées de façon myope, c'est-à-dire au prix courant de l'énergie, et actualisées selon un taux propre à chaque type d'investisseur privé. Cette distinction permet d'illustrer le « dilemme » auquel sont soumis le propriétaire et le locataire d'un même logement. Le premier n'a généralement pas d'intérêt à investir dans des économies d'énergie qui profiteront au second (sauf s'il récupère son investissement sous forme de « valeur verte », i.e. augmentation du loyer ou de la valeur vénale du bien, qui n'est pas prise en compte ici). Même s'il bénéficie des économies d'énergie, le locataire n'a pas non plus d'intérêt à investir car sa durée d'occupation du logement est généralement très inférieure au temps de retour de l'investissement.

Dans le modèle Res-IRF, les propriétaires bailleurs, qui subissent le dilemme, ont des exigences de rentabilité plus élevées (i.e. un taux d'actualisation plus élevé) que les propriétaires occupants pour les investissements d'efficacité énergétique. La distinction porte également sur le type de logement³⁶. Les propriétaires de maisons individuelles sont supposés plus disposés à investir dans l'efficacité énergétique (i.e. avoir un taux d'actualisation plus faible) que les propriétaires de logements collectifs, qui peuvent être découragés par la complexité des règles de copropriété ou l'appropriation imparfaite des économies d'énergie due aux transferts de chaleur avec les appartements adjacents. Conformément à ces principes, les taux d'actualisation sont fixés dans Res-IRF de manière à (i) attribuer une valeur classique de 7 % aux agents qui sont le plus susceptibles d'investir, c'est à dire les propriétaires occupants, et (ii) faire en sorte que le taux d'actualisation moyen pondéré par la part de chaque type d'investisseur corresponde à la valeur de 21 % généralement estimée pour les investissements d'efficacité énergétique (Train, 1985). Une telle méthode implique que seule une fraction de la population est réceptive aux incitations.

	Maisons individuelles	Logements collectifs
Propriétaire occupant	45 % ($r=7$ %)	12 % ($r=10$ %)
Propriétaire bailleur	11 % ($r=35$ %)	32 % ($r=40$ %)

Tableau 2 : Part des types d'investisseurs d'après les données INSEE et paramétrage de leur taux d'actualisation (r)

Il existe des preuves empiriques que le classement des options d'efficacité énergétique en fonction de leur seul coût financier (coûts de transition et dépenses d'énergie) ne correspond pas à leur réalisation effective (Laurent *et al.*, 2009). De même, il est avéré que la motivation financière n'est pas le critère principal des décisions de rénovation (TNS Sofres, 2006, p.33). Des coûts dits « intangibles » sont utilisés pour refléter cette imperfection de

³⁶ Les logements sociaux ne sont pas isolés en tant que tels et sont donc considérés comme tout autre logement loué.

l'information sur les différentes options de rénovation. Calibrés à l'année de base pour permettre au modèle de reproduire les transitions effectivement observées lors d'opérations programmées d'amélioration de l'habitat (PUCA, 2008), ils sont par la suite ajoutés systématiquement au coût financier afin de comparer la rentabilité des options d'investissement.

		Classe énergétique d'arrivée						
		F	E	D	C	B	A	
Classe énergétique de départ	G	25 %	27 %	27 %	21 %	ε %	ε %	100 %
	F		40 %	26 %	31 %	2 %	ε %	100 %
	E			66 %	28 %	6 %	ε %	100 %
	D				95 %	5 %	ε %	100 %
	C					91 %	9 %	100 %
	B						100 %	100 %
	A							

Tableau 3 : Matrice des transitions effectives (d'après PUCA, 2008)

2.2.3 Dynamique des coûts et taux de rénovation endogène

Le taux de rénovation des logements existants, reconnu comme un levier important de l'évolution de la performance globale du parc (Teissier et Meunier, 2008), est déterminé de façon endogène dans Res-IRF. Estimé à 1 % du parc de résidences principales à l'année de base³⁷, il croît à long terme avec la rentabilité moyenne des projets de rénovation selon une fonction logistique (voir annexe 1, figure 25). La rentabilité relative des différentes transitions de classe énergétique détermine donc à la fois la qualité et la quantité des rénovations. La dynamique est induite par les variations des prix des énergies et soutenue par l'apprentissage du côté de l'offre de technologies et les phénomènes d'imitation du côté de la demande. L'augmentation auto-entretenu du nombre de rénovation est néanmoins tempérée par l'épuisement naturel du potentiel des mesures rentables.

L'apprentissage du côté de l'offre est représenté par une fonction classique de *learning-by-doing* (Sassi, 2008), selon laquelle les coûts de transition décroissent avec l'expérience, estimée par la quantité de rénovations cumulées au cours du temps. A partir des rares informations empiriques disponibles, cette relation est paramétrée de la façon suivante : (i) le stock initial de connaissance est fixé à un niveau important, car les technologies sont considérées comme « matures » (CGDD, 2010, p.18) ; (ii) les taux d'apprentissage, i.e. le pourcentage de diminution des coûts consécutif à un doublement de l'expérience, sont relativement faibles, compte tenu des faibles perspectives d'évolution du marché³⁸.

Du côté de la demande, les effets d'imitation dans l'adoption des technologies d'efficacité énergétique sont empiriquement avérés (Maresca *et al.*, 2009) mais rarement quantifiés. Ils sont représentés dans Res-IRF par une décroissance des coûts intangibles avec la quantité cumulée de rénovation, selon une fonction logistique. A mesure que les coûts intangibles diminuent, le calcul économique réalisé par le propriétaire s'approche d'un pur calcul de rentabilité financière.

³⁷ D'après les données OPEN (2008), en considérant uniquement les rénovations qui conduisent à une transition d'au moins une classe de performance énergétique.

³⁸ Les difficultés portent notamment sur la fragmentation des acteurs ou l'évolution lente de la formation (Lagandré, 2006 ; CGDD, 2010, p.88). Les taux retenus sont de 10 % dans l'existant et 15 % dans le neuf. Ces taux sont fixés délibérément en-dessous de la valeur moyenne de 18 % (+/-9 %) estimée par Weiss *et al.* (2010) à partir du seul prix des technologies, afin de prendre en compte l'inertie importante des coûts d'installation. Ils traduisent toutefois des perspectives d'économies d'échelle plus grandes dans le neuf que dans l'existant.

2.2.4 Sobriété et effet rebond

En théorie, la consommation d'énergie d'un logement rénové est donnée par la nouvelle classe de performance du DPE dans laquelle il se trouve. En pratique, les hypothèses utilisées pour définir ces classes conduisent à une surestimation systématique des consommations réelles. Les raisons de cet écart sont d'ordre technique (malfaçon, *etc.*) et surtout comportemental. On observe en effet une utilisation de l'infrastructure de chauffage plus sobre que celle supposée par le mode de calcul du DPE³⁹. Cette différence s'explique à la fois par des déterminants socio-culturels qui commencent à peine à être identifiés (Maresca *et al.*, 2009 ; Subrémon, 2010), et par des phénomènes économiques mieux connus, comme l'illustrent des travaux récents d'EDF R&D qui mettent en évidence une réponse du taux d'utilisation au prix implicite du service de chauffage (Allibe, 2009).

Ces travaux sont repris dans le modèle Res-IRF sous la forme d'une courbe logistique reliant le taux d'utilisation de l'infrastructure de chauffage (E_{fin}/E_{conv}) à la dépense annuelle théorique d'énergie, qui valorise la performance conventionnelle du logement (E_{conv}/S) au prix courant de l'énergie. Cette relation indique que plus la dépense d'énergie est faible (élevée), plus le niveau d'utilisation des équipements est élevé (faible), traduisant un relâchement (renforcement) de la sobriété ou effet rebond. La construction de cette courbe à partir des travaux d'EDF R&D est détaillée en annexe 2.

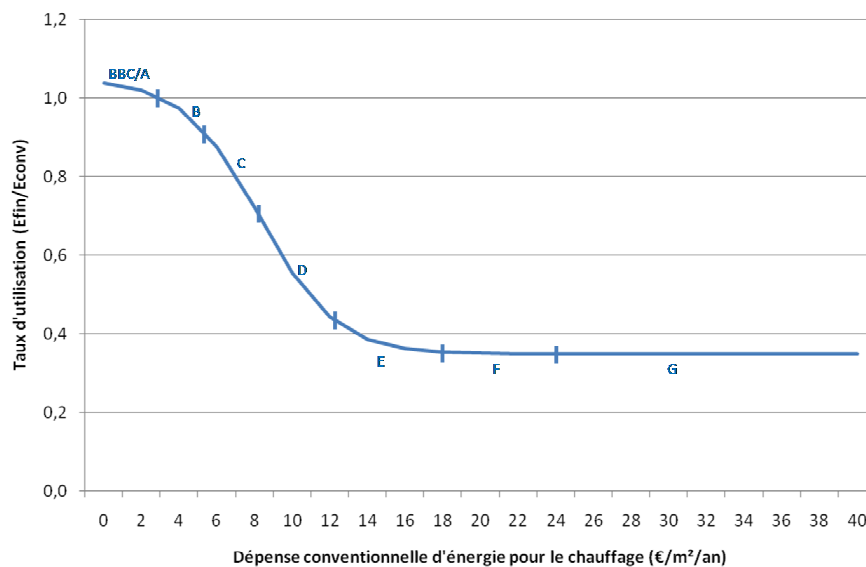


Figure 3 : Courbe d'utilisation de l'infrastructure de chauffage (d'après Allibe, 2009)

Emplacement indicatif des classes de performance énergétique du DPE au prix moyen de l'énergie de 2008 (voir détail en annexe 2).

³⁹ Alors que la consommation conventionnelle du DPE suppose une température de chauffage de 19°C, la température effective semble plus proche de 20°C (Maresca *et al.*, 2009). L'ajustement de comportement porte donc essentiellement sur d'autres facteurs, comme le nombre de pièces chauffées ou la durée annuelle de chauffage.

2.2.5 Bouclage macroéconomique

Le modèle Res-IRF peut être utilisé de façon autonome à partir de scénarios exogènes de croissance démographique, d'évolution du revenu disponible réel des ménages et de prix des énergies. Dans les simulations qui suivent, il est hybridé de façon récursive au modèle d'équilibre général IMACLIM-R adapté à l'économie française (Crassous, 2008 ; Sassi, 2008 ; Guivarch, 2010). A chaque année n , l'équilibre général détermine les prix des énergies et le revenu des ménages. Ces variables d'entrée modifient les décisions d'investissement et de consommation d'énergie dans Res-IRF, qui fournit en retour une nouvelle demande d'énergie et d'investissement. Ces variables de sortie sont enfin utilisées pour résoudre l'équilibre général à l'année $n+1$. Il s'agit donc d'un bouclage « faible », au sens où la rétroaction du module sur l'équilibre général porte uniquement sur les marchés de l'énergie et l'investissement des ménages. Les ménages n'ont pas d'autre contrainte budgétaire que celle définie par leur taux d'actualisation. Enfin, la croissance du revenu ne modifie pas les comportements d'efficacité et de sobriété et n'a d'effet que sur la croissance du stock de logements.

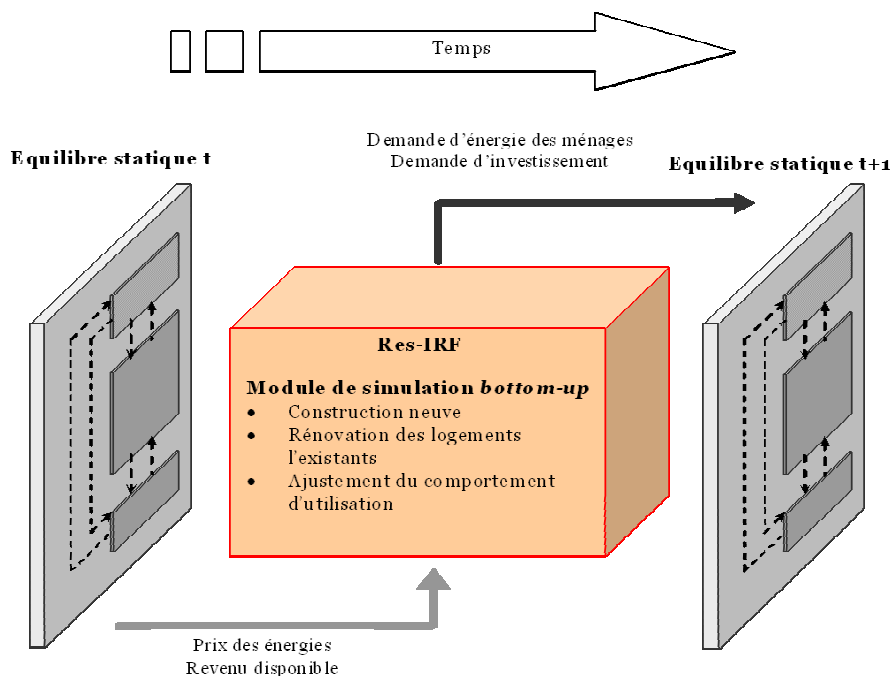


Figure 4 : Bouclage récursif du module Res-IRF avec le modèle IMACLIM-R

2.3 Scénario de référence

Le scénario de référence suit une projection exogène de population (INSEE, 2006). Les dynamiques de revenu et de prix des énergies sont endogènes dans le cadre du couplage de Res-IRF à IMACLIM-R France mais déterminées par un scénario exogène de prix du pétrole mondial dérivé de l'*Annual Energy Outlook 2008* (U.S. EIA, 2008).

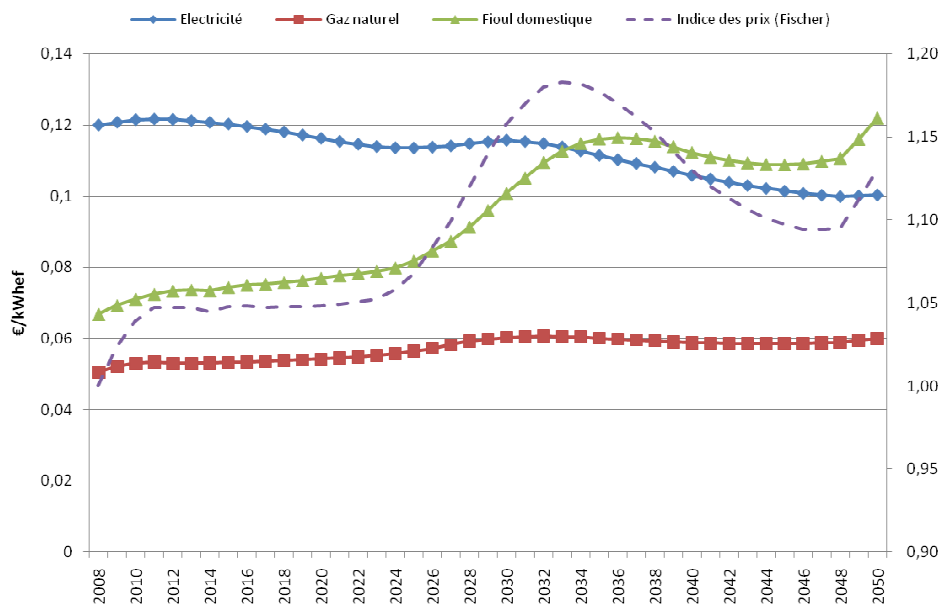


Figure 5 : Prix des énergies dans le scénario de référence

La première ligne des tableaux 4 et 5 fait état d'économies d'énergie finale de l'ordre de 10 % de la consommation de 2008 en 2050. Des substitutions d'énergie implicites, principalement du fioul vers l'électricité, expliquent l'augmentation nette de la consommation d'énergie primaire ; elles conduisent en revanche à une diminution importante des émissions directes de CO₂ en 2050 par rapport à 1990 (-19 %).

Ces tendances sont le produit d'une baisse de la consommation et des émissions par m² et d'une augmentation du parc de logements⁴⁰. En 2050, la surface du parc a progressé de 37 % par rapport à 2008. 62 % du stock est composé de bâtiments construits avant 2007, ce qui établit le rôle déterminant de la rénovation énergétique. Il faut souligner l'importance du taux de démolition appliqué en priorité aux logements les plus inefficaces : en fixant ce taux à zéro, la consommation totale d'énergie finale diminue de 5 % en 2050 par rapport à son niveau de 2008, au lieu de 10 % dans le scénario de référence.

⁴⁰ Entre 2008 et 2050, le nombre de ménages augmente de 13 % et la taille des ménages baisse de 6 %. Ces projections sont cohérentes avec celles du MEEDDM, qui estime la croissance du nombre de ménages à 15 % et la diminution de leur taille à 7 % pour la période 2005-2020 (Jacquot, 2007).

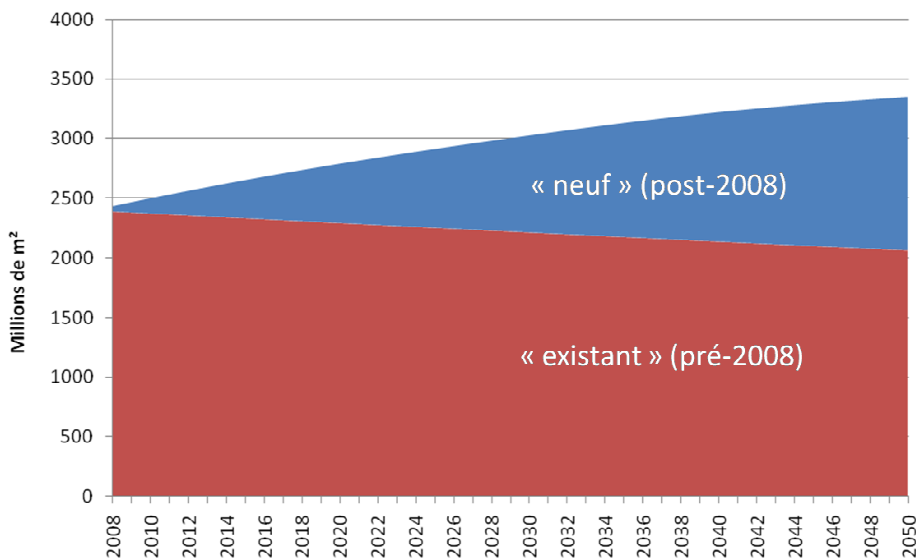


Figure 6 : Projection de la superficie du parc de logements

En dépit de l'augmentation du stock, la consommation et les émissions diminueraient de manière significative si le taux d'utilisation de la capacité thermique restait inchangé, c'est-à-dire sans relâchement de sobriété. En réalité, le taux d'utilisation augmente dans le scénario de référence et au terme de la période, l'effet rebond⁴¹ atteint 33 %, ce qui le situe dans la fourchette haute des estimations données pour le chauffage (Herring and Sorrell, 2009 ; Marchand *et al.*, 2008). Il est à souligner que le scénario de prix des énergies utilisé, relativement stable, n'encourage pas la sobriété.

Les gains unitaires d'énergie finale, qui atteignent 15 % en 2020 et 30 % en 2050 par rapport à la consommation de 2008, sont plus faibles que les tendances historiques exposées au chapitre 1.1.1. Cet effet peut être dû à une croissance démographique moins vigoureuse, qui ralentit la substitution de logements existants par des logements neufs, à un épuisement du potentiel de rénovations efficaces déjà avancé, ou à des progrès autonomes dus aux mesures de faible efficacité non prises en compte dans le modèle. Au regard de cette tendance, l'objectif « Grenelle -38 % », évalué par une projection *ad hoc* au chapitre 1.2.2, paraît particulièrement ambitieux.

3. Mode d'action des politiques du Grenelle de l'environnement

L'étude suivante simule l'impact des principales mesures existantes (CIDD, RT2012-2020, EcoPTZ) et supplémentaires (obligation de rénovation et CCE) du Grenelle de l'environnement sur la consommation d'énergie pour le chauffage résidentiel. Ces politiques s'apparentent à des instruments canoniques facilement modélisables : subventions qui réduisent le coût d'investissement (CIDD et EcoPTZ), réglementations qui limitent les choix d'efficacité (RT2012-2020 et obligation de rénovation) et taxe (CCE) qui renchérit le coût d'usage. De plus, elles s'appliquent à l'ensemble des logements. D'autres politiques qui ne partagent pas l'une ou l'autre de ces caractéristiques, comme les certificats d'économies d'énergie pour la première ou les subventions pratiquées dans le logement social pour la seconde, peuvent également avoir un impact important. Si elles n'ont pu être modélisées, leur contribution est évaluée qualitativement dans la partie 5.

Après avoir détaillé comment les politiques sont paramétrées pour reproduire les dispositions réglementaires du Grenelle de l'environnement, leur efficacité est comparée en termes d'économies d'énergie additionnelles par rapport au scénario de référence.

⁴¹ L'effet rebond est donné par le ratio entre les économies d'énergie réelles et théoriques. L'effet rebond *absolu* est comparé pour chaque scénario par rapport à la consommation de 2008. L'effet rebond *induit* par les politiques compare les scénarios de politique à la référence.

3.1 Paramétrage des politiques

3.1.1 Crédits d'impôt développement durable (CIDD)

L'achat de biens efficaces en énergie, comme le double vitrage, l'isolation, l'installation de chaudières performantes ou de pompes à chaleur est éligible au CIDD, avec des taux de crédit allant de 15 à 50 % du coût d'investissement. La dépense fiscale correspondante a été multipliée par cinq entre 2005 et 2007 pour atteindre 2,8 milliards d'euros en 2008. Cette année-là, le dispositif a bénéficié à 1,6 million de foyers, pour un taux de subvention équivalent de 32 % (INSEE, 2010). Les évaluations récentes montrent qu'il agit comme un réel déclencheur de l'investissement dans la rénovation des logements (ADEME, 2008, p.74). Sa réévaluation par la loi de finances de 2009 porte sur la restriction de l'éligibilité aux technologies les plus performantes, l'extension de la base de calcul aux dépenses d'installation pour l'isolation et l'éligibilité nouvelle des propriétaires bailleurs. S'il est prorogé jusqu'en 2012, le projet de loi de finances de 2011 prévoit de le « raboter ».

Le dispositif défini antérieurement à l'année de calibrage du modèle (2007) est considéré comme partie intégrante du scénario de référence. Une subvention est mise en place de 2009 à 2020 pour représenter le crédit d'impôt additionnel par rapport au régime préexistant. Elle s'applique uniquement au parc existant, comme une remise uniforme de 30 % du coût d'investissement pour toute transition vers une classe énergétique supérieure, plafonnée à 8 000 € par logement⁴². Ce taux est proche de celui accordé aux opérations les plus lourdes, qui sont les seules capables d'induire des transitions de classe de performance énergétique. Implicitement, les crédits d'impôt sont financés par un impôt forfaitaire sur les ménages.

3.1.2 Eco-prêts à taux zéro pour la rénovation énergétique (EcoPTZ)

Des prêts bancaires à taux d'intérêt nul pour des mesures cohérentes de rénovation ont été définis par la loi de finances de 2009. Le montant du prêt est plafonné à 30 000 € par logement sur une durée maximale de 10 ans. L'EcoPTZ est cumulable avec le CIDD mais doit impérativement combiner des mesures sur l'enveloppe et le système de chauffage. En 2009, il a bénéficié à 80 000 ménages, pour un investissement moyen de 16 500 € par logement (SGFGAS, 2010). Il est supposé bénéficier à 400 000 ménages en 2012 et durer jusqu'en 2020 (MEEDDM, 2010).

L'EcoPTZ est représenté dans le modèle comme une subvention sur le coût de transition de classe énergétique correspondant au montant total des intérêts d'un prêt conventionnel de dix ans à 4 %. Par exemple, une rénovation de 15 000 € bénéficie d'une subvention de 3 490 €, sachant que le bénéficiaire va payer 1 500 € pour chacune des dix annuités, au lieu de 1 849 € dans le cas d'un prêt conventionnel à 4 %. Le montant prêté correspond au coût d'investissement total, déduction faite des crédits d'impôt et plafonné à 30 000 € par logement. L'instrument s'applique à toutes les rénovations considérées, en supposant que l'exigence de combiner les mesures est nécessairement satisfaite pour réaliser une transition d'au moins une classe énergétique.

3.1.3 Réglementation thermique pour les bâtiments neufs (RT2012-2020)

L'une des décisions les plus consensuelles du Grenelle de l'environnement a été de fixer les réglementations thermiques futures à des niveaux ambitieux (loi Grenelle 1, article 4). Soumis jusqu'à présent à la réglementation thermique 2005, les constructions neuves devront se conformer au niveau BBC dans le cadre de la RT2012 et au niveau BEPOS avec la RT2020. Bien qu'encore négligeable, la construction de bâtiments à basse consommation se développe très rapidement, par anticipation de la RT2012 qui a été largement annoncée (MEEDDM, 2010).

⁴² Ce plafond correspond à la valeur la plus restrictive prévue. En pratique, il est relevé en fonction du nombre de personnes habitant dans le logement.

Ces réglementations sont représentées dans Res-IRF comme des restrictions successives du choix d'investissement aux seules options d'efficacité énergétique réglementaires⁴³ en 2012⁴⁴ et 2020.

3.1.4 Obligation de rénovation (OR)

Telle qu'elle est définie par le COMOP3, l'obligation de rénovation (OR) impose la réalisation de bouquets de travaux visant à atteindre la classe B ou C lors de chaque transaction immobilière. Appliquée à la classe G en 2012, elle serait progressivement étendue aux classes énergétiques supérieures (Pelletier, 2008, p.86).

Dans Res-IRF, cet instrument est mis en place plus tardivement et s'applique à la vente comme à la location. A chaque changement d'occupant du logement (locataire ou propriétaire), les propriétaires de logements de classe énergétique inférieure au seuil de la classe C (i.e. les logements qui consomment plus de 150 kWh/m²/an) doivent effectuer des travaux de rénovation permettant d'atteindre au minimum la classe C. Le taux de rénovation, déterminé de façon endogène dans le modèle, est forcé pour les logements situés sous le seuil afin de correspondre aux cycles de changement d'occupant, qui touchent chaque année 3,5 % des logements occupés par leur propriétaire et 18 % de logements loués, soit 7 % de l'ensemble du parc (CGDD, 2009). Les choix de rénovation (i.e. de classe énergétique d'arrivée) sont limités aux options situées au-delà du seuil. L'obligation est imposée aux logements classés G en 2016, aux logements classés F en 2020, aux logements classés E en 2024 et enfin aux logements de classe D en 2028.

3.1.5 Taxe carbone ou contribution climat-énergie (CCE)

Une commission présidée par Alain Quinet a été réunie en 2008 pour recalculer la valeur tutélaire du carbone permettant à la France de tenir ses engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre, à partir des travaux d'une première commission présidée par Marcel Boiteux (Boiteux et Baumstark, 2001 ; Quinet *et al.*, 2008). Différents exercices de modélisation ont permis de fixer la valeur tutélaire du carbone à 32 €/tCO₂ en 2010, augmentant chaque année de 5,8 % jusqu'en 2030 puis à un taux de 4 % au-delà. Avant d'être annulée par le Conseil constitutionnel, la CCE inscrite dans la loi de finances de 2009 s'appuyait partiellement sur ces travaux et devait être fixée à 17 €/tCO₂ en 2010.

En l'absence de nouvelle proposition, la valeur du carbone utilisée dans Res-IRF suit les recommandations du rapport Quinet : fixée à 32 €/tCO₂ en 2010, elle augmente de 5,8 % par an jusqu'en 2030 puis de 4 % par an ensuite, pour valoir 217 €/tCO₂ en 2050. Ses revenus sont versés forfaitairement aux ménages, comme dans la proposition de loi votée par le Parlement. Si le prix de l'énergie hors taxe carbone est anticipé de façon myope comme dans les autres scénarios, la taxe carbone est parfaitement anticipée à partir de l'année où elle est mise en place. La production d'électricité n'est pas taxée mais la consommation d'électricité est taxée sur la base d'un contenu en carbone⁴⁵ de 180gCO₂/kWh.

⁴³ Cette représentation fait abstraction des requêtes spécifiques en faveur de la sobriété énergétique, comme l'obligation de mettre en place des compteurs intelligents. Nous remercions Linda Aliane (MEEEDM) pour cette remarque.

⁴⁵ Ce mode de taxation correspond à la proposition de taxe carbone-énergie du Projet de loi de finances rectificative pour 2000.

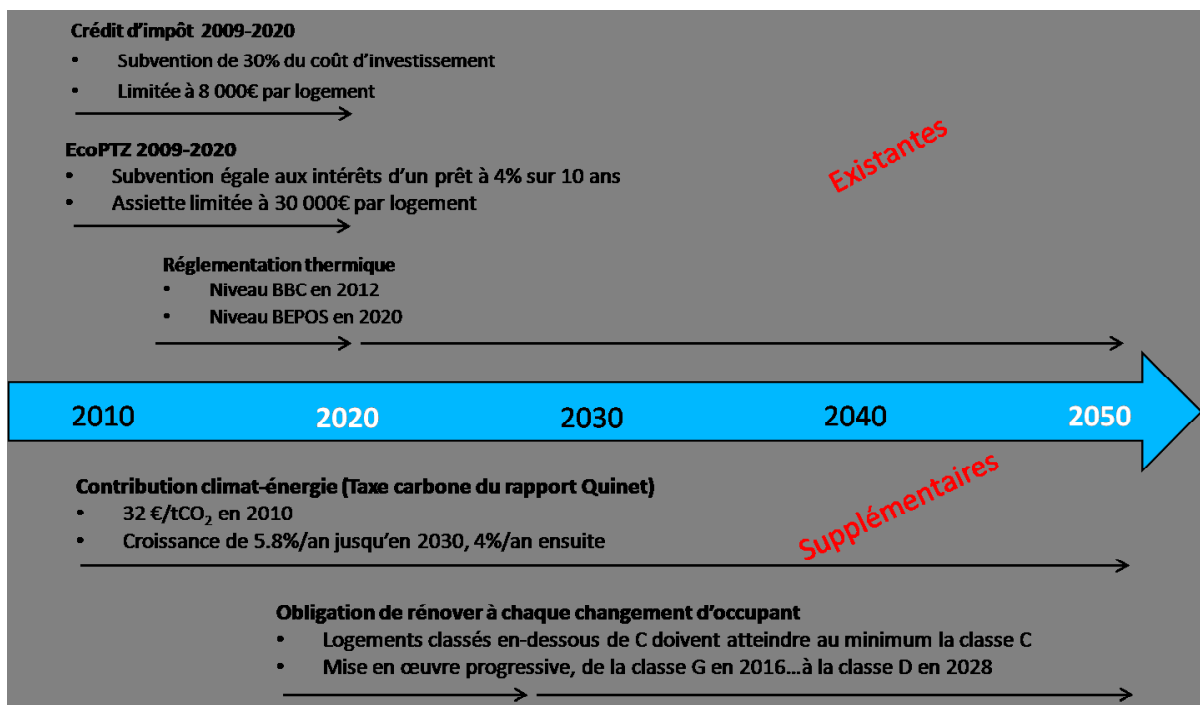


Figure 7 : Principaux paramètres des mesures existantes et supplémentaires

		Evolution de l'énergie primaire par rapport à 2008, effet rebond inclus								Evolution de l'énergie finale par rapport à 2008, sur le parc total					
		Consommation unitaire dans le parc existant		Consommation unitaire dans le parc neuf		Consommation unitaire dans le parc total		Consommation totale dans le parc total		Consommation unitaire, effet rebond inclus		Consommation totale, effet rebond inclus		Consommation totale, effet rebond exclus	
		2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050
Objectif fixé par les pouvoirs publics		-38 %													
Ref	Scénario de référence	-8,1 %	-19,5 %	-0,6 %	-1,7 %	-11,3 %	-23,0 %	1,2 %	5,2 %	-15,6 %	-34,2 %	-3,6 %	-10,0 %	-11,4 %	-33,4 %
<i>Instruments isolés</i>															
CIDD	Crédit d'impôt DD	-9,2 %	-20,7 %	-0,6 %	-1,7 %	-12,3 %	-23,8 %	0,2 %	4,2 %	-16,6 %	-34,8 %	-4,8 %	-10,9 %	-13,8 %	-34,9 %
EPTZ	Eco-prêt à taux zéro	-9,0 %	-20,4 %	-0,6 %	-1,7 %	-12,0 %	-23,6 %	0,4 %	4,4 %	-16,4 %	-34,7 %	-4,5 %	-10,7 %	-13,2 %	-34,6 %
RT	Réglementation neuf 2012-2020	-8,1 %	-19,5 %	-44,6 %	-78,7 %	-16,9 %	-44,0 %	-5,0 %	-23,4 %	-19,7 %	-49,7 %	-8,3 %	-31,2 %	-14,0 %	-44,6 %
CCE	Taxe carbone	-14,5 %	-35,2 %	-4,4 %	-15,9 %	-17,1 %	-36,7 %	-5,3 %	-13,5 %	-22,9 %	-50,1 %	-11,9 %	-31,8 %	-13,6 %	-38,0 %
OR	Obligation de rénovation	-10,7 %	-29,1 %	-0,6 %	-1,7 %	-13,5 %	-29,1 %	-1,2 %	-3,0 %	-17,6 %	-39,5 %	-5,9 %	-17,3 %	-14,6 %	-48,7 %
<i>Combinaisons d'instruments</i>															
AME	CIDD+EPTZ+RT	-10,3 %	-22,1 %	-44,6 %	-78,7 %	-18,7 %	-45,6 %	-7,1 %	-25,6 %	-21,6 %	-50,9 %	-10,5 %	-32,9 %	-18,6 %	-47,5 %
AMS1	AME+CCE	-16,9 %	-37,3 %	-46,4 %	-81,0 %	-24,4 %	-55,8 %	-13,7 %	-39,5 %	-28,9 %	-62,7 %	-18,8 %	-49,1 %	-21,8 %	-51,5 %
AMS2	AME+OR	-12,7 %	-31,0 %	-44,6 %	-78,7 %	-20,6 %	-51,2 %	-9,4 %	-33,3 %	-23,3 %	-55,8 %	-12,5 %	-39,5 %	-21,5 %	-61,2 %
AMS3	AME+CCE+OR	-19,3 %	-43,8 %	-46,4 %	-81,0 %	-26,3 %	-59,8 %	-15,9 %	-45,0 %	-30,6 %	-67,0 %	-20,7 %	-54,8 %	-24,4 %	-63,8 %
<i>Combinaisons volontaristes</i>															
A	AME avec CCE à 200 €/tCO ₂ en 2010	-36,9 %	-67,0 %	-56,4 %	-89,0 %	-42,2 %	-76,4 %	-34,0 %	-67,8 %	-51,2 %	-82,3 %	-44,3 %	-75,8 %	-37,5 %	-72,3 %
A+	A avec CIDD et EPTZ prolongés	-36,9 %	-68,1 %	-56,4 %	-89,0 %	-42,2 %	-77,1 %	-34,0 %	-68,8 %	-51,2 %	-83,2 %	-44,3 %	-77,1 %	-37,5 %	-75,1 %
A++	A+ avec OR fixée à la classe B	-36,9 %	-69,3 %	-56,4 %	-89,0 %	-42,2 %	-77,9 %	-34,0 %	-69,8 %	-51,2 %	-84,4 %	-44,3 %	-78,7 %	-37,5 %	-79,0 %

Tableau 4 : Consommation d'énergie dans les différents scénarios

		Progression des parts énergétiques dans la consommation finale (en points de pourcentage)						Emissions de CO ₂ directes par rapport à 1990		Consommation d'électricité en TWh (en 2008 : 58,0 TWh)		Effet rebond			
		Electricité (part 2008 : 23 %)		Gaz naturel (part 2008 : 53 %)		Fioul domestique (part 2008 : 24 %)						Absolu		Induit par les instruments	
		2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050
Objectif fixé par les pouvoirs publics															
Ref	Scénario de référence	4,4	14,6	0,5	0,7	-4,8	-15,3	5,0 %	-18,6 %	66,5	85,6	8,8 %	35,1 %	-	-
<i>Instruments isolés</i>															
CIDD	Crédit d'impôt DD	4,5	14,5	0,7	0,8	-5,2	-15,4	3,5 %	-19,3 %	66,1	84,6	10,5 %	37,0 %	1,6 %	1,4 %
EPTZ	Eco-prêt à taux zéro	4,4	14,5	0,6	0,8	-5,1	-15,4	3,9 %	-19,1 %	66,2	84,8	10,1 %	36,5 %	1,2 %	1,1 %
RT	Réglementation neuf 2012-2020	3,1	9,8	0,7	2,6	-3,8	-12,4	1,9 %	-32,4 %	60,4	57,0	6,5 %	24,2 %	-2,1 %	-8,0 %
CCE	Taxe carbone	6,4	23,1	-0,6	-8,2	-5,8	-14,9	-6,9 %	-46,1 %	65,5	79,7	2,0 %	10,0 %	-6,3 %	-18,6 %
OR	Obligation de rénovation	4,3	14,8	0,9	2,8	-5,2	-17,6	2,5 %	-26,2 %	64,8	79,1	10,2 %	61,3 %	1,3 %	19,4 %
<i>Combinaisons d'instruments</i>															
AME	CIDD+EPTZ+RT	3,2	9,4	1,2	2,9	-4,4	-12,3	-0,9 %	-33,7 %	59,3	54,9	10,0 %	27,8 %	1,1 %	-5,4 %
AMS1	AME+CCE	5,4	16,2	0,6	-4,3	-6,0	-11,9	-13,1 %	-54,3 %	58,3	50,5	3,8 %	5,0 %	-4,6 %	-22,3 %
AMS2	AME+OR	3,1	8,9	1,6	5,6	-4,7	-14,5	-3,0 %	-40,4 %	50,1	41,2	11,5 %	56,0 %	2,4 %	15,5 %
AMS3	AME+CCE+OR	5,3	18,7	1,0	-4,2	-6,2	-14,5	-15,1 %	-61,5 %	56,6	47,7	4,9 %	24,8 %	-3,6 %	-7,6 %
<i>Combinaisons volontaristes</i>															
A	AME avec CCE à 200 €/tCO ₂ en 2010	15,9	28,5	-5,9	-13,6	-9,9	-15,0	-49,3 %	-82,7 %	54,8	31,6	-10,9 %	-12,8 %	-18,1 %	-35,4 %
A+	A avec CIDD et EPTZ prolongés	15,9	31,3	-5,9	-15,3	-9,9	-16,0	-49,3 %	-84,5 %	54,8	31,5	-10,9 %	-8,0 %	-18,1 %	-31,9 %
A++	A+ avec OR fixée à la classe B	15,9	35,9	-5,9	-19,1	-9,9	-16,8	-49,3 %	-87,0 %	54,8	31,8	-10,8 %	1,4 %	-18,1 %	-24,9 %

Tableau 5 : Résultats complémentaires

3.2 Efficacité comparée des politiques

L'évaluation des politiques distingue les déterminants de la performance liés à l'amélioration de l'efficacité énergétique et aux variations de sobriété. L'amélioration de l'efficacité énergétique se décompose elle-même entre quantité et qualité des rénovations. La sobriété est déduite de l'évolution du taux d'utilisation et l'effet rebond total est évalué par son taux de croissance. L'effet rebond induit par chaque politique est évalué par rapport à cette référence. Toutes les simulations sont réalisées à climat constant. Les résultats numériques sont présentés dans les tableaux 4 et 5.

Le tableau 4 et la figure 8 donnent un premier classement des instruments. Le CIDD et l'EcoPTZ ont la performance la plus faible en termes d'économies d'énergie, du fait notamment de leur suppression en 2020. Par rapport au scénario de référence, tous deux augmentent le nombre de rénovations tant qu'ils sont en place (figure 10). Ils améliorent également la qualité des rénovations, comme l'indique la moindre présence dans le stock final de classes « inefficaces » (G à D) et la plus grande présence de classes « efficaces » (C à A) que dans le cas de référence (figure 11). L'amélioration de l'efficacité énergétique qui en résulte induit un léger effet rebond (tableau 5), comme l'illustre le taux d'utilisation agrégé plus élevé que dans le cas de référence sur la figure 9.

L'obligation de rénovation suit les subventions au classement des instruments les plus efficaces. La structure du parc existant est considérablement affectée par la restriction des choix d'efficacité aux meilleures options (figure 11). En particulier, le nombre de rénovations est massivement impacté chaque fois que l'obligation s'applique à une nouvelle classe de performance⁴⁶; cette augmentation est mécaniquement suivie d'un épuisement tout aussi massif des rénovations rentables, qui explique le profil temporel en dents de scie exposé à la figure 10. Cet outil semble particulièrement apte à surmonter le dilemme propriétaire-locataire, comme l'illustre la disparition consécutive des classes de G, F et E au profit de classes plus efficaces. Alors que les logements loués sont peu rénovés dans le scénario de référence et dans les cas de subvention, en raison de taux d'actualisation élevés, l'obligation force la rénovation de tous les types de logements. Elle s'applique même plus fréquemment aux logements loués, dont les cycles d'occupation sont plus rapides. Toutefois, cette performance maximale en termes d'efficacité énergétique est en partie atténuée par l'effet rebond le plus important de toutes les politiques (tableau 5), qui s'explique par la localisation du seuil d'obligation C dans la partie la plus pentue de la courbe d'utilisation (cf. figure 3).

Les deux politiques les plus performantes, la RT2012-2020 et la CCE, ont pour caractéristiques communes d'avoir une durée indéterminée et de renforcer la sobriété. Toutefois, un examen plus attentif des déterminants de la réduction de consommation révèle des mécanismes bien distincts. La CCE augmente légèrement le taux de rénovation sur l'ensemble de la période et améliore la qualité des rénovations pour un impact final sur l'efficacité des bâtiments existants comparable à celui des subventions. De même, son effet sur la structure du parc neuf est faible (figure 12). Néanmoins, la réduction de la facture énergétique consécutive à ces progrès d'efficacité énergétique modestes (déplacement vers la gauche sur la courbe d'utilisation de la figure 3) est plus que compensée par l'augmentation des prix des énergies (déplacement vers la droite), limitant ainsi le relâchement de sobriété et réduisant l'effet rebond par rapport au scénario de référence. Enfin, la CCE a un fort effet de substitution vers l'électricité.

⁴⁶ On peut considérer que pour la classe de performance nouvellement soumise à l'obligation, le taux annuel de rénovation passe d'environ 1 % à environ 7 %, soit la valeur moyenne du taux de changement d'occupant.

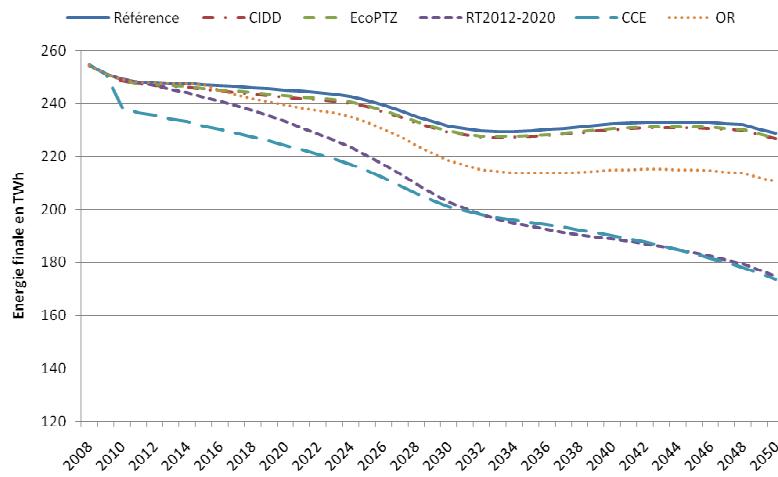


Figure 8 : Consommation d'énergie finale dans le cas de politiques isolées

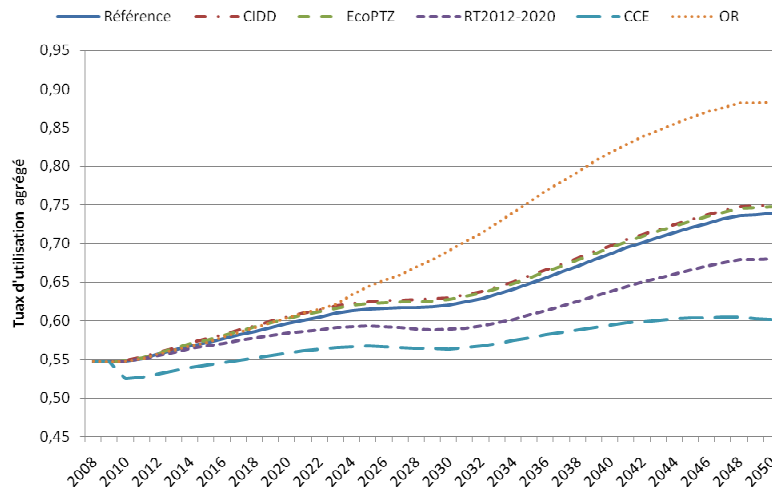


Figure 9 : Taux d'utilisation agrégé dans le cas de politiques isolées

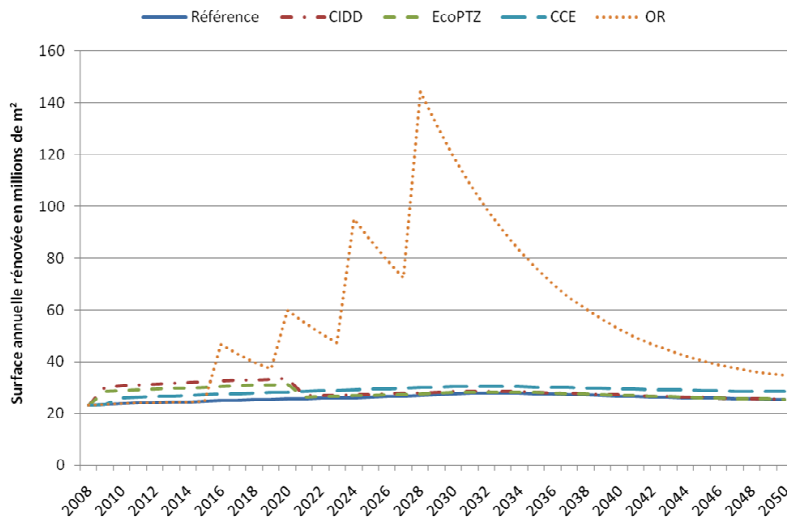


Figure 10 : Nombre de rénovations dans le cas de politiques isolées

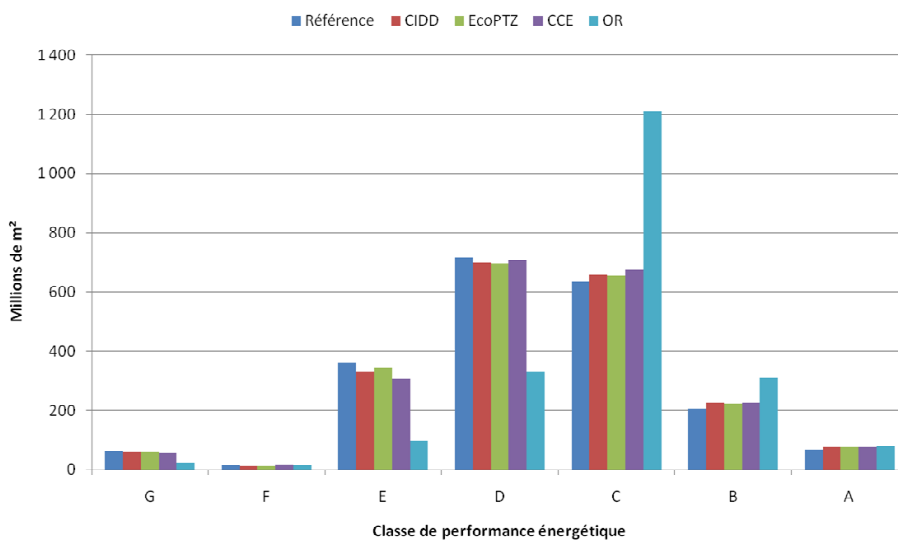


Figure 11 : Structure du parc existant en 2050 dans le cas de politiques isolées

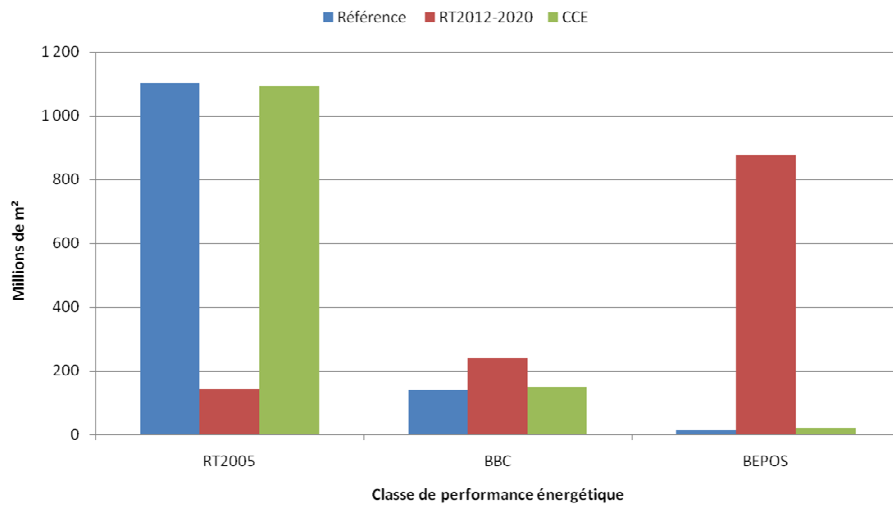


Figure 12 : Structure du parc neuf en 2050 dans le cas de politiques isolées

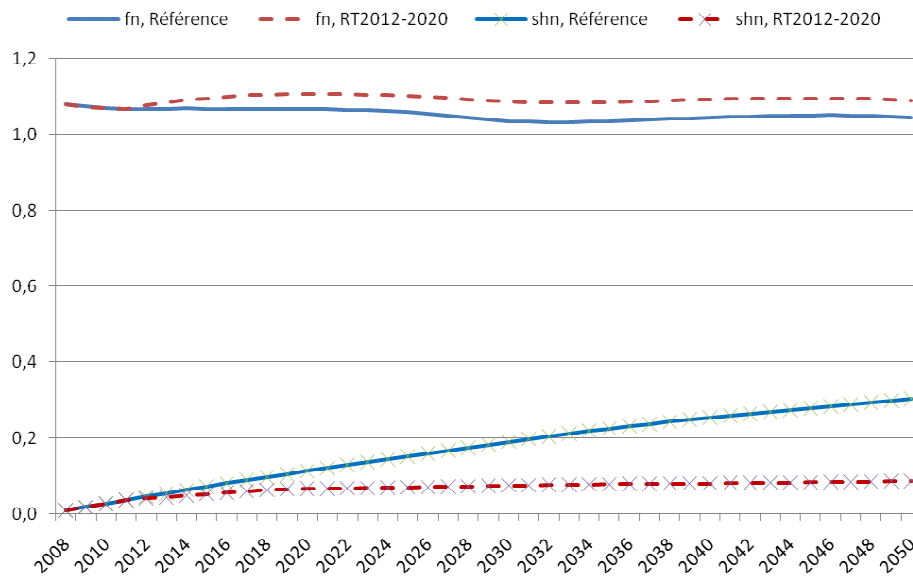


Figure 13 : Effets de sobriété dans le parc neuf (voir l'équation 2)

La RT2012-2020 a un effet opposé. Si elle s'avère être le seul moyen d'augmenter significativement l'efficacité du parc neuf, le renforcement de la sobriété qui s'ensuit paraît contre-intuitif (figure 9). Il s'explique en fait si l'on considère séparément le parc neuf et l'existant. Soit f le taux d'utilisation global, f_e (f_n) le taux d'utilisation spécifique au parc existant (neuf) et sh_e (sh_n) la part du parc existant (neuf) dans la demande d'énergie conventionnelle totale. Le taux d'utilisation total peut s'écrire comme la moyenne pondérée des taux spécifiques :

$$f = sh_e f_e + sh_n f_n \quad (2)$$

La figure 13 compare l'évolution de f_n et sh_n dans le scénario RT2012-2020 par rapport à la référence. La réglementation induit une augmentation du taux d'utilisation spécifique aux bâtiments neufs, à la suite d'améliorations de l'efficacité énergétique. Cependant, elle réduit également la part des nouveaux bâtiments dans la demande totale d'énergie par rapport au scénario de référence, la consommation d'énergie dans les constructions très efficaces étant quasi nulle. En conséquence, l'effet net de l'augmentation relative de f_n et de la diminution relative de sh_n avec la réglementation par rapport à la référence est négatif, ce qui réduit le taux d'utilisation total.

En définitive, les effets généraux suivants peuvent être identifiés : (i) les incitations financières comme la taxe et les subventions, qui modifient les coûts relatifs d'investissement et d'usage, sont moins efficaces que les réglementations pour améliorer l'efficacité énergétique ; (ii) les politiques qui augmentent l'efficacité énergétique sans affecter directement les prix de l'énergie, comme les subventions et les réglementations, génèrent un effet rebond. Inversement, la taxe carbone a un effet vertueux à la fois sur l'efficacité énergétique et sur la sobriété. Même s'ils sont largement conditionnés au paramétrage des politiques, ces résultats sont conformes à ceux de modèles plus stylisés (Quirion, 2004 ; Giraudet *et al.*, 2010). Enfin, il est intéressant de constater que conformément aux tendances historiques exposées au chapitre 1.1, la réglementation thermique du bâtiment neuf reste un outil primordial de MDE.

4. Evaluation globale des politiques du Grenelle de l'environnement

Les différentes mesures sont en pratique mises en place simultanément. Dans le chapitre qui suit, l'efficacité de différents bouquets de mesure est évaluée et mise au regard de l'objectif « Grenelle -38 % » sur la consommation unitaire d'énergie primaire, mais également de l'objectif « Facteur 4 » d'une division par quatre des émissions de CO₂ liées au chauffage. Bien que ces objectifs couvrent un périmètre plus large que celui traité dans le modèle, leur crédibilité est conditionnée à leur réalisation sur le périmètre du chauffage résidentiel, considéré comme le potentiel d'économies d'énergie le plus vaste et le moins coûteux (Baudry et Osso, 2007).

Quatre scénarios sont simulés : le bouquet AME combine les trois mesures « existantes », *i.e.* le CIDD et l'EcoPTZ qui sont déjà en place et la RT2012-2020 qui vient d'être actée ; trois bouquets AMS combinent à ce bouquet de base les mesures « supplémentaires » discutées, *i.e.* la CCE et l'OR.

4.1 Bouquet avec mesures existantes (AME)

Le bouquet AME induit des gains sur la consommation primaire unitaire du parc existant de 10,3 % en 2020, ce qui est très éloigné de l'objectif « Grenelle -38 % ». Les émissions totales de CO₂ sont réduites de 33,7 % en 2050 par rapport à 1990, ce qui est également très éloigné de l'objectif « Facteur 4 ». Les économies d'énergie primaire unitaire spécifiquement induites par le bouquet sur le parc existant en 2020 (nettes des économies réalisées dans le scénario de référence, soit 2,2 point) excèdent d'environ 0,2 point la somme des économies induites par chaque politique prise séparément (*idem*, soit respectivement 1,1 point et 0,9 point qui font 2,0 point). Ce résultat suggère que l'interaction entre le CIDD et l'EcoPTZ est très légèrement sur-additive.

L'analyse détaillée des déterminants des économies montre que l'augmentation du taux de rénovation par rapport à la référence (figure 16) correspond approximativement à la somme des augmentations induites séparément par le CIDD et l'EcoPTZ (figure 10). Plus précisément, l'augmentation finale est légèrement sur-

additive, en raison de la détermination logistiquie du taux de rénovation (introduite au chapitre 2.1.3 et détaillée en annexe 1, figure 25). L'ajout de deux subventions réduit le coût sur le cycle de vie, augmentant par la même occasion la rentabilité du projet de rénovation moyen, et d'autant plus le taux de rénovation. Cette combinaison de mesures déplace les choix de rénovation vers les meilleures classes de performance énergétique et rend le parc de logements assez efficace en 2050. En parallèle, elle induit un effet rebond supérieur à la somme des politiques prises séparément. Cet effet, difficilement visible si l'on compare le taux d'utilisation du bouquet (figure 15) à celui des autres politiques du bouquet, y compris la RT2012-2020 (figure 9), est confirmé par l'analyse numérique.

4.2 Bouquets avec mesures supplémentaires (AMS)

L'ajout au bouquet de base AME de la CCE (scénario AMS1), de l'OR (scénario AMS2) et des deux (scénario AMS3) génère des économies d'énergie supplémentaires, qui toutefois ne permettent pas d'atteindre les objectifs « Grenelle -38 % » et « Facteur 4 », comme l'indique le tableau 4 et la figure 14. La comparaison à la figure 19 des économies du bouquet AMS3 (nettes des économies du bouquet AME) à la somme des économies des bouquets AMS1 (*idem*) et AMS2 (*idem*), révèle une interaction sous-additive de la CCE et de l'OR. Cet effet est d'une plus grande ampleur, en valeur absolue, que celui qui concerne le CIDD et l'EcoPTZ et il s'explique différemment.

Comme le montrent les figures 16 et 17, les scénarios AMS2 et AMS3 ont un impact similaire sur le taux de rénovation et la structure du parc existant en 2050. Ce constat suggère que, de la CCE ou l'OR, la seconde soutient davantage l'amélioration de l'efficacité énergétique. La CCE déplace légèrement les choix d'efficacité énergétique vers les meilleures options, comme l'atteste la présence plus importante de logements existants classés A et B et de logements neufs classés BEPOS dans le scénario AMS3 que dans le scénario AMS2 (figures 17 et 18). Ces classes de performance énergétique se situent dans un domaine où le taux d'utilisation atteint un plateau ou, dit autrement, l'effet rebond sature (*cf.* figure 3). Au final, la figure 15 suggère que l'effet net des politiques combinées sur le taux d'utilisation est régi par la CCE, dans la mesure où la courbe d'utilisation du scénario AMS3 est relativement plus proche de celle du scénario AMS1 que de celle du scénario AMS2. Cependant, cet effet renforçant de la taxe sur la sobriété ne compense pas le fait que les gains d'efficacité énergétique qui découlent du scénario AMS3 sont visiblement inférieurs à la somme des gains spécifiques des scénarios AMS1 et AMS2 : il est clair que la disparition de la classe inefficace E dans le scénario AMS3 n'est pas aussi importante que ne le suggère l'addition des effets des scénarios ASM1 et AMS2.

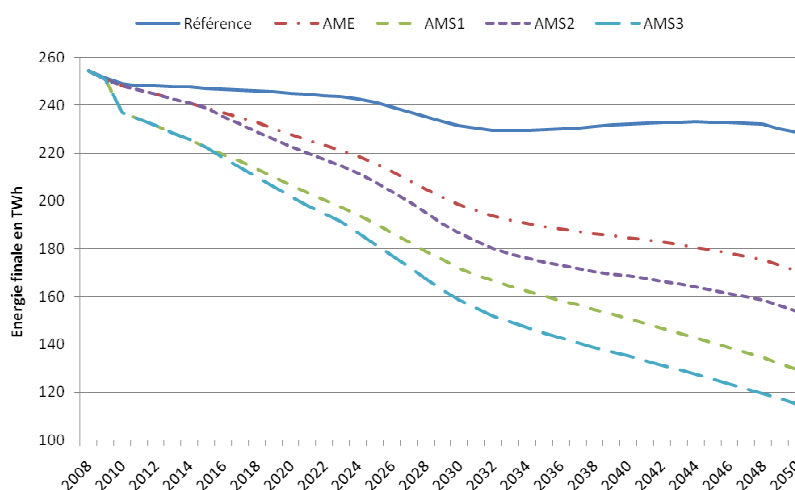


Figure 14 : Consommation d'énergie finale dans le cas de politiques combinées

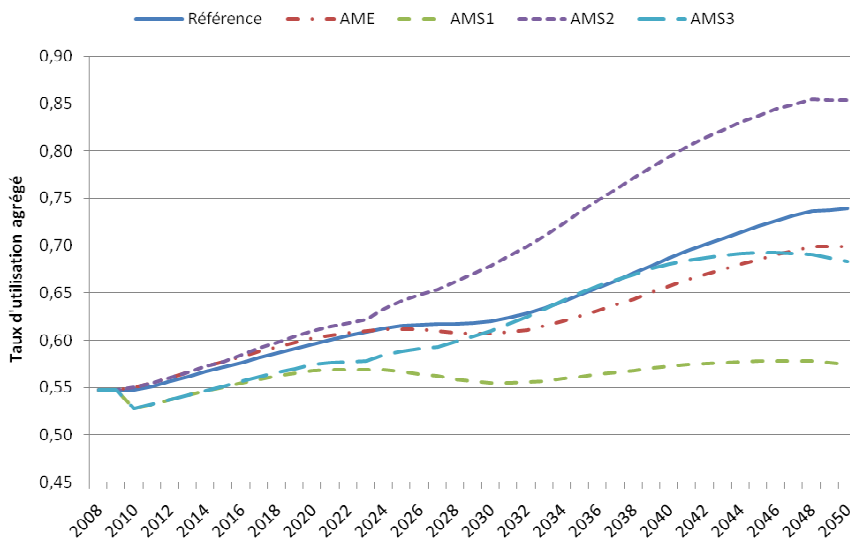


Figure 15 : Taux d'utilisation agrégé dans le cas de politiques combinées

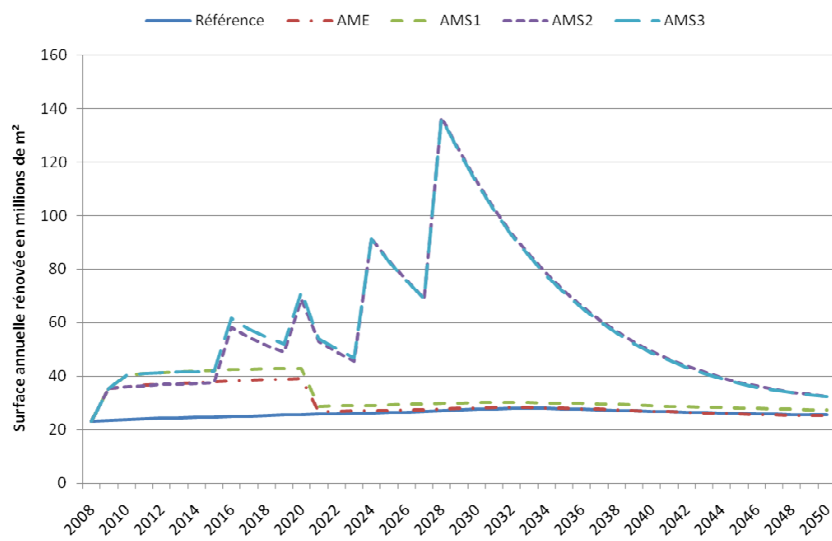


Figure 16 : Nombre de rénovations dans le cas de politiques combinées

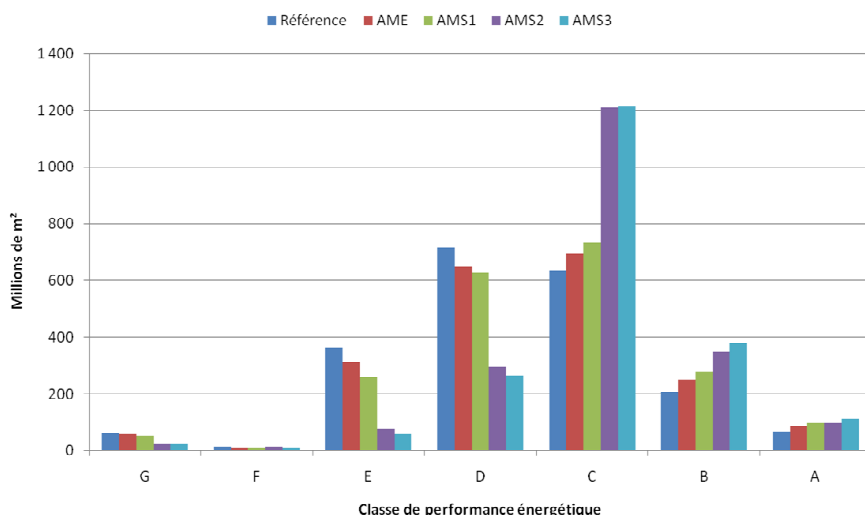


Figure 17 : Structure du parc existant en 2050 dans le cas de politiques combinées

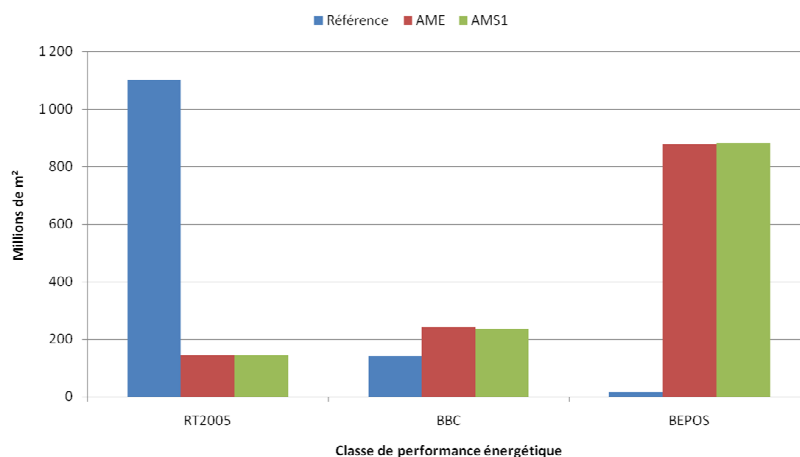


Figure 18 : Structure du parc neuf en 2050 dans le cas de politiques combinées

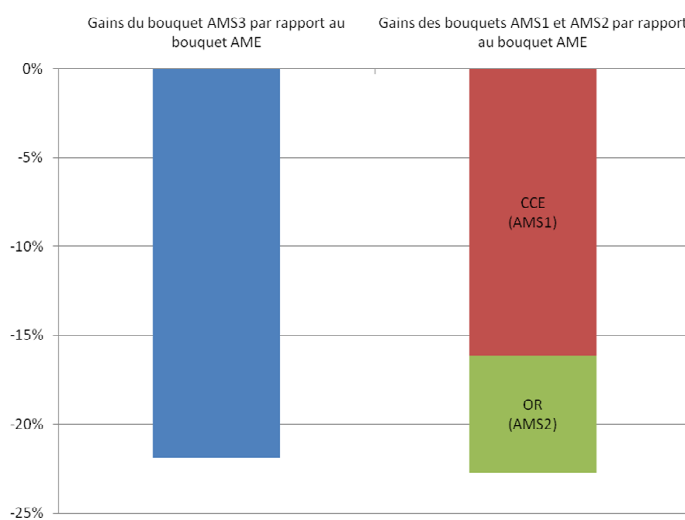


Figure 19 : Gains d'énergie finale en 2050 par rapport à 2008

5. Discussion

5.1 Une évaluation positive

L'exercice réalisé a une visée positive, ce qui signifie qu'il évalue l'efficacité des mesures existantes *telles qu'elles sont définies officiellement* (et des mesures supplémentaires telles qu'elles sont discutées actuellement), au regard d'objectifs *pris comme donnés*. Cela implique que les instruments ne sont pas comparés pour leurs propriétés intrinsèques (*cf. Giraudet et al., 2010*), mais pour leur efficacité à paramétrage donné (durée de mise en œuvre, taux de taxe et de subvention, rigueur des réglementations, *etc.*). De même, toutes les combinaisons possibles entre instruments ne sont pas analysées ; seules sont simulées les combinaisons les plus probables. Les interactions qui en découlent paraissent faibles et leur sens n'est pas systématique. Avant de réaliser un exercice à visée plus normative (chapitre 5.3), ces réflexions appellent quelques commentaires sur les unités retenues pour la définition des objectifs et les critères d'évaluation utilisés.

5.1.1 Unités d'évaluation

Les instruments ont été évalués au regard des objectifs « Grenelle -38 % » et « Facteur 4 ». La définition législative retenue pour le premier est relativement imprécise, et la comparaison des résultats selon différentes unités à partir des tableaux 4 et 5 révèle que :

- Les tendances de réduction de consommation sont plus fortes en énergie finale qu'en énergie primaire, du fait d'une substitution générale des combustibles fossiles par l'électricité, affectée d'un fort coefficient de conversion en énergie primaire.
- La réduction de consommation unitaire (par m²) est plus forte que la réduction de consommation totale à l'échelle de l'ensemble du parc, qui croît sous l'influence de la construction neuve. La consommation unitaire est le seul indicateur envisageable pour évaluer la performance du parc neuf (i.e. construit à partir de 2008). En revanche, la réduction de consommation du parc existant (i.e. construit avant 2008) est plus faible en valeur unitaire qu'en valeur totale, du fait des destructions annuelles qui réduisent ce stock.

En définitive, l'interprétation la plus vraisemblable de l'objectif « Grenelle -38 % » en énergie *primaire unitaire*, appliqué aux bâtiments *construits avant 2009* (exposée au chapitre 1.2.2) n'est pas forcément pertinente. Outre la difficulté posée par le recensement des bâtiments par année de construction, l'application d'objectifs en intensité à un tel périmètre produit des tendances de réduction artificiellement pessimistes.

5.1.2 Critères d'évaluation

Les instruments sont comparés en termes d'*efficacité dynamique*, c'est-à-dire en fonction des réductions de consommation d'énergie et d'émissions de CO₂ qu'ils génèrent à long terme, en présence de progrès technique et d'effets d'imitation endogènes. Une analyse complète de la performance des instruments et de leurs interactions suppose de mettre ces bénéfices en regard des coûts, afin d'évaluer l'*efficacité dynamique* globale.

Le profil temporel des coûts et bénéfices induits par le crédit d'impôt illustre la difficulté de cette tâche (figure 20). S'il paraît concevable d'associer les bénéfices observés aux coûts de la politique pendant la durée de sa mise en œuvre, les économies d'énergie qui persistent au-delà de sa suppression ne peuvent être isolées *ex post* de la tendance générale de consommation, influencée par d'autres facteurs comme les prix de l'énergie ou le progrès technique.

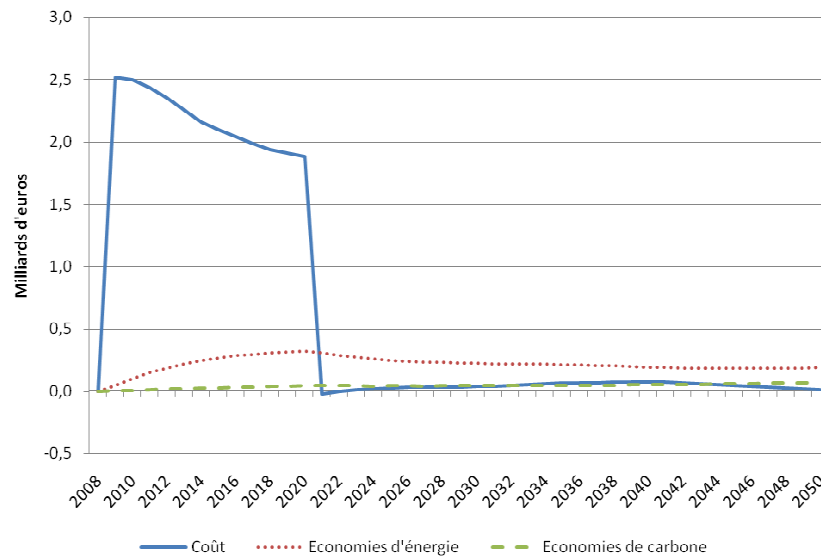


Figure 20 : Profil temporel des coûts et bénéfices du CIDD par rapport au scénario de référence

Pour cette raison, l'évaluation réalisée se limite au critère de l'efficacité dynamique. Enfin, l'absence de segmentation des ménages par classe de revenu dans le modèle Res-IRF rend impossible l'analyse des *effets distributifs* des instruments.

5.2 Eléments non modélisés

Au final, la combinaison des mesures existantes et supplémentaires est largement insuffisante pour engager la consommation d'énergie pour le chauffage sur la voie du « Grenelle -38 % » (quelle qu'en soit l'unité d'évaluation retenue) et du « Facteur 4 ». Outre la relative stabilité des prix de référence des énergies, qui génère naturellement peu d'économies d'énergie, des éléments non modélisés concourent à ce pessimisme.

5.2.1 Energies renouvelables

En l'absence de technologies explicites, les pompes à chaleur sont implicitement représentées par un coût d'investissement plus élevé pour la construction de logements BBC chauffés à l'électricité qu'au gaz naturel ou au fioul domestique. En revanche, le modèle se concentre sur les principales énergies commerciales et omet toute autre consommation d'énergie renouvelable pour le chauffage, pourtant considérée comme décisive pour atteindre le « Facteur 4 ». Simuler la substitution d'énergies fossiles par du bois-énergie nécessite un couplage complexe avec un modèle de la forêt française pour représenter l'offre limitée de bois. De même, l'intégration des réseaux de chaleur peut être réalisée dans un modèle associant la consommation d'énergie à différents modes de localisation, ce qui n'est pas le cas de Res-IRF.

5.2.2 Mesures complémentaires

Les bouquets de mesures simulés dans ce qui précède sont très restrictifs par rapport à la multitude de mesures mises en place avant et à la suite du Grenelle de l'environnement. Outre la politique générale d'information sur les différentes options de travaux, les mesures de réhabilitation du logement social peuvent être réalisées à grande échelle et avoir un impact conséquent sur les émissions de CO₂. De même, la réglementation thermique de l'existant améliore la performance des équipements standards non pris en compte dans le modèle. D'autres mesures récentes paraissent plus difficiles à évaluer. Dans la mesure où les justificatifs d'achat d'équipements ayant donné lieu à crédit d'impôt peuvent être utilisés par les fournisseurs d'énergie pour obtenir des CEE, l'additionnalité des dispositifs CEE et CIDD est largement débattue (Giraudet *et al.*, 2010). Le contrat de

performance énergétique paraît certes efficace (Duplessis, 2010), mais son déploiement à grande ampleur semble peu probable. Les nouveaux contrats de partage des charges entre propriétaires et locataires préconisés par l'ADEME (2009) et mis en place récemment peuvent en revanche jouer un rôle important, compte tenu de la sensibilité du dilemme propriétaire-locataire.

Si ces mesures visent pour la plupart l'investissement dans l'efficacité énergétique, les mesures visant à encourager la sobriété paraissent complètement absentes de la politique française de MDE. L'ampleur des relâchements de comportement mise en évidence dans les différentes simulations laisse penser que des mesures de modération de l'intensité d'utilisation génèreraient des économies d'énergie considérables. Les expériences étrangères de *feedback* et de *smart metering* présentent à ce titre des résultats encourageants. Elles posent cependant des problèmes de confidentialité qui compliquent leur mise en œuvre.

5.3 Scénarios volontaristes

L'évaluation positive conduite dans les simulations précédentes, qui conclut à l'inefficacité des bouquets d'instruments considérés au regard des objectifs fixés par les pouvoirs publics, est complétée ici par une analyse normative de mesures qui pourraient être prises pour atteindre les objectifs.

Malgré sa sensibilité politique, la taxe carbone paraît plus simple à mettre en œuvre à court terme que des subventions, qui mobilisent le budget de l'Etat, et les obligations de rénovation, qui imposent un surcoût aux ménages. Aussi les simulations qui suivent tentent de déterminer, par doublements successifs du taux initial de la CCE au sein du bouquet AMS3, la taxe qui permet d'atteindre le « Facteur 4 ». Comme en témoigne la figure 21, cette hausse a un effet marginalement décroissant, qui peut s'expliquer par le rendement décroissant des mesures de rénovation, la saturation du taux d'utilisation dans les hautes classes énergétiques et une forte substitution vers l'électricité, affectée d'un coefficient élevé de conversion en énergie primaire. Au final, un bouquet AMS3 dont le taux de taxe en 2010 est six fois supérieur au taux de départ (avec la même croissance annuelle) atteint l'objectif « Grenelle -38 % » sur le parc existant. Cette politique est prise en compte dans le scénario A, qui correspond à un bouquet AMS3 dont le taux de taxe initial est de 200 €/tCO₂ (soit 1 907 €/tCO₂ en 2050 avec les taux de croissance définis au chapitre 3.1.5).

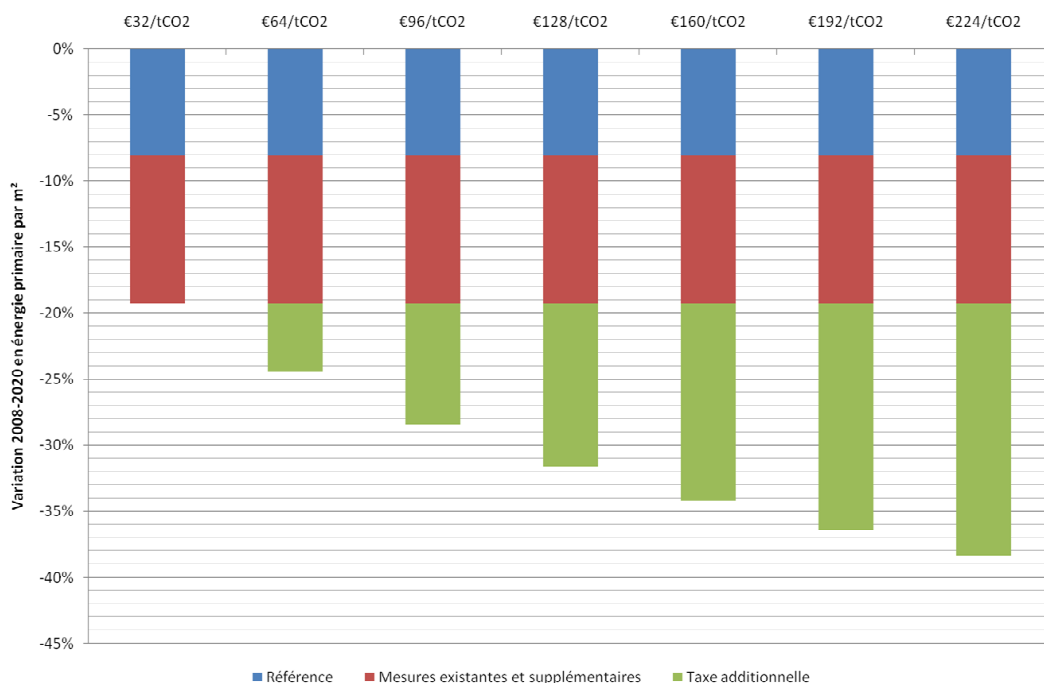


Figure 21 : Gains d'énergie primaire unitaire dans le parc existant en 2020 par rapport à 2008

Deux autres scénarios volontaristes sont simulés pour infléchir la consommation de chauffage vers le « Facteur 4 ». Le scénario A+ prolonge les subventions du scénario A jusqu'en 2050, tandis que le scénario A++ lui surajoute une élévation du seuil de l'obligation de rénovation au niveau de la classe B, appliquée progressivement de la classe G en 2016 à la classe C en 2032. Le tableau 5 montre que ces bouquets permettent de diviser les émissions de CO₂ par quatre en 2050 par rapport à 1990. Les résultats exposés à la figure 23 montrent que chaque durcissement du bouquet de politiques déplace un peu plus les choix de rénovation vers les catégories B et A, aux dépens des autres classes. Ces conclusions s'appliquent également au parc neuf, comme en témoigne la figure 24. En réponse, chaque durcissement des mesures augmente un peu plus le taux d'utilisation sur la période 2030-2050, qui est toutefois nettement diminué par rapport au scénario AMS3 (figure 22).

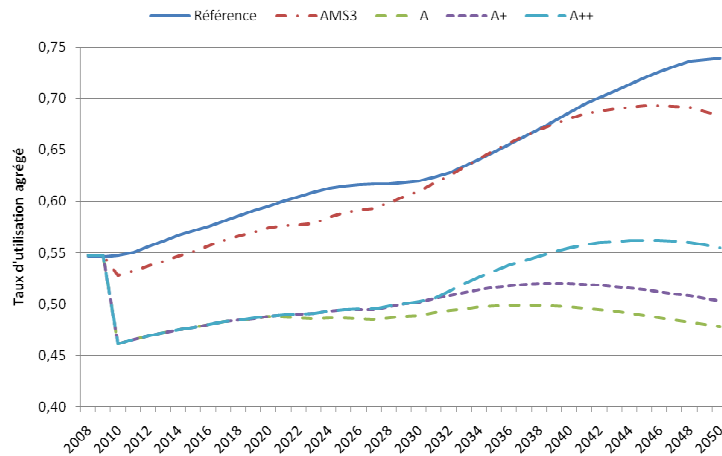


Figure 22 : Taux d'utilisation agrégé dans le cas de scénarios volontaristes

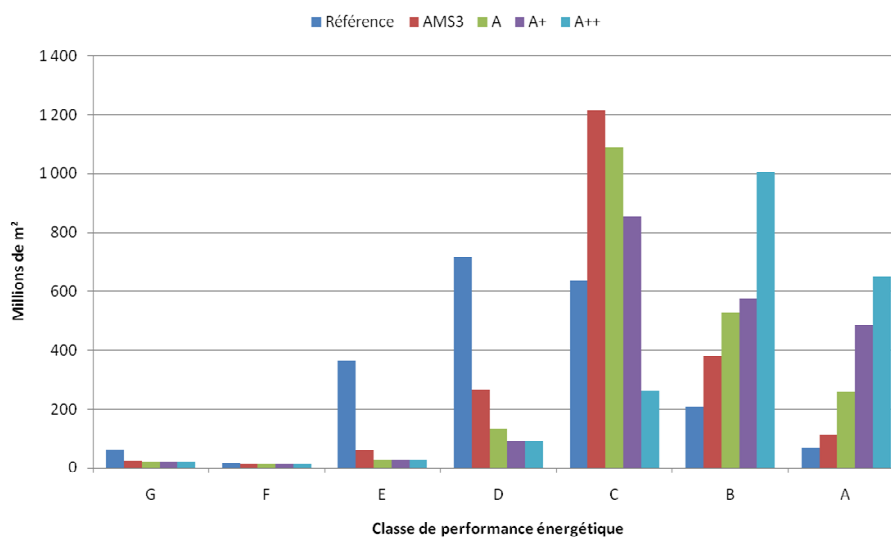


Figure 23 : Structure du parc existant en 2050 dans le cas de scénarios volontaristes

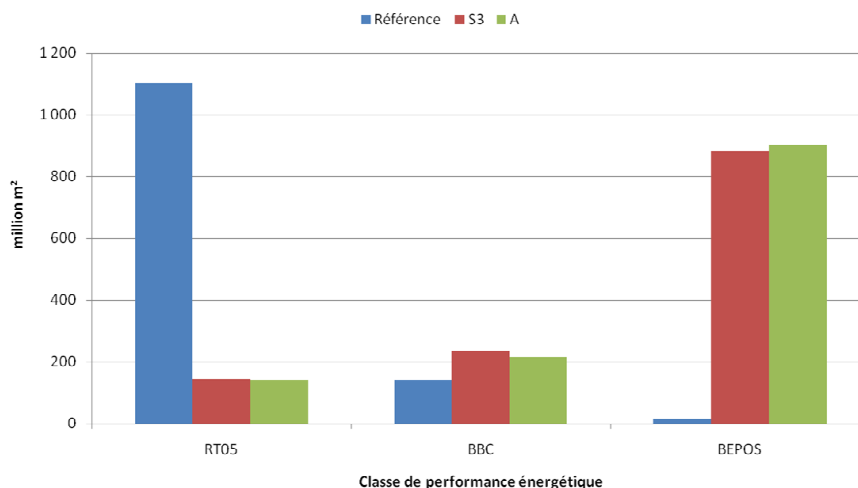


Figure 24 : Structure du parc neuf en 2050 dans le cas de scénarios volontaristes

6. Conclusion

Cette étude évalue l'efficacité des mesures existantes et supplémentaires du Grenelle de l'environnement au regard des objectifs nationaux de réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂. Le modèle hybride énergie-économie utilisé intègre des déterminants spécifiques de la consommation d'énergie dans le logement, en particulier l'effet rebond et certaines « barrières » à l'efficacité énergétique telles que le dilemme propriétaire-locataire et l'information imparfaite. Les barrières sont progressivement surmontées par les effets d'apprentissage et d'imitation, mais cette dynamique auto-entretenu est modérée par l'épuisement naturel du potentiel d'économies d'énergie et l'effet rebond.

Les bouquets de politique modélisés combinent subventions (CIDD et EcoPTZ), réglementations (RT2012-2020 et obligation de rénovation) et taxe carbone. A partir de simulations effectuées sur le périmètre du chauffage, l'étude montre que les politiques considérées échouent à réduire la consommation d'énergie de 38 % en 2020 par rapport à 2008, et à diviser par quatre les émissions de CO₂ en 2050 par rapport à 1990. En prenant en compte la pénétration des énergies renouvelables et l'impact de mesures supplémentaires comme la réhabilitation de logements sociaux, les CEE ou le partage des charges entre propriétaires et locataires, l'objectif « Facteur 4 » peut probablement être atteint dans le cas des scénarios les plus volontaristes, mais certainement pas avec les bouquets moins ambitieux. Sachant que la consommation résidentielle de chauffage est un indicateur *a priori* optimiste des potentialités d'atténuation du changement climatique dans le bâtiment (cf figure 1), un renforcement rapide de la politique climatique paraît nécessaire.

Certains résultats théoriques peuvent également être tirés de cette étude de cas. Le résultat le plus robuste est l'effet vertueux de la taxe carbone à la fois sur l'efficacité et sur la sobriété énergétiques. L'obligation de rénovation paraît être le seul instrument propre à surmonter le dilemme propriétaire-locataire. L'analyse des interactions entre instruments révèle des effets légèrement sur-additifs entre crédits d'impôt et prêts bonifiés, de même qu'entre la taxe carbone et l'obligation de rénovation. Toutefois, ces effets sont liés à l'architecture singulière du modèle et aux paramètres numériques auxquels sont fixés les instruments.

L'étude conclut aux recommandations suivantes, qui vont dans le sens d'une politique intégrée de maîtrise de la demande d'énergie :

1. *Maintenir jusqu'en 2020 au moins les mesures existantes (CIDD et EcoPTZ) et mettre en œuvre rapidement des mesures supplémentaires*
2. *Fixer les mesures supplémentaires à des niveaux suffisamment ambitieux pour assurer des synergies au sein de la politique globale de MDE*
3. *Compléter cette politique visant principalement l'efficacité énergétique par des mesures encourageant la sobriété des comportements de consommation d'énergie*

Ces recommandations sont déduites d'une évaluation *ex ante*. La détermination complète des facteurs de succès futur de la MDE nécessite de poursuivre l'effort d'évaluation *ex post* des mesures passées, exercice dont la difficulté a été soulignée dès 1998 par le rapport Martin. En particulier, les évaluations rétrospectives et prospectives doivent progresser vers une meilleure prise en compte de l'ensemble des coûts et bénéfices de la MDE.

7. Annexes

7.1 Annexe 1 : Equations principales du modèle

Probabilité de réalisation des projets de rénovation

Le coût sur le cycle de vie $LCC_{i,f}$ de chaque transition d'une classe de départ i vers une classe d'arrivée $f > i$ correspond à la somme du coût de transition donné par la matrice du tableau 1 $CINV_{i,f}$, des dépenses d'énergie associées à la classe f d'arrivée $CENER_f$ et des coûts intangibles $IC_{i,f}$:

$$LCC_{i,f} = CINV_{i,f} + CENER_f + IC_{i,f} \quad (A1)$$

$CENER_f$ valorise la dépense conventionnelle d'énergie liée à la performance $(E_{conv}/S)_f$ du logement de classe f , cumulée de façon myope au prix courant de l'énergie P sur la durée de vie L (fixée à 35 ans pour l'enveloppe et 20 ans pour le système de chauffage d'après ATEE, 2009) de l'investissement et actualisée au taux r :

$$CENER_f = P \left(\frac{E_{conv}}{S} \right)_f \left(\frac{1 - (1+r)^{-L}}{r} \right) \quad (A2)$$

(A2)

Les probabilités de réalisation associées à chaque transition $MS_{i,k}$ sont déduites de leur coût sur le cycle de vie selon l'équation suivante, paramétrée par $v > 0$:

$$MS_{i,f} = \frac{LCC_{i,f}^{-v}}{\sum_{k>i} LCC_{i,k}^{-v}} \quad (A3)$$

(A3)

Plus le coût sur le cycle de vie de l'option est élevé, plus sa probabilité de réalisation est grande. Le paramètre v , qui est un indicateur de l'hétérogénéité du marché et des préférences, implique qu'une probabilité non nulle est allouée à chaque option. Ainsi, les choix ne se portent pas exclusivement sur l'option dont le coût sur le cycle de vie est le plus faible. Ce paramètre est fixé de façon exogène à 8.

Taux de rénovation

Pour chaque classe de départ i , la fraction de logements rénovés est déduite de la « valeur actuelle nette de rénovation » NPV_i (en euro par logement) par une courbe sigmoïde paramétrée par $a > 0$ et $b > 0$:

$$\alpha_i = f_{a,b}(NPV_i) = \frac{1}{1 + a \exp(-bNPV_i)} \quad (A4)$$

(A4)

La valeur actuelle nette de rénovation compare les dépenses d'énergie associées à la classe de performance actuelle $CENER_i$ au coût sur le cycle de vie d'un projet moyen de rénovation, i.e. la somme des coûts sur le cycle de vie $LCC_{i,k}$ de chaque transition possible de la classe i vers une classe plus performante $k > i$, pondérée par la probabilité de réalisation de chaque transition $MS_{i,k}$:

$$NPV_i = CENER_i - \sum_{k>i} MS_{i,k} LCC_{i,k} \quad (A5)$$

La forme sigmoïde implique que plus le projet moyen de rénovation est rentable (i.e. la valeur actuelle nette est élevée), plus la fraction de logements rénovés est grande. La courbe obtenue à la figure 25 est calibrée en sélectionnant les valeurs positives de a et b qui minimisent la réalisation du projet de rénovation de valeur actuelle nette nulle⁴⁷, sous la contrainte que le nombre de rénovations totales $Upgrade^0$ soit reproduit à l'année 0 (2007) :

$$\begin{cases} \text{Min}_{a,b} f_{a,b}(0) \\ \text{s.c.} \quad \sum_i S_i^0 f_{a,b}(NPV_i^0) = Upgrade^0 \\ \text{s.c.} \quad a > 0, b > 0 \end{cases} \quad (A6)$$

⁴⁷ La sigmoïde étant monotone croissante, il s'agit d'une condition suffisante pour minimiser la réalisation de tous les projets ayant une valeur actuelle nette négative.

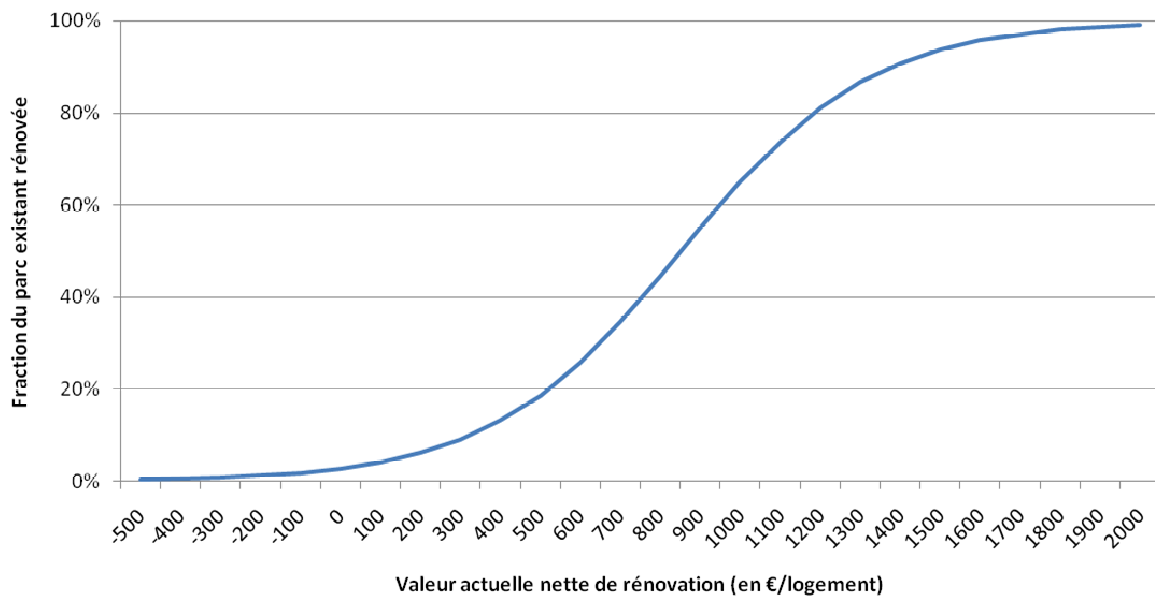


Figure 25 : Calibrage du taux de rénovation

Coûts intangibles

L'équation (A1) peut être résumée par une fonction x paramétrée par le taux d'actualisation r :

$$LCC_{i,f} = x_r(CINV_{i,f}, CENER_f, IC_{i,f}) \quad (A7)$$

De même, l'équation (A3) peut être résumée par une fonction y paramétrée par l'hétérogénéité des préférences v :

$$MS_{i,f} = y_v(LCC_{i,f}) \quad (A8)$$

A taux d'actualisation r et hétérogénéité des préférences v fixés, les coûts intangibles $\{IC_{i,k}^0\}$ d'une classe de départ i vers toute classe d'arrivée $k > i$ sont calibrés de façon à ce que les choix d'investissement reproduisent les probabilités observées $\{MS_{i,k}^{obs}\}$. On utilise pour ce faire la fonction $z_{v,r}$, qui est la réciproque de la composée de x_r et y_v :

$$z_{v,r} = x_r^{-1} \circ y_v^{-1} \quad (A9)$$

Un nombre infini d'ensembles de coûts intangibles qui reproduisent les probabilités relatives peut être trouvé, quelle que soit la valeur absolue des coûts. En d'autres termes, le système de $(n-i+1)$ équations reliant $\{IC_{i,k}\}$ à $\{MS_{i,k}\}$ (dont la somme vaut 1) est sous-déterminé et ne peut être résolu qu'en ajoutant une condition

supplémentaire. Une équation qui contrôle λ , le ratio de la moyenne pondérée des coûts intangibles et des coûts sur le cycle de vie est donc ajoutée pour résoudre le système suivant :

$$\begin{cases} IC_{i,i+1}^0 = z_{v,r}(MS_{i,i+1}^{obs}, CINV_{i,i+1}^0, CENER_{i,i+1}^0) \\ \dots \\ IC_{i,n-1}^0 = z_{v,r}(MS_{i,n-1}^{obs}, CINV_{i,n-1}^0, CENER_{i,n-1}^0) \\ \sum_{k=i+1}^n MS_{i,k}^{obs} IC_{i,k}^0 = \lambda \sum_{k=i+1}^n MS_{i,k}^{obs} LCC_{i,k}^0 \end{cases} \quad (A10)$$

Le taux d'actualisation utilisé est de 4 %, pour refléter le fait que les observations proviennent d'opérations programmées d'amélioration de l'habitat (PUCA, 2008). La valeur minimale de λ qui permet de résoudre le système est 18 %. C'est cette valeur qui est utilisée dans l'ensemble des simulations.

Accélération de l'information par effet d'imitation

Les effets d'imitation sont représentés par une décroissance logistique de la part variable $(1-\beta)$ des coûts intangibles initiaux ($IC_{i,f}^0$) avec le stock cumulé de rénovations vers la classe d'arrivée (K_f), paramétrée par $(c>0)$ et $(d>0)$. En pratique, ces paramètres sont exprimés comme une combinaison de (β) et d'un taux d'information (IR), fixé de façon exogène à 25 %, qui définit l'amplitude de la décroissance consécutive à un doublement du stock cumulé de rénovations :

$$IC_{i,f} = IC_{i,f}^0 \left(\beta + \frac{1-\beta}{1 + c(\beta, IR) \exp\left(d(\beta, IR) \frac{K_f}{K_f^0}\right)} \right) \quad (A11)$$

(A11)

Progrès technique induit par l'apprentissage

De la même façon, la part variable $(1-\gamma)$ des coûts de transition décroît avec les rénovations cumulées selon une fonction classique de *learning-by-doing*, paramétrée par un taux d'apprentissage (LR) , analogue au taux d'information IR , fixé à 10 % dans l'existant et 15 % dans le neuf :

$$CINV_{i,f} = CINV_{i,f}^0 \left(\gamma + (1-\gamma)(1-LR)^{\frac{\log(K_f/K_f^0)}{\log 2}} \right) \quad (A12)$$

(A12)

Changement de système de chauffage

Un changement de système de chauffage peut intervenir lorsque la classe d'énergie finale a été choisie. La probabilité $PR_{ei,ef}$ de changer d'une énergie de chauffage ei à une autre énergie ef , est alors déterminée de la façon suivante :

$$PR_{ei,ef} = \frac{LCCS_{ei,ef}^{-\nu}}{\sum_{eh} LCCS_{ei,eh}^{-\nu}} \quad (A13)$$

$LCCS_{ei,ef}$ est le coût sur le cycle de vie du changement, définie comme la somme des coûts de changement $switch_{ei,ef}$ et des dépenses d'énergie subies dans la classe f au prix P_{ef} de l'énergie e_f :

$$LCCS_{ei,ef} = SWITCH_{ei,ef} + P_{ef} \left(\frac{E_{conv}}{S} \right)_f \left(\frac{1 - (1+r)^{-L}}{r} \right) \quad (A3.2)$$

(A3.2)

En l'absence de données appropriées, cette relation n'inclut ni coûts intangibles, ni effets d'apprentissage. Les coûts de changement exposés à l'annexe 3 (tableau 7) sont estimés d'après OPEN (2008).

7.2 Annexe 2 : Construction de la courbe d'utilisation

La courbe présentée à la figure 3 s'appuie sur des travaux réalisés par EDF R&D, qui relie empiriquement le taux d'utilisation de l'infrastructure de chauffage à la dépense conventionnelle d'énergie pour le chauffage (Allibe, 2009). Conformément à l'équation (1), le taux d'utilisation correspond pour chaque type de logement au ratio entre la consommation effective d'énergie pour le chauffage estimée par le CEREN et la consommation qui serait réalisée selon le calcul thermique conventionnel utilisé pour le DPE (en suivant les hypothèses d'un mode de calcul type 3CL concernant la température de chauffage, le nombre de pièces chauffées, la durée annuelle de chauffage, *etc.*, estimées selon l'expertise interne d'EDF R&D). Cette relation est établie par la courbe logistique décroissante suivante (figure 26) :

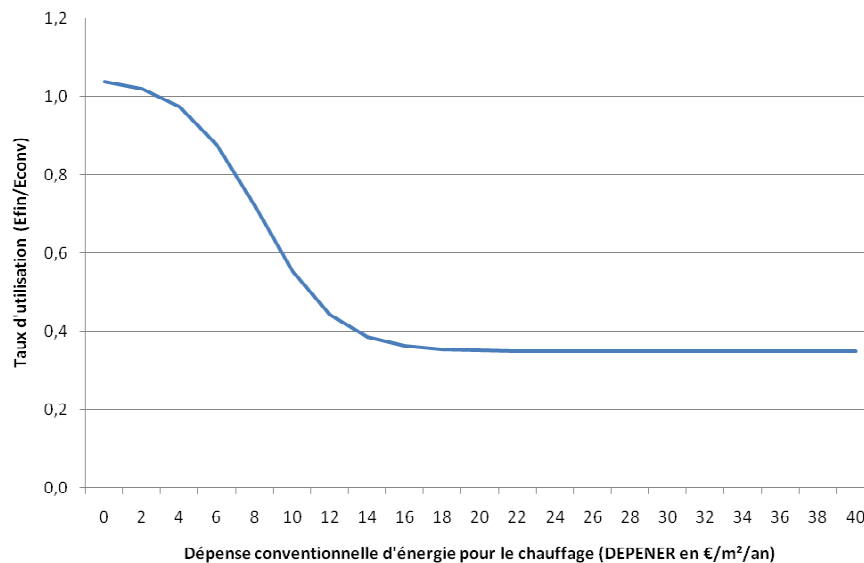


Figure 26 : Courbe d'utilisation de l'infrastructure de chauffage

La courbe relie le taux d'utilisation (E_{fin}/E_{conv}) à la dépense conventionnelle unitaire d'énergie pour le chauffage $DEPENER$ (en €/m²/an) selon l'équation suivante :

$$\left(\frac{E_{fin}}{E_{conv}} \right) = 0,35 + \frac{0,7}{1 + 4 \exp\left(\frac{DEPENER - 11}{2} \right)} \quad (A13)$$

(A13)

Où $DEPENER$ est le produit de l'efficacité énergétique du logement (E_{conv}/S en kWh/m²/an) donnée par la classe (c) de performance du DPE et du prix courant (P_e en €/kWh) de l'énergie (e) utilisée pour le chauffage :

$$DEPENER_{c,e} = \left(\frac{E_{conv}}{S} \right)_c P_e \quad (A14)$$

(A14)

La saturation basse du taux d'utilisation, observée à 0,35, traduit le fait que si la dépense d'énergie pour le chauffage devient très importante (à cause de prix de l'énergie élevés et/ou d'une mauvaise performance du logement), l'individu maintient un ratio entre consommation effective et conventionnelle constant afin d'assurer un confort physiologique minimal. La saturation haute ne peut être directement observée par manque de données. Elle est toutefois supposée et fixée à la valeur maximale observée (1,05), en admettant que même s'ils occupent un logement très efficace et/ou que les prix des énergies sont très bas, les individus ne peuvent se livrer à un gaspillage illimité de l'énergie pour des raisons physiques, physiologiques voire sociales (Allibe, 2009). Ces travaux ont été adaptés dans l'étude afin d'illustrer les niveaux de performance énergétique du DPE, qui sont à la base de la représentation du parc de logements dans le modèle Res-IRF. La classe de performance énergétique peut être valorisée aux prix de chaque énergie moyennant les hypothèses suivantes :

- Alors que Res-IRF se concentre sur la consommation d'énergie pour le chauffage, la consommation d'énergie conventionnelle du DPE couvre les usages chauffage, eau chaude sanitaire (ECS) et climatisation. Un coefficient correctif de 84 % (estimé d'après ADEME, 2008) est utilisé pour isoler la part du chauffage dans le total des consommations couvertes par ces trois usages.
- Les niveaux de performance énergétique du DPE sont libellés en énergie primaire, alors que les consommations d'énergie résidentielles sont facturées en énergie finale. Le coefficient usuel de 2,58 doit donc être utilisé pour inférer les dépenses de chauffage électrique à partir des consommations conventionnelles primaires du DPE. Pour les autres énergies de chauffage, les valeurs en énergie primaire et finale sont confondues.

En suivant ces deux hypothèses, la courbe précédente est décomposée par énergie de chauffage aux prix des énergies de 2008 et les classes de performance sont disposées en fonction de la consommation conventionnelle évaluée sur le seul périmètre chauffage (figure 27) :

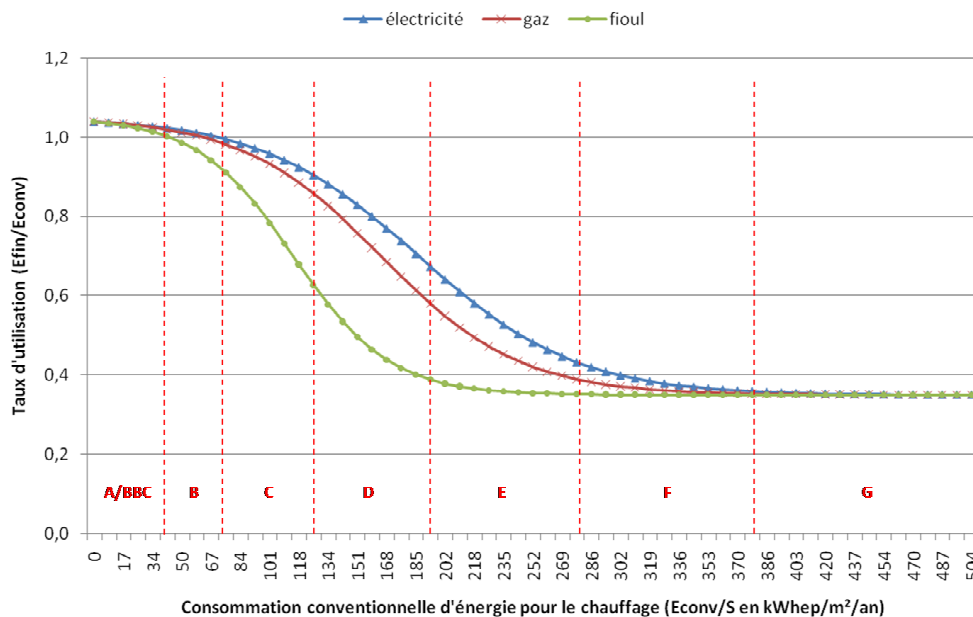


Figure 27 : Placement indicatif des étiquettes énergie aux prix 2008 des énergies

La courbe de la figure 3 du rapport correspond à une simplification de cette courbe au prix moyen des trois énergies en 2008 pondéré par leurs parts dans la consommation résidentielle de chauffage.

7.3 Annexe 3 : Éléments complémentaires de paramétrage

Cette annexe fournit les valeurs des principaux paramètres qui n'ont pas été précisées dans les chapitres qui précèdent.

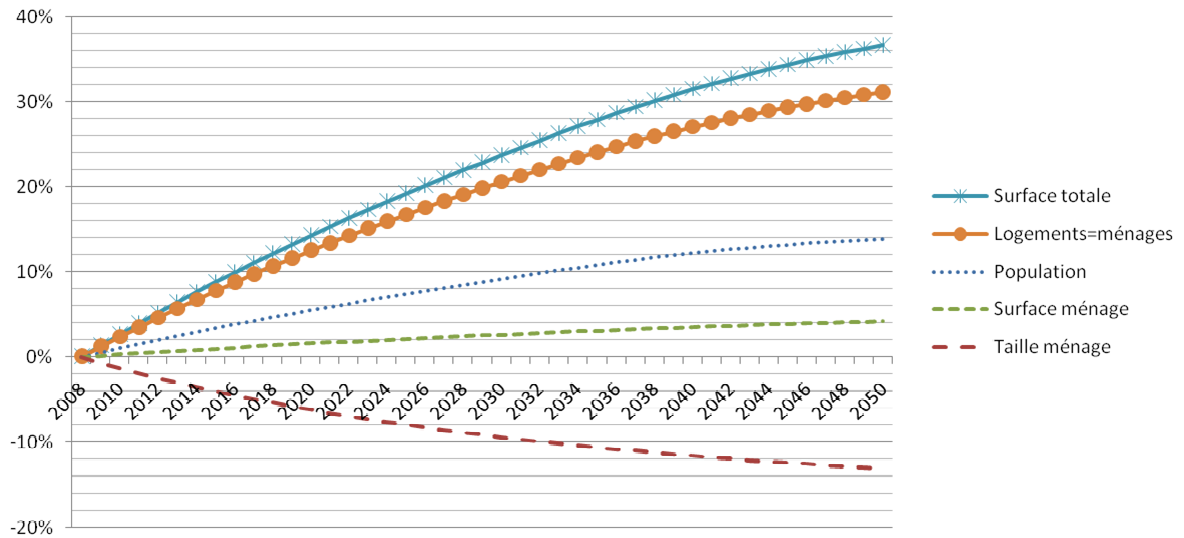


Figure 28 : Croissance du stock de logements en scénario de référence

	RT2005	BBC	BEPOS
Electricité	1 150	1 370	1 600
Gaz naturel	1 200	1 350	1 600
Fioul domestique	1 200	1 350	1 600

Tableau 6 : Coûts investissement dans la construction neuve (€/m²)

		Système de départ		
		Electricité	Gaz naturel	Fioul domestique
Système d'arrivée	Electricité	0	70	100
	Gaz naturel	55	0	80
	Fioul domestique	55	50	0

Tableau 7 : Coûts d'investissement dans le changement de système de chauffage (en €/m², d'après OPEN, 2008)

Etiquette DPE	G	F	E	D	C	B	A
Consommation conventionnelle (kWhep/m ² /an)	>450	450-330	330-230	230-150	150-90	90-50	<50

Tableau 8 : Consommations d'énergie conventionnelles du diagnostic de performance énergétique

	Electricité	Gaz naturel	Fioul domestique
gCO ₂ /kWh _{ep}	180	234	300

Tableau 9 : Contenu CO₂ selon la méthode 3CL utilisée pour le diagnostic de performance énergétique

Bibliographie

- ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie], 2008, « Les chiffres clé du bâtiment »
- ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie], 2009, « Réhabilitation du parc locatif privé. Avec les nouveaux mécanismes de financements issus du Grenelle, un système gagnant-gagnant propriétaire-locataire », Lettre Stratégie et études n°18
- Allaire, D., G. Gaudière, Y. Majchrzak, C. Masi, 2008, « Problématique qualitative et quantitative de la sortie du parc national de bâtiments », Mémoire du Groupe d'Analyse d'Action Publique, ENPC
- Allibe, B., 2009, "Impact of comfort level on French dwelling space heating energy demand: a retrospective and prospective study", Behavior, Energy and Climate Change Conference, Poster Session, November 16, Washington, D.C.
- ATEE [Association Technique Energie Environnement], 2009, « Le dispositif des certificats d'économies d'énergie », Mémento du club C2E
- Ben Jelloul, M., 2010, "Les choix énergétiques dans l'immobilier résidentiel à la lumière de l'analyse économique", Centre d'analyse stratégique, Note de veille n°172
- Boiteux, M., L. Baumstark, 2001, « *Transports : choix des investissements et coûts des nuisances* », Rapport pour le Commissariat général au plan, La Documentation française, 2001
- BRE [Building Research Establishment], 2005, "Costing sustainability: How much does it cost to achieve BREEAM and EcoHomes ratings?", Information paper
- CGDD [Commissariat général au développement durable], 2009, « La mobilité résidentielle progresse dans le parc locatif privé et diminue dans le parc social », Observation et Statistiques, n°27
- CGDD [Commissariat général au développement durable], 2010, « Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte », Rapport
- Combet, E., F. Ghersi, J.-C. Hourcade, C. Thubin, 2009, *Economie d'une fiscalité carbone en France*, Rapport du CIRED
- Crassous, R., 2008, « Modéliser le long-terme dans un monde de second rang : application aux politiques climatiques », Thèse de doctorat, AgroParisTech
- Duplessis, B., 2010, « Evaluation de l'efficacité des services énergétiques pour l'amélioration des installations de climatisation », pp. 96-116, in J. Carassus, B. Duplessis (eds), « Economie du développement urbain durable », Presses des Mines, Paris.
- GIEC [Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat], 2007 : « Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat » [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, 103 pages.
- Giraudet, L.-G., D. Finon, P. Quirion, 2010, « Quelle efficacité des dispositifs de certificats blancs dans les politiques de maîtrise de la demande d'énergie ? », pp. 73-94, in J. Carassus, B. Duplessis (eds), « Economie du développement urbain durable », Presses des Mines, Paris.
- Girault, M., 2008, « Baisse des consommations d'énergies de chauffage dans les logements depuis 2001 », Notes de synthèse du SESP n°170, 29-34
- Guivarch, C., 2010, « Evaluer le coût des politiques climatiques – De l'importance des mécanismes de second rang », Thèse de doctorat, Université Paris-Est
- Herring H., S. Sorrell, 2009, *Energy efficiency and sustainable consumption: the rebound effect*, Palgrave McMillan Ed.
- INSEE [Institut national de la statistique et des études économiques], 2006, Projections de population pour la France métropolitaine à l'horizon 2050 : la population continue de croître et le vieillissement se poursuit, INSEE PREMIERE n°1089
- INSEE [Institut national de la statistique et des études économiques], 2010, « Le recours au crédit d'impôt en faveur du développement durable : une résidence principale sur sept rénovée entre 2005 et 2008 », INSEE PREMIERE n°1316

- Jacquot, A., 2007, « La demande potentielle de logements : un chiffrage à l'horizon 2020 », Notes de synthèse du SESP n°165, 41-48
- Lagandré, E., 2006, « L'amélioration énergétique des logements existants. Le rôle des artisans dans l'information de leurs clients », *Les Annales de la recherche urbaine*, n°103, pp. 95-99
- Laponche, B., 2002, « Les mots pour le dire : de l'économie à l'intelligence », *Maîtrise de l'énergie et développement durable*, Les cahiers de Global Chance, n°16, pp. 4-6
- Laurent, M.-H., D. Osso, E. Cayre, 2009, "Energy savings and costs of energy efficiency measures: a gap from policy to reality?" Proceedings of the ECEEE 2009 summer study, 571-581
- Leray, T., B. de la Roncière, 2002, « 30 ans de maîtrise de l'énergie », Association technique énergie environnement, Arcueil
- Marchal, J., 2008, « Modélisation des performances thermiques du parc de logements », Rapport pour l'ANAH
- Marchand, C., M.-H. Laurent, R. Rezakhanlou, Y. Bamberger, 2008, « Le bâtiment sans énergies fossiles ? », *Futuribles*, n°343, pp.79-100
- Maresca, B., A. Dujin, R. Picard, 2009, « La consommation d'énergie dans l'habitat entre recherche de confort et impératif écologique », Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie (CREDOC), Cahier de recherche n°264
- Martin, Y., Y. Carsalade, J.-P. Leteurtriois, F. Moisan, 1998, « La maîtrise de l'énergie : rapport d'évaluation », La Documentation française, Paris
- MEEDDM [Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer], 2010, « La fiscalité environnementale prend son essor »
- Négawatt, 2005, Scénario négaWatt 2006 pour un avenir sobre, efficace et renouvelable, Document de synthèse
- OPEN [Observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement], 2009, Rapport final
- Pelletier, P., 2008, Rapport au Ministre d'Etat, ministre de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables, Comité opérationnel « rénovation des bâtiments existant »
- PUCA [Plan Urbanisme Construction Architecture], 2008, « L'habitat existant dans la lutte contre l'effet de serre, Evaluer et faire progresser les performances énergétiques et environnementales des OPAH ». Rapport intermédiaire
- Quinet, A., L. Baumstark, J. Célestin-Urbain, H. Pouliquen, D. Auverlot, C. Raynard, 2008, « La valeur tutélaire du carbone », Rapport de la commission présidée par Alain Quinet, Conseil d'Analyse Stratégique, La Documentation française, Paris
- Quirion, P., 2004, « Les certificats blancs face aux autres instruments de politique publique pour les économies d'énergie : bilan de la littérature économique et priorités de recherche », Rapport pour l'Institut français de l'énergie
- Sassi, O., 2008, « L'impact du changement technique endogène sur les politiques climatiques », Thèse de doctorat, Université Paris-Est
- Subrémon, H., 2010, « Etat de la littérature anthropologique sur la consommation d'énergie domestique - en particulier de chauffage », Rapport de recherche présenté au MEEDDAT - DGALN/PUCA
- SGFGAS [Société de gestion du fonds de garantie de l'accession sociale à la propriété], 2010, « Bilan statistique des éco-prêts à taux zéro émis en 2009 »
- Teissier, O., L. Meunier, 2008, « Scénarios de forte réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les transports et les bâtiments à l'horizon 2050 », Notes de synthèse du SESP n°170, 5-15
- TNS Sofres, 2006, Maîtrise de l'énergie, 2^e phase, Attitudes et comportements des particuliers, Note de synthèse
- Train, K., 1985, "Discount rates in consumer's energy-related decisions: a review of the literature", *Energy* 10(12): 1243-1253
- Traisnel, J.-P., 2001, « Habitat et développement durable. Bilan rétrospectif et prospectif ». Les cahiers du CLIP, n°13
- U.S. EIA [U.S. Energy Information Administration], 2008, American Energy Outlook 2008
- Weiss, M., M. Junginger, M. K. Patel, K. Blok, 2010, "A review of experience curve analysis for energy demand technologies", *Technological forecasting and social change*, 77(3):411-428

Références complémentaires

Le rapport s'appuie en priorité sur des références françaises. A titre indicatif, les références anglo-saxonnes suivantes constituent un complément utile à cette bibliographie.

Gillingham, K., Newell, W.A. Pizer, 2008, "Modeling endogenous technological change for climate policy analysis", *Energy Economics*, 30(6): 2734-2753

Gillingham, K., R. Newell, K. Palmer, 2009, "Energy Efficiency economics and policy", *Annual Review of Resource Economics*, 1: 597-619

Giraudet L.-G., Quirion P., 2008, "Efficiency and distributional impacts of tradable white certificates compared to taxes, subsidies and regulations", *Revue d'économie politique*, 119(6): 885-914

Goulder L. H., I.W.H. Parry, 2008, "Instrument choice in environmental policy", *Review of Environmental Economics and Policy*, 2(2): 152-174

Haas R., Auer H., Biermayr P., 1998, "The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating", *Energy and Buildings*, 27(2): 109-205

Hourcade, J.-C., M. Jaccard, C. Bataille, F. Ghersi, 2006, "Hybrid Modeling: new answers to old challenges", *The Energy Journal*, Special issue 2: Hybrid Modeling of Energy Environment Policies, 1-12

IEA [International Energy Agency], 2007, *Mind the gap: Quantifying principal-agent problems in energy efficiency*, Paris

Jaccard M., Dennis M., 2006, "Estimating home energy decision parameters for a hybrid energy-economy policy model", *Environmental Modeling and Assessment*, 11(2): 91-100

Jaffe, A.B., R.N. Stavins, 1994, "The energy-efficiency gap: What does it mean?", *Energy Policy*, 22(10): 804-810

Mau P., J. Eyzaguirre, M. Jaccard, C. Collins-Dodd, K. Tiedemann, 2008, "The 'neighbor effect': Simulating dynamics in consumer preferences for new vehicle technologies". *Ecological Economics*, 68(1-2): 504-516

OCDE [Organisation de coopération et de développement économiques], 2007, « *Politiques de l'environnement quelles combinaisons d'instruments?* », Paris

Sanstad, A.H., R.B.Howarth, 1994, "'Normal' markets, market imperfections and energy efficiency", *Energy Policy*, 22(10): 811-818

Sassi, O., R. Crassous, J.-C. Hourcade, V. Gitz, H. Waisman, C. Guivarch, 2010, "IMACLIM-R: a modelling framework to simulate sustainable development pathways", *International Journal of Global Environmental Issues*, 10(1-2): 5-24

Sorrell S., E. O'Malley, J. Schleich, S. Scott, 2004, *"The economics of energy efficiency: barriers to cost-effective investment"*, Edward Elgar Ed.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Matrice des coûts de transition (€/m ²).....	33
Tableau 2 : Part des types d'investisseurs d'après les données INSEE et paramétrage de leur taux d'actualisation (r)	33
Tableau 3 : Matrice des transitions effectives (d'après PUCA, 2008).....	34
Tableau 4 : Consommation d'énergie dans les différents scénarios	42
Tableau 5 : Résultats complémentaires.....	43
Tableau 6 : Coûts investissement dans la construction neuve (€/m ²).....	65
Tableau 7 : Coûts d'investissement dans le changement de système de chauffage (€/m ² , d'après OPEN, 2008).....	65
Tableau 8 : Consommations d'énergie conventionnelles du diagnostic de performance énergétique.....	66
Tableau 9 : Contenu CO ₂ selon la méthode 3CL utilisée pour le diagnostic de performance énergétique.....	66

Liste des figures

Figure 1 : Evolution passée de la consommation unitaire d'énergie des logements, par usage (ADEME, 2008).....	28
Figure 2 : Structure du parc de logements en 2007 d'après les données de l'ANAH (Marchal, 2008).....	31
Figure 3 : Courbe d'utilisation de l'infrastructure de chauffage (d'après Allibe, 2009).....	35
Figure 4 : Bouclage récursif du module Res-IRF avec le modèle IMACLIM-R	36
Figure 5 : Prix des énergies dans le scénario de référence	37
Figure 6 : Projection de la superficie du parc de logements.....	38
Figure 7 : Principaux paramètres des mesures existantes et supplémentaires.....	41
Figure 8 : Consommation d'énergie finale dans le cas de politiques isolées.....	45
Figure 9 : Taux d'utilisation agrégé dans le cas de politiques isolées.....	45
Figure 10 : Nombre de rénovations dans le cas de politiques isolées	46
Figure 11 : Structure du parc existant en 2050 dans le cas de politiques isolées	46
Figure 12 : Structure du parc neuf en 2050 dans le cas de politiques isolées.....	47
Figure 13 : Effets de sobriété dans le parc neuf (voir l'équation 2).....	47
Figure 14 : Consommation d'énergie finale dans le cas de politiques combinées.....	49
Figure 15 : Taux d'utilisation agrégé dans le cas de politiques combinées	50
Figure 16 : Nombre de rénovations dans le cas de politiques combinées.....	50
Figure 17 : Structure du parc existant en 2050 dans le cas de politiques combinées.....	51
Figure 18 : Structure du parc neuf en 2050 dans le cas de politiques combinées	51
Figure 19 : Gains d'énergie finale en 2050 par rapport à 2008.....	51
Figure 20 : Profil temporel des coûts et bénéfices du CIDD par rapport au scénario de référence	53
Figure 21 : Gains d'énergie primaire unitaire dans le parc existant en 2020 par rapport à 2008.....	54
Figure 22 : Taux d'utilisation agrégé dans le cas de scénarios volontaristes.....	55
Figure 23 : Structure du parc existant en 2050 dans le cas de scénarios volontaristes	55
Figure 24 : Structure du parc neuf en 2050 dans le cas de scénarios volontaristes.....	56
Figure 25 : Calibrage du taux de rénovation	60
Figure 26 : Courbe d'utilisation de l'infrastructure de chauffage.....	63
Figure 27 : Emplacement indicatif des étiquettes énergie aux prix 2008 des énergies	64
Figure 28 : Croissance du stock de logements en scénario de référence	65

Liste des sigles

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

AME (scénario) : scénario avec mesures existantes

AMS (scénario) : scénario avec mesures supplémentaires

ANAH : Agence nationale de l'habitat

BBC : bâtiment basse consommation

BEPOS : bâtiment à énergie positive

CCE : contribution climat-énergie

CEE : certificats d'économies d'énergie

CGDD : Commissariat général au développement durable

CIDD : crédit d'impôt développement durable

CIREN : Centre international de recherche sur l'environnement et le développement

COMOP : Comité opérationnel du Grenelle de l'environnement

DPE : diagnostic de performance énergétique

EcoPTZ : éco-prêt à taux zéro

GES : gaz à effet de serre

GIEC : Groupement d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques

MDE : maîtrise de la demande d'énergie

MEEDDM : Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer

OR : obligation de rénovation

POPE (loi) : Loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique

Res-IRF : module résidentiel d'IMACLIM-R France

RT : réglementation thermique

SCEQE : système communautaire d'échange des quotas d'émissions

Commissariat général au développement durable

Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable

Tour Voltaire

92055 La Défense cedex

Tél : 01.40.81.21.22

Retrouvez cette publication sur le site :

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/developpement-durable/>

Résumé

La France s'est engagée à réduire les consommations d'énergie du parc des bâtiments existants de 38 % en 2020 par rapport à 2008, objectif « Grenelle -38 % », et à diviser les émissions de CO₂ par quatre en 2050 par rapport à 1990, objectif « Facteur 4 ».

Pour atteindre ces objectifs, le Grenelle de l'environnement a mis en avant un certain nombre de leviers réglementaires et incitatifs.

Cette étude, réalisée par le CIREDD pour le compte du CGDD, a pour objectif d'analyser l'impact de ces différents instruments sur la consommation d'énergie pour le chauffage. Mesures existantes (crédit d'impôt développement durable, éco-prêt à taux zéro, réglementation thermique) et mesures supplémentaires (obligation de rénovation, contribution climat énergie) sont évaluées grâce au modèle Res-IRF du CIREDD. Ce modèle prend en compte l'efficacité énergétique des logements et leur évolution dans le temps sous l'effet de rénovations; il modélise également de façon originale les comportements de chauffage des ménages.

Les premières simulations suggèrent que les politiques considérées ne suffisent pas à atteindre les objectifs ambitieux fixés par la France. Ces résultats sont sensibles aux hypothèses retenues. En introduisant des hypothèses plus optimistes (ex : prix des rénovations plus faible) et en prenant en compte des facteurs complémentaires au modèle (ex : bois), un travail de ré-estimation sur la base du modèle du CIREDD a permis d'obtenir des résultats plus proches des objectifs du Grenelle.

Abstract

France has committed to reduce energy consumption of existing buildings from 38% in 2020 compared to 2008, target "Grenelle -38%", and to divide CO₂ emissions by four in 2050 compared to 1990, target "Factor 4". To achieve these objectives, the Grenelle de l'environnement has highlighted a number of regulatory and incentive policies.

This study, conducted by the CIREDD for the CGDD, aims to analyse the impact of these instruments on the energy consumption for heating. Existing measures (tax credit for sustainable development, eco-interest loan, thermal regulation) and additional measures (obligation to renovate, climate and energy contribution) are estimated using the CIREDD's model, Res-IRF. This model takes into account the energy efficiency of homes and their evolution over time as a result of renovations. It models also, in an original way, the heating behaviour of households.

The first simulations show that the policies considered are not sufficient to achieve the ambitious goals set by France. These results are sensitive to assumptions. By introducing more optimistic assumptions (eg lower prices renovations) and taking into account additional factors to the model (eg wood), a re-estimation based on the CIREDD's model has yielded results closer to the objectives of the Round Table.



Dépôt légal : Novembre 2011
ISSN 2102 - 4723