



HAL
open science

Les instruments économiques de maîtrise de l'énergie : Une évaluation multidimensionnelle

Louis-Gaëtan Giraudet

► **To cite this version:**

Louis-Gaëtan Giraudet. Les instruments économiques de maîtrise de l'énergie : Une évaluation multidimensionnelle. Economies et finances. Université Paris-Est, 2011. Français. NNT: . tel-00599374v1

HAL Id: tel-00599374

<https://pastel.hal.science/tel-00599374v1>

Submitted on 9 Jun 2011 (v1), last revised 3 Dec 2011 (v2)

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

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



École des Ponts
ParisTech

UNIVERSITÉ —
— PARIS-EST

Ecole Doctorale «Ville, Transports et Territoires »

Thèse de doctorat d'Université Paris-Est

Discipline : Economie

Louis-Gaëtan GIRAUDET

Les instruments économiques de maîtrise de l'énergie : Une évaluation multidimensionnelle

***Thèse co-dirigée par Dominique FINON, Directeur de recherche CNRS
et Philippe QUIRION, Chargé de recherche CNRS***

Soutenue le 28 mars 2011

Jury :

Mark JACCARD, Professeur, Simon Fraser University

Franck LECOQ, Ingénieur des Ponts, des Eaux et des Forêts, AgroParisTech

Rapporteur

Rapporteur

Jérôme ADNOT, Professeur, Mines ParisTech

Jean-Charles HOURCADE, Directeur de recherche CNRS, Directeur d'études EHESS

Gilles ROTILLON, Professeur émérite, Université Paris X-Nanterre

Katheline SCHUBERT, Professeur, Université de Paris I Panthéon-Sorbonne

Dominique FINON, Directeur de recherche CNRS

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

Directeur de thèse

Résumé

Les instruments économiques de maîtrise de l'énergie : une évaluation multidimensionnelle

Cette thèse évalue l'efficacité de différentes formes de taxes, subventions et réglementations mises en place pour corriger les défaillances de marché qui s'opposent aux économies d'énergie. Elle mobilise plusieurs approches, selon un degré de complexité croissant. Dans un premier temps, un modèle microéconomique standard est développé pour comparer les performances statiques des différents instruments. Dans un deuxième temps, la représentation des comportements des consommateurs est approfondie dans un modèle de prospective de la consommation d'énergie pour le chauffage des ménages français, qui permet d'identifier les mécanismes dynamiques par lesquels les instruments peuvent corriger les principales défaillances de marché. Dans un troisième temps, une évaluation empirique des dispositifs de « certificats blancs » – obligations échangeables d'économies d'énergie imposées aux opérateurs énergétiques – est menée à partir d'une comparaison des expériences britannique, italienne et française, en intégrant les institutions dans l'analyse. Le croisement de ces différentes approches montre que : (i) les taxes sur l'énergie, qui encouragent à la fois l'investissement dans l'efficacité énergétique et la sobriété des comportements, sont particulièrement efficaces ; (ii) les réglementations sur l'efficacité énergétique ont un impact significatif sur la diffusion des technologies efficaces ; (iii) les subventions à l'efficacité énergétique génèrent un effet rebond important ; (iv) en fonction de l'environnement institutionnel dans lequel ils s'insèrent, les « certificats blancs » combinent les propriétés de ces instruments. Appliquée en France au secteur du bâtiment résidentiel, la combinaison la plus efficace de ces instruments ne permet pas d'atteindre les objectifs d'économies d'énergie définis dans le cadre du Grenelle de l'environnement.

Mots clés :

Barrières à l'efficacité énergétique
Certificats blancs
Effet rebond
Efficacité
Efficience
Efficience dynamique
Maîtrise de l'énergie
Modélisation hybride
Réglementation
Subvention
Taxe

Thèse préparée au Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED), 45 bis avenue de la Belle Gabrielle, 94736 Nogent-sur-Marne Cedex

Abstract

Policy instruments for energy conservation: A multidimensional assessment

This thesis evaluates the effectiveness of various forms of taxes, subsidies and regulations implemented to correct for market failures that may prevent energy savings. It builds on various approaches, with gradual complexity. First, a standard microeconomic model is developed to compare the static performances of these instruments. Second, the representation of consumer behaviour is strengthened in a model of the residential energy demand for space heating in France, which allows to identify the dynamic mechanisms by which instruments can correct for the main market failures. Third, an empirical evaluation of « white certificate » schemes – tradable energy saving obligations imposed on energy operators – is made from the comparison between the British, Italian and French experiences, taking into account national institutions. The following conclusions can be drawn from these various approaches : (i) energy taxes, by encouraging both energy efficiency investment and sufficiency behaviour, are particularly effective ; (ii) energy efficiency regulations have a significant impact on the diffusion of efficient technologies ; (iii) subsidies to energy efficiency induce a large rebound effect ; (iv) depending on the institutional environment in which they operate, white certificate schemes combine different properties of these instruments. Applied to the French residential building sector, the most effective combination of these instruments does not allow to reach the energy saving target set by the Government.

Keywords:

Barriers to energy efficiency
Dynamic efficiency
Energy conservation
Effectiveness
Efficiency
Hybrid modelling
Rebound effect
Regulation
Subsidy
Tax
White certificate schemes

Remerciements

Avant toute chose, je remercie Mark Jaccard et Franck Lecocq d'avoir accepté d'être rapporteur de mon travail et Jérôme Adnot, Gilles Rotillon et Katheline Schubert d'avoir accepté de se joindre à eux pour l'évaluer.

Si le choix de bâtir cette thèse sur une pluralité d'approches correspondait à une volonté personnelle, je n'ai pu l'assumer jusqu'au bout que grâce à un co-encadrement exceptionnel de Dominique Finon et Philippe Quirion. Chacun m'a apporté, à sa manière, un savant dosage de liberté, d'implication et de regard critique, qui m'a permis de relever le défi de cohérence que suscitait une telle entreprise.

Je remercie Dominique de m'avoir poussé à ne jamais céder à la facilité et à toujours garder en vue le lien avec le monde réel. La « convergence par tâtonnements » à laquelle nous avons abouti restera pour moi comme une expérience intellectuellement très enrichissante. Je remercie Philippe de m'avoir confié rapidement des responsabilités importantes, comme l'approfondissement d'un de ses articles antérieurs et la participation à l'*Energy Modeling Forum*, qui furent de formidables déclencheurs sur le plan méthodologique et pour ma réflexion théorique d'ensemble. Par la suite, l'acuité de son interprétation des résultats de modélisation m'a particulièrement aidé.

J'ai également eu la chance de travailler avec Céline Guivarch, avec qui des échanges simples et brefs me permettaient d'avancer à grand pas. En outre, la proximité temporelle de nos soutenance de thèse fut fort utile à ma réflexion. Les recherches de Benoît Allibe ont également alimenté en données précieuses mes travaux de modélisation.

Cette thèse a bénéficié de collaborations, formelles ou informelles, avec des acteurs publics et privés, sans lesquelles l'ancrage empirique de mes recherches n'aurait pas été possible. Je remercie en particulier Luc Bodineau (ADEME), Jean-Jacques Becker, Olivier Teissier et Lucile Penot-Antoniou (CGDD) et Eric Lagandré (ANAH).

Je suis reconnaissant à Jean-Charles Hourcade de m'avoir accueilli au CIREC, d'avoir porté un intérêt constant à mon travail et, plus généralement, de m'accompagner dans mon projet de recherche. Je salue l'ensemble du personnel du CIREC, où il fait si bon travailler. Je remercie en particulier Patrice Dumas, Stéphane Hallegatte, Sandrine Mathy et Stéphanie Monjon pour des relectures occasionnelles, Ruben Bibas, Laure Lampin et Vincent Viguié pour des discussions enrichissantes sur les thématiques voisines sur lesquelles ils travaillent, ainsi que Emmanuel Combet, Meriem Hamdi-Cherif, Hypathie Nassopoulos et Henri Waisman, sans oublier « notre ami » Christophe Cassen, que j'ai côtoyés au CIREC pendant toute la durée de ma thèse.

J'embrasse mes amis, qui m'ont accompagné dans le quotidien de ces trois années (je n'ai jamais été aussi prêt de pouvoir répondre par l'affirmative à la question rituelle de Damien et Corentin : « alors, t'as trouvé aujourd'hui ? »), et mes parents et ma sœur pour leur éternel soutien.

Table des matières

RESUME	3
ABSTRACT	5
REMERCIEMENTS	7
TABLE DES MATIERES	9
LISTE DES FIGURES	15
LISTE DES TABLEAUX	17
INTRODUCTION GENERALE	19
CHAPITRE I : ECONOMIE DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE ET JUSTIFICATION DE L'INTERVENTION PUBLIQUE ..	27
1 LES OBJETS DE L'ECONOMIE DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE	29
1.1 <i>Le service énergétique et ses déterminants : efficacité et sobriété</i>	29
1.1.1 Le service énergétique	29
1.1.2 Efficacité, sobriété et maîtrise de l'énergie	30
1.2 <i>Efficacité et sobriété sont économiquement liées : l'effet rebond</i>	31
1.3 <i>Le problème fondateur : le paradoxe de l'efficacité énergétique</i>	32
1.4 <i>Les barrières aux économies d'énergie : défaillances et obstacles</i>	33
2 L'EVOLUTION DES CONCEPTIONS DANS L'ECONOMIE DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE	34
2.1 <i>Les controverses fondatrices</i>	35
2.1.1 Les visions opposées d'ingénieurs et d'économistes	35
2.1.2 Une reformulation du problème par des taux d'actualisation implicites élevés	36
2.2 <i>La synthèse économique de Jaffe et Stavins : paradoxe et gisements</i>	36
2.2.1 Une référence normative à la fois standard et dynamique	37
2.2.2 Les obstacles à l'efficacité énergétique	38
2.2.3 Les défaillances des marchés de l'énergie	39
2.2.4 Les défaillances des marchés de l'efficacité énergétique	40
2.3 <i>L'élargissement de l'analyse aux approches « hétérodoxes »</i>	42
2.3.1 La référence à la rationalité limitée	42
2.3.2 Les apports de l'économie des coûts de transaction	42
2.3.3 L'économie comportementale et les défaillances de comportement	43
2.3.4 Autres disciplines des sciences humaines	44
3 LES VOIES DE PROGRESSION DE L'ECONOMIE DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE	44
3.1 <i>Surmonter le problème de l'inséparabilité des barrières</i>	44
3.2 <i>Approfondir l'analyse des comportements d'utilisation des équipements</i>	45
3.3 <i>Approfondir l'analyse des barrières à l'innovation</i>	46
4 DE L'ANALYSE DES BARRIERES AUX RECOMMANDATIONS D'INTERVENTION PUBLIQUE	47
4.1 <i>A problèmes différents, instruments différents</i>	47
4.2 <i>La question du nombre d'instruments</i>	48
5 CONCLUSIONS	49
BIBLIOGRAPHIE	51
CHAPITRE II : EVALUATION DES INSTRUMENTS DE MAITRISE DE L'ENERGIE : PRINCIPES ET RESULTATS	
PRELIMINAIRES	57
1 CRITERES D'EVALUATION	60

1.1	<i>Efficacité et efficence économique</i>	60
1.2	<i>Efficence statique et dynamique</i>	61
1.3	<i>Critères complémentaires : effet d'aubaine et effets distributifs</i>	61
2	REVUE DES RESULTATS D'EVALUATIONS THEORIQUES ET EMPIRIQUES	62
2.1	<i>Instruments basés sur des incitations non financières</i>	62
2.1.1	Réglementation sur l'efficacité énergétique	62
2.1.2	Information sur l'efficacité et la sobriété énergétiques	64
2.2	<i>Instruments basés sur des incitations financières</i>	64
2.2.1	Subvention à l'efficacité énergétique.....	64
2.2.2	Taxe sur l'énergie et les émissions de CO ₂	65
2.3	<i>Combinaisons d'instruments</i>	65
2.3.1	Cas de superposition	65
2.3.2	Un cas d'hybridation : les obligations d'économies d'énergie	66
3	PERFORMANCE COUT-EFFICACITE DES PRINCIPAUX INSTRUMENTS EN STATIQUE COMPARATIVE	67
3.1	<i>Description du modèle en situation de référence</i>	68
3.2	<i>Instruments représentés</i>	70
3.3	<i>Principaux résultats</i>	72
3.4	<i>Synthèse et limites du modèle</i>	74
4	CONCLUSION.....	75
	BIBLIOGRAPHIE.....	77

CHAPITRE III : EVALUATION PROSPECTIVE DES INSTRUMENTS DE MAITRISE DE L'ENERGIE PAR LA MODELISATION HYBRIDE 81

1	RES-IRF, UN MODELE DE LA PERFORMANCE ENERGETIQUE DU PARC DE LOGEMENTS FRANÇAIS	84
1.1	<i>Une architecture de modélisation hybride à deux niveaux</i>	85
1.1.1	Res-IRF, un module bottom-up au développement microéconomique avancé	85
1.1.2	Bouclage macroéconomique avec le modèle d'équilibre général IMACLIM-R.....	86
1.2	<i>Vue d'ensemble du module Res-IRF</i>	87
1.2.1	Représentation technologique du parc de logements	87
1.2.2	Choix d'une option de rénovation.....	89
1.2.3	Coûts de rénovation et effet d'apprentissage.....	89
1.2.4	Anticipations myopes et taux d'actualisation hétérogènes	90
1.2.5	Coûts intangibles et effet d'imitation.....	91
1.2.6	Dynamique des coûts et taux de rénovation endogène.....	92
1.2.7	Sobriété et effet rebond.....	92
1.3	<i>Le modèle en situation de référence</i>	93
1.3.1	Déterminants principaux du scénario de référence	93
1.3.2	Estimation du gisement d'économies d'énergie dans le parc existant	95
2	MODE D'ACTION DES INSTRUMENTS DU GRENELLE DE L'ENVIRONNEMENT.....	96
2.1	<i>Paramétrage des instruments</i>	97
2.1.1	Crédits d'impôt développement durable (CIDD)	97
2.1.2	Eco-prêts à taux zéro pour la rénovation énergétique (EcoPTZ)	97
2.1.3	Réglementation thermique pour les bâtiments neufs (RT2012-2020).....	97
2.1.4	Obligation de rénovation (OR)	98
2.1.5	Taxe carbone ou contribution climat-énergie (CCE).....	98
2.2	<i>Efficacité comparée des instruments</i>	102
3	EVALUATION GLOBALE DES POLITIQUES DU GRENELLE DE L'ENVIRONNEMENT	106
3.1	<i>Bouquet avec mesures existantes (AME)</i>	106
3.2	<i>Bouquets avec mesures supplémentaires (AMS)</i>	107
4	DISCUSSION	110
4.1	<i>Une évaluation positive</i>	110
4.1.1	Unités d'évaluation	110

4.1.2	Critères d'évaluation : la question des coûts	110
4.2	<i>Eléments non modélisés</i>	112
4.2.1	Energies renouvelables	112
4.2.2	Mesures complémentaires	112
4.3	<i>Scénarios volontaristes</i>	113
5	CONCLUSION	116
	BIBLIOGRAPHIE	117
CHAPITRE IV : EVALUATION EMPIRIQUE DES CERTIFICATS BLANCS, INSTRUMENT MULTIFONCTIONNEL DE MAITRISE DE L'ENERGIE		121
1	PROPRIETES DES DISPOSITIFS DE CERTIFICATS BLANCS	125
1.1	<i>Définition</i>	125
1.2	<i>Caractérisation théorique</i>	126
2	LES DIFFERENCES DE MISE EN ŒUVRE DES DISPOSITIFS NATIONAUX	126
2.1	<i>Acteurs</i>	127
2.1.1	Opérateurs énergétiques obligés	127
2.1.2	Consommateurs d'énergie	127
2.1.3	Tierces parties	127
2.1.4	Pouvoirs publics	128
2.2	<i>Réseaux d'acteurs</i>	128
2.2.1	Périmètre des dispositifs	128
2.2.2	Relations « aval » entre obligés et consommateurs	129
2.2.3	Relations « amont » horizontales ou verticales	129
2.3	<i>Institutions</i>	130
2.3.1	Structure et régulation des marchés de l'énergie	130
2.3.2	Niveau quantitatif de l'obligation	130
2.3.3	Règles de recouvrement des coûts	131
2.3.4	Co-existence avec d'autres instruments de politique publique	131
3	EFFICIENCE STATIQUE	132
3.1	<i>Analyse coût-bénéfice</i>	132
3.2	<i>Déterminants techniques de l'efficacité statique</i>	134
3.3	<i>Influence des règles institutionnelles sur les relations « aval »</i>	135
4	LES OPTIONS DE FLEXIBILITE DANS LA DYNAMIQUE DES RESEAUX D'ACTEURS	137
4.1	<i>Malgré des échanges, un faible recours aux transactions horizontales</i>	137
4.2	<i>La prédominance des transactions verticales</i>	139
5	LES CONDITIONS D'EFFICIENCE DYNAMIQUE DES DISPOSITIFS DE CERTIFICATS BLANCS	140
5.1	<i>La nécessaire résolution des incohérences institutionnelles</i>	140
5.2	<i>Le développement de nouvelles incitations</i>	141
5.3	<i>Un dispositif d'accompagnement de la transition technologique</i>	142
6	CONCLUSION	143
	BIBLIOGRAPHIE	145
CONCLUSION GENERALE		149
ANNEXE I : LA MAITRISE DE L'ENERGIE EN FRANCE : TENDANCES PASSES ET ENJEUX FUTURS		157
1	IMPACT DES MESURES DE MAITRISE DE L'ENERGIE DE 1974 AUX ANNEES 2000	159
1.1	<i>Une décroissance continue de la consommation unitaire de chauffage</i>	159
1.2	<i>Une tendance soutenue par la réglementation thermique des bâtiments neufs</i>	160
2	LA NOUVELLE DONNE ISSUE DU GRENELLE DE L'ENVIRONNEMENT	161
2.1	<i>Les années 2000 : la maîtrise de l'énergie comme réponse à l'enjeu climatique</i>	161
2.2	<i>Les objectifs et moyens définis par le Grenelle de l'environnement</i>	161

ANNEXE II: EFFICIENCY AND DISTRIBUTIONAL IMPACTS OF TRADABLE WHITE CERTIFICATES COMPARED TO TAXES, SUBSIDIES AND REGULATIONS 163

INTRODUCTION	165
1 TRADABLE WHITE CERTIFICATES IN PRACTICE	166
2 THE MODEL	168
2.1 <i>The model in business-as-usual (i.e., no energy-saving policy)</i>	168
2.2 <i>Calibration of the parameters</i>	171
2.3 <i>White certificates with a target as a percentage of energy sold (WC%)</i>	172
2.4 <i>White certificates with an absolute target (WCA)</i>	173
2.5 <i>Tax rebated lump-sum to consumers (TH)</i>	175
2.6 <i>Tax rebated lump-sum to energy suppliers (TE)</i>	175
2.7 <i>Subsidy on energy-efficient goods and services (S)</i>	176
2.8 <i>Energy-efficiency regulation (R)</i>	177
3 NUMERICAL RESULTS	178
3.1 <i>Total costs and quantities</i>	178
3.2 <i>Consumers' prices</i>	179
3.3 <i>Distributional consequences</i>	181
4 DISCUSSION	183
4.1 <i>Where to apply which policy instrument?</i>	183
4.2 <i>Equity and political acceptability</i>	183
4.3 <i>Issues not included in the model</i>	183
4.3.1 <i>Equalisation of the marginal cost of energy saving</i>	183
4.3.2 <i>The "energy-efficiency gap"</i>	184
4.3.3 <i>Transaction costs</i>	184
5 CONCLUSION.....	185
ACKNOWLEDGEMENTS.....	186
APPENDIX 1.....	186
APPENDIX 2: COMPARISON OF NATIONAL TARGETS	187
REFERENCES	189

ANNEXE III: EXPLORING THE POTENTIAL FOR ENERGY CONSERVATION IN FRENCH HOUSEHOLDS THROUGH HYBRID MODELLING..... 191

1 INTRODUCTION.....	193
2 THE RESIDENTIAL MODULE OF IMACLIM-R FRANCE (RES-IRF).....	194
2.1 <i>Determinants of the demand for space heating</i>	194
2.2 <i>Retrofitting dynamics</i>	195
2.2.1 <i>Capital turn-over</i>	196
2.2.2 <i>Choice of a retrofitting option</i>	197
2.2.3 <i>Transition costs and learning-by-doing</i>	197
2.2.4 <i>Myopic expectation and heterogeneous discounting</i>	198
2.2.5 <i>Intangible costs and information acceleration</i>	200
2.2.6 <i>Endogenous retrofitting rate</i>	201
2.3 <i>Sufficiency and the rebound effect</i>	202
2.4 <i>IMACLIM-R macroeconomic feedback</i>	204
3 BUSINESS AS USUAL SCENARIO	205
3.1 <i>Input data</i>	205
3.2 <i>Evolution of the primary drivers of energy consumption</i>	206
3.3 <i>Reliability of the model</i>	210
4 THE POTENTIAL FOR ENERGY CONSERVATION IN EXISTING DWELLINGS	211
4.1 <i>Determinants of technological change</i>	212

4.2	<i>Sensitivity to investment parameters</i>	214
4.3	<i>Potential energy savings due to efficiency and sufficiency</i>	217
5	CONCLUSION.....	218
	ACKNOWLEDGEMENTS.....	219
	ANNEX 1: PARAMETER SETTINGS	220
	ANNEX 2: FUEL SWITCHING IN EXISTING DWELLINGS	222
	ANNEX 3: BUILDING STOCK GROWTH.....	223
	ANNEX 4: CALIBRATION OF INTANGIBLE COSTS	225
	REFERENCES	229
ANNEXE IV: THE COSTS AND BENEFITS OF WHITE CERTIFICATE SCHEMES		235
1	INTRODUCTION.....	237
2	MAIN DIFFERENCES IN NATIONAL DESIGNS	239
2.1	<i>Scope of the obligation</i>	239
2.2	<i>Metrics of the obligation</i>	240
3	ENERGY EFFECTIVENESS.....	241
3.1	<i>Delimitation of energy savings</i>	241
3.1.1	General effects impacting energy effectiveness	241
3.1.2	Methodological issues in energy savings accounting	242
3.2	<i>Effectiveness assessment</i>	243
3.2.1	Quantification of the energy savings to target.....	243
3.2.2	Nature of effective energy savings.....	244
4	COSTS BORNE BY OBLIGED PARTIES	245
4.1	<i>Nature of the costs arising from white certificate schemes</i>	246
4.2	<i>Estimates of the costs borne by obliged parties</i>	246
4.3	<i>Cost distribution among obliged parties</i>	248
5	BALANCING COSTS AND BENEFITS	249
5.1	<i>Contributions of other parties to total costs</i>	249
5.2	<i>Social benefits</i>	250
5.3	<i>A social efficiency assessment</i>	251
6	INTERPRETING COSTS: LESSONS ABOUT OBLIGED PARTIES' STRATEGY.....	253
6.1	<i>Cost heterogeneity and trade implications</i>	254
6.2	<i>Nature of the costs and validity of the hybrid mechanism</i>	255
7	CONCLUSION.....	256
	ACKNOWLEDGEMENTS.....	259
	ANNEX	260
	REFERENCES	265
BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE		269

Liste des figures

Figure 1: Le système technico-économique du bâtiment résidentiel.....	24
Figure 2: Arbitrage microéconomique entre les consommations d'énergie et de biens d'efficacité énergétique	31
Figure 3: Représentation microéconomique de l'effet rebond	32
Figure 4: Les différentes notions de gisement d'efficacité énergétique, d'après Jaffe <i>et al.</i> (2004, p.88)	37
Figure 5: Les différents types de barrières et défaillances, d'après Sorrell (2004, p.30), Jaffe <i>et al.</i> (2004), Quirion (2004) et Gillingham <i>et al.</i> (2009, p.604).....	38
Figure 6: Ciblage du modèle 1 par rapport au système technico-économique du bâtiment résidentiel	67
Figure 7: Système de demande du consommateur	68
Figure 8: Variation de la demande de service énergétique issue de l'arbitrage entre e et g	69
Figure 9: Effet de la taxe sur l'offre d'énergie.....	71
Figure 10: Effet de la subvention sur l'offre de bien g	71
Figure 11: Effet de la réglementation sur la demande d'énergie	71
Figure 12: Sensibilité du coût à l'élasticité de substitution entre SE et c, pour une diminution de e de 2% (ordonnée logarithmique)	72
Figure 13: Sensibilité du coût à l'élasticité de substitution entre e et g, pour une diminution de e de 2% (ordonnée logarithmique)	72
Figure 14: Effet sur les quantités d'une diminution de e de 2% ($\sigma = 0,5$ et $\sigma_b = 1$)	73
Figure 15: Effet sur les prix d'une diminution de e de 2% ($\sigma = 0,5$ et $\sigma_b = 1$)	74
Figure 16: Ciblage du modèle 2 par rapport au système technico-économique du bâtiment résidentiel	84
Figure 17: Bouclage récursif du module Res-IRF avec le modèle IMACLIM-R	86
Figure 18: Structure du parc de logements en 2007 d'après les données de l'ANAH (Marchal, 2008)	88
Figure 19: Courbe d'utilisation de l'infrastructure de chauffage (d'après Allibe, 2009 ; Cayre <i>et al.</i> , 2011)	93
Figure 20: Prix des énergies dans le scénario de référence	94
Figure 21: Projection de la superficie du parc de logements.....	95
Figure 22: Potentiel technico-économique de maîtrise de l'énergie dans les logements existants.....	96
Figure 23: Principaux paramètres des mesures existantes et supplémentaires	99
Figure 24: Consommation d'énergie finale dans le cas d'instruments isolés	102
Figure 25: Taux d'utilisation agrégé dans le cas d'instruments isolés	104
Figure 26: Nombre de rénovations dans le cas d'instruments isolés.....	104
Figure 27: Impact des instruments isolés sur les coûts de rénovation	104
Figure 28: Structure du parc existant en 2050 dans le cas d'instruments isolés	105
Figure 29: Structure du parc neuf en 2050 dans le cas d'instruments isolés.....	105
Figure 30: Effets de sobriété dans le parc neuf (voir l'équation 2)	105
Figure 31: Consommation d'énergie finale dans le cas d'instruments combinés	108
Figure 32: Taux d'utilisation agrégé dans le cas d'instruments combinés	108
Figure 33: Nombre de rénovations dans le cas d'instruments combinés	108
Figure 34: Structure du parc existant en 2050 dans le cas d'instruments combinés.....	109
Figure 35: Structure du parc neuf en 2050 dans le cas d'instruments combinés	109
Figure 36: Gains d'énergie finale en 2050 par rapport à 2008.....	109
Figure 37: Profil temporel des coûts et bénéfices du CIDD par rapport au scénario de référence	111
Figure 38: Profil temporel des coûts et bénéfices de l'OR par rapport au scénario de référence.....	111
Figure 39: Profil temporel des coûts et bénéfices de la CCE par rapport au scénario de référence	111
Figure 40: Gains d'énergie primaire unitaire dans le parc existant en 2020 par rapport à 2008	114
Figure 41: Structure du parc existant en 2050 dans le cas de scénarios volontaristes.....	115
Figure 42: Structure du parc neuf en 2050 dans le cas de scénarios volontaristes	115

Figure 43: Taux d'utilisation agrégé dans le cas de scénarios volontaristes	115
Figure 44: Ciblage du « Modèle » 3 par rapport au système technico-économique du bâtiment résidentiel ...	124
Figure 45: Mode de délivrance des certificats blancs en Italie en 2008 (Source: Pavan, 2008; Eyre <i>et al.</i> , 2009)	138
Figure 46: Evolution passée de la consommation unitaire d'énergie des logements, par usage (ADEME, 2008)	159
Figure 47: Types of saving in the existing TWC schemes	168
Figure 48: Consumer demand system.....	169
Figure 49: Impact of a 2% energy-saving target on total cost and on quantities	179
Figure 50: Impact of a 2% energy-saving target on P_e and P_g	181
Figure 51: Impact of a 2% energy-saving target on the components of total cost	182
Figure 52: Italian energy saving target.....	187
Figure 53: The retrofitting dynamic system	196
Figure 54: Share of retrofitted dwellings with respect to the net present value of retrofitting.....	202
Figure 55: Sufficiency curve (adapted from Allibe, 2009)	204
Figure 56: Recursive connection of Res-IRF to IMACLIM-R France	205
Figure 57: Reference energy prices.....	206
Figure 58: Decomposition of the primary drivers of the final energy demand for space heating	207
Figure 59: Growth of the total building stock, with new dwellings split by construction categories	207
Figure 60: Numbers and efficiency of existing dwellings by efficiency class	208
Figure 61: Evolution of energy consumption by fuel type, in new and existing dwellings	209
Figure 62: Sufficiency effect	210
Figure 63: Sensitivity to alternative energy price scenarios	211
Figure 64: Annual retrofits, in reference and in alternative scenarios	212
Figure 65: Evolution of retrofitting variables	213
Figure 66: Change in annual retrofits due to freezing retrofitting variables	213
Figure 67: Change in annual retrofits due to parameter variation	215
Figure 68: Change in 2050 energy class repartition due to parameter variation	215
Figure 69: Change in conventional energy demand of existing dwellings due to parameter variation.....	216
Figure 70: Change in the aggregate service factor of existing dwellings due to parameter variation.....	216
Figure 71: Techno-economic potential for energy conservation in existing dwellings.....	217
Figure 72: National measures mix (Data: AEEG, 2008; DGEC, 2009; Lees, 2008)	244

Liste des tableaux

Tableau 1: Contribution spécifique de l'auteur aux travaux présentés dans la thèse	26
Tableau 2: Valeur actuelle nette de quelques investissements d'efficacité énergétique	33
Tableau 3: Matrice des coûts de rénovation (€/m ²)	89
Tableau 4: Part des types d'investisseurs (d'après INSEE) et paramétrage de leur taux d'actualisation (r)	91
Tableau 5: Outils de représentation des différentes barrières à l'efficacité énergétique	91
Tableau 6: Consommation d'énergie dans les différents scénarios.....	100
Tableau 7: Résultats complémentaires	101
Tableau 8: Les acteurs des dispositifs de certificats blancs	128
Tableau 9: Les différents types de relations entre acteurs	130
Tableau 10: Les différentes règles institutionnelles	132
Tableau 11: Coûts et bénéfices des dispositifs de certificats blancs.....	133
Tableau 12: Mesures réalisées en France dans le secteur résidentiel (Source: DGEC, 2009).....	135
Tableau 13: Synthèse des performances des instruments de maîtrise de l'énergie	153
Tableau 14: Récapitulatif des approches suivies	155
Table 15: Targets in the British, Italian and French schemes.....	167
Table 16: List of model variables.....	186
Table 17: List of model parameters	186
Table 18: Comparison of national targets.....	188
Table 19: Matrix of initial transition costs (€/m ²)	198
Table 20: Numbers (as % of the total stock) and discount rates (in %/year) in each type of dwelling.....	200
Table 21: Comparison of model outcomes to usual values	210
Table 22: Alternative parameter setting	214
Table 23: Model parameters.....	221
Table 24: Matrix of fuel switching costs (€/m ²)	222
Table 25: Matrix of new construction costs (€/m ²)	224
Table 26: Matrix of 2008 transition choices, with ε indicating a negligible term (adapted from PUCA, 2008) ..	226
Table 27: Matrix of initial intangible costs (€/m ²).....	226
Table 28: Matrix of new construction choices, as observed in 2008 (adapted from OPEN, 2008).....	227
Table 29: Matrix of intangible costs for new constructions (€/m ²)	227
Table 30: Comparison of the costs borne by obliged parties.....	248
Table 31: Comparison of total costs.....	249
Table 32: Comparison of total benefits.....	251
Table 33: Consolidated costs and benefits and social efficiency analysis.....	253
Table 34: Numerical values and references of the main assumptions	260
Table 35: Energy savings expressed in normalized units over the 2005-08 period in Italy	261
Table 36: Estimate of obliged parties' costs in the French scheme	262
Table 37: Estimate of the total costs of energy efficiency improvement in the French scheme	263

Introduction générale

Autrefois discutée dans des cercles d'ingénieurs initiés, la question des économies d'énergie s'est invitée dans le débat public à la suite du premier choc pétrolier de 1973. Sensibilisés par un prix de l'énergie élevé, les pouvoirs publics constatent alors que d'importantes dépenses pourraient être évitées par des investissements rentables dans les technologies efficaces en énergie (isolation, électroménager efficace, *etc.*), voire par une plus grande sobriété des comportements de consommation d'énergie (modération de la température de chauffage, suppression des éclairages inutiles, *etc.*). Ces consommations évitées permettent en outre de réduire la dépendance nationale aux importations d'énergie fossile. C'est l'époque, en France, des campagnes de communication pour la « chasse au gaspi », du passage à l'heure d'été et de la mise en place des premières réglementations thermiques pour la construction neuve. Par la suite, pourtant, l'attention portée à la maîtrise de l'énergie fluctue au gré des tensions sur les marchés pétroliers et ce n'est qu'avec l'avènement de la lutte contre le changement climatique, au début des années 1990, que ce thème s'inscrit durablement dans l'agenda public (Martin *et al.*, 1998 ; Leray et de la Roncière, 2002).

En plus de réduire l'intensité énergétique et la dépendance aux importations des économies nationales, les économies d'énergie réduisent les émissions anthropiques de gaz à effet de serre à l'origine du changement climatique (Levine *et al.*, 2007 ; Académie des sciences, 2010). Souvent résumées par une formule de bon sens – « l'énergie la moins chère et la moins polluante, c'est encore celle que l'on ne consomme pas¹ » –, ces multiples propriétés font aujourd'hui de la maîtrise de l'énergie l'un des consensus d'action collective les mieux partagés par la société civile, les pouvoirs publics et les acteurs privés. En France, le sujet a occupé une place centrale dans les consultations du Grenelle de l'environnement, notamment dans le domaine du bâtiment. La loi de programme qui s'ensuit reconnaît l'importance du bâtiment comme principal gisement d'économies d'énergie et fixe pour objectif de réduire la consommation d'énergie dans le bâtiment existant de 38% en 2020². Divers instruments de politique publique, comme les réglementations thermiques, des formes variées de subvention telles que les crédits d'impôt et les prêts bonifiés, ou encore des obligations d'économies d'énergie imposées aux fournisseurs d'énergie (« certificats blancs ») sont mis en place pour y parvenir.

Ce condensé d'histoire rappelle que la maîtrise de l'énergie ne reçoit que tardivement tout l'intérêt qu'elle mérite. Ce défaut de mise en œuvre (*implementation gap*) tient en partie à l'incomplétude des réponses apportées aux questions économiques qui accompagnent l'action publique : *Qu'est-ce qui justifie une intervention publique en faveur des économies d'énergie ? Les instruments d'intervention sont-ils efficaces ?*

La réponse à la première question n'est pas aussi évidente que le bon sens le suggère. Il suffit pour s'en convaincre d'observer que la formule évoquée plus haut peut être retournée avec tout autant de candeur : si un gisement de rentabilité existe, mais qu'il n'est pas investi spontanément, que peut faire de plus l'intervention publique ? Ces arguments opposés ont alimenté une controverse durable et parfois vive entre communautés d'experts. D'un côté, les ingénieurs les plus scientifiques défendent l'existence d'un gisement considérable d'économies d'énergie et militent en faveur de politiques publiques ambitieuses. Cette posture est motivée par des calculs qui tendent à surestimer le

¹ Prononcée par exemple par M. François Loos, alors Ministre délégué à l'industrie, lors d'un colloque sur les certificats d'économies d'énergie organisé par l'ADEME à Paris le 8 novembre 2005.

² Loi « Grenelle 1 », n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, Article 5.

gisement, en supposant une *généralisation des meilleures technologies disponibles*, au mépris des contraintes hétérogènes rencontrées par les individus. A l'opposé, les économistes les plus orthodoxes évoquent la fameuse image du « billet de banque traînant sur un trottoir très fréquenté sans être ramassé » pour souligner l'inconséquence de cette idée. Considérant l'économie à l'*équilibre*, dans une situation où toutes les ressources sont allouées efficacement, ils nient l'existence d'un gisement de rentabilité inexploité et rejettent toute nécessité d'intervention.

Entre ces deux positions caricaturées, la grande majorité des spécialistes s'accorde sur le constat suivant : le niveau actuel de consommation d'énergie, qui n'exploite pas toutes les possibilités d'efficacité énergétique, est facteur d'inefficience économique ; à l'origine de ce paradoxe, des « barrières » s'opposent à l'investissement dans l'efficacité énergétique et à la sobriété énergétique, *i.e.* la décroissance absolue des consommations courantes d'énergie ; certaines, mais pas toutes, justifient une intervention publique (Jaffe *et al.*, 2004). Par exemple, l'hétérogénéité des préférences des consommateurs est un « obstacle » à la généralisation des meilleures technologies, mais elle est une donnée économique de base qui n'appelle pas d'intervention. En revanche, l'information imparfaite des consommateurs sur les bénéfices offerts par les meilleures technologies disponibles correspond à une « défaillance » des marchés de l'efficacité énergétique qui mérite d'être corrigé.

Ainsi dégrossie, la question préalable de justification est encore loin d'être close. Les conditions de l'intervention publique, définies « négativement » par la présence de défaillances de marché qui s'opposent à l'atteinte de l'optimum économique, restent largement ouvertes. L'interprétation dépend notamment de l'hypothèse normative retenue pour caractériser la situation d'optimalité. Si la notion statique d'optimum de Pareto reste la référence, elle s'avère inopérante pour analyser l'aspect dynamique du problème : en effet, la question de l'optimalité porte autant sur la *possibilité ou non* pour les technologies efficaces d'être diffusées que sur le *rythme* d'une telle diffusion. De plus, l'analyse standard des écarts à l'optimum de Pareto va rarement jusqu'à la remise en cause de l'hypothèse de rationalité parfaite, dont les limites sont pourtant avérées dans le domaine de la maîtrise de l'énergie par un nombre croissant d'études comportementales. Dans cette perspective, la tendance des ménages à fonder leur décision d'investissement sur un calcul au prix courant de l'énergie est-elle une simple réaction à l'incertitude, caractéristique propre à tout marché et qui n'affecte donc pas l'efficacité, ou bien est-elle une « routine de calcul » qui viole l'hypothèse de rationalité parfaite ? Ces différences d'interprétation d'un même phénomène peuvent conduire à des prescriptions opposées.

La conséquence de cette réponse incomplète à la question de *justification* est la quasi-absence de réponse à la question de l'*efficacité* de l'intervention, qui lui est subordonnée. Les difficultés posées par la séparabilité des barrières compliquent leur quantification empirique et empêchent de prendre la mesure de l'intervention nécessaire. De plus, le processus par lequel un instrument permet de surmonter une barrière est souvent mal identifié. Enfin, même s'il était possible de caractériser clairement le sous-ensemble de barrières justifiant une intervention publique et l'ensemble des réponses politiques possibles, rien ne dit qu'un instrument unique pourrait être associé à chaque barrière : un instrument peut être employé pour surmonter plusieurs barrières ; deux instruments s'attaquant à deux barrières non indépendantes peuvent subir des interactions qui augmentent ou diminuent l'efficacité globale de l'intervention.

Ainsi, il n'existe pas de cadre d'analyse unique permettant d'associer l'évaluation des barrières et celle des instruments d'intervention publique. La notion de barrière fait appel à différents référentiels économiques : l'économie publique avant tout, mais également l'économie de l'innovation, l'économie comportementale et l'économie institutionnelle. Certaines de ces approches ont une portée plus descriptive que prescriptive, de telle sorte que toutes ne font pas le lien entre les barrières et les instruments qui pourraient les surmonter.

De ce problème d'évaluation découlent les questions de recherche qui sont traitées dans cette thèse : **Comment représenter les principales barrières aux économies d'énergie ? Comment leur associer des instruments de maîtrise de l'énergie ? Dans ce cadre, quelle est la performance des instruments ?** Ces questions se situent à la jonction entre celles, plus générales, de la justification et de l'efficacité de l'intervention publique.

Les réponses apportées reposent sur une comparaison des instruments de maîtrise de l'énergie par différents modèles, au sens d'une représentation simplifiée d'un système complexe. Adaptés de méthodologies existantes ou spécifiquement développés pour le sujet, les trois modèles utilisés se distinguent par leur dimension théorique ou empirique, statique ou dynamique, et par des degrés différents de formalisation.

L'unité du propos tient au fait que ces modèles couvrent différentes parties d'un même système technico-économique pris comme étude de cas : la branche résidentielle du secteur du bâtiment dans les pays industrialisés, la France pour l'essentiel. Dépeint à la figure 1, ce système lie une demande – des consommateurs – et une offre – des entreprises – par des transactions portant sur l'énergie d'une part, une multitude de biens contribuant à l'usage domestique de l'énergie d'autre part (panneau d'isolation, système de chauffage, ampoule d'éclairage, etc.). Les agents comme les biens sont hétérogènes et inter-reliés : les consommateurs diffèrent entre autres par leurs préférences, mais sont liés par des phénomènes sociaux comme l'imitation ; les entreprises aux compétences variées opèrent sur des marchés plus ou moins concentrés et interagissent au sein de filières organisées plus ou moins verticalement ; les biens sont technologiquement distincts mais peuvent, à l'image du système de chauffage et de l'isolation, fonctionner en synergie. Ainsi délimité, le système s'insère dans un environnement institutionnel qui régule son fonctionnement. Dans ce cadre global, les instruments d'intervention publique peuvent être vus comme des contraintes qui influencent la dynamique du système.

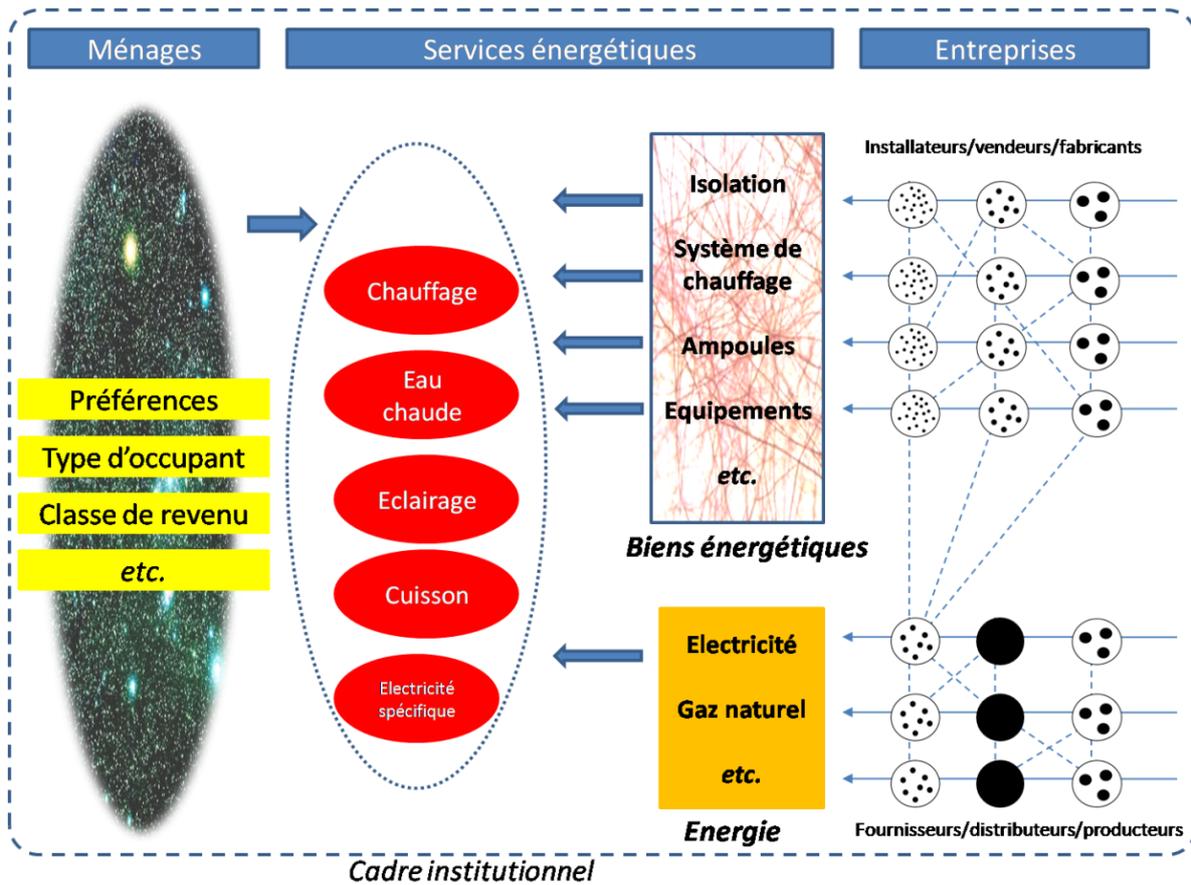


Figure 1: Le système technico-économique du bâtiment résidentiel

Afin d'assurer la cohérence de l'analyse, certaines problématiques connexes se trouvent exclues du système. D'abord, les déterminants de la consommation d'énergie dans les bâtiments *tertiaires* sont moins connus que dans le résidentiel et paraissent suffisamment spécifiques pour être considérés séparément. De plus, la question de l'accès à l'énergie précède toute réflexion sur la consommation d'énergie domestique dans les *pays en développement*, alors qu'elle peut être considérée comme close dans les pays industrialisés. Enfin, la consommation d'énergie résulte d'un arbitrage avec d'autres services domestiques, notamment le logement et la mobilité, qui sont liés à d'autres secteurs de l'économie comme *l'immobilier et les transports*. Malgré ces limites, les résultats présentés ici s'appliquent dans une large mesure aux thématiques connexes. Leur évocation occasionnelle permettra de le montrer.

Le chapitre I met en perspective historique l'élaboration de l'économie de la maîtrise de l'énergie et clarifie les concepts et les problèmes qui lui sont associés. La suite est organisée selon un degré croissant de complexité des objets étudiés. Le chapitre II propose une représentation stylisée du système technico-économique du bâtiment résidentiel par un modèle microéconomique standard. Une première barrière, l'effet rebond, est introduite et la performance coût-efficacité des principaux instruments de maîtrise de l'énergie (taxe, subvention, réglementation, « certificats blancs ») est évaluée en statique comparative. Ces résultats sont précédés d'un survol bibliographique des évaluations théoriques et empiriques des instruments de maîtrise de l'énergie. Le chapitre III approfondit la représentation des comportements des consommateurs, en développant un module de prospective de la consommation d'énergie des ménages français (Res-IRF) intégré au modèle

d'équilibre général IMACLIM-R France. Cette architecture hybride permet d'introduire de nouvelles barrières, de paramétrer les instruments de façon réaliste et d'évaluer leur efficacité dynamique. Le chapitre IV déplace l'analyse vers l'offre d'énergie et de biens d'usage de l'énergie et mobilise une approche institutionnelle, qui se prête davantage à l'étude de barrières portant sur l'organisation industrielle et la régulation. Les « certificats blancs » – obligations échangeables d'économies d'énergie imposées aux fournisseurs d'énergie, mises en œuvre en Grande-Bretagne, en Italie et en France – y sont représentés au sein d'un « régime technologique ». Ce modèle non formalisé permet d'évaluer empiriquement l'impact de l'instrument sur le changement technologique et organisationnel, en lien avec l'environnement institutionnel.

La conclusion propose une synthèse des performances des instruments selon plusieurs critères. Leur contribution potentielle à l'atteinte des objectifs fixés par les pouvoirs publics est discutée. Les zones d'ombre qui demeurent sur la quantification des coûts et les interactions entre instruments sont mises en lumière.

Ce travail s'appuie sur cinq articles publiés ou soumis dans des revues à comité de lecture. Les contributions particulières de l'auteur sont précisées dans le tableau 1 à la page suivante. Deux articles sont entièrement intégrés au texte et trois y sont partiellement repris. Les versions complètes de ces derniers figurent en annexe II, III et IV.

Académie des sciences, 2010, *Le changement climatique*, <http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/pdf/climat_261010.pdf>

Jaffe, A.B., R.G. Newell, R.N. Stavins, 2004, "Economics of energy efficiency", 79-90 in Cleveland, C.J. (ed), *Encyclopedia of Energy, Volume 2*, San Diego and Oxford (UK): Elsevier

Leray, T., B. de la Roncière, 2002, *30 ans de maîtrise de l'énergie*, Association technique énergie environnement, Arcueil

Levine, M., D. Ürge-Vorsatz, K. Blok, L. Geng, D. Harvey, S. Lang, G. Levermore, A. Mongameli Mehlwana, S. Mirasgedis, A. Novikova, J. Rilling, H. Yoshino, 2007: Residential and commercial buildings. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Martin, Y., Y. Carsalade, J.-P. Leteurtois, F. Moisan, 1998, *La maîtrise de l'énergie : rapport d'évaluation*, Paris: La Documentation française

	Travaux soumis dans des revues à comité de lecture	Positionnement dans la thèse	Valorisation complémentaire	Contribution spécifique de l'auteur	Partenariats institutionnels
Modèle 1	Giraudet, L.-G., P. Quirion, "Efficiency and distributional impacts of tradable white certificates compared to taxes, subsidies and regulations", <i>Revue d'économie politique</i> , 2008(6), Volume 118, p. 885-914	Synthétisé au chapitre II, restitué en intégralité en annexe II	<i>FEEM nota di lavoro</i> , n°88.2008 Ouvrage du CSTB*	Réécriture dans une forme plus complexe d'un modèle conçu par Philippe Quirion, écriture du code informatique de la nouvelle version et réalisation des simulations numériques. Contribution à la rédaction de l'article pour environ un tiers.	
Modèle 2	Giraudet, L.-G., C. Guivarch, P. Quirion, "Exploring the potential for energy conservation in French households through hybrid modeling", soumis à <i>Energy Economics</i> en janvier 2011	Synthétisé au chapitre III, restitué en intégralité en annexe III	<i>CIRE working paper</i> , DT/WP n°2011-26	Ecriture du modèle, écriture de l'essentiel du code informatique et réalisation des simulations numériques Ecriture de la majeure partie de l'article	Participation à <i>Energy Modeling Forum 25</i> Contrat d'évaluation des politiques du Grenelle bâtiment avec le CGDD
	Giraudet, L.-G., C. Guivarch, P. Quirion, "Comparing and combining energy saving policies. Will proposed residential sector policies meet French official targets?", accepté pour <i>The Energy Journal</i> , EM25 Special Issue, 2011	Restitué en intégralité au chapitre III	Rapport pour le CGDD, rendu le 31 octobre 2010	A partir du modèle élaboré, réalisation des simulations numériques Ecriture de la majeure partie de l'article	
« Modèle » 3	Giraudet, L.-G., L. Bodineau, D. Finon, 2010 "The costs and benefits of white certificates schemes", révisé pour <i>Energy Efficiency</i> en octobre 2010	Synthétisé au chapitre IV, restitué en intégralité en annexe IV	Ouvrage du CSTB* <i>FEEM nota di lavoro</i> , n°132.2010	Contribution aux calculs : pour moitié pour le dispositif français, en intégralité pour les autres pays Ecriture de la majeure partie de l'article	Contrat d'évaluation des coûts des certificats blancs avec l'ADEME Participation à des réseaux informels (Club de l'amélioration de l'habitat, <i>Joint Research Center</i> de la Commission européenne)
	Giraudet, L.-G., D. Finon, "White certificates schemes: the static and dynamic efficiency of a multifunctional policy instrument", soumis à <i>Ecological Economics</i> en septembre 2010	Restitué en intégralité au chapitre IV		Contribution à la rédaction de l'article pour environ deux tiers	

Tableau 1: Contribution spécifique de l'auteur aux travaux présentés dans la thèse

* 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 ? » in J. Carassus, B. Duplessis (eds), *Economie du développement urbain durable*, Presses des Mines, Paris. ISBN: 978291125613

Chapitre I : Economie de la maîtrise de l'énergie et justification de l'intervention publique

Ce premier chapitre passe en revue les problèmes économiques qui justifient l'intervention publique en faveur de la maîtrise de l'énergie. Les concepts de service énergétique, efficacité et sobriété, ainsi que les problèmes de « paradoxe de l'efficacité énergétique » et d' « effet rebond », qui caractérisent la maîtrise de l'énergie, sont d'abord introduits. *L'économie de l'efficacité énergétique*, à laquelle Adam Jaffe et Robert Stavins ont apporté une contribution majeure, est ensuite mise en perspective historique. Des voies de progression vers une théorie plus générale de *l'économie de la maîtrise de l'énergie* sont pointées dans un troisième temps. Enfin, les recommandations élémentaires d'intervention publique qui découlent des problèmes analysés sont commentées.

L'intervention publique désigne ici toute réglementation, politique, programme ou mesure destinée à influencer un comportement (Wilson et Dowlatabadi, 2007, p.170). Les instruments d'intervention sont détaillés au deuxième chapitre.

1 Les objets de l'économie de la maîtrise de l'énergie

1.1 Le service énergétique et ses déterminants : efficacité et sobriété

1.1.1 Le service énergétique

Il est un lieu commun par lequel débute tout discours sur la consommation d'énergie : l'énergie n'est pas utilisée pour elle-même, mais pour produire un *service énergétique*, destiné à assurer des besoins pour certains essentiels : chauffage de l'eau et de l'espace, éclairage, cuisson et fonctionnement des appareils électroménagers au sein du domicile ; mobilité en dehors. La consommation du « bien » énergie ne peut donc être envisagée sans la consommation d'autres biens, qui permettent de convertir une unité d'énergie *finale* (kilowattheure, stère de bois, litre d'essence, etc.) en une unité d'énergie *utile* (lumen pour l'éclairage, degré Celsius pour le confort de chauffage, passager-kilomètre pour la mobilité, etc.). Comme le dépeint la figure 1, ces *biens d'usages de l'énergie* recouvrent, dans le logement, à la fois les technologies ou équipements qui consomment de l'énergie (systèmes de chauffage, appareils électroménagers, luminaires, etc.) et les technologies ou équipements qui ont une influence directe sur la consommation d'énergie (isolation des fenêtres et des parois opaques, système de ventilation, systèmes de contrôle, etc.).

Dans un souci de simplification, le service énergétique peut être vu comme un *bien composite*, produit implicitement par la consommation conjointe d'énergie et de biens d'usage de l'énergie. La maximisation de l'utilité associée à la consommation de service énergétique implique deux types de comportement.

D'abord, le décalage temporel qui existe entre les coûts fixes (achat de biens d'usage de l'énergie) et les coûts variables (dépenses annuelles d'énergie), ainsi que la nature souvent capitalistique des biens d'usage de l'énergie, invitent à étudier le service énergétique par les méthodes usuelles de calcul économique. Selon la situation de référence à laquelle il est comparé, l'investissement dans les biens d'usages de l'énergie répond à une logique de « rationalisation », lorsqu'il s'agit par exemple d'isoler un logement pour optimiser le confort thermique, ou à une logique de « renouvellement », comme lorsqu'un système de chauffage doit être remplacé parce qu'il tombe en panne ou qu'il arrive au terme de sa durée de vie utile. Il est important de préciser que les biens d'usages de l'énergie peuvent contribuer à d'autres services domestiques, non exclusivement énergétiques, qui entrent en

compte dans la décision d'investissement : l'isolation des murs a des conséquences esthétiques, le double vitrage réduit les nuisances sonores, la ventilation participe à l'assainissement de l'air, etc.

L'investissement une fois réalisé, l'intensité d'utilisation des nouveaux biens d'usage de l'énergie varie avec les besoins du consommateur en services énergétiques. Pour le confort de chauffage, par exemple, ces variations portent sur le réglage du thermostat, le nombre de pièces chauffées, la période annuelle de chauffage, etc.

1.1.2 Efficacité, sobriété et maîtrise de l'énergie

Au-delà de cette caractérisation économique, les comportements qui sous-tendent la consommation de service énergétique sont autant de sources potentielles d'économies d'énergie (*energy savings*), qui suscitent l'intérêt des ingénieurs et des pouvoirs publics.

En premier lieu, l'*efficacité énergétique (energy efficiency)*, définie comme le ratio entre le service énergétique produit et la quantité d'énergie utilisée pour le produire (Lovins, 2004, p.383), ou le rendement de conversion de l'énergie finale en énergie utile, est un attribut caractéristique des biens d'usage de l'énergie. Dans la décision d'investissement, différentes options d'efficacité sont en concurrence : pour l'éclairage, l'investisseur a le choix entre une ampoule à incandescence, peu efficace, et une lampe fluo-compacte, assez efficace, voire une diode électroluminescente, très efficace ; pour l'isolation, le paramètre d'efficacité correspond à la nature du matériau (laine de verre, fibres végétales, etc.) et son épaisseur ; pour les chaudières, la gamme d'efficacité s'étend du standard peu efficace à la chaudière à condensation, très efficace, en passant par la chaudière basse température, d'efficacité intermédiaire. Plus l'option est efficace, plus elle réduit la consommation d'énergie finale pour un même service énergétique. Dans le cas des biens domestiques d'usage de l'énergie, l'option la plus efficace est généralement la plus coûteuse³.

En second lieu, l'usage des biens d'usage de l'énergie peut également être orienté vers une diminution absolue de la consommation d'énergie : réduction de la durée d'éclairage, modération de la température de chauffage, etc. Le terme de *sobriété énergétique (energy sufficiency)* est fréquemment utilisé pour qualifier ce type de comportement (Salomon *et al.*, 2005 ; Alcott, 2008 ; Herring, 2009).

L'efficacité et la sobriété énergétiques correspondent à une orientation particulière des comportements d'investissement et d'utilisation des biens d'usage de l'énergie. La figure 2 illustre cette idée à partir d'une courbe isoquante, qui regroupe l'ensemble des arbitrages entre la consommation d'énergie et la consommation d'un bien efficace agrégé qui procurent le même service énergétique : l'efficacité correspond à un déplacement *le long* de l'isoquante, qui substitue à la consommation d'énergie une plus grande consommation de bien efficace, tandis que la sobriété correspond à un déplacement *de* l'isoquante vers une consommation d'énergie plus faible, à consommation de bien efficace constante.

³ Cette propriété est spécifique au domaine du logement. Dans le domaine des transports, l'option efficace est souvent la moins coûteuse.

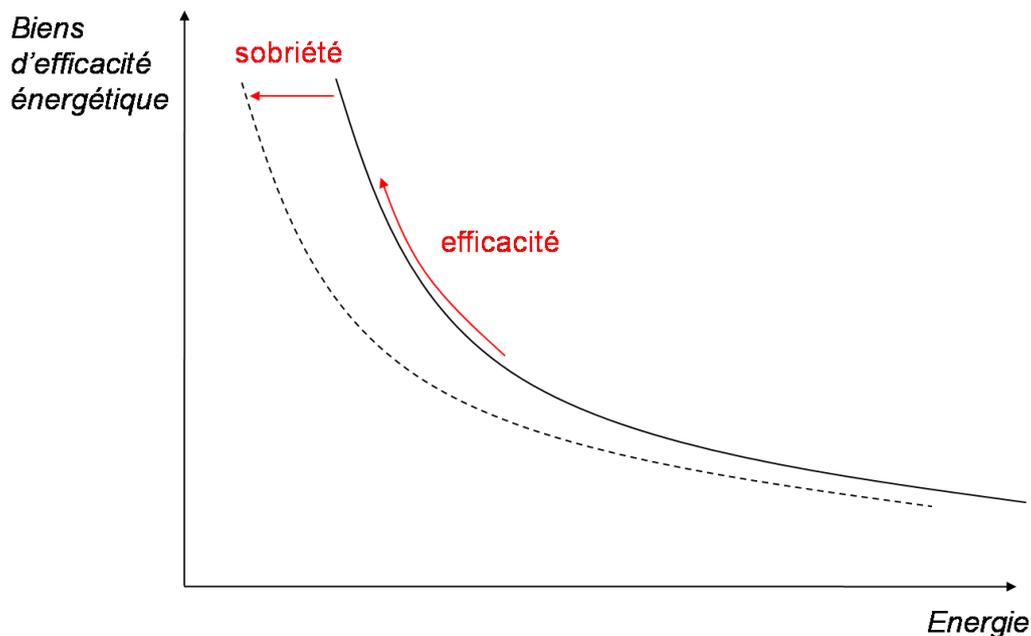


Figure 2: Arbitrage microéconomique entre les consommations d'énergie et de biens d'efficacité énergétique

Le terme de maîtrise de l'énergie (*energy conservation*⁴) désigne la recherche conjointe d'efficacité et de sobriété énergétiques, visant à maximiser les économies d'énergie par rapport à une situation de référence. Pour différentes raisons qui seront traitées par la suite, cet objectif s'inscrit dans l'agenda des politiques publiques. A ce stade, toutefois, il importe de préciser qu'il ne coïncide pas nécessairement avec la rationalité de l'analyse économique standard. Le consommateur ne choisit pas systématiquement l'option la plus efficace : il peut attacher davantage de valeur aux attributs du bien autres que le service énergétique (esthétique des murs, confort d'éclairage, etc.) ; l'option efficace peut ne pas correspondre à son intérêt individuel, comme dans le cas d'une résidence secondaire rarement occupée, pour laquelle le coût fixe supplémentaire ne compense qu'à très long terme les faibles coûts variables. De même, le comportement de l'utilisateur n'est pas systématiquement guidé par la sobriété : selon qu'il est frileux ou pas, par exemple, il fixe le thermostat de chauffage à une température plus ou moins élevée.

1.2 Efficacité et sobriété sont économiquement liées : l'effet rebond

Comme pour tout « bien » économique, la demande de service énergétique augmente quand son prix baisse. Du fait de sa nature composite, le coût du service dépend du prix de l'énergie et du prix du bien énergétique ; son coût marginal dépend du seul coût variable, c'est-à-dire des dépenses d'énergie. A quantité constante (par exemple un certain niveau d'éclairage, de température d'intérieur), le coût marginal du service énergétique augmente avec le prix de l'énergie (à technologie constante) et diminue avec l'efficacité du bien d'usage de l'énergie (à prix de l'énergie constant), puisqu'une moindre quantité d'énergie est alors nécessaire pour assurer le même service. Ainsi, toutes choses égales par ailleurs, un accroissement de l'efficacité du bien d'usage de l'énergie

⁴ Traduit littéralement de l'anglais, le terme de « conservation de l'énergie » évoque le premier principe de la thermodynamique. L'employer ajouterait à la confusion déjà existante avec le vocabulaire d'ingénieur. Le terme de maîtrise de l'énergie lui est préféré ici car il fait implicitement référence à une intervention. Il sera entendu dans sa définition la plus étroite d'économie d'énergie *finale*, n'abordant que rarement les aspects plus généraux, comme le caractère renouvelable ou non de l'énergie, son contenu carbone ou encore les pertes lors de la conversion de l'énergie primaire en énergie finale (Laponche, 2002).

diminue le coût marginal du service énergétique pour finalement en augmenter la consommation, ce qui induit un déplacement de l'isoquante de service énergétique d'un niveau initial SE à un niveau SE' , et un déplacement de la contrainte budgétaire C à un niveau C' (figure 3). Les économies d'énergie nettes qui s'ensuivent sont donc moindres que les économies brutes prédites par la seule variation d'efficacité : c'est l'*effet rebond direct*⁵ (*rebound effect, take-back effect*).

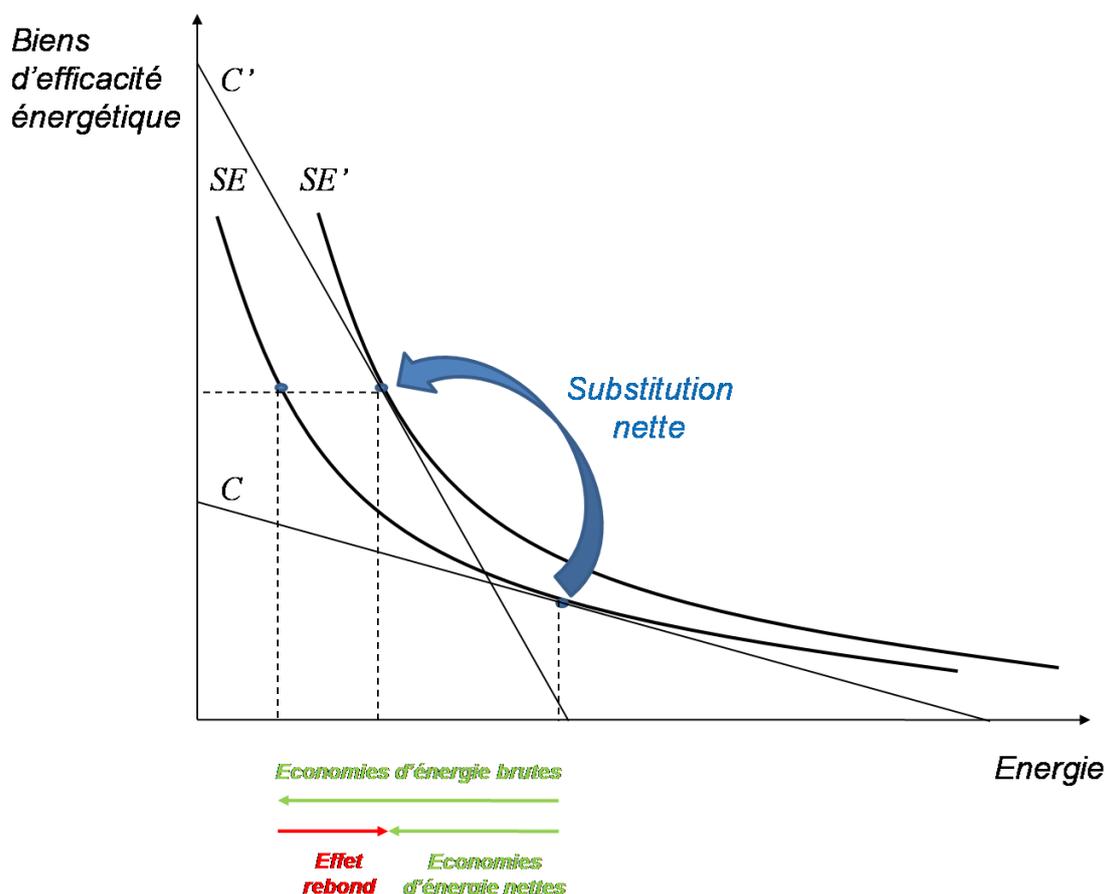


Figure 3: Représentation microéconomique de l'effet rebond

Par un mécanisme purement économique, l'efficacité et la sobriété énergétiques apparaissent donc comme partiellement antagonistes, ce qui constitue un obstacle à la maîtrise de l'énergie. L'effet rebond n'est pas spécifique au secteur du logement et concerne tous les types de service énergétique, en particulier le transport (Sorrell et Dimitropoulos, 2008).

1.3 Le problème fondateur : le paradoxe de l'efficacité énergétique

L'évaluation de la rentabilité des investissements dans l'efficacité énergétique est facilitée par les critères usuels de calcul économique. En comparaison, l'utilité associée au service énergétique est difficilement mesurable et les déterminants des comportements d'utilisation sont moins accessibles à l'analyse. Pour cette raison, l'étude de la maîtrise de l'énergie a souvent été réduite à la seule efficacité énergétique.

⁵ Le qualificatif « direct » fait référence au seul effet prix. Entre autres paramètres, le revenu peut avoir son importance. L'effet rebond peut dépasser le cadre microéconomique pour apparaître à un niveau méso-économique, voire macroéconomique. Ces effets ne sont pas analysés ici.

Selon les critères usuels de calcul économique, de nombreux investissements dans l'efficacité énergétique sont rentables. Le tableau 2 montre ainsi que la valeur actuelle nette (VAN) des investissements domestiques les plus représentatifs – qui met en balance les coûts d'investissement et les dépenses d'énergie évitées sur la durée de vie des équipements est positive. Ce résultat est valide dans une perspective d'optimisation « sociale intergénérationnelle », *i.e.* en utilisant un taux d'actualisation de 4%. Il reste largement valide sous des hypothèses reflétant le point de vue plus restrictif de l'investisseur « privé », *i.e.* en utilisant un taux d'actualisation de 7% et en cumulant les économies d'énergie sur la durée minimale entre la durée de vie de l'investissement et la durée moyenne d'occupation du logement, estimée à 15 ans (CGDD, 2009a). Dans chaque cas, le calcul de rentabilité sous-estime les bénéfices sociaux, puisqu'il ne prend pas en compte la valorisation monétaire des émissions de CO₂ évitées.

	Durée de vie	Coûts			Bénéfices actualisés bruts		Bénéfices actualisés nets	
		Coût brut	Surcoût	Coût net	"sociaux"	"privés"	"sociaux"	"privés"
Chaudière à condensation	16 ans	7 000 €	40%	2 000 €	10 560 €	8 492 €	8 560 €	6 492 €
Isolation de combles	35 ans	6 660 €	100%	6 660 €	33 744 €	16 941 €	27 084 €	10 281 €
Isolation des murs	35 ans	13 320 €	100%	13 320 €	27 528 €	13 821 €	14 208 €	501 €
Lampe fluo-compacte de classe A	7,5 ans	6 €	100%	6 €	25 €	23 €	19 €	17 €
Fenêtre avec vitrage isolant	35 ans	800 €	100%	800 €	488 €	245 €	-312 €	-555 €
Réfrigérateur de classe A+	10 ans	500 €	25%	100 €	62 €	55 €	-38 €	-45 €

Tableau 2: Valeur actuelle nette de quelques investissements d'efficacité énergétique

*Hypothèses : * chauffage combustible en zone H1 ; ** maison individuelle de 111 m². Données : ATEE (2009) pour les durées de vie et les gains énergétiques ; hypothèses propres pour les coûts (voir également annexe IV, Table 37) et les prix des énergies (0,08€ pour les combustibles et 0,11€ pour l'électricité).*

Pourtant, les décisions d'investissement réelles ne suivent pas les résultats de ces calculs élémentaires. En France, par exemple, le classement des différentes mesures d'efficacité énergétique par ordre de rentabilité ne reproduit pas le classement de leur taux d'adoption réel, dominé par les fenêtres avec vitrage isolant (Laurent *et al.*, 2009). Bien qu'ils paraissent rentables du point de vue des critères usuels de calcul économique, certains investissements de « rationalisation » (*e.g.* isolation) ne sont réalisés qu'à des niveaux très faibles ; de même, certains investissements de « renouvellement » (*e.g.* remplacement de chaudière) ne sont pas réalisés au-delà du rythme naturel de déclassement. D'où le *paradoxe de l'efficacité énergétique*, tel que l'ont qualifié Jaffe et Stavins (1994a).

1.4 Les barrières aux économies d'énergie : défaillances et obstacles

Les causes du paradoxe de l'efficacité énergétique sont nombreuses et abondamment discutées depuis plus de trente ans. Elles sont caractérisées par Jaffe *et al.* (2004, p.79) selon les catégories suivantes :

Les différentes causes du paradoxe de l'efficacité énergétique sont regroupées sous le terme générique de *barrières à l'efficacité énergétique (barriers to energy efficiency)*. Cette notion négative désigne tout ce qui s'oppose à la diffusion des biens d'usage efficace de l'énergie. Il peut s'agir de défaillances de marché ou de simples obstacles.

Le terme de *défaillance de marché (market failure)* fait référence à tout ce qui s'oppose sur un marché à l'efficacité⁶ économique collective, définie comme une situation optimale au sens de Pareto, où il est impossible d'accroître le bien-être d'un groupe d'individus sans diminuer celui d'un autre groupe (Varian, 2003). La présence d'une défaillance de marché est considérée comme une condition nécessaire à l'intervention publique. Dans le domaine de l'efficacité énergétique, si une barrière s'avère être une défaillance de marché, alors l'inefficacité énergétique va de pair avec l'inefficacité économique. La notion de défaillance de marché est parfois complétée par la notion de *défaillance de comportement* (qui sera définie ultérieurement).

Les barrières qui ne sont pas des défaillances de marché, généralement nommées par défaut *non-market failures*, seront qualifiées ici d'*obstacle à l'efficacité énergétique*. Dans une situation où une barrière est « simplement » un obstacle, l'inefficacité énergétique ne remet pas en cause l'efficacité économique et, du point de vue des critères économiques standard, ne justifie pas d'être corrigée par une intervention publique.

Même si les débats portent le plus souvent sur les barrières à l'efficacité énergétique, la définition du terme générique « barrière » (*market barrier*) prend en compte les éléments qui s'opposent à l'utilisation des biens d'usage efficace de l'énergie⁷. Par conséquent, le terme de barrière *aux économies d'énergie* sera utilisé dans cette thèse pour désigner les défaillances de marché et les obstacles qui s'opposent plus généralement à la maîtrise de l'énergie. En pratique, les barrières aux économies d'énergie recouvrent les barrières à l'efficacité énergétique et incluent l'effet rebond. Celui-ci doit être vu « simplement » comme un obstacle aux économies d'énergie, dans la mesure où il correspond à une situation d'efficacité économique.

2 L'évolution des conceptions dans l'économie de l'efficacité énergétique

Cette partie met en perspective historique les débats qui ont permis de fonder progressivement une véritable économie de l'efficacité énergétique (*economics of energy efficiency*)⁸, à partir d'une identification positive des barrières. A l'origine fondée sur une controverse entre ingénieurs et économistes qui culmina au milieu des années 1990, cette théorie a été unifiée par Adam Jaffe et Robert Stavins. Ce socle est aujourd'hui enrichi par des concepts issus de champs émergents comme l'économie comportementale.

⁶ L'anglicisme *efficience* fait référence ici à la notion d'*economic efficiency*, qui doit être distinguée, comme le montrera le chapitre II, de la notion d'*effectiveness* ou *efficacy*, généralement traduite en français par le terme *efficacité*.

⁷ Jaffe *et al.* (2004, p.79) définissent les barrières de la façon suivante : "*Disincentives to the diffusion and/or use of a good, such as high costs or prices, which may or may not represent market failures*".

⁸ Cette partie s'appuie principalement sur les synthèses de Jaffe *et al.* (2004), Sorrell (2004), Gillingham *et al.* (2009). Le terme *economics of energy conservation*, lorsqu'il est rencontré dans cette littérature (e.g. Sutherland, 1996), fait la plupart du temps référence à la seule efficacité énergétique.

2.1 Les controverses fondatrices

2.1.1 Les visions opposées d'ingénieurs et d'économistes

Les ingénieurs sont les premiers à s'interroger, dans les années 1970, sur la non-réalisation de projets d'efficacité énergétique à VAN positive. Le terme « négawatt » se répand, sous l'impulsion d'Amory Lovins et des chercheurs du *Rocky Mountain Institute*, pour désigner les économies d'énergie qui pourraient être réalisées à coût « nul » voire « négatif ». Cette analyse a alors une implication politique simple : faute d'être réalisés spontanément, les investissements rentables d'efficacité énergétique doivent être déclenchés par des incitations publiques (Hirst et Brown, 1990). A partir de la fin des années 1970, des politiques sont mises en place aux Etats-Unis, comme les standards de performance énergétique et les politiques de *Demand-side management*, qui imposent aux monopoles électriques de promouvoir activement la maîtrise de l'énergie en investissant auprès des consommateurs⁹.

Ces formes nouvelles d'intervention amènent les économistes à questionner leur justification. Deux critiques fondamentales sont adressées aux ingénieurs : (i) l'indicateur pertinent du bien-être du consommateur n'est pas la VAN, mais la disposition à payer et le surplus ; (ii) parmi les barrières qui s'opposent à l'efficacité énergétique, seules les défaillances de marché justifient une intervention publique (Sutherland, 1996 ; Wirl, 1997). Si elle pose le problème dans un cadre approprié, cette « leçon d'économie » faite aux « avocats de la maîtrise¹⁰ » (*conservationists*) est principalement le fait d'économistes conservateurs, qui critiquent en général toute forme d'intervention publique.

Le débat devient rapidement politique (Jaffe et Stavins, 1994c, note 7 ; Sorrell, 2004, p.25) et se polarise autour de deux positions extrêmes : d'une part, une assimilation de l'efficacité énergétique à l'efficacité économique ; d'autre part, une négation du paradoxe de l'efficacité énergétique, où seules les externalités environnementales et la tarification inadéquate de l'énergie sont reconnues comme motifs d'intervention publique. La controverse atteint son paroxysme dans la première moitié des années 1990, avec notamment une « passe d'armes » entre Amory Lovins et Paul Joskow dans *The Electricity Journal* (Joskow, 1994 ; Lovins, 1994) et un numéro spécial d'*Energy Policy* en octobre 1994¹¹. Elle demeure aujourd'hui vive, comme l'indique la persistance des positions « optimistes » de certains travaux d'ingénieur (McKinsey & Company, 2009) et celles, « pessimistes », de certains économistes (Wirl, 2000).

La synthèse est amorcée par des chercheurs se positionnant à l'interface de l'économie et de l'ingénierie, dont beaucoup sont originaires du *Lawrence Berkeley National Laboratory*. S'ils reconnaissent la distinction entre barrières et défaillances de marché, ils rappellent que le paradoxe de l'efficacité énergétique est fondamentalement un problème de *diffusion des technologies efficaces*. Le cadre statique dans lequel se placent les sceptiques est dès lors insuffisant, et le problème doit être appréhendé plus généralement dans une perspective dynamique d'économie de l'innovation, comme le résumant Sanstad et Howarth (1994, p.816) :

⁹ Le chapitre II revient en détail sur ces politiques.

¹⁰ Cette traduction non littérale permet d'éviter l'amalgame avec le terme « conservationnistes », qui désigne, en Français, ceux qui s'opposent à la théorie biologique de l'évolution.

¹¹ Volume 22, numéro 10, pages 795-886, Elsevier Publishing. Ce numéro comprend notamment les contributions, utilisées ici, de Huntington *et al.*, Sanstad et Howarth, Jaffe et Stavins (c), Lutzenhiser.

“That technological innovations in general take time to work their way into widespread use is certainly among the most ‘normal’ of economic processes. (...) Efficiency is a property of market equilibria. Broadly speaking, however, technological advance is intrinsically a dynamic, disequilibrium phenomenon. (...) The standard equilibrium theory serves to describe, in a sense, the outcome of this adjustment, but not the dynamic process itself. This is not to say that diffusion processes are intrinsically ‘imperfect’ but rather that the economic analysis of these processes cuts across usual distinctions between efficient and imperfect outcomes, and does not provide a unified picture of diffusion processes.”

2.1.2 Une reformulation du problème par des taux d’actualisation implicites élevés

Le taux d’actualisation implicite révélé par les investissements d’efficacité énergétique observés est devenu une variable déterminante dans l’analyse du paradoxe de l’efficacité énergétique. Elle fut d’autant plus commentée qu’elle est couramment utilisée à la fois par les ingénieurs et par les économistes. Les valeurs estimées pour les biens d’usage de l’énergie les plus représentatifs (systèmes de chauffage, équipements électroménagers, etc.) s’étendent typiquement de 20 à 100% (Train, 1985 ; Mundaca, 2008). Jugées *anormalement élevées* par rapport aux taux d’intérêt conventionnels, ces valeurs ont été interprétées comme une mise en évidence du paradoxe de l’efficacité énergétique. Elles appellent toutefois deux commentaires.

D’abord, les déterminants d’investissement sont largement *sous-déterminés* par les observations. Les seuls paramètres qui peuvent être considérés comme bien établis sont la durée de vie et le coût de l’investissement. En revanche, le prix futur de l’énergie, qui permet de valoriser les bénéfices, est naturellement inconnu et maintenu par défaut à sa valeur courante sur la totalité de la durée de vie de l’investissement. Le taux d’actualisation apparaît alors comme le dernier degré de liberté qui permet de prendre en compte la réaction de l’investisseur à cette incertitude. Plus généralement, le taux d’actualisation incorpore l’ensemble des paramètres non observables de l’investissement, de telle sorte que l’information qu’il contient dépasse largement la pure « préférence pour le présent » censée le définir.

Dès lors, toute *interprétation* de sa valeur est problématique. En particulier, la nature d’obstacle ou de défaillance de marché des barrières à l’efficacité énergétique incorporées par le taux d’actualisation dépend de la valeur prise pour référence :

“If the outcome with lower discount rates is considered the optimal result, then it is implicitly assumed that all market barriers are indeed market failures. Conversely, postulating that the optimal result is the one in which consumers are assumed to discount at observed high implicit rates, then it is implicitly assumed that there are no market failures.” (Jaffe et al., 2004, p.87)

En définitive, la valeur élevée du taux d’actualisation implicite propre aux investissements d’efficacité énergétique peut être considérée comme une « tautologie », *i.e.* une manifestation du paradoxe, et non une explication de ses causes. L’identification positive des barrières sous-jacentes nécessite une analyse plus avancée.

2.2 La synthèse économique de Jaffe et Stavins : paradoxe et gisements

Adam Jaffe et Robert Stavins ont unifié l’économie de l’efficacité énergétique sur le plan théorique (Jaffe et Stavins, 1994a,b,c ; Jaffe et al., 2004), en surmontant des clivages qui portaient davantage

sur des questions d'approche scientifique (empirique pour les ingénieurs, théorique pour les économistes) et d'idéologie politique que sur des problèmes économiques.

2.2.1 Une référence normative à la fois standard et dynamique

En affirmant la primauté de l'optimum de Pareto comme référence de l'efficacité économique collective, Jaffe et Stavins s'attachent avant tout à distinguer, parmi les barrières à l'efficacité énergétique, les défaillances de marché des simples obstacles. Cette distinction les conduit à distinguer différentes notions du *gisement* d'efficacité énergétique (*energy efficiency gap*) ou « potentiel sans regret » (*no regret potential*, cf. Ostertag, 2003) – qui peut être vu comme l'ampleur quantitative du paradoxe¹² –, en fonction de la nature des barrières à corriger. Comme l'illustre la figure 4, qui reproduit un diagramme remanié à plusieurs reprises par les auteurs (Jaffe et Stavins, 1994c, p.808 ; Jaffe *et al.*, 2004, p.88), les différentes politiques correctives ont des effets contrastés sur l'efficacité énergétique et l'efficacité économique : si la correction des défaillances de marché permet d'accroître ces deux grandeurs (flèches 1, 3 et 5), la correction des simples obstacles sacrifie la seconde à la première (flèche 2).

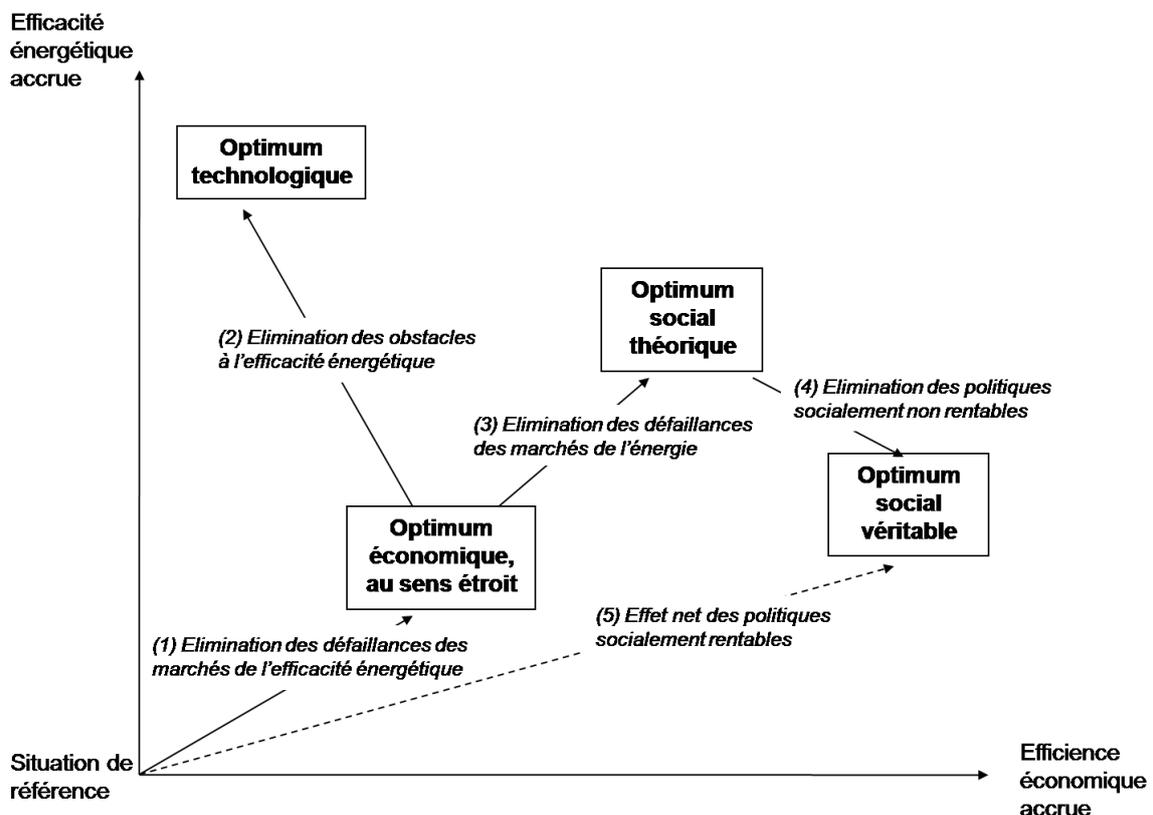


Figure 4: Les différentes notions de gisement d'efficacité énergétique, d'après Jaffe *et al.* (2004, p.88)

Jaffe et Stavins ne limitent pas leur analyse à une vision statique de l'optimalité et reprennent à leur compte la perspective dynamique proposée à la même époque par Sanstad et Howarth (1994). Ils reconnaissent que le paradoxe de l'efficacité énergétique repose sur une sous-diffusion

¹² La distinction clairement établie par Jaffe et Stavins en 1994 entre les termes *paradox* et *gap* a fini par s'effacer dans les travaux actuels au profit du seul terme *gap*, employé au singulier. Elle est toutefois reprise dans cette thèse, afin de réaffirmer la pluralité des notions de gisement qui découle de celle, unique, de paradoxe.

d'équipements technologiquement matures, et s'attachent essentiellement à évaluer la direction et le taux du progrès technologique par rapport à une référence optimale :

"The diffusion of economically superior technologies is typically gradual. Awareness of this empirical reality should make the existence of the energy efficiency gap much less perplexing, but it does not answer the question of whether the optimal rate of diffusion is greater than the observed rate" (Jaffe et al., 2004, p.82).

La description des obstacles et défaillances de marché qui suit s'appuie sur la classification la plus récente des auteurs (Jaffe et al., 2004), enrichie des contributions de Sorrell (2004), Quirion (2004) et Gillingham et al. (2009).

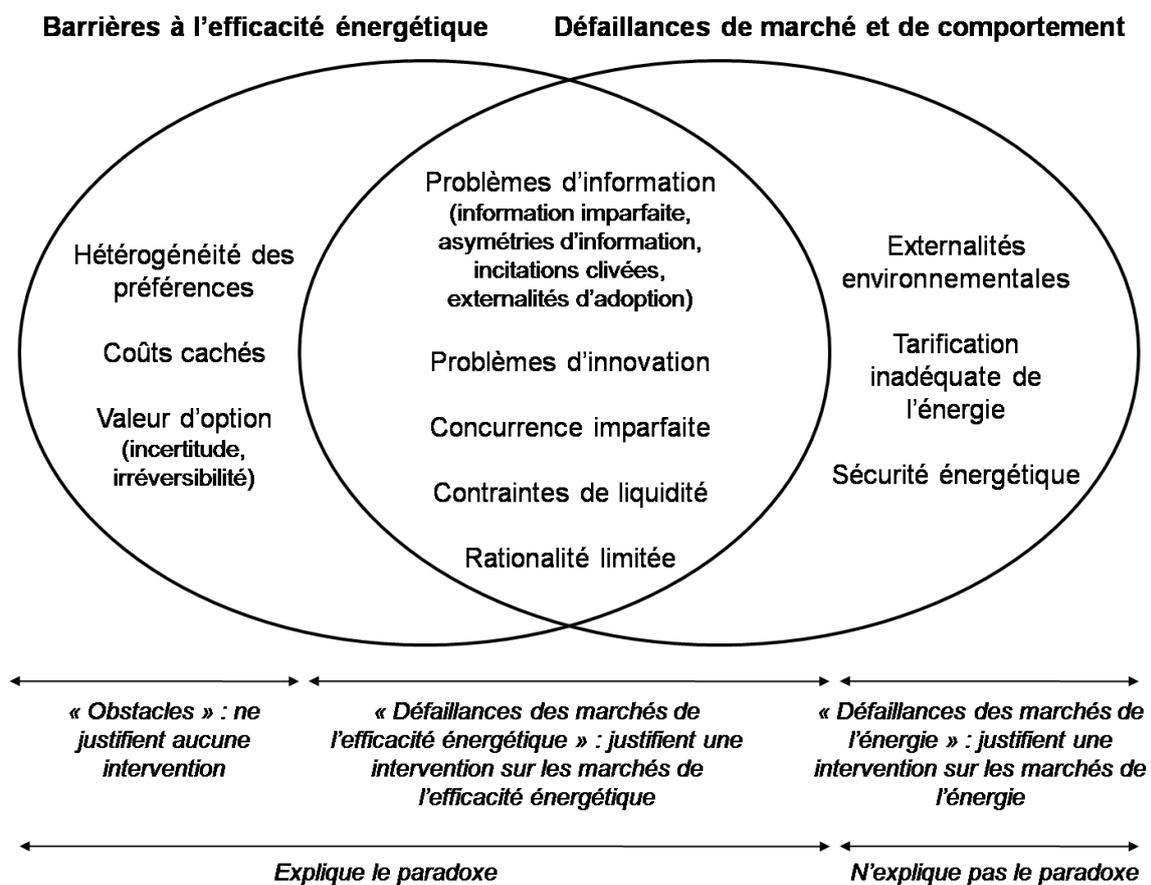


Figure 5: Les différents types de barrières et défaillances, d'après Sorrell (2004, p.30), Jaffe et al. (2004), Quirion (2004) et Gillingham et al. (2009, p.604)

2.2.2 Les obstacles à l'efficacité énergétique

Les barrières qui ne sont pas des défaillances de marché, qualifiées ici d'obstacles à la diffusion des technologies efficaces, peuvent être considérées comme des composantes normales des marchés de l'efficacité énergétique et ne justifient pas d'être corrigées par une intervention publique (cf. figure 5).

Par exemple, l'incertitude qui entoure à la fois les prix futurs de l'énergie et le coût futur des technologies d'une part, le caractère irréversible de la majorité des investissements d'efficacité énergétique d'autre part, créent une incitation à retarder l'investissement, généralement qualifiée de *valeur d'option* (Henry, 1974). Si leur ampleur est discutée, ces valeurs d'options sont parfois invoquées pour expliquer la valeur élevée du taux d'actualisation implicite propre aux investissements d'efficacité énergétique (Hassett et Metcalf, 1993 ; Sanstad *et al.*, 1995 ; Ansar et Sparks, 2009).

De même, certains *coûts cachés*¹³ inhérents au fonctionnement normal des marchés ne sont pas pris en compte dans les calculs de rentabilité les plus élémentaires, mais « absorbés » par le taux d'actualisation implicite, dont ils contribuent à élever la valeur. Ces coûts correspondent aux efforts de recherche d'un produit sur le marché, au dérangement occasionné par l'installation des équipements intérieurs (particulièrement important dans le cas des travaux d'isolation), ou encore à la perte d'utilité sur certains attributs des équipements autres que l'efficacité énergétique (*e.g.* changement de teinte des ampoules basse consommation par rapport aux ampoules à incandescence). Il se peut également que l'efficacité réelle des équipements ne corresponde pas aux prévisions des ingénieurs (Metcalf et Hassett, 1999), même si le sens de ce biais ne semble pas systématique.

Enfin, l'obstacle le plus évident et quantitativement le plus important est l'*hétérogénéité* des consommateurs : une personne qui ne craint pas le froid et consomme peu d'énergie pour se chauffer a moins d'intérêt à investir dans un système efficace qu'une personne frileuse ; l'intérêt de rénover une résidence secondaire dépend de la fréquence à laquelle celle-ci est visitée, qui varie selon les propriétaires. L'hétérogénéité est une composante élémentaire de tout marché ; l'hétérogénéité entre les adopteurs « précoces » et les adopteurs « tardifs », sujets à l'effet d'imitation, est même à la base du processus graduel de diffusion des technologies (Wilson et Dowlatabadi, 2007). En niant cette donnée, les calculs de gisement fondés sur une généralisation des meilleures technologies disponibles, comme c'est souvent le cas des travaux d'ingénieurs, peuvent conduire à un niveau d'efficacité économique sous-optimal (*cf.* figure 4).

2.2.3 Les défaillances des marchés de l'énergie

Les défaillances de marché, qui désignent tout ce qui s'oppose à l'atteinte de l'optimum économique de Pareto, sont généralement classées en quatre catégories : définition incomplète des droits de propriété, situations de concurrence imparfaite, information imparfaite et externalités (Sanstad et Howarth, 1994, p.813 ; Sorrell, 2004, p.34). Dans le contexte de la maîtrise de l'énergie, des défaillances affectent à la fois les marchés de *l'énergie* (électricité, gaz, fioul domestique, *etc.*) et les marchés de *l'efficacité énergétique* (ampoules, chaudières, isolation, *etc.*).

Trois types de défaillance se rencontrent sur les marchés de l'énergie. D'abord, la consommation d'énergie, dont une fraction irréductible est d'origine fossile, induit des *externalités environnementales négatives*. Les plus importantes sont les émissions de CO₂, qui contribuent directement au changement climatique (GIEC, 2007 ; Académie des sciences, 2010). De plus, le *prix de l'énergie est inférieur à son coût marginal*, du fait notamment d'une tarification de l'électricité au

¹³ Ces coûts sont parfois vus comme un sous-ensemble de « coûts de transaction » (Sanstad et Howarth, 1994 ; Sutherland, 1996).

coût moyen (ou binôme en France), voire de subventions à certaines énergies¹⁴. Enfin, la dépendance aux importations d'énergies fossiles produites dans des régions du monde politiquement instables crée une *insécurité énergétique*, qui peut être vue comme une externalité négative ; toutefois, le lien économique entre les dépenses militaires de sécurité et la consommation d'énergie fossile reste à établir empiriquement (Jaffe *et al.*, 2004, p.85).

Dans l'ensemble, ces défaillances de marché, lorsqu'elles sont avérées, conduisent à des prix de l'énergie artificiellement bas par rapport au coût social et environnemental de la consommation d'énergie. Leur correction peut contribuer à amplifier le gisement d'efficacité énergétique dans le sens d'une plus grande efficacité économique (*cf.* figure 4, flèche 3). Néanmoins, une telle intervention n'est pas directement motivée par la résolution du paradoxe de l'efficacité énergétique, dont les défaillances des marchés de l'énergie ne sont pas responsables : même avec des prix de l'énergie artificiellement bas, de nombreux investissements d'efficacité énergétique s'avèrent rentables mais ne sont pas réalisés.

2.2.4 Les défaillances des marchés de l'efficacité énergétique

En revanche, les défaillances des marchés de l'efficacité énergétique sont, avec les simples obstacles, la cause même du paradoxe ; à la différence de ces derniers, elles justifient une intervention publique (*cf.* figure 5). Les problèmes d'*information* apparaissent comme les défaillances les plus significatives sur les marchés de l'efficacité énergétique (Huntington *et al.*, 1994, p.796). Dans la mesure où ces problèmes prennent différentes formes, les grilles utilisées pour les analyser sont rarement homogènes et mobilisent une variété de concepts issus de la théorie des biens publics (caractère non-rival et non-excludable de l'information) et de la théorie de l'agence (problèmes principal-agent, aléa moral, antisélection). La classification exhaustive de Gillingham *et al.* (2009) retient les concepts suivants¹⁵ :

- *Information imparfaite* – Les consommateurs, voire les vendeurs d'équipement, n'ont pas connaissance des bénéfices que procurent l'efficacité énergétique, qui n'est pas perçue comme un attribut valorisant les biens d'usage de l'énergie. L'information sur l'efficacité énergétique apparaît comme un bien public, systématiquement sous-produit par le marché.
- *Asymétries d'information* – Alors que l'énergie peut être caractérisée comme un « bien de recherche » (*search good*), dont les caractéristiques sont connues avec certitude avant l'achat, les biens d'usage de l'énergie sont considérés comme des « biens de croyance » (*credence good*), dont les caractéristiques ne se révèlent pas totalement à l'usage (Sorrell, 2004 ; Quirion, 2004) ; c'est par exemple le cas des équipements électriques, qui ne disposent pas d'un compteur électrique individuel. En conséquence, le consommateur apparaît plus réticent à dépenser des sommes élevées pour les biens d'usage de l'énergie que pour l'énergie. Cette caractéristique de « bien de croyance » génère des problèmes d'« antisélection », situation où les vendeurs du bien d'usage de l'énergie ne sont pas en mesure de transférer toute l'information à l'acheteur : par exemple, lorsque des travaux d'isolation sont réalisés, leur coût est encore rarement répercuté dans le prix de revente du logement.

¹⁴ Ces défaillances sont parfois considérées comme des défaillances de l'Etat (*regulatory failures*) (*e.g.* Quirion, 2004, p.15).

¹⁵ Voir Sorrell (2004, p.35-42) pour la classification la plus complète.

- *Incitations clivées (split incentives)* – Les investissements d’efficacité énergétique sont souvent découragés par l’impossibilité pour le financeur de s’en approprier les bénéfices. L’exemple le plus courant est le « dilemme propriétaire-locataire » : le propriétaire n’a pas d’intérêt à investir dans des économies d’énergie qui profiteront à son locataire ; même s’il bénéficie des économies d’énergie, ce dernier 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. Il s’ensuit une consommation d’énergie plus élevée dans les logements loués que dans les logements occupés par leur propriétaire, toutes choses égales par ailleurs (Scott, 1997 ; Leth-Petersen et Togeby, 2001 ; Levinson et Niemann, 2004 ; Rehdanz, 2007 ; AIE, 2007). Murtishaw et Sathaye (2006) estiment que ce problème affecte 66% des consommations d’énergie pour l’usage d’eau chaude, 48% pour le chauffage, 25% pour les réfrigérateurs et 2% pour l’éclairage.
- *Externalités positives d’adoption* – L’adoption d’une technologie nouvelle par des « adopteurs précoces » porte ses performances à la connaissance d’autres adopteurs potentiels, induisant ainsi des phénomènes d’imitation. Des concepts spécifiques sont employés dans la littérature économique et sociologique pour désigner ce phénomène : *learning-by-using* (Jaffe *et al.*, 2004; Gillingham *et al.*, 2009), *neighbour effect* (Mau *et al.*, 2008; Axsen *et al.*, 2009), *social contagion* (Mahapatra et Gustavsson, 2008) ou encore *social learning* (Darby, 2006a).

Il existe sur les marchés de l’efficacité énergétique des défaillances traditionnellement liées à l’*innovation*, comme le sous-investissement en recherche et développement et les externalités positives liées à l’apprentissage du côté de l’offre de technologies (*learning-by-doing*). Le phénomène d’apprentissage se manifeste par une baisse du coût des technologies avec l’accroissement de la connaissance, généralement approché par la production cumulée (Arrow, 1962 ; Wing, 2006 ; Gillingham *et al.*, 2008). Bien que ce phénomène soit moins étudié pour les technologies d’usage de l’énergie que pour les technologies de génération de l’énergie (Laitner et Sanstad, 2004), les quelques estimations disponibles suggèrent que le « taux d’apprentissage » des biens d’usage de l’énergie, *i.e.* le taux de décroissance du prix consécutif à un doublement de la production cumulée, se situe autour de 18%, soit une valeur proche de la valeur de 20% estimée dans la plupart des secteurs industriels (Weiss *et al.*, 2010).

Certains marchés de l’efficacité énergétique sont caractérisés par une structure de *concurrence imparfaite*. Lorsque l’offre de biens d’usage de l’énergie est segmentée par gamme d’efficacité, comme les ampoules (incandescence, basse consommation) ou les fenêtres (double, triple vitrage), les fabricants qui disposent d’un pouvoir de marché ont la possibilité de discriminer les consommateurs par les prix et d’accroître leur marge sur le haut de gamme, qui correspond en général, dans le secteur résidentiel et tertiaire, aux options les plus efficaces (Quirion, 2004, p.14).

Les *contraintes de financement* constituent un dernier type de défaillance des marchés de l’efficacité énergétique. Le recours au crédit pour financer des travaux de rénovation énergétique ne concerne qu’une faible portion des ménages (TNS Sofres, 2006, p.33). Ce phénomène peut donner lieu à différentes interprétations : le crédit peut être vu comme non contraint mais rarement nécessaire, ou au contraire fortement contraint, obligeant les individus à financer autrement leurs dépenses de rationalisation (Gillingham *et al.*, 2009, p.607).

2.3 L'élargissement de l'analyse aux approches « hétérodoxes »

Le regain d'attention porté à la maîtrise de l'énergie sous l'influence des préoccupations environnementales s'est accompagné d'un réexamen du socle théorique constitué par Jaffe et Stavins, à la lumière notamment du concept de rationalité limitée. Les théories utilisées, autrefois considérées comme « hétérodoxes » (Sorrell, 2004), tendent aujourd'hui à s'intégrer à l'analyse économique standard¹⁶.

2.3.1 La référence à la rationalité limitée

Si, dans la réalité, chacune des conditions nécessaires à l'atteinte de l'optimum de Pareto – concurrence parfaite, information parfaite et rationalité parfaite – peut être mise en défaut, l'analyse économique standard des défaillances de marché s'est longtemps réduite à la concurrence imparfaite et l'information imparfaite. Depuis les travaux d'Herbert Simon (1959), elle accorde désormais une place au concept de « rationalité limitée », qui suggère que les individus ou les firmes suivent une logique de *satisfaction* (*satisficing*) plutôt que d'optimisation : ils agissent le plus rationnellement possible, mais dans la limite de leur capacité cognitive à résoudre seuls des calculs complexes d'optimisation.

Ce relâchement des hypothèses de rationalité parfaite et de comportement purement utilitariste a ouvert des pistes de recherche importantes en économie de l'environnement en général, et en économie de l'efficacité énergétique en particulier. Les barrières à l'efficacité énergétique ont ainsi été revisitées par l'économie des coûts de transaction, qui s'intéresse aux formes de gouvernance des firmes, et par l'économie comportementale, qui se concentre sur les décisions des consommateurs.

2.3.2 Les apports de l'économie des coûts de transaction

La théorie des coûts de transaction prend sa source dans les travaux de Ronald Coase (1960) et s'est développée sous l'influence d'Oliver Williamson (1981), dans le cadre plus général de la « nouvelle économie institutionnelle ». Elle vise à déterminer dans quelle mesure la nature et l'ampleur des coûts de transaction détermine les structures de gouvernance mises en place par des parties engagées dans un échange. Elle part de l'hypothèse que les agents impliqués dans une transaction sont opportunistes et cherchent à contourner leur engagement contractuel. Afin de se prémunir de cet opportunisme mutuel, ils élaborent des contrats incomplets, au sens où certaines clauses demeurent ouvertes. Dans ce contexte, les coûts de transaction sont définis comme « les coûts d'élaboration d'un contrat *ex ante* et de son administration *ex post* ». Ils varient en fonction de la fréquence et de la complexité des transactions, de l'incertitude qui les entoure et de la « spécificité » de l'actif en jeu, au sens de sa substituabilité avec d'autres biens. En règle générale, plus les coûts de transaction sont importants, plus les structures de gouvernance s'orientent vers l'intégration verticale au détriment du marché, qui laisse davantage de place aux échanges au comptant.

La théorie des coûts de transaction offre une interprétation alternative à certaines barrières à l'efficacité énergétique. Ainsi, les investissements destinés à réduire les coûts de fonctionnement, comme les projets d'efficacité énergétique, sont souvent de taille plus réduite que les investissements « stratégiques » dans le développement de capacité et de nouveaux produits ; ils

¹⁶ Ces approches ont été consacrées par l'attribution du « prix Nobel » d'économie à leurs contributeurs les plus influents, comme Ronald Coase en 1991 et Oliver Williamson en 2009 pour la théorie des coûts de transaction, et Daniel Kahneman en 2002 pour l'économie comportementale.

induisent des coûts de transaction relativement plus élevés, qui finalement s'opposent à leur réalisation. La théorie des coûts de transaction permet également de reconsidérer certaines analyses de l'économie standard. Par exemple, l'élaboration d'un contrat définissant le partage des coûts et bénéfices d'un investissement d'efficacité énergétique entre le propriétaire et le locataire n'est pas impossible, mais découragée en pratique par l'importance des coûts de transaction qui lui sont associés (négociation, contrôle *ex post*).

Sorrell (2004), qui détaille dans les grandes lignes l'apport de la théorie de coûts de transaction dans l'économie de l'efficacité énergétique, en pointe toutefois deux limites. D'abord, elle a une portée explicative plus que prescriptive :

"The [Transaction cost economics] literature is (...) less concerned with identifying appropriate circumstances for public intervention than with using transaction costs to explain the observed choice of market, organizational and contractual forms and the specific design of individual contract arrangements." (Sorrell, 2004, p.45)

Cette visée explicative implique une critique plus fondamentale, déjà émise par Williamson :

"Transaction costs are notoriously difficult to measure, with the results that '...there is a suspicion that almost anything can be rationalised by involving suitably specified transaction costs (Williamson, 1979, p.233)." (Sorrell, 2004, p.51)

2.3.3 L'économie comportementale et les défaillances de comportement

Alors que les progrès de l'économie des coûts de transaction résident dans la reconnaissance de la rationalité limitée, l'économie comportementale (*Behavioural economics*) approfondit l'analyse en s'intéressant au caractère systématique – au sens de régulier et prévisible – des biais qu'engendre la rationalité limitée (Eyre, 1997 ; Foss, 2003 ; Sorrell, 2004). Elle s'appuie sur la notion de *défaillance de comportement (behavioral failure)*, qui se manifeste lorsqu'une prise de décision ne répond pas à la maximisation d'utilité. Dans les contextes fréquents où les préférences sont mal définies et changeantes, les agents prennent des décisions « heuristiques », fondées sur des « routines de calcul ». La notion de défaillance de comportement permet de revisiter les grandes questions de l'économie néoclassique, notamment les externalités, le risque et la coopération entre agents, voire les réponses imparfaites des agents aux politiques publiques (Shogren et Taylor, 2008).

Dans le domaine de la maîtrise de l'énergie, l'existence de routines décisionnelles conduisant à un sous-investissement systématique dans l'efficacité énergétique est un constat déjà ancien (Kempton et Montgomery, 1982). Les explications avancées prennent différentes formes mais tournent généralement autour de la notion de *biais en faveur du statu quo* (Sorrell, 2004 ; Wilson et Dowlatabadi, 2007 ; Allcott et Mullainathan, 2010). Cette défaillance de comportement tient notamment au fait que les individus sont averses aux risques affectant les gains potentiels et non-averses aux risques affectant les pertes potentielles, de telle sorte que les variations de bien-être sont plus fortes pour une perte que pour un gain espéré d'un montant équivalent (Kahneman et Tversky, 1979 ; Gillingham *et al.*, 2009). Au niveau des décisions domestiques, elle implique que les consommateurs préfèrent leur situation courante, en général bien maîtrisée, à un investissement dans l'efficacité énergétique, dont les performances sont entachées d'incertitude.

Malgré l'importance croissante des études de terrain, les travaux d'économie comportementale sont encore principalement fondés sur des expériences de laboratoire, dont la reproduction en situation réelle n'est pas garantie. Ses avancées demeurent insuffisantes pour énoncer des principes généraux (Shoegren et Taylor, 2008).

2.3.4 Autres disciplines des sciences humaines

Toutefois, la brèche ouverte par l'économie comportementale dans la remise en cause des décisions rationnelles ouvre la voie à d'autres sciences sociales (Wilson et Dowlatabadi, 2007). Ainsi, l'efficacité énergétique a fait l'objet d'études avancées dans le domaine de la psychologie (van den Bergh, 2008), de la sociologie (Shove, 1998) ou encore de l'anthropologie (Wilhite *et al.*, 1996 ; Subrémon, 2010, Zélem, 2010). En France, par exemple, des travaux de sociologie suggèrent que l'achat de biens d'usage de l'énergie obéit à une logique « cumulative et distinctive », c'est-à-dire que les individus cherchent à se distinguer en investissant dans des biens efficaces, qui correspondent généralement au haut de gamme (Maresca *et al.*, 2009). Le phénomène d'imitation qui s'ensuit renforce probablement les externalités positives d'adoption identifiées par les économistes.

3 Les voies de progression de l'économie de l'efficacité énergétique

Si les bases de l'économie de l'efficacité énergétique apparaissent plus solides aujourd'hui qu'il y a dix ou vingt ans, le concept de barrière sur lequel elle est assise continue de poser certaines questions. De plus, elle n'explore pas toutes les dimensions de la maîtrise de l'énergie. La partie suivante identifie trois voies de progression de l'économie de l'efficacité énergétique actuelle. Par la suite, le terme plus général d'*économie de la maîtrise de l'énergie* est employé pour désigner l'ensemble des problèmes économiques abordés dans ce chapitre.

3.1 Surmonter le problème de l'inséparabilité des barrières

Les barrières à l'origine de l'inertie des comportements d'investissement dans l'efficacité énergétique ne sont pas toujours aisément caractérisables en termes de simple obstacle, de défaillance de marché ou de défaillance de comportement :

"The important question that remains is what causes the inertia. To the degree that it is caused by real costs of adoption borne by potential adopters, we are returned to one of the types of non-market failure described above. To the degree that inertia is caused by some sort of (informational) market failure, we can then ask which of the types previously discussed is responsible." (Jaffe et Stavins, 1994c, p.806)

L'inertie des comportements peut être interprétée comme un problème de valeur d'option. Elle peut également être interprétée comme un problème d'information imparfaite, les consommateurs privilégiant la consommation d'un « bien de recherche », l'énergie, au détriment d'un « bien de croyance », les technologies efficaces. Elle peut enfin résulter d'une défaillance de comportement, l'aversion à la perte. Ces différentes interprétations conduisent à des prescriptions opposées : alors que la première n'appelle pas d'intervention particulière, les deux dernières justifient une intervention publique.

Sur la question plus précise des défaillances, il importe de déterminer dans quelle mesure les défaillances de marché et de comportement se recourent. Les défaillances de comportement sont-

elles un sous-ensemble des défaillances de marché, qui doivent être prises en compte dans l'élaboration de politiques visant à corriger les défaillances de marché ? Ou bien sont-elles indépendantes, nécessitant une intervention spécifique ? Ces questions, générales aux problèmes d'environnement¹⁷, se posent en des termes particuliers dans le cas de la maîtrise de l'énergie :

"[In the case of hidden costs], bounded rationality may be considered partly responsible for the barrier, since it contributes to the existence of transaction costs. But bounded rationality may also be classified as a barrier itself, since it contributes to decisions which depart from those predicted by orthodox models. This may occur even when actors have adequate motivation, incentives and information and when other barriers to energy efficiency are absent." (Sorrell, 2004, p.78)

Les développements actuels de l'économie comportementale suggèrent une forte dépendance entre les défaillances de marché et de défaillances de comportement, par le biais d' « externalités de rationalité » (*rationality spillovers*) entre différents champs d'action. Des travaux expérimentaux montrent en effet que les individus ayant une pratique intense de l'arbitrage de marché, par exemple les adeptes de paris sportifs, adoptent dans leurs décisions courantes des comportements plus proches du comportement normatif standard que les individus n'ayant pas cette expérience (List, 2004). Ce phénomène a des implications importantes dans le domaine de l'environnement, où les externalités, définies par une absence de marché, induisent vraisemblablement des défaillances de comportement¹⁸.

A cause de ces problèmes d'inséparabilité des défaillances de marché, des défaillances de comportement, et des obstacles à l'efficacité énergétique, les exercices de quantification des barrières à l'efficacité énergétique sont très rares, en particulier dans le secteur résidentiel. Les analyses empiriques doivent prendre plus d'importance pour déterminer l'ampleur et la nature de l'intervention publique nécessaire. En particulier, elles doivent aller au-delà de l'estimation des taux d'actualisation, voire des coûts cachés, qui ne sont que des représentations « tautologiques » des barrières à expliquer.

3.2 Approfondir l'analyse des comportements d'utilisation des équipements

L'économie de l'efficacité énergétique se concentre sur les déterminants d'investissement dans les biens d'usage de l'énergie, en laissant relativement en dehors de l'analyse les déterminants des comportements d'utilisation de ces technologies au quotidien. L'*effet rebond* rappelle pourtant que l'investissement et l'utilisation des technologies sont indissociables. Énoncé pour la première fois par Khazzom (1980), ce phénomène est aujourd'hui abondamment discuté, ainsi que l'attestent le numéro spécial que lui a consacré *Energy Policy* en juin 2000¹⁹ et l'ouvrage collectif édité par Herring et Sorrell (2009). De même que pour le paradoxe de l'efficacité énergétique analysé plus haut, son existence est rarement remise en cause, mais son ampleur est controversée : des vues

¹⁷ "Two circular questions arise in the context of environmental policy : Does market failure lead to behavioral failure, which leads to continued market failure? Does behavioral failure prevent the creation of new markets that would eliminate the behavioral failure?" (Shogren et Taylor, 2008, p.12).

¹⁸ Cette observation suggère que les quotas d'émission échangeables, en familiarisant les acteurs avec les pratiques de marché, sont *a priori* plus efficaces pour internaliser les dommages causés à l'environnement qu'une taxe sur les émissions (Quirion, 2000 ; Shogren et Taylor, 2008)

¹⁹ Volume 28, numéro 6-7, pages 351-500. Elsevier Publishing.

« optimistes », qui l'estiment faible, s'opposent à des vues « pessimistes », qui estiment qu'il annule une grande partie des progrès d'efficacité, allant jusqu'à évoquer le cas extrême d'un « retour de flamme » (*backfire*), situation où l'amélioration de l'efficacité énergétique induirait une augmentation nette de la consommation d'énergie.

La revue empirique exhaustive de Sorrell *et al.* (2009) conclut à une perte maximale d'environ 30% des gains d'efficacité énergétique pour l'ensemble des usages de l'énergie. Ces valeurs sont généralement estimées comme une élasticité de la demande de service énergétique à l'efficacité du vecteur énergétique. Elles réduisent toutefois le lien entre efficacité et sobriété à une proportionnalité trompeuse, qui masque la variabilité du phénomène en fonction de l'ampleur des améliorations d'efficacité énergétique considérées. En d'autres termes, il semble que la relation entre l'efficacité du vecteur énergétique et la demande de service énergétique n'est pas isoélastique (Haas et Schipper, 1998 ; Cayre *et al.*, 2011). Cette observation implique d'associer plus étroitement l'analyse des barrières à l'efficacité énergétique et l'analyse de l'effet rebond.

Au-delà de l'effet rebond, qui est clairement identifié comme un phénomène économique, *i.e.* une réponse rationnelle et bien informée à un signal-prix, il importe d'approfondir l'analyse des déterminants *non-économiques* de l'utilisation des biens d'usage de l'énergie (Ürge-Vorsatz *et al.*, 2009). Les déterminants psychologiques, sociologiques et anthropologiques qui gouvernent ces comportements doivent être rapprochés de ceux qui déterminent les décisions d'investissement.

3.3 Approfondir l'analyse des barrières à l'innovation

Dans le cadre du système technico-économique dépeint à la figure 1, l'économie de l'efficacité énergétique porte davantage sur l'analyse de la « demande » que sur celle de l' « offre ». Les barrières qui affectent l'offre d'énergie sont relativement bien identifiées comme relevant de défaillances de marché, en particulier la tarification inadéquate des énergies et l'absence d'internalisation des dommages environnementaux (Jaffe *et al.*, 2004 ; Gillingham *et al.*, 2009). En revanche, les barrières qui pèsent sur l'offre de biens d'usage de l'énergie, si elles paraissent primordiales aux auteurs du GIEC (Levine *et al.*, 2007, p.418), demeurent mal comprises. L'estimation empirique des taux d'apprentissage n'en offre qu'une vision agrégée : elle est en général fondée sur le prix d'achat des technologies proposé aux consommateurs et ne prend pas en compte les coûts d'installation, qui représentent une part importante du coût total de l'investissement dans l'efficacité énergétique.

Lutzenhiser (1994) est un des rares auteurs à avoir tenté d'identifier en détail les barrières qui affectent l'offre de biens d'usage de l'énergie²⁰. En analysant le marché américain de la construction de logements neufs et de la rénovation de logements existants, il met notamment en avant les problèmes suivants :

- L'activité est cyclique et dépend fortement de la conjoncture économique. Cette situation ne favorise pas la stabilisation des travailleurs les plus qualifiés.
- En réponse à cette cyclicité, les contrats de sous-traitance entre les différents corps de métier sont généralement négociés pour chaque nouveau chantier (*job by job*) plutôt que sur

²⁰ Pour l'anecdote, l'incipit de son article reste d'une grande actualité : “*Too date, little empirical research has considered how the residential construction industry influences the energy efficiency of housing.*” (Lutzenhiser, 1994, p.867)

une période longue, qui permettrait de rapprocher et consolider les différentes compétences.

- Les entreprises du bâtiment ont rarement la taille critique pour consacrer des ressources à la recherche et développement ou au *marketing*.
- Le secteur est caractérisé par une forte culture entrepreneuriale, guidée par des contraintes financières de court-terme et le respect des délais de livraison, qui laisse peu de place à l'innovation sur le long-terme.

Ces observations s'appliquent largement à la France, qui compte environ 350 000 entreprises du bâtiment, d'une taille moyenne de 3,5 salariés en équivalent temps-plein (Lagandré, 2006 ; CGDD, 2009b). Ces petites entreprises sont rarement organisées en groupes industriels et exportent peu. L'innovation y est relativement moins importante que dans les autres secteurs, et principalement orientée vers le changement organisationnel, *i.e.* la réduction des coûts et des délais et l'amélioration de la qualité des prestations (Tessier, 2008).

4 De l'analyse des barrières aux recommandations d'intervention publique

La présence de défaillances de marché et de comportement est une condition nécessaire à l'intervention publique en faveur de la maîtrise de l'énergie. Cette partie s'attache à décrire les prescriptions élémentaires qui peuvent être déduites de la nature des défaillances identifiées.

4.1 A problèmes différents, instruments différents

Compte tenu des défaillances identifiées, les instruments²¹ de maîtrise de l'énergie peuvent prendre *a priori* différentes formes (Gillingham *et al.*, 2009, p.604) :

- *Pour corriger les défaillances des marchés de l'énergie* : signal-prix pour internaliser la valeur du carbone (taxation ou échange de quotas d'émission) ; tarification de l'électricité en temps réel ou au prix de marché ; taxation de l'énergie pour assurer l'indépendance énergétique.
- *Pour corriger les problèmes d'information* : labels, programmes d'information et d'éducation.
- *Pour corriger les problèmes d'innovation* : subvention à la recherche, au développement et à la démonstration ; subventions à l'adoption de technologies innovantes.
- *Pour corriger les contraintes de financement* : facilités de crédit, prêts bonifiés.
- *Pour corriger les problèmes de concurrence imparfaite* : réglementation imposant un standard d'efficacité énergétique.
- *Pour corriger les défaillances de comportement* : programmes d'information, d'éducation ; réglementation imposant un standard d'efficacité énergétique.

L'importance accordée aux instruments de réglementation et d'information confère à la maîtrise de l'énergie une certaine autonomie par rapport à l'économie de l'environnement, où les prescriptions sont davantage resserrées autour de l'internalisation des dommages causés à l'environnement par un « signal-prix » (Tirole, 2009 ; Godard, 2010). Toutefois, si plusieurs instruments peuvent être prescrits, doivent-ils tous être mis en œuvre simultanément ?

²¹ Plus généralement, l'instrumentation de l'action publique peut être vue comme *l'ensemble des problèmes posés par le choix et l'usage des outils (des techniques, des moyens d'opérer, des dispositifs) qui permettent de matérialiser et d'opérationnaliser l'action gouvernementale* (Lascoumes et Le Galès, 2005, p.12).

4.2 La question du nombre d'instruments

La définition des politiques publiques suit généralement la « règle de Tinbergen », qui recommande de mettre en œuvre *au moins autant* d'instruments qu'il y a d'objectifs à atteindre (Tinbergen, 1952 ; Knudson, 2009). Cette préconisation est largement reprise dans le domaine de la maîtrise de l'énergie, comme l'illustre le dernier rapport d'évaluation du GIEC :

“These barriers are especially strong and diverse in the residential and commercial sectors; therefore, overcoming them is only possible through a diverse portfolio of policy instruments (high agreement, medium evidence).” (Levine *et al.*, 2007, p.390).

Dans le même temps prévaut une forme de *principe de parcimonie*, qui suppose de limiter les moyens d'intervention au strict minimum nécessaire ; cela implique que le nombre d'instruments ne dépasse pas le nombre de problèmes, voire de limiter l'intervention à un unique instrument, s'il existe, qui résout tous les problèmes. La tension entre ces deux recommandations conduit idéalement à mettre en œuvre un instrument spécifique pour chaque défaillance à régler²².

Dans les faits, cette préconisation se heurte à deux difficultés. D'une part, la partie qui précède a montré que les défaillances sont difficilement identifiables et séparables. D'autre part, les instruments ne sont pas parfaitement « sélectifs », au sens où ils n'auraient aucun impact sur les problèmes autres que ceux pour lesquels ils sont mis en œuvre (Johansen, 1965 ; Knudson, 2008). La superposition partielle des défaillances et la sélectivité imparfaite des instruments créent des situations complexes, auxquelles il est difficile d'appliquer des principes simples d'intervention.

A partir de l'examen de cas concrets, Benneer et Stavins (2007) tentent de dégager quelques règles pour la mise en place de multiples instruments, en fonction des différentes « contraintes » qui règnent dans l'économie, *i.e.* les défaillances de marché, les contraintes politiques ou encore les instruments préexistant. Ils examinent d'abord les situations où plusieurs défaillances de marché coexistent. Selon la manière dont la correction de l'une affecte les pertes de bien-être provoquées par l'autre, les défaillances peuvent être mutuellement amélioratrices (*jointly ameliorating*), mutuellement renforçantes (*jointly reinforcing*) ou neutres (*neutral*). Dans le domaine de la politique environnementale, la présence simultanée d'externalités environnementales négatives et d'externalités d'innovation positives peut justifier la mise en œuvre conjointe d'un soutien à l'innovation et d'un signal-prix sur la valeur du carbone (Jaffe *et al.*, 2005 ; Fischer et Newell, 2008). Dans le cas plus spécifique de la maîtrise de l'énergie, la présence d'information imparfaite peut justifier d'associer à ce bouquet des politiques d'information (Newell *et al.*, 1999). Toutes ces défaillances sont vues par les auteurs comme mutuellement amélioratrices.

Benneer et Stavins (2007) traitent également de cas où coexistent une défaillance de marché, qui justifie une intervention, et une contrainte inamovible d'un autre type, qui ne justifie pas d'intervention particulière mais peut affecter l'efficacité de la politique destinée à corriger la défaillance. Certaines de ces situations peuvent justifier l'emploi d'un second instrument. Dans le cas des politiques d'efficacité énergétique (non abordé par les auteurs), qui ont tendance à aggraver l'effet rebond, il peut être judicieux d'associer un instrument destiné à réduire cet effet.

²² Par une simple analogie mathématique, cette double recommandation peut être vue comme une relation « bijective » de l'ensemble des instruments dans l'ensemble des objectifs, rendue à la fois « surjective » par la Règle de Tinbergen et « injective » par le principe de parcimonie.

Pour finir, il faut souligner que la question des superpositions entre instruments mord sur celle de l'hybridation, qui peut être formulée ainsi : la mise en œuvre d'instruments hybrides se justifie-t-elle par la présence de plusieurs « contraintes » ? Ou simplement par la recherche de synergies améliorant l'efficacité de l'intervention ?

5 Conclusions

En définitive, l'économie de la maîtrise de l'énergie se définit par la présence, sur les marchés de l'énergie et des biens d'usage de l'énergie, d'une multitude de « barrières » qui s'opposent à la maximisation des économies d'énergie. Ces barrières correspondent à de simples « obstacles » (incertitude et irréversibilité, coûts cachés, hétérogénéité des préférences, effet rebond), des défaillances de marché (externalités environnementales, information imparfaite, externalités d'innovation, contraintes de financement) voire des défaillances de comportement (rationalité limitée). Ces problèmes sont dus à la nature hautement diversifiée du service énergétique, « bien composite » sous-jacent :

- Le service énergétique est auto-produit par la consommation conjointe d'énergie et de biens d'usage de l'énergie, déterminée par les comportements individuels d'investissement et d'utilisation des technologies.
- Le bien d'usage de l'énergie n'est pas unique et se décompose en une myriade de technologies, parfois liées par des synergies techniques, mais dont les déterminants d'achat sont variés : dans le cas du chauffage, la rénovation énergétique est pleinement efficace si les travaux portant sur l'enveloppe (vitrage, isolation) sont coordonnées avec ceux portant sur le système de chauffage ; toutefois, les travaux d'isolation correspondent à un investissement « de rationalisation », tandis que le remplacement d'une chaudière obéit à une logique « de renouvellement ».
- L'efficacité énergétique n'est pas le seul attribut de ces technologies. La recherche de confort thermique, acoustique, sanitaire ou esthétique est parfois le motif principal d'investissement.

A ces problèmes économiques propres sont associés des réponses politiques spécifiques (information, réglementation, subventions et signaux-prix), qui accordent à l'économie de la maîtrise de l'énergie une certaine autonomie vis-à-vis de l'économie de l'environnement. Néanmoins, l'externalité environnementale demeure une composante centrale de la maîtrise de l'énergie et paraît décisive pour le « passage à l'acte » politique : jusqu'à l'avènement de la lutte contre le changement climatique, les gains d'efficacité économique et de sécurité énergétique qu'apporte la maîtrise de l'énergie n'ont pas suffi à motiver l'intervention publique.

Plus généralement, l'économie de l'environnement et l'économie de la maîtrise de l'énergie contribuent à l'élaboration d'une théorie économique du « second rang », qui vise à analyser les contraintes qui empêchent l'atteinte de l'optimum de Pareto et les moyens de surmonter ces contraintes (Lipsey et Lancaster, 1956 ; Benneer et Stavins, 2007 ; Guivarch, 2010). Cette tâche suppose de défaire les liens complexes qui unissent les contraintes et les instruments. Dans cette perspective, deux questions se posent pour la suite de cette thèse : *Comment représenter les différentes barrières aux économies d'énergie ? Les recommandations d'intervention sont-elles validées par l'évaluation ?*

Bibliographie

- Académie des sciences, 2010, *Le changement climatique*, <http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/pdf/climat_261010.pdf>
- AIE [Agence internationale de l'énergie], 2007, *Mind the gap: Quantifying principal-agent problems in energy efficiency*, Paris
- Alcott, B., 2008, "The sufficiency strategy: Would rich-world frugality lower environmental impact?", *Ecological Economics*, 64(4): 770-786
- Allcott, H., S. Mullainathan, 2010, "Behavior and energy policy", *Science*, Vol. 327, n°5970, pp. 1204-1205.
Version longue:
<http://web.mit.edu/allcott/www/Allcott%20and%20Mullainathan%202010%20-%20Behavioral%20Science%20and%20Energy%20Policy.pdf>
- Ansar, J., R. Sparks, 2009, "The experience curve, option value, and the energy paradox", *Energy Policy*, 37(3):1012-1020
- Arrow, K.J., 1962, "The economic implications of learning by doing", *The Review of Economic Studies* 29(3):155-173
- ATEE [Association Technique Energie Environnement], 2009, *Le dispositif des certificats d'économies d'énergie*, Mémento du club C2E
- Axsen, J., D. C. Mountain, M. Jaccard, 2009, "Combining stated and revealed choice research to simulate the neighbor effect: The case of hybrid-electric vehicles", *Resource and Energy Economics*, 31(3): 221-238
- Bennea, L.S., R.N. Stavins, 2007, "Second-best theory and the use of multiple policy instruments", *Environmental and Resource Economics*, 37(1):111-129
- Cayre, E., B. Allibe, M.-H. Laurent, D. Osso, 2011, "There are people in the house!: How misleading for energy policies are the results of purely technical analysis of residential energy consumption", *Proceedings of the ECEEE Summer Study*, Paper 7-277
- CGDD [Commissariat général au développement durable], 2009a, « 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], 2009b, « Entreprises de construction : résultats de l'EAE 2007 », *Observation et Statistiques*, n°58
- Coase, R.H., 1960, "The problem of social cost", *Journal of Law and Economics*, 3:1-44
- Darby, S., 2006a, "Social learning and public policy: Lessons from an energy-conscious village", *Energy Policy*, 34(17):2929-2940
- Darby, S., 2006b, *The effectiveness of feedback on energy consumption: A review for DEFRA of the literature on metering, billing and direct displays*, Environmental Change Institute, University of Oxford
- Fischer, C., R.G. Newell, 2008, "Environmental and technology policies for climate mitigation", *Journal of Environmental Economics and Management*, 55(2):142-162
- Foss, N.J., 2003, "Bounded rationality in the economics of organization: "Much cited and little used"", *Journal of Economic Psychology*, 24(2):245-264

- 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.
- 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
- Godard, O., 2010, « L'organisation internationale de la lutte contre l'effet de serre. Une revue critique des thèses du rapport de Jean Tirole », *L'Economie politique*, 46(2):82-106
- Guivarch, C., 2010, « Evaluer le coût des politiques climatiques – De l'importance des mécanismes de second rang », Thèse de doctorat, Université Paris-Est
- Haas, R., L. Schipper, 1998, "Residential energy demand in OECD-countries and the role of irreversible efficiency improvements", *Energy Economics*, 20(4): 421-442
- Hassett, K.A., G.E. Metcalf, 1993, "Energy conservation investment: Do consumers discount the future correctly?", *Energy Policy*, 21(6):710-716
- Henry, C., 1974, "Option values in the economics of irreplaceable assets", *The Review of Economic Studies*, 41:89-104
- Herring, H., S. Sorrell (eds), 2009, *Energy efficiency and sustainable consumption: the rebound effect*, Palgrave McMillan Ed.
- Herring, H., 2009, "Sufficiency and the rebound effect", pp. 224-239, in Herring, H., S. Sorrell (eds), *Energy efficiency and sustainable consumption: the rebound effect*, Palgrave McMillan Ed.
- Hirst, E., M. Brown, 1990, "Closing the efficiency gap: barriers to the efficient use of energy", *Resources, Conservation and Recycling*, 3(4):267-281
- Huntington, H.G., L. Schipper, A.H. Sanstad, 1994, "Editor's introduction", *Energy Policy*, 22(10):795-797
- 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
- Jaccard, M., M. Dennis, 2006, "Estimating home energy decision parameters for a hybrid energy-
- Jaffe, A.B., R.N. Stavins, 1994a, "The energy paradox and the diffusion of conservation technology", *Resource and Energy Economics*, 16(2):91-122
- Jaffe, A.B., R.N. Stavins, 1994b, "Energy-efficiency investments and public policy", *The Energy Journal*, 15(2):43-65
- Jaffe, A.B., R.N. Stavins, 1994c, "The energy-efficiency gap: What does it mean?", *Energy Policy*, 22(10):804-810
- Jaffe, A.B., R.G. Newell, R.N. Stavins, 2004, "Economics of energy efficiency", 79-90 in Cleveland, C.J. (ed), *Encyclopedia of Energy, Volume 2*, San Diego and Oxford (UK): Elsevier
- Jaffe, A.B., R.G. Newell, R.N. Stavins, 2005, "A tale of two market failures: Technology and environmental policy", *Ecological Economics*, 54(2-3):164-174
- Johansen, L., 1965, *Public Economics*, Amsterdam: North Holland

- Joskow, P.L., 1994, "More from the guru of energy efficiency: 'There must be a pony!", *The Electricity Journal*, 7(4):50-61
- Kahneman, D., A. Tversky, 1979, "Prospect theory: An analysis of decision under risk", *Econometrica*, 47(2):263-292
- Kempton, W., L. Montgomery, 1982, "Folk quantification of energy", *Energy*, 7(10): 817-827
- Khazoom, J.D., 1980, "Economic implications of mandated efficiency in standards for household appliances", *The Energy Journal*, 1(4):21-40
- Knudson, W.A., 2009, "The Environment, Energy, and the Tinbergen Rule", *Bulletin of Science, Technology and Society*, 29(4):308-312
- 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
- Laitner, J.A.S., A.H. Sanstad, 2004, "Learning-by-doing on both the demand and the supply sides: implications for electric utility investments in a Heuristic model", *International Journal of Energy Technology and Policy*, 2(1-2):142-152
- 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
- Lascoumes, P., P. Le Galès, 2005, « L'action publique saisie par ses instruments », pp. 11-44 in Lascoumes, P., P. Le Galès (eds), *Gouverner par les instruments*, Paris: Presses de Sciences Po
- 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
- Leth-Petersen, S., M. Togeby, 2001, "Demand for space heating in apartment blocks: measuring effects of policy measures aiming at reducing energy consumption", *Energy Economics*, 23(4):387-403
- Levine, M., D. Ürge-Vorsatz, K. Blok, L. Geng, D. Harvey, S. Lang, G. Levermore, A. Mongameli Mehlwana, S. Mirasgedis, A. Novikova, J. Rilling, H. Yoshino, 2007: Residential and commercial buildings. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Levinson, A., S. Niemann, 2004, "Energy use by apartment tenants when landlords pay for utilities", *Resource and Energy Economics*, 26(1):51-75
- Lipsey, R.G., K. Lancaster, 1956, "The general theory of second best", *The Review of Economic Studies*, 24(1):11-32
- List, J.A., 2004, "Neoclassical theory versus prospect theory: Evidence from the marketplace", *Econometrica*, 72(2):615-625
- Lovins, A.B., 1994, "Apples, oranges and horned toads: Is the Joskow & Marron critique of electric efficiency costs valid?", *The Electricity Journal*, 7(4):29-49
- Lovins, A.B., 2004, "Energy Efficiency, Taxonomic Overview", pp. 383-401, in Cleveland, C.J. (ed), *Encyclopedia of Energy, Volume 2*, San Diego and Oxford (UK): Elsevier
- Lutzenhiser, L., 1994, "Innovation and organizational networks Barriers to energy efficiency in the US housing industry", *Energy Policy*, 22(10):867-876
- Mahapatra, K., L. Gustavsson, 2008, "An adopter-centric approach to analyze the diffusion patterns of innovative residential heating systems in Sweden", *Energy Policy*, 36(2):577-590

- 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
- 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
- McKinsey & Company, 2009, *Pathways to a Low-Carbon Economy, Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve*
- Metcalf, G.E., K.A. Hassett, 1999, "Measuring the Energy Savings from Home Improvement Investments: Evidence from Monthly Billing Data", *The Review of Economics and Statistics*, 81(3):516-528
- Mundaca, L., 2008, "Markets for energy efficiency: Exploring the implications of an EU-wide 'Tradable White Certificate' scheme", *Energy Economics*, 30(6):3016-3043
- Murtishaw, S., J. Sathaye, 2006, "Quantifying the effect of the principal-agent problem on US residential use", *Working paper LBNL-59773*, Lawrence Berkeley National Laboratory
- Newell, R.G., A.B. Jaffe, R.N. Stavins, 1999, "The induced innovation hypothesis and energy-saving technological change", *The Quarterly Journal of Economics*, 114(3):941-975
- Ostertag, K., 2003, *No-regret potentials in energy conservation: An analysis of their relevance, size and determinants*, Heidelberg: Physica
- Quirion, P., 2000, « Enjeux économiques des règles internationales et de la conception des systèmes nationaux » in Oïka, *Les enjeux économiques et institutionnels du changement climatique. Négociations internationales: les déterminants des accords et de leur mise en œuvre*, Rapport final pour le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement
- 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
- Rehdanz, K., 2007, "Determinants of residential space heating expenditures in Germany", *Energy Economics*, 29(2):167-182
- Salomon, T., C. Couturier, M. Jedliczka, T. Letz, B. Lebot, 2005, "A negawatt scenario for 2005–2050", *Proceedings of the ECEEE Summer Study*
- Sanstad, A.H., R.B. Howarth, 1994, "'Normal' markets, market imperfections and energy efficiency", *Energy Policy*, 22(10):811-818
- Sanstad, A.H., C. Blumstein, S.E. Stoff, 1995, "How high are option values in energy-efficiency investments?", *Energy Policy*, 23(9):739-743
- Scott, S., 1997, "Household energy efficiency in Ireland: A replication study of ownership of energy saving items", *Energy Economics*, 19(2):187-208
- Shogren, J.F., L.O. Taylor, 2008, "On behavioral-environmental economics", *Review of Environmental Economics and Policy*, 2(1):26-44
- Shove, E., 1998, "Gaps, barriers and conceptual chasm: theories of technology transfer and energy in buildings", *Energy Policy*, 26(15):1105-1112
- Simon, H.A., 1959, "Theories of decision-making in economics and behavioural science", *American Economic Review*, 49(3):253-283

- Sorrell, S., 2004, "Understanding barriers to energy efficiency", pp.25-93 in Sorrell S., E. O'Malley, J. Schleich, S. Scott (eds), *The economics of energy efficiency: barriers to cost-effective investment*, Cheltenham: Edward Elgar
- Sorrell, S., J. Dimitropoulos, 2008, "The rebound effect: microeconomic definitions, limitations and extensions", *Ecological Economics*, 65(3):636-649
- 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
- Sutherland, R.J., 1996, "The economics of energy conservation policy", *Energy Policy*, 24(4):361-370
- Tessier, L., 2008, « La structure et les métiers de la construction guident son innovation », Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, *SESP en bref*, n°24
- Tinbergen, J., 1952, *On the theory of economic policy*, Amsterdam: North Holland.
- Tirole, J., 2009, *Politique climatique, une nouvelle architecture internationale*, Rapport au Conseil d'Analyse Economique, Paris: La documentation française
- TNS Sofres, 2006, *Maîtrise de l'énergie, 2e 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
- Ürge-Vorsatz, D., A. Novikova, S. Köppel, B. Boza-Kiss, 2009, "Bottom-up assessment of potentials and costs of CO₂ emission mitigation in the buildings sector: insights into the missing elements", *Energy Efficiency*, 2(4):293-316
- van den Bergh, J.C.J.M., 2008, "Environmental regulation of households: An empirical review of economic and psychological factors", *Ecological Economics*, 66(4):559-574
- Varian, H.R., 2003, *Introduction à la microéconomie*, Bruxelles: De Boeck
- Weiss, MM. Junginger, M.K. Patel, K. Blok, 2010, "A review of experience curve analyses for energy demand technologies", *Technological Forecasting & Social Change*, 77(3):411-428
- Wilhite, H., H. Nakagami, T. Masuda, Y. Yamaga, H. Haneda, 1996, "A cross-cultural analysis of household energy use behaviour in Japan and Norway", *Energy Policy*, 24(9):795-803
- Williamson, O.E., 1981, "The economics of organization: The transaction cost approach", *The American Journal of Sociology*, 87(3):548-577
- Wilson, C., H. Dowlatabadi, 2007, "Models of decision making and residential energy use", *Annual Review of Environment and Resources*, 32:169-203
- Wing, I.S., 2006, "Representing induced technological change in models for climate policy analysis", *Energy Economics*, 28(5-6):539-562
- Wirl, F., 1997, *The economics of conservation programs*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers
- Wirl, F., 2000, "Lessons from utility conservation programs", *The Energy Journal*, 21(1):87-108
- Zélem, M.-C., 2010, *Politique de maîtrise de la demande d'énergie et résistances au changement : Une approche socio-anthropologique*, Paris: L'Harmattan

Chapitre II : Evaluation des instruments de maîtrise de l'énergie : principes et résultats préliminaires

Le premier chapitre a explicité les défaillances des marchés de l'énergie et de l'efficacité énergétique (externalités environnementales, problèmes d'information, externalités positives d'apprentissage, etc.) ainsi que les défaillances de comportement dérivées de la rationalité limitée (biais pour le *statu quo*) qui justifient l'intervention publique en faveur de la maîtrise de l'énergie. Il a également mis en avant certains obstacles (effet rebond, hétérogénéité des préférences, incertitude sur les marchés) qui affectent l'efficacité de l'intervention.

Dès lors qu'elle est justifiée, l'intervention publique est en principe élaborée selon la séquence suivante : (1) définition d'objectifs (*goal, objective*) ; (2) traduction des objectifs en cibles quantifiées (*target*) ; (3) choix d'instruments (Hepburn, 2006, p.228). Les arguments de justification qui s'appliquent à la maîtrise de l'énergie ne sont que partiellement pris en compte dans les étapes 1 et 2. La séparabilité imparfaite des barrières aux économies d'énergie complique la traduction quantitative de l'objectif, qui consiste à *corriger des défaillances de marché et de comportement en présence d'obstacles à l'efficacité énergétique*. De surcroît, les étapes 1 et 2 établissent les objectifs d'action publique sur une variété de critères, non exclusivement économiques. L'analyse des étapes 1 et 2 dépasse donc le cadre de cette thèse et les cibles quantifiées sont prises comme données dans les chapitres qui suivent.

Cette thèse s'intéresse principalement au choix des instruments d'intervention publique (étape 3), qui accorde une place centrale à l'analyse économique et repose fondamentalement sur une démarche d'évaluation, c'est-à-dire un jugement des performances des instruments selon différents critères économiques. Idéalement, l'évaluation *ex ante* précède la mise en œuvre. En pratique, une telle entreprise est rarement achevée lorsque les pouvoirs publics passent à l'action ; fût-elle engagée, elle est toujours empreinte d'incertitude. L'évaluation *ex post* apporte alors la connaissance complémentaire qui permet éventuellement de fonder le choix d'instrument sur des éléments systématiques.

Ce deuxième chapitre pose les fondements de l'évaluation des instruments de maîtrise de l'énergie. La première partie introduit les critères utilisés dans l'ensemble des travaux. La deuxième partie dresse une revue des résultats théoriques et empiriques qui se dégagent de la littérature. La troisième partie compare les propriétés élémentaires des instruments classiques de maîtrise de l'énergie à l'aide d'un modèle d'équilibre partiel, qui représente de façon stylisée le système décrit à la figure 1, en intégrant l'effet rebond.

L'annexe I illustre concrètement les problèmes soulevés dans ce chapitre en brochant l'historique de la politique française de maîtrise de l'énergie. L'annexe II détaille le modèle et les résultats de la troisième partie.

1 Critères d'évaluation

1.1 Efficacité et efficience économique

En considérant le cas simple où *un* instrument est mis en œuvre pour atteindre *une* certaine cible définie par les décideurs politiques, l'évaluation économique consiste à estimer les critères suivants :

- L'efficacité (*effectiveness, efficacy*) : quel est le niveau de réalisations additionnelles par rapport à une situation de référence ? Si des cibles sont prédéfinies, sont-elles atteintes ?
- Le rapport coût-efficacité (*cost-effectiveness*) : à quel coût le niveau de réalisations (ou la cible) est-il atteint ?
- L'efficience (*efficiency*) : le niveau de réalisation (ou la cible) atteint dégage-t-il des bénéfices sociaux nets ?

En théorie, hors des effets distributifs, l'efficience est le seul critère économique qui importe. Il est toutefois fréquent, dans le domaine de la politique environnementale, que l'estimation des coûts et surtout des bénéfices de l'intervention soit entachée d'incertitude ; le meilleur moyen de juger de la performance de l'instrument peut alors être de définir un certain niveau de réalisations (niveau de dépollution, d'économies d'énergie) et d'estimer à quel coût il est atteint (Baumol et Oates, 1971 ; Goulder et Parry, 2008). Les critères d'efficacité et de coût-efficacité sont donc des substituts imparfaits mais courants au critère d'efficience²³.

Appliquée à la maîtrise de l'énergie, cette séquence d'évaluation requiert une méthode singulière. L'efficacité, d'abord, est envisagée comme une certaine quantité d'énergie économisée par rapport à une situation de référence (en kWh évité ou tonne de CO₂ évitée). La définition de la situation de référence et son évolution au cours du temps, ainsi que la durée de vie supposée des économies d'énergie, constituent des hypothèses fondamentales et notoirement difficiles à élaborer (Boonekamp, 2006).

Les bénéfices physiques ainsi délimités doivent ensuite être traduits en bénéfices monétaires. Alors qu'elle suppose dans le cas général des hypothèses hasardeuses sur la disponibilité à payer des consommateurs (Goulder, 2007), cette étape est ici simplifiée : comme les bénéfices sociaux des économies d'énergie découlent principalement d'une diminution de la facture énergétique, il « suffit » en effet de formuler des hypothèses d'évolution du prix des énergies pour les valoriser. Les émissions de CO₂ évitées peuvent également être comptabilisées à la valeur tutélaire du carbone. En revanche, une grande partie des bénéfices reste, comme dans le cas général, difficile à évaluer (gains sur l'emploi, amélioration du confort et de la santé, *etc.*).

Au regard des bénéfices générés, les coûts de l'intervention doivent enfin être quantifiés. Les coûts les plus évidents sont liés au surcroît d'investissement dans les technologies efficaces induits par l'instrument : l'intégralité du coût des technologies pour les investissements de « rationalisation », comme l'isolation, mais seulement la différence de coût avec la technologie moyenne du marché ou du parc pour les investissements de « renouvellement », comme le remplacement de système de chauffage. Leur analyse suppose un examen attentif des marchés de l'efficacité énergétique et du

²³ "Maximizing cost-effectiveness requires that all agents face the same price on emissions. The stronger condition of maximizing the efficiency gains from policy intervention implies a particular level for this price: namely, the one that equates the marginal benefits and costs of emissions reductions." (Goulder et Parry, 2008, p.154).

prix des technologies. Aux côtés de ces « coûts directs », l'instrument induit un ensemble de « coûts indirects », qui englobent les coûts de contrôle pour le gouvernement, les coûts de mise en conformité pour les firmes, ou encore les pertes d'utilité des consommateurs lorsque l'investissement s'accompagne d'une réduction des attributs autres que l'efficacité énergétique (par exemple, un changement de luminosité à la suite de l'installation d'une ampoule basse consommation). Ces coûts sont généralement plus difficiles à circonscrire et à quantifier que l'ensemble des coûts directs.

Lorsque ces trois grandeurs – bénéfiques physiques, bénéfiques monétaires, coûts – sont quantifiées, le critère de coût-efficacité est calculé en rapportant les coûts (€) de l'action (coûts privés pour le consommateur, coût pour le budget de l'Etat, etc.) à ses bénéfices physiques (kWh évité, tonne de CO₂ évitée) et le critère d'efficacité est calculé en soustrayant les coûts aux bénéfices monétaires.

1.2 Efficience statique et dynamique

Dans un cadre standard d'équilibre statique, la maximisation de l'efficacité implique que le coût marginal de l'intervention égalise le bénéfice marginal des économies d'énergie, et la maximisation du rapport coût-efficacité correspond à une situation où les agents égalisent le coût marginal de leurs économies d'énergie. Le décalage temporel qui existe entre l'investissement et les économies d'énergie qui s'ensuivent limitent cependant la pertinence de cette approche marginaliste. L'incertitude qui pèse sur la valorisation des coûts et bénéfices peut conduire à des jugements contradictoires selon l'horizon temporel considéré : d'une part, les prix des énergies sont soumis à des fluctuations importantes ; d'autre part, si les coûts des technologies ont tendance à décroître sur le long terme sous l'influence de l'apprentissage technologique, ils peuvent augmenter à court terme quand l'offre ne suffit pas à satisfaire la demande.

Plus généralement, l'équilibre statique est conceptuellement insuffisant pour envisager des problèmes économiques qui portent sur la diffusion des technologies à long terme. Un tel mécanisme repose sur des phénomènes d'apprentissage et de transformation des marchés difficiles à quantifier. Le critère d'efficacité dynamique (*dynamic efficiency*), qui intègre l'innovation technologique et le changement organisationnel sur une période longue, doit donc compléter le critère statique (Milliman et Prince, 1989; Jaffe et Stavins, 1995; Finon et Menanteau, 2005). Cette démarche est influencée par la perspective évolutionniste, qui envisage l'équilibre non pas comme l'état réel de l'économie, mais comme un état vers lequel elle tend (Nelson et Winter, 2002).

1.3 Critères complémentaires : effet d'aubaine et effets distributifs

La quantification de l'« effet d'aubaine », qui désigne les réalisations qui se seraient produites en l'absence de l'instrument, est partie intégrante de l'estimation du critère d'efficacité, qui évalue l'effet additionnel de l'instrument par rapport à une situation de référence. Cette démarche suppose de comptabiliser le coût des réalisations « opportunistes », mais pas les bénéfices qui en découlent (Joskow et Marron, 1992 ; Gillingham *et al.*, 2009, p.612 ; Lees, 2008). Dans le cas de la maîtrise de l'énergie, justifiée entre autres par des externalités d'adoption sur l'offre et la demande de biens énergétiques (*cf.* chapitre 1), il est toutefois envisageable que le nombre de bénéficiaires « opportunistes » (*free-riders*) d'un programme d'efficacité énergétique (subvention, information, etc.) soit partiellement compensé par des non-bénéficiaires (*free-drivers*) qui sont passés à l'acte grâce à la diffusion de l'information et aux baisses de coût générées par ce programme (Blumstein et Harris, 1993 ; Eto *et al.*, 1996 ; Thomas, 2009).

Les « impacts distributifs » de l'intervention sont également à prendre en compte, selon différentes dimensions : les firmes et les autres agents de la société d'une part, les ménages de différentes classes de revenu d'autre part (Goulder et Parry, 2008). La distribution des impacts entre agents économiques établit *l'acceptabilité ou faisabilité politique* de l'instrument. Son analyse approfondie nécessite l'emploi des outils de l'économie politique (Hahn et Stavins, 1992 ; Keohane *et al.*, 1998 ; Glachant, 2008). La distribution des impacts en fonction des classes de revenu des ménages établit *l'équité* (Combet *et al.*, 2010). Cette question se pose en des termes particuliers dans le cas de la maîtrise de l'énergie, où les technologies à encourager – celles qui sont énergétiquement efficaces – correspondent généralement au haut de gamme ; à titre de comparaison, le problème est inversé dans le secteur des transports, où l'efficacité énergétique est généralement l'attribut des véhicules de bas de gamme, dont le poids et la motorisation sont relativement faibles (Quirion, 2004). Évaluer l'équité du choix d'instrument de maîtrise de l'énergie suppose toutefois de connaître la répartition des bénéficiaires par classe de revenu, information qui n'est pas toujours accessible.

2 Revue des résultats d'évaluations théoriques et empiriques

La présente partie passe en revue les performances des différents instruments de maîtrise de l'énergie, établies en confrontant des travaux théoriques et des évaluations empiriques de politiques américaines et européennes (Gillingham *et al.*, 2006 ; AIE et AFD, 2008 ; Linares et Labandeira, 2010). Le seul critère communément estimé est l'efficacité, *i.e.* le niveau d'économies d'énergie additionnelles induit par l'instrument ; les estimations de coût-efficacité et d'efficience sont plus rarement disponibles.

Trois cas sont distingués : les instruments basés sur des incitations non financières (réglementation, information), les instruments basés sur des incitations financières (taxe, subvention) et les combinaisons d'instruments (superposition, hybridation). A l'occasion, certains résultats issus de l'évaluation d'autres instruments de politique environnementale viennent compléter l'analyse.

2.1 Instruments basés sur des incitations non financières

Les problèmes économiques qui affectent la maîtrise de l'énergie ne se réduisent pas à un cas pur d'externalité et sont principalement liés à des imperfections d'information (Huntington *et al.*, 1994, p.796). Pour cette raison, les instruments dont la mise en œuvre est à la fois la plus ancienne et la plus répandue sont non financiers.

2.1.1 Réglementation sur l'efficacité énergétique

Les réglementations en faveur de l'efficacité énergétique recouvrent les standards de performance, qui imposent aux fabricants un niveau minimal d'efficacité énergétique des technologies mises sur le marché, et les code de construction (*building code*), comme la réglementation thermique pour les bâtiments neufs en France, qui fixent un niveau maximal de consommation d'énergie. Seuls les premiers ont fait l'objet d'une véritable analyse économique.

Du point de vue de l'économie standard, l'efficience des réglementations est diversement appréciée. Partant de l'hétérogénéité des consommateurs, certains auteurs avancent que la restriction des choix technologiques réduit le bien-être des individus qui ne sont pas disposés à investir au-delà du seuil d'efficacité imposé (Hausman et Joskow, 1982 ; Sutherland, 1996). Par exemple, les consommateurs qui valorisent une certaine qualité d'éclairage sont réticents à acheter des ampoules basse consommation ; les propriétaires qui fréquentent peu leur résidence secondaire ont rarement

intérêt à investir dans un système de chauffage efficace mais coûteux. En d'autres termes, les réglementations risquent de sacrifier l'efficacité économique au profit de l'efficacité énergétique, comme l'illustre la flèche (2) du diagramme de la figure 4 (chapitre I). Cette perte de bien-être est d'autant plus problématique qu'elle affecte surtout les ménages à faibles revenus, qui sont les principaux consommateurs des technologies inefficaces retirées du marché (Sutherland, 1996).

Cette critique tend toutefois à être contredite dans la situation plus réaliste où la concurrence sur les marchés de l'efficacité énergétique est imparfaite. Fischer (2005) montre à l'aide d'un modèle d'équilibre partiel que lorsqu'un monopole a la possibilité de segmenter la demande par des prix supérieurs à l'optimum concurrentiel, les consommateurs à faibles revenus n'ont pas accès à toute l'efficacité énergétique pour laquelle ils sont disposés à payer, tandis que les consommateurs à hauts revenus achètent les biens haut de gamme à un prix artificiellement élevé. Imposer un standard permet d'offrir des biens de meilleure efficacité aux consommateurs à bas revenus et de réduire la rente extraite des biens haut de gamme vendus aux consommateurs à hauts revenus.

Du point de vue de l'économie comportementale, les standards de performance sont reconnus pour simplifier la décision d'investissement dans un contexte de rationalité limitée (Sanstad et Howarth, 1994 ; Wilson et Dowlatabadi, 2007, p.176). Sorrell résume l'argument en ces termes :

“Not only may bounded rationality provide an additional barrier to energy efficiency, it may also undermine the effectiveness of certain types of policy interventions. If agents lack the time or capacity to use existing information, there is little point in providing more information. This point is important as it directly contradicts the orthodox argument that intervention should be directed at correcting information market failures, rather than imposing performance standards. In practice, standards may be more effective in some circumstances as they bypass the problem of bounded rationality.” (Sorrell, 2004, p.79 ; les références bibliographiques mentionnées ont été supprimées)

Les réflexions qui portent sur l'efficacité dynamique des réglementations sont partagées dans le cas général des politiques environnementales (Taylor *et al.*, 2005). Certains auteurs soutiennent l'« hypothèse de Porter » (Porter, 1991 ; Porter et van der Linde, 1995), selon laquelle les instruments réglementaires stimulent le changement technologique par la contrainte, formant une « incitation économique négative » (Driesen, 2003). D'autres avancent qu'ils réduisent les choix d'investissement sans encourager à aller au-delà du standard imposé, au contraire des mécanismes de marché plus flexibles (Milliman et Prince, 1989 ; Palmer *et al.*, 1995 ; Jaffe et Palmer, 1997). Cette seconde vision tend à dominer dans le domaine de l'efficacité énergétique, où les réglementations sont considérées comme moins performantes que les incitations financières pour soutenir le progrès technique (Jaffe et Stavins, 1995).

Au niveau empirique, les standards de performance ont été mis en place aux Etats-Unis au niveau fédéral et étatique à partir du milieu des années 1970. Les évaluations *ex post* les plus complètes évaluent le rapport coût-efficacité des standards en 2000 à environ 0,02\$ par kWh économisé (Gillingham *et al.*, 2006, p.183). Sur la période 1987-2050, ils devraient produire des bénéfices nets dans un rapport bénéfice/coût de 2,75 pour 1 (Meyers *et al.*, 2003). Les fabricants ne semblent pas considérer les standards qui leur ont été imposés comme une charge trop importante (McInerney et Anderson, 1997) et les économies d'échelle dans l'industrie de l'efficacité énergétique paraissent plus importantes que ne l'avaient envisagé les autorités (Nadel, 2002).

2.1.2 Information sur l'efficacité et la sobriété énergétiques

Compte tenu de l'importance des problèmes d'information dans le domaine de la maîtrise de l'énergie, les politiques d'information recueillent les faveurs de toutes les sensibilités économiques, y compris celle des traditionnels « sceptiques » (Hausman et Joskow, 1982 ; Sutherland, 1996 ; Howarth *et al.*, 2000 ; Wilson et Dowlatabadi, 2007). Leur intérêt se résume en ces termes :

“Information programs are motivated by the informational problems and behavioral failures noted above. The intention is that, by providing greater and more reliable information, issues of uncertain future returns and asymmetric information may be lessened. Additional information may also lower the cognitive cost of energy decision making or help guide consumers towards better decisions.” (Gillingham *et al.*, 2009, p.612)

Les politiques d'information sur l'efficacité énergétique des produits sont très répandues. Elles correspondent la plupart du temps à des obligations d'attester la qualité des produits vendus, comme c'est le cas pour l'étiquette énergie des équipements et pour le diagnostic de performance énergétique des bâtiments, imposé par l'Union européenne²⁴. Il existe également de nombreuses démarches volontaires, comme le label de performance ENERGY STAR, qui garantit la performance des équipements aux Etats-Unis, principalement dans le secteur tertiaire. L'*Environmental Protection Agency* (EPA), qui promeut ce programme depuis 1992, l'estime particulièrement efficient : il devrait dégager, sur la période 2001-2012, des bénéfices nets de l'ordre 65 milliards de dollars, à un coût très faible (EPA, 2003).

L'information sur l'usage de l'énergie, qui vise la sobriété des comportements, est expérimentée à des échelles beaucoup plus réduites. Une multitude de travaux montrent que l'inclusion d'information personnalisée sur la facture énergétique peut diminuer la consommation d'énergie, particulièrement dans les cas de *feedback with peer comparison*, où la consommation individuelle est comparée à celle de ménages similaires (Abrahamse *et al.*, 2005 ; Darby, 2006 ; Fischer, 2008 ; Ayres *et al.*, 2009). La pression des normes sociales conduit les ménages situés au-dessus de la moyenne à réduire leur consommation ; l'information doit toutefois être suffisamment ciblée pour atténuer l'« effet bommerang », *i.e.* l'augmentation de la consommation des ménages situés en-dessous de la moyenne. Le coût de ces politiques est jugé très faible, puisqu'il se limite pour le fournisseur d'énergie à des frais postaux (Allcott et Mullhainathan, 2010). De même, l'information fournie aux ménages sur la consommation d'énergie des appareils en veille en réduit significativement l'usage (Boardman, 2004).

2.2 Instruments basés sur des incitations financières

2.2.1 Subvention à l'efficacité énergétique

Les subventions en faveur de la maîtrise de l'énergie prennent la plupart du temps la forme de crédits d'impôt sur le revenu pour l'achat de biens efficaces. Hassett et Metcalf (1995) montrent qu'une variation de 10% du taux de crédit d'impôt accroît la rentabilité des investissements dans l'efficacité énergétique de 24%. L'effet d'une telle subvention est trois (Jaffe et Stavins, 1995) à huit fois (Hassett et Metcalf, 1995) plus important que celui d'une taxe équivalente sur l'énergie.

²⁴ Directive 2002/91/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments.

Les subventions sont toutefois sujettes à un effet d'aubaine important. Une étude de cas allemande montre par exemple que la moitié des ménages ayant bénéficié d'une subvention avaient une disposition à payer pour les investissements réalisés supérieure à leur coût (Grösche et Vance, 2009). Ce problème est d'autant plus sensible que les bénéficiaires sont principalement des ménages à haut revenu, comme le montre en France l'évaluation du crédit d'impôt pour les technologies efficaces (INSEE, 2010). L'efficacité des subventions est également amoindrie par l'effet rebond, comme le montrera la partie suivante.

2.2.2 Taxe sur l'énergie et les émissions de CO₂

L'effet des politiques d'augmentation du prix de l'énergie – par des taxes sur l'énergie, sur les émissions de CO₂ ou sur les deux – est généralement déduit d'estimations de l'élasticité-prix de la demande d'énergie. Cette élasticité est significative, comme l'illustrent les niveaux d'efficacité énergétique particulièrement élevés dans les pays scandinaves, où les prix de l'énergie sont parmi les plus hauts (Linares et Labandeira, 2010). De nombreuses études mettent en évidence une réponse asymétrique de la demande d'énergie : l'élasticité est, en valeur absolue, plus élevée dans le cas d'une hausse de prix que dans le cas d'une baisse. Cette observation suggère d'une part que la hausse des prix de l'énergie stimule des investissements irréversibles dans l'efficacité énergétique, d'autre part que l'effet rebond qui suit la baisse du prix est limité (Haas et Schipper, 1998 ; Gately et Huntington, 2002).

Si la taxation paraît efficace pour encourager la maîtrise de l'énergie, elle souffre d'une faible popularité et, potentiellement, d'effets redistributifs. L'instrument présente toutefois l'avantage de générer des recettes fiscales, qui peuvent être en partie utilisées pour réduire les effets redistributifs, dans une logique de « double dividende » (Goulder *et al.*, 1999 ; Gago et Labandeira, 2000 ; Combet *et al.*, 2010).

2.3 Combinaisons d'instruments

Le chapitre I a montré que la justification des combinaisons d'instruments nécessite un examen rigoureux des défaillances et obstacles en présence. En pratique, les combinaisons sont légion dans le domaine de l'environnement (Bennear et Stavins, 2007), et particulièrement dans le domaine de la maîtrise de l'énergie, où les raisons d'intervenir sont multiples. Les instruments se combinent soit par superposition, *i.e.* lorsqu'ils sont mis en présence simultanément sans coordination délibérée, soit par hybridation, *i.e.* lorsqu'un instrument partage les caractéristiques de plusieurs autres instruments.

2.3.1 Cas de superposition

Même en limitant l'analyse aux superpositions entre instruments qui visent en priorité la maîtrise de l'énergie – c'est-à-dire en excluant les interactions potentielles avec les autres politiques environnementales, comme les permis d'émission –, le nombre de cas à étudier s'élève rapidement. Pourtant, l'évaluation des superpositions reste très limitée.

Le résultat le plus fameux est l'efficacité accrue des prix de l'énergie pour l'induction du changement technique en présence de politiques d'information (Newell *et al.*, 1999). Plus récemment, McGilligan *et al.* (2010) mettent en évidence au Royaume-Uni un effet analogue avec les subventions, dont le diagnostic de performance énergétique augmente l'efficacité ; toutefois, cet effet est valide pour certaines techniques d'isolation, mais pas toutes. Une interaction mutuellement bénéfique entre les instruments incitatifs et informatifs semble donc se dégager.

2.3.2 Un cas d'hybridation : les obligations d'économies d'énergie

Les obligations d'économies d'énergie imposées aux opérateurs énergétiques, au sens large, sont le principal instrument « hybride » qui existe dans le domaine de la maîtrise de l'énergie. Il a d'abord été mis en œuvre aux Etats-Unis à partir des années 1980. Dans de nombreux Etats, une politique de *Demand-side management* (DSM) obligeait les monopoles électriques régulés à consacrer des ressources à la gestion de la pointe électrique et à encourager l'investissement des ménages dans l'efficacité énergétique²⁵.

Le caractère hybride de l'instrument ainsi défini n'apparaît pas comme une évidence. Il s'est en fait révélé à la pratique, à mesure que les monopoles électriques diversifiaient leurs stratégies de réponse à l'obligation. Les politiques d'information ont été d'abord privilégiées ; elles ont ensuite été complétées par des subventions aux ménages pour l'achat et l'installation d'équipements efficaces ; des subventions ont enfin été distribuées plus en amont aux fabricants d'équipement pour stimuler la diffusion des technologies (Gillingham *et al.*, 2006).

Les politiques de DSM sont, avec les standards, l'instrument qui a été le plus évalué aux Etats-Unis, et leur déploiement fut le moteur de la recherche académique sur les barrières à l'efficacité énergétique. Leurs performances en termes de coût-efficacité et d'efficience ont fait l'objet de nombreuses évaluations et contre-évaluations, depuis la « passe d'armes » entre Paul Joskow et Amory Lovins dans *The Electricity Journal* en 1994 (Joskow, 1994 ; Lovins, 1994) jusqu'aux débats récents sur la fiabilité des données de coûts et d'économies d'énergie rapportées par les monopoles électriques obligés (Laughran et Kulick, 2004 ; Horowitz, 2004 ; Auffhammer *et al.*, 2008). Malgré l'hétérogénéité des programmes et des méthodes d'évaluation, les politiques de DSM semblent générer des bénéfices sociaux nets, selon un rapport coût-efficacité proche de celui des standards et inférieur au prix de l'énergie (Gillingham *et al.*, 2006, p.183).

Avec la libéralisation progressive des marchés de l'énergie, l'instrument s'est transformé aux Etats-Unis en *Energy Efficiency Resource Standard* (EERS) et a été adapté en Europe sous la forme de « certificats blancs ». Mis en place en Grande-Bretagne en 2002, en Italie en 2005 et en France en 2006, cet instrument repose sur une obligation échangeable d'économies d'énergie imposée aux fournisseurs d'énergie. En contexte libéralisé, un niveau d'hybridation supplémentaire apparaît, puisque l'instrument partage partiellement les propriétés d'une taxe sur l'énergie. Cet effet est modélisé dans la partie suivante puis discuté au chapitre IV, qui porte sur l'évaluation empirique des expériences européennes de certificats blancs.

²⁵ Les programmes de DSM constituaient à l'époque le versant « demande » d'une politique plus générale de gestion intégrée des ressources (*integrated resource planning*), visant à optimiser les systèmes électriques à la fois du côté de l'offre et de la demande. Pour davantage de détail sur les politiques américaines de DSM, voir le début de l'annexe IV.

3 Performance coût-efficacité des principaux instruments en statique comparative²⁶

Après avoir détaillé les propriétés de chaque instrument, la présente partie vise à comparer leurs performances. Cette tâche suppose l'emploi d'un cadre d'analyse simple, qui permette à la fois de reproduire la variété des comportements des agents impliqués et de comparer des instruments aux modes d'action distincts. Le modèle employé ici tente de satisfaire ce double objectif en formalisant le cadre microéconomique d'équilibre statique esquissé au chapitre I (figures 2 et 3). Les trois agents qui animent le système technico-économique présenté en introduction (figure 1) – les ménages, les producteurs d'énergie et les producteurs de biens d'efficacité énergétique – sont décrits par des comportements standards, comme l'illustre la figure 6. L'arbitrage du ménage entre sobriété et efficacité introduit une des principaux obstacles aux économies d'énergie : l'effet rebond.

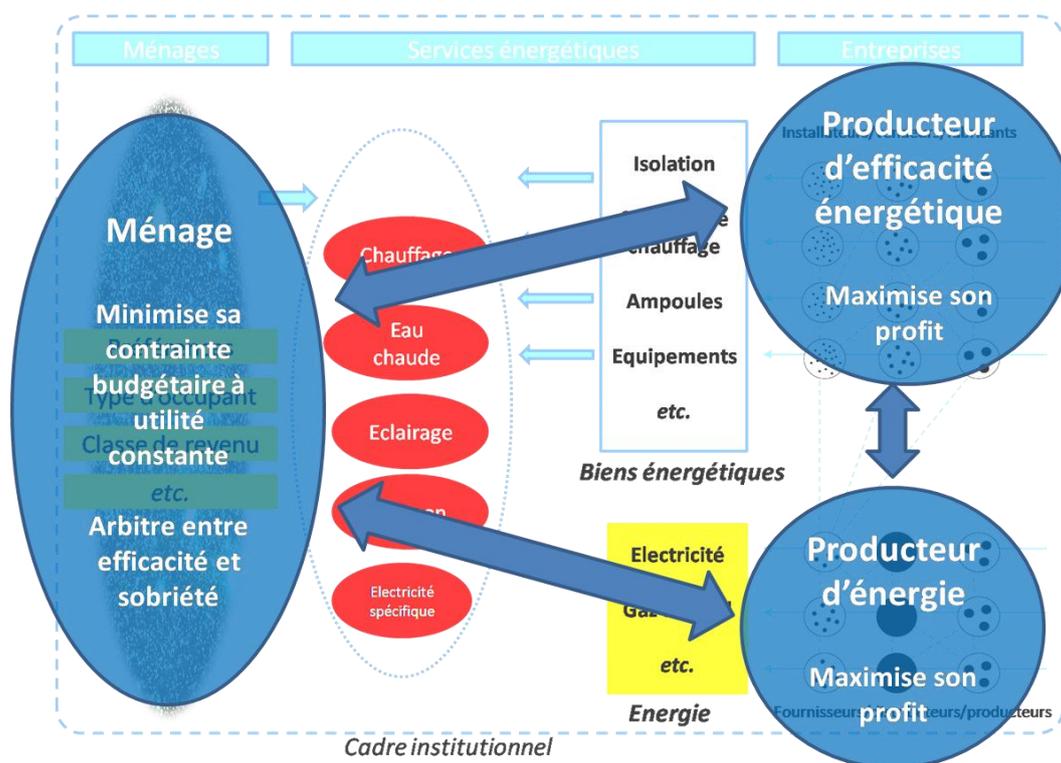


Figure 6: Ciblage du modèle 1 par rapport au système technico-économique du bâtiment résidentiel

L'évaluation porte en priorité sur les instruments dont l'analyse standard est la plus répandue : taxe sur l'énergie, subvention et réglementation sur l'efficacité énergétique ; le modèle propose également une représentation des dispositifs innovants de certificats blancs. Les performances des instruments sont comparées pour un même objectif de réduction de la consommation d'énergie ; le leur classement en termes de coût-efficacité est donc le même qu'en termes d'efficacité. La question de l'acceptabilité, au sens des effets distributifs entre les agents représentés dans le modèle, est également discutée.

²⁶ Le modèle présenté ici, qui s'appuie sur un modèle plus simple conçu par Quirion (2004, 2006), a été développé par nous-mêmes avec Philippe Quirion dans un article publié en anglais dans la *Revue d'économie politique* en décembre 2008. Il a été repris sous une forme synthétique dans un article publié en français avec Dominique Finon et Philippe Quirion dans un ouvrage collectif publié en janvier 2010 (Carassus et Duplessis, eds). La présente section s'appuie sur la version synthétique et privilégie la représentation graphique. La version originale de l'article, qui comprend l'ensemble des équations et des résultats, figure en annexe II.

3.1 Description du modèle en situation de référence

Le modèle d'optimisation en équilibre partiel comprend trois biens, produits par trois producteurs et consommés par un ménage représentatif : l'énergie (e), un bien *green* (g) désignant tout capital générateur d'efficacité énergétique, qu'il soit matériel (par exemple, chaudière à condensation, panneau d'isolation, ampoule basse consommation) ou immatériel (par exemple, formation à la conduite automobile économique), et un troisième bien composite (c) représentant tous les autres biens consommés par le ménage. Les trois biens sont produits avec des rendements décroissants par les trois producteurs qui maximisent leur profit selon le programme générique suivant :

$$\forall i \in e, g, c \quad \text{Max}_i \pi_i$$

$$\text{avec } \pi_i = P_i i - \left(\gamma_i i + \frac{\delta_i}{2} i^2 \right) \quad (\text{P1})$$

Les trois biens sont consommés par le ménage selon un système de demande emboîté à élasticité de substitution constante, qui opère un arbitrage à deux niveaux :

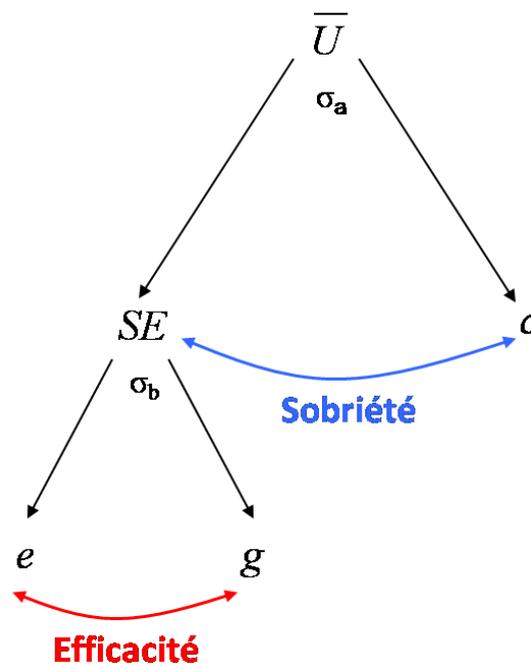


Figure 7: Système de demande du consommateur

Au niveau le plus désagrégé, la consommation des biens e et g permet au ménage d'autoproduire un quatrième bien « virtuel », le service énergétique (SE) : l'usage d'électricité et de lampes permet par exemple de fournir un service d'éclairage, généralement exprimé en énergie utile. La forme fonctionnelle choisie rend les biens e et g partiellement substituables, ce qui signifie qu'un même niveau de service énergétique (un certain niveau d'éclairage) peut être produit par différentes combinaisons de g et e , par exemple peu de g et beaucoup de e dans le cas d'un équipement inefficace (ampoule à incandescence) ou beaucoup de g et peu de e dans le cas d'un équipement efficace (ampoule basse consommation). Ce comportement est représenté par le programme de maximisation suivant :

$$\begin{cases} \text{Min}_{\{e,g\}} P_e e + P_g g \\ \text{s.c. } SE = (\alpha_e e^{\frac{\sigma_b-1}{\sigma_b}} + \alpha_g g^{\frac{\sigma_b-1}{\sigma_b}})^{\frac{\sigma_b}{\sigma_b-1}} \end{cases} \quad (P2)$$

Le service énergétique autoproduit est déterminé par la combinaison de e et g sur l'isoquante (SE) qui minimise le coût sous contrainte budgétaire :

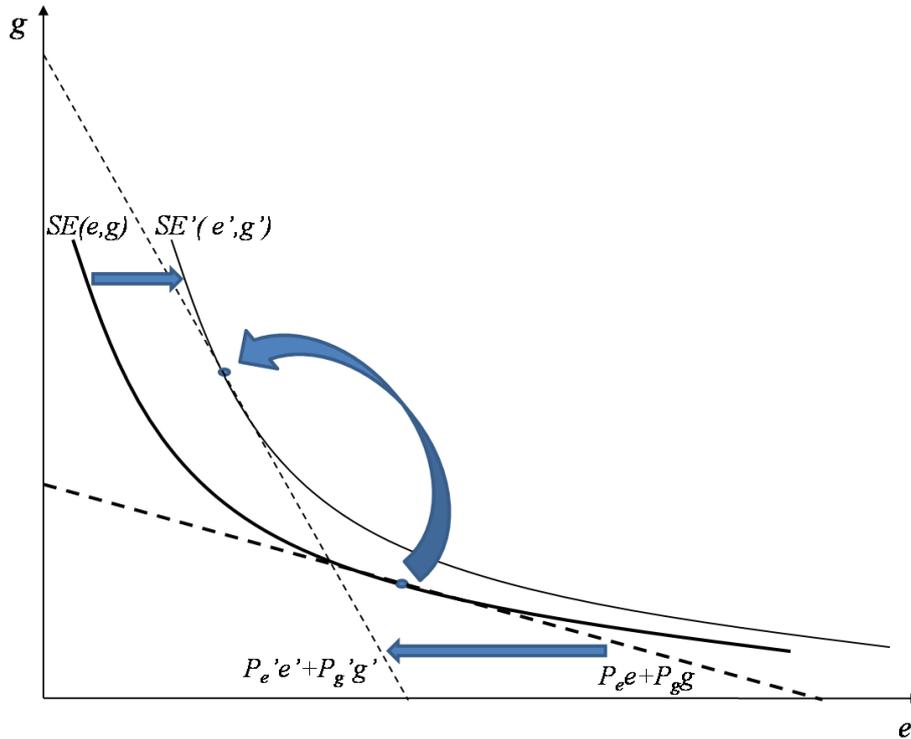


Figure 8: Variation de la demande de service énergétique issue de l'arbitrage entre e et g

Au niveau le plus agrégé, un niveau d'utilité constant est satisfait par la consommation du service énergétique et de tous les autres biens, représentés par le seul bien composite. En fonction des arbitrages qui s'opèrent au niveau le plus désagrégé entre e et g , le prix implicite du service énergétique (dérivé des prix de e et g) varie par rapport au prix du bien composite et un deuxième arbitrage s'opère entre la consommation de ces deux biens substituables, selon un programme de maximisation P3 analogue²⁷ au programme P2 :

$$\begin{cases} \text{Min}_{\{SE,c\}} P_{SE} SE + P_c c \\ \text{s.c. } \bar{U} = (\alpha_{SE} SE^{\frac{\sigma_a-1}{\sigma_a}} + \alpha_c c^{\frac{\sigma_a-1}{\sigma_a}})^{\frac{\sigma_a}{\sigma_a-1}} \end{cases} \quad (P3)$$

Cette représentation endogène du niveau de service énergétique permet de dissocier dans un cadre de rationalité et d'information parfaite les effets d'efficacité énergétique (arbitrage entre e et g) des

²⁷ Ces deux programmes diffèrent néanmoins car dans P3, la contrainte fixe un niveau d'utilité constant tandis que dans P2, le niveau de service énergétique peut être modifié par le premier programme. Cette différence se traduit graphiquement par la mobilité de l'isoquante (e, g) dans P2 (cf. figure 8), alors que l'isoquante (S, c) est immobile dans P3.

effets de sobriété énergétique (arbitrage entre SE et c). Cette distinction permet en particulier d'évaluer l'effet rebond associé à chaque politique, c'est-à-dire l'atténuation des gains d'efficacité énergétique causée par une hausse du service énergétique (cf. chapitre I, figure 3).

Les équations d'offre et de demande qui dérivent de l'équilibre sur les marchés des trois biens, ainsi que le calibrage des paramètres, qui vise à représenter sommairement le secteur résidentiel français, sont détaillées en annexe II. Le scénario de référence suit l'hypothèse d'une substituabilité faible entre c et SE ($\sigma_a = 0,5$) et d'une substituabilité conventionnelle entre e et g ($\sigma_b \approx 1$). Des analyses de sensibilité aux élasticités de substitution sont réalisées par la suite.

3.2 Instruments représentés

La performance coût-efficacité d'un dispositif de certificats blancs avec objectif individuel attribué au producteur d'énergie en fonction de ses ventes (comme c'est généralement le cas) est comparé à celui des instruments usuels de maîtrise de la demande d'énergie²⁸ : une taxe sur la consommation d'énergie finale dont les revenus sont reversés forfaitairement aux ménages ; une subvention aux biens efficaces en énergie financée par un prélèvement forfaitaire au contribuable ; une réglementation imposant un certain niveau d'efficacité énergétique, représenté par un rapport SE/e fixe.

La taxe sur l'énergie réduit l'offre d'énergie de O_e à O_e' (figure 9) ; la subvention aux producteurs de bien g augmente l'offre de g de O_g à O_g' (figure 10) ; la réglementation sur les équipements efficaces en énergie réduit la demande d'énergie de D_e à D_e' (figure 11). Chaque modification de la quantité et du prix d'un des deux biens e et g modifie en retour la consommation et le prix de l'autre bien par déplacement le long de l'isoquante, et la nouvelle contrainte budgétaire définit un niveau final de service énergétique SE' (figure 8).

Les certificats blancs sont représentés de la façon suivante : les fournisseurs d'énergie remplissent un objectif individuel d'économies d'énergie en subventionnant les producteurs de bien g et recouvrent cette contrainte en augmentant leur prix de vente d'énergie. Il s'agit d'un mécanisme hybride entre taxe sur l'énergie et subvention aux équipements efficaces.

Tous les instruments sont comparés pour une même efficacité, c'est-à-dire une réduction de e à e' de 2%, valeur légèrement supérieure aux objectifs quantitatifs d'économies d'énergie associés à ces politiques. La variable de décision qui permet à chaque instrument (taux de taxe, montant de l'obligation de certificats blancs, montant de la subvention, taux de réglementation) d'atteindre cette cible est déterminée de façon endogène. Le surcoût de chaque instrument par rapport au coût de la situation de référence est calculé comme la dépense des ménages en bien e , g et c moins le profit des trois producteurs, dont sont déduits les éventuels transferts.

²⁸ Les équations sont détaillées en annexe II. Deux instruments supplémentaires y sont également représentés : une taxe sur la consommation d'énergie finale reversée forfaitairement aux fournisseurs d'énergie et un dispositif de certificats blancs dont l'objectif est réparti de façon absolue, sans critère particulier de vente. Les résultats du premier sont très proches de ceux de la taxe reversée aux ménages et ceux du second sont très proches de la subvention.

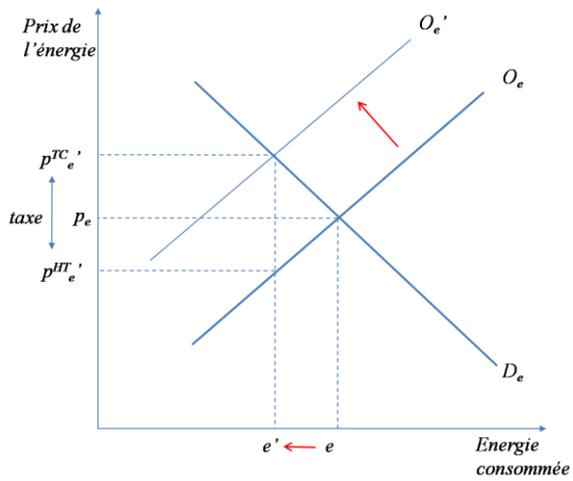


Figure 9: Effet de la taxe sur l'offre d'énergie

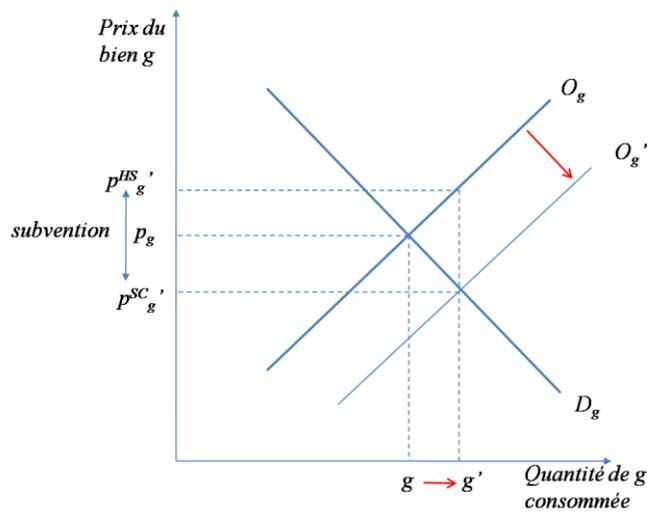


Figure 10: Effet de la subvention sur l'offre de bien g

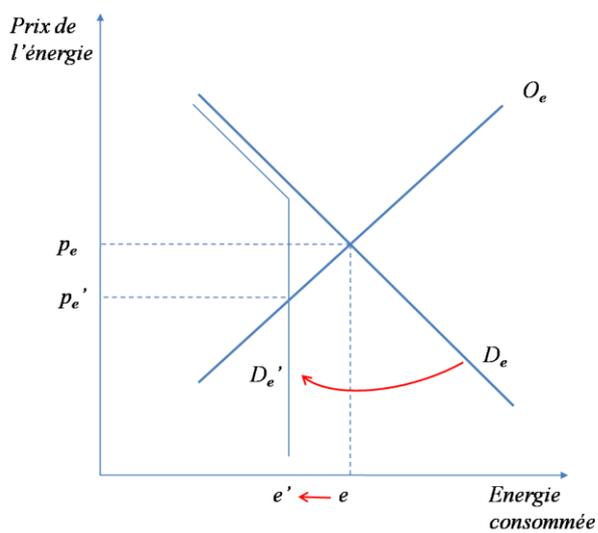


Figure 11: Effet de la réglementation sur la demande d'énergie

3.3 Principaux résultats

Dès le moment où le niveau de service énergétique varie de façon endogène ($\sigma_a > 0$) et à mesure qu'augmentent les possibilités de substitution de SE et c , les différences de coût entre instruments s'accroissent :

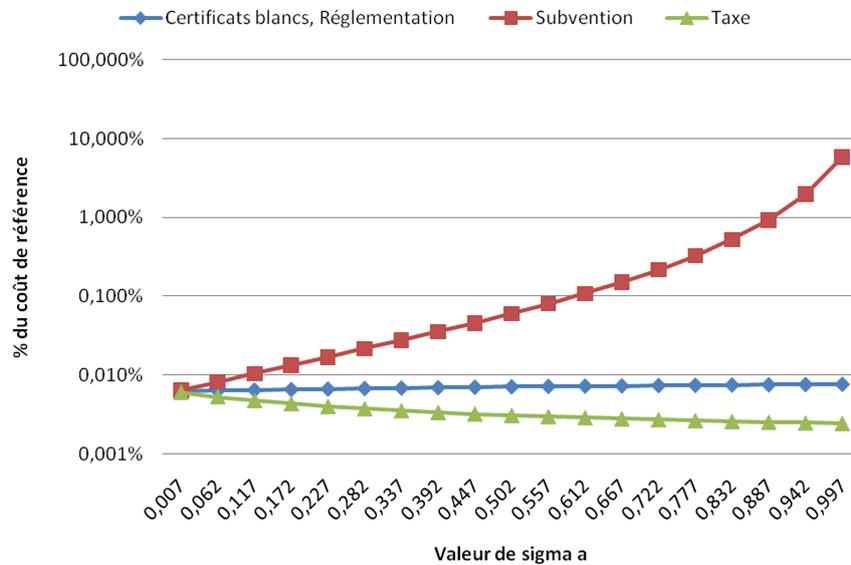


Figure 12: Sensibilité du coût à l'élasticité de substitution entre SE et c , pour une diminution de e de 2% (ordonnée logarithmique)

En particulier, le coût de la taxe décroît, le coût de la réglementation et des certificats blancs augmente légèrement et le coût de la subvention augmente fortement. La valeur de σ_b , i.e. l'ampleur des possibilités de substitution entre e et g , ne modifie pas ce classement :

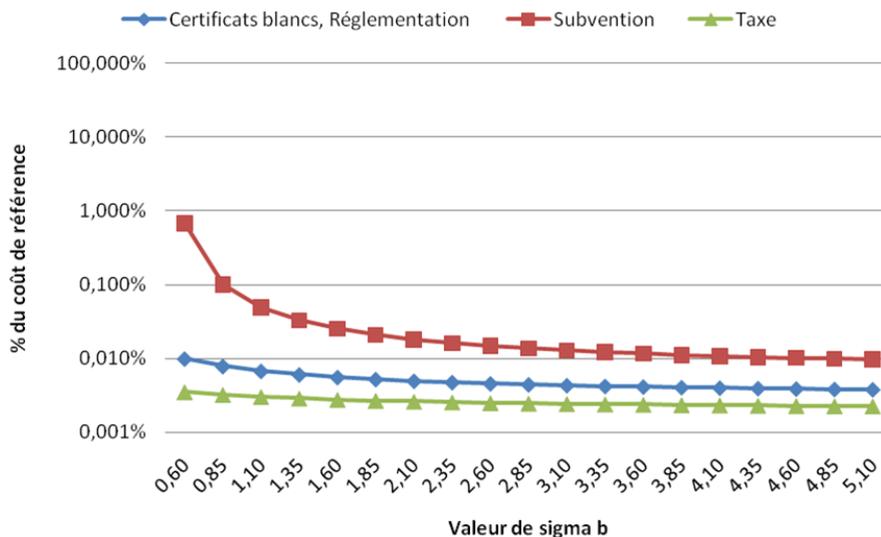


Figure 13: Sensibilité du coût à l'élasticité de substitution entre e et g , pour une diminution de e de 2% (ordonnée logarithmique)

D'après la figure 7, deux possibilités s'offrent au ménage pour réduire sa consommation d'énergie : substituer g à e ou réduire SE au profit de c . La figure suivante montre que la consommation de bien g augmente fortement avec la subvention, très peu avec la taxe et à niveau intermédiaire équivalent pour la réglementation et les certificats blancs :

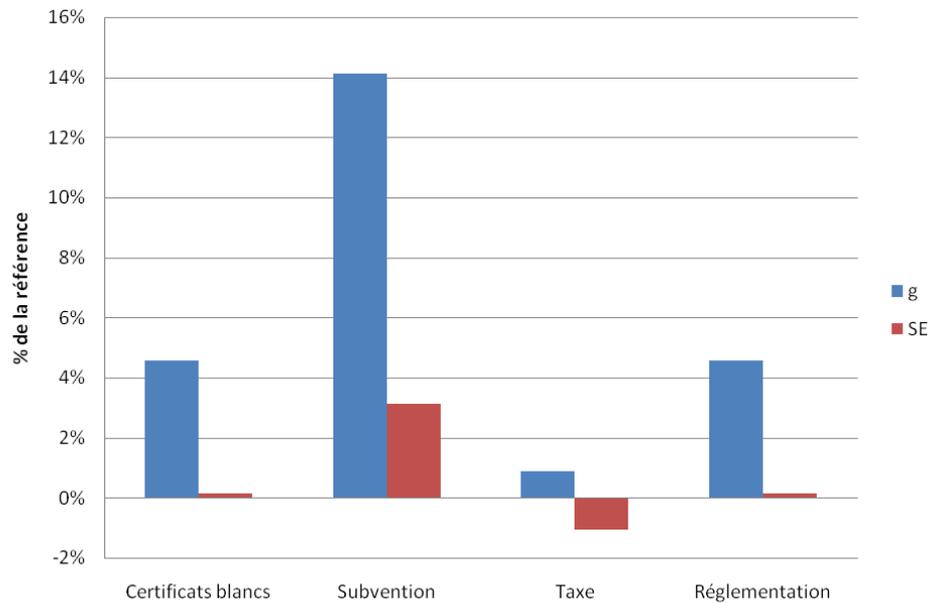


Figure 14: Effet sur les quantités d'une diminution de e de 2% ($\sigma_a = 0,5$ et $\sigma_b = 1$)

Ces augmentations de différentes ampleurs de la consommation de bien g , combinées à une même réduction de la consommation du bien e pour chaque instrument, aboutissent à des effets contrastés sur le niveau de service énergétique, qui croît fortement avec la subvention, diminue avec la taxe et augmente légèrement avec les certificats blancs et la réglementation. Ainsi, les taxes permettent d'atteindre la même cible d'économies d'énergie que les autres instruments pour un niveau moindre d'investissement dans l'efficacité énergétique (g) car elles diminuent le niveau de service énergétique. Au contraire avec la subvention, une forte quantité de bien g est nécessaire pour compenser la hausse du service énergétique. Les certificats blancs ont une position intermédiaire entre ces deux instruments, dont ils empruntent partiellement les modes d'action. La hausse de SE observée dans tous les cas sauf la taxe correspond à un effet rebond, qui est à l'origine des différences de coût entre instruments. Son ampleur dépend de σ_a , *i.e.* des possibilités de substitution entre c et SE , qui varient dans la réalité en fonction des types d'équipements considérés. Par exemple, l'usage d'un réfrigérateur génère moins d'effet rebond que l'usage d'un système de chauffage (Greening *et al.*, 2000).

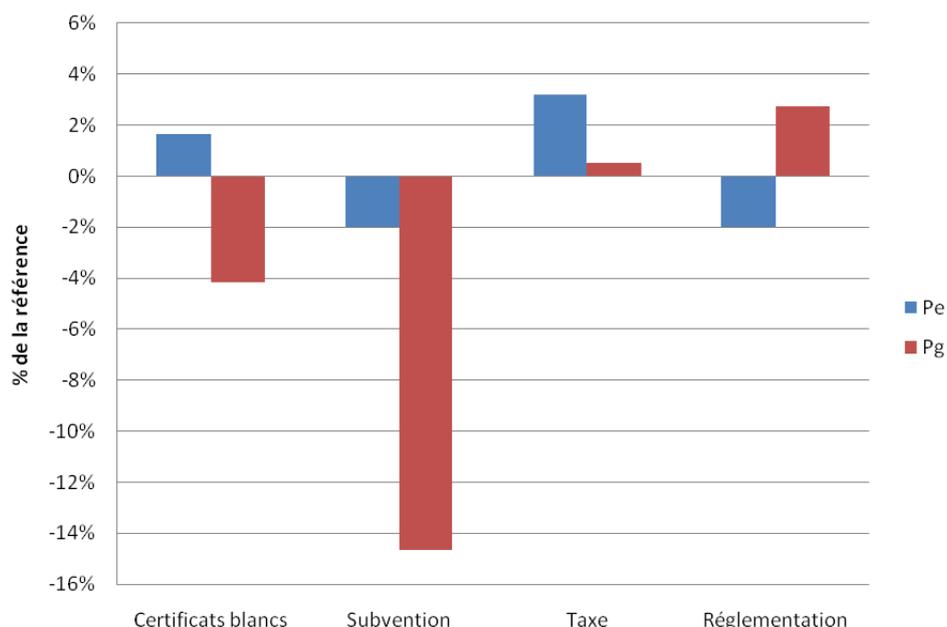


Figure 15: Effet sur les prix d'une diminution de e de 2% ($\sigma = 0,5$ et $\sigma_b = 1$)

Les prix des biens exposés à la figure 15 suivent également une évolution contrastée. Le prix P_e du bien e a naturellement tendance à décroître à mesure que la consommation d'énergie diminue, la courbe d'offre étant croissante. Cependant, avec les certificats blancs et encore davantage avec la taxe, cet effet est plus que compensé par l'augmentation de prix nécessaire aux producteurs pour couvrir le coût de l'instrument, reflétée par exemple par l'écart entre le prix hors taxe P_e^{HT} , et le prix taxe comprise P_e^{TC} , (figure 9). Étant donnée la courbe d'offre croissante, le prix P_g du bien g a naturellement tendance à croître en réponse à l'accroissement de demande induit dans chaque cas, mais avec les certificats blancs et encore plus avec la subvention, cet effet est contrebalancé par la subvention plus ou moins importante à l'offre de g .

3.4 Synthèse et limites du modèle

Le modèle offre une représentation stylisée du système économique délimité en introduction (figure 1) et illustre la notion de « service énergétique », présenté au chapitre I comme un arbitrage entre une consommation d'énergie et une consommation de biens efficaces en énergie. Souvent commenté à l'aide de représentations graphiques simples (Gillingham *et al.*, 2009, p.600 ; Sorrell *et al.*, 2009 ; Oikonomou *et al.*, 2009), le service énergétique est plus rarement analysé de façon quantitative. Le présent modèle se distingue en le déterminant de façon endogène, permettant ainsi d'évaluer l'effet rebond.

Le modèle est utilisé pour classer les instruments selon le critère de coût-efficacité, estimé comme le coût direct agrégé qu'ils imposent à l'ensemble des acteurs pour atteindre une même cible d'économies d'énergie. La taxe apparaît comme l'instrument le plus avantageux (*i.e.* au rapport coût-efficacité le plus faible) et la subvention comme le moins avantageux (*i.e.* au rapport coût-efficacité le plus élevé); les certificats blancs et la réglementation se situent à un niveau intermédiaire équivalent. Ces différences de coût pour un même niveau d'efficacité sont imputables à l'effet rebond. Les effets des instruments sur les prix complètent l'analyse par des considérations de

redistribution et d'acceptabilité. La taxe, qui augmente tous les prix rendus aux consommateurs²⁹, paraît difficile à mettre en œuvre politiquement. La subvention diminue tous les prix, mais l'effet rebond qu'elle génère aboutit à des coûts élevés également difficiles à justifier. Entre ces deux instruments, les certificats blancs ont des effets opposés sur les prix, mais toujours plus modérés que dans les cas précédents, ce qui peut faciliter leur mise en œuvre.

Ces conclusions sont à relativiser, dans la mesure où le modèle ne prend que très partiellement en compte l'étendue des problèmes propres à la maîtrise de la demande d'énergie introduits au chapitre I. Le cadre standard utilisé ne permet pas d'envisager des situations d'information et de rationalité imparfaites, ni des phénomènes dynamiques comme l'apprentissage technologique. Les politiques d'information, qui sont immédiatement prescrites par l'analyse des défaillances de marché, ne sont pas modélisées. Le modèle établit néanmoins les propriétés élémentaires des instruments de maîtrise de l'énergie les plus classiques, et apporte un premier éclairage sur les certificats blancs, qui semblent un bon compromis entre la minimisation des coûts économiques et l'acceptabilité politique.

4 Conclusion

De cette première évaluation comparative des instruments de maîtrise de l'énergie se dégagent les propriétés économiques suivantes :

- Les instruments réglementaires comme les standards et les codes de construction paraissent assez efficaces du point de vue de l'efficacité énergétique ; ils soulèvent cependant des questions d'équité.
- Les subventions paraissent efficaces du point de vue de l'efficacité énergétique, mais soulèvent de multiples problèmes : effet rebond, effet d'aubaine, effets distributifs.
- Les taxes ne sont pas l'instrument le plus efficace du strict point de vue de l'efficacité énergétique ; cette relative faiblesse est toutefois compensée par un effet singulier sur la sobriété énergétique.

En raison du caractère parcellaire des données et de l'hétérogénéité des méthodes employées, la comparaison empirique des instruments se réduit au critère physique d'efficacité. Le rapport coût-efficacité et l'efficacité économique ne sont pas systématiquement estimés. L'analyse des effets d'équité est extrêmement rare, alors que le problème affecte tous les instruments, hormis peut-être l'information. Enfin, le recul est encore insuffisant pour évaluer l'efficacité dynamique sur le long terme.

Outre ces insuffisances portant sur l'évaluation de la performance globale des instruments, leur mode d'action reste largement inconnu. A cet égard, le modèle de la troisième partie propose une avancée en distinguant les impacts sur l'efficacité et la sobriété énergétique. Toutefois, par construction, il ne permet pas d'analyser l'effet des instruments sur les nombreuses autres barrières aux économies d'énergie, qu'il s'agisse de simples obstacles, de défaillances de marché ou de défaillances de comportement.

²⁹ C'est d'ailleurs ce qui en fait un instrument si efficace : la hausse conjointe des prix génère une hausse du prix implicite du service énergétique et donc une réduction de la demande de service énergétique, tandis que le contraire se produit avec la subvention.

Enfin, il faut souligner que l'information est un objet difficilement quantifiable en termes physique ou monétaire. Même s'il est visiblement l'instrument le plus approprié du point de vue de la justification et de l'efficacité économique, ni la modélisation ni l'évaluation empirique ne peuvent l'appréhender de façon satisfaisante.

Bibliographie

- Abrahamse, W., L. Steg, C. Vlek, T. Rothengatter, 2005, "A review of intervention studies aimed at household energy conservation", *Journal of Environmental Psychology*, 25(3):273–291
- AIE [Agence internationale de l'énergie] et AFD [Agence française pour le développement], 2008, *Promoting energy efficiency investments. Case studies in the residential sector*, Paris
- Allcott, H., S. Mullainathan, 2010, "Behavior and energy policy", *Science*, Vol. 327, n°5970, pp. 1204-1205.
Version longue:
<<http://web.mit.edu/allcott/www/Allcott%20and%20Mullainathan%202010%20-%20Behavioral%20Science%20and%20Energy%20Policy.pdf>>
- Auffhammer, M., C. Blumstein, M. Fowlie, 2008, "Demand-side management and energy efficiency revisited", *The Energy Journal*, 29(3):91-104
- Ayres, I., S. Raseman, A. Shih, 2009, "Evidence from two large field experiments that peer comparison feedback can reduce residential energy usage", *NBER Working Paper*, No. 15386
- Baumol, W.J., W. E. Oates, 1971, "The use of standards and prices for protection of the environment", *The Swedish Journal of Economics*, 73(1):42-54
- Bennear, L.S., R.N. Stavins, 2007, "Second-best theory and the use of multiple policy instruments", *Environmental and Resource Economics*, 37(1):111-129
- Blumstein, C., J. Harris, 1993, "The cost of energy efficiency", *Science*, New Series, Vol. 261, n° 5124, p. 970
- Boardman, B., 2004, "New directions for household energy efficiency: evidence from the UK", *Energy Policy*, 32(17):1921-1933
- Boonekamp, P.G.M., 2006, "Evaluation of methods used to determine realized energy savings", *Energy Policy*, 34(18):3977-3992
- Combet, E., F. Gherzi, J.-C. Hourcade, C. Thubin, 2010, "La fiscalité carbone au risque des enjeux d'équité", *Revue française d'économie*, 25(2):59-91
- Darby, S., 2006, *The effectiveness of feedback on energy consumption: A review for DEFRA of the literature on metering, billing and direct displays*, Environmental Change Institute, University of Oxford
- Driesen, D.M., 2003, *The Economic Dynamics of Environmental Law*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- EPA [U.S. Environmental Protection Agency], 2003, *ENERGY STAR: The power to protect the environment through energy efficiency*, EPA 430-R03-008
- Eto, J., E. Vine, L. Shown, R. Sonnenblick, C. Payne, 1996, "The total cost and measured performance of utility-sponsored energy efficiency programs", *The Energy Journal*, 17(1): 31-51
- Finon, D., P. Menanteau, 2008, "The static and dynamic efficiency of instruments of promotion of renewable", *Energy Studies Review*, 12(1), Article 3
- Fischer, C., 2005, "On the importance of the supply side in demand-side management", *Energy Economics*, 27:165-180
- Fischer, C., 2008, "Feedback on household electricity consumption: a tool for saving energy?", *Energy Efficiency*, 1(1):79-104

- Gago, A., X. Labandeira, 2000, "Towards a green tax reform model", *Journal of Environmental Policy and Planning*, 2:25-37
- Gately, D., H.G. Huntington, 2002, "The asymmetric effects of changes in price and income on energy and oil demand", *The Energy Journal*, 23(1):19-55
- Gillingham, K., R. Newell, K. Palmer, 2006, "Energy Efficiency policies: a retrospective examination", *Annual Review of Environment and Resources*, 31:161-192
- Gillingham, K., R. Newell, K. Palmer, 2009, "Energy Efficiency economics and policy", *Annual Review of Resource Economics*, 1:597-619
- Glachant, M., 2008, « L'effet du lobbying sur les instruments de la politique environnementale », *Revue d'économie politique*, 118(5):663-682
- Goulder, L.H., I.W.H. Parry, R.C. Williams III, D. Burtraw, 1999, "The cost-effectiveness of alternative instruments for environmental protection in a second-best setting", *Journal of Public Economics*, 72(3):329-360
- Goulder, L.H., 2007, "Benefit-cost analysis, individual differences, and third parties", *Research in Law and Economics*, 23:67-86
- Goulder L. H., I.W.H. Parry, 2008, "Instrument choice in environmental policy", *Review of Environmental Economics and Policy*, 2(2):152-174
- Grösche, P., C. Vance, 2009, "Willingness to Pay for Energy Conservation and Free-Ridership on Subsidization: Evidence from Germany", *The Energy Journal*, 30(2):135-154
- Haas, R., L. Schipper, 1998, "Residential energy demand in OECD-countries and the role of irreversible efficiency improvements", *Energy Economics*, 20(4): 421-442
- Hahn, R.W., R.N. Stavins, 1992, "Economic incentives for environmental protection: integrating theory and practice", *The American Economic Review*, Papers and Proceedings of the Hundred and Fourth Annual Meeting of the American Economic Association, 82(2):464-468
- Hassett, K.A., G.E. Metcalf, 1995, "Energy tax credits and residential conservation investment: Evidence from panel data", *Journal of Public Economics*, 57(2):201-217
- Hausman, J.A., 1979, "Individual discount rates and the purchase and utilization of energy-using durables", *The Bell Journal of Economics*, 10(1):33-54
- Hepburn, C., 2006, "Regulation by prices, quantities or both: a review of instrument choice", *Oxford Review of Economic Policy*, 22(2):226-247
- Horowitz, M., 2004, "Electricity intensity in the commercial sector: market and public program effects", *The Energy Journal*, 225(2):115-138
- Huntington, H.G., L. Schipper, A.H. Sanstad, 1994, "Editor's introduction", *Energy Policy*, 22(10):795-797
- INSEE [Institut national de la statistique et des études économiques], 2007, Tableau entrées-sorties 2004 niveau 118 base 2000
- Jaffe, A.B., R.N. Stavins, 1995, "Dynamic incentives of environmental regulations: the effects of alternative policy instruments on technology diffusion", *Journal of Environmental Economics and Management*, 29(3):S43-S63
- Jaffe, A.B., K. Palmer, 1997, "Environmental regulation and innovation: a panel data study", *The Review of Economics and Statistics*, 79(4):610-619

- Joskow, P.L., D.B. Marron, 1992, "What does a negawatt really cost? Evidence from utility conservation programs", *The Energy Journal*, 13(4):41-74
- Joskow, P.L., 1994, "More from the guru of energy efficiency: 'There must be a pony!'", *The Electricity Journal*, 7(4):50-61
- Keohane, N.O., R.L. Revesz, R.N. Stavins, 1998, "The Choice of Regulatory Instruments in Environmental Policy", *Harvard Environmental Law Review*, 22:313-367
- Laughran, D.S., J. Kulick, 2004, "Demand-side management and energy efficiency in the United States", *The Energy Journal*, 25(1):19-43
- Lees, E., 2008, *Evaluation of the Energy Efficiency Commitment 2005-08*, Report to DECC
- Linares, P., X. Labandeira, 2010, "Energy efficiency: Economics and policy", *Journal of Economic Surveys*, 24(3):573-592
- Lovins, A.B., 1994, "Apples, oranges and horned toads: Is the Joskow & Marron critique of electric efficiency costs valid?", *The Electricity Journal*, 7(4):29-49
- Meyers, S., J.E. McMahon, M. McNeil, X. Liu, 2003, "Impacts of US federal energy efficiency standards for residential appliances", *Energy*, 28(8):755-767
- McGilligan, C., M. Sunikka-Blank, S. Natarajan, 2010, "Subsidy as an agent to enhance the effectiveness of the energy performance certificate", *Energy Policy*, 38(3):1272-1287
- McInerney, E.J., V. Anderson, 1997, "Appliance manufacturers' perspective on energy standards", *Energy and Buildings*, 26(1):17-21
- Milliman, S.R., R. Prince, 1989, "Firm incentives to promote technological change in pollution control", *Journal of Environmental Economics and Management*, 17(3):247-265
- Nadel, S., 2002, "Appliance and equipment efficiency standards", *Annual Review of Energy and Environment*, 27:159-192
- Nelson, R.N., S.G. Winter, 2002, "Evolutionary theorizing in economics", *The Journal of Economic Perspectives*, 16(2):23-46
- Newell, R.G., A.B. Jaffe, R.N. Stavins, 1999, "The induced innovation hypothesis and energy-saving technological change", *The Quarterly Journal of Economics*, 114(3):941-975
- Oikonomou, V., F. Becchis, L. Steg, D. Russolillo, 2009, "Energy saving and energy efficiency concepts for policy making", *Energy Policy*, 37(11):4787-4796
- Palmer, K., W.E. Oates, P.R. Portney, 1995, "Tightening environmental standards: The benefit-cost or the no-cost Paradigm?", *The Journal of Economic Perspectives*, 9(4):119-132
- Porter, M.E., 1991, "America's green strategy", *Scientific American*, 264(4):96
- Porter, M.E., C. van der Linde, 1995, "Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship", *The Journal of Economic Perspectives*, 9(4):97-118
- 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
- Quirion, P., 2006, "Distributional impacts of energy-efficiency certificates vs. taxes and standards", *FEEM working paper*, 18.2006

- Sanstad, A.H., R.B. Howarth, 1994, "'Normal' markets, market imperfections and energy efficiency", *Energy Policy*, 22(10):811-818
- Sorrell, S., 2004, "Understanding barriers to energy efficiency", pp.25-93 in Sorrell S., E. O'Malley, J. Schleich, S. Scott (eds), *The economics of energy efficiency: barriers to cost-effective investment*, Cheltenham: Edward Elgar
- Sorrell, S., D. Harrison, D. Radov, P. Klevnas, A. Foss, 2009, "White certificate schemes: Economic analysis and interactions with the EU ETS", *Energy Policy*, 37(1):29-42
- Sutherland, R.J., 1996, "The economics of energy conservation policy", *Energy Policy*, 24(4):361-370
- Taylor, M.R., E.S. Rubin, D.A. Hounshell, 2005, "Regulation as the mother of innovation: the case of SO2 control", *Law and Policy*, 27(2):348-378
- Thomas, S., 2009, "Measuring and reporting energy savings for the European Services Directive – how it can be done", *Results and recommendations from the EMEES project*, Wuppertal Institute on behalf of the EMEES Consortium, Wuppertal
- Wilson, C., H. Dowlatabadi, 2007, "Models of decision making and residential energy use", *Annual Review of Environment and Resources*, 32:169-203

Chapitre III : Evaluation prospective des instruments de maîtrise de l'énergie par la modélisation hybride³⁰

³⁰ Ce chapitre reprend la quasi-intégralité d'un rapport réalisé pour le Commissariat général au développement durable (CGDD). Il a donné lieu à deux articles en anglais soumis à des revues à comité de lecture. Le premier, soumis à *Energy Economics*, est résumé ici et restitué en intégralité en annexe III. Le second, qui doit être publié prochainement dans *The Energy Journal* (numéro spécial sur l'efficacité énergétique, issu des travaux de EMF25), est ici pleinement restitué.

Le deuxième chapitre a fourni, à partir d'une modélisation microéconomique, des résultats d'évaluation statique de la performance coût-efficacité des instruments de maîtrise de l'énergie. Cette analyse a mis en lumière la nécessité d'accroître la complexité des outils d'évaluation pour expliciter les mécanismes par lesquels les instruments « surmontent » les barrières exposées au premier chapitre. A cet enjeu théorique s'ajoute un enjeu d'aide à la décision, puisque la définition d'objectifs quantifiés d'économies d'énergie par les pouvoirs publics crée des besoins de prospective de long terme, assise sur des données détaillées plutôt que sur des représentations sectorielles stylisées.

La modélisation prospective « hybride » offre un cadre méthodologique dynamique qui rend possible un tel approfondissement. Elle est apparue il y a une dizaine d'années en réponse aux insuffisances des méthodes de modélisation conventionnelles, polarisées par les visions d'ingénieurs et d'économistes : les modèles *bottom-up*, développés par les premiers, privilégient une description explicite des technologies, au prix d'un éloignement des représentations de la théorie microéconomique et surtout des représentations des modèles d'équilibre général ; les modèles *top-down*, développés par les seconds, se caractérisent par l'emploi de fonctions de production, abstraction mathématique commode pour représenter des équilibres sectoriels et macroéconomiques, qui toutefois ne garantit pas la reproduction des quantités physiques (Finon, 2004 ; Hourcade *et al.*, 2006). Ce clivage tend à s'amenuiser avec l'émergence polymorphe des modèles hybrides, qui dans leur ensemble peuvent être définis ainsi :

“Those bottom-up or top-down energy-environment models that have made at least one modification that shifts them substantially away from their conventional placement [along the three dimensions of technological explicitness, microeconomic realism and macroeconomic completeness].” (Hourcade et al., 2006, p.5)

Ce troisième chapitre présente une architecture de modélisation hybride de la consommation d'énergie pour le chauffage des logements, qui couvre 20% de la consommation finale française (ADEME, 2008). Le modèle vise à : (i) représenter les principales *barrières* aux économies d'énergie ; (ii) faire le lien entre les barrières et le mode d'action des instruments, c'est-à-dire préciser les mécanismes par lesquels les instruments corrigent les *défaillances*, compte tenu des *obstacles* environnants ; (iii) évaluer l'efficacité des instruments et de leurs combinaisons au regard d'objectifs quantifiés définis par les pouvoirs publics, dans une perspective dynamique. Selon la démarche d'exploration du système technico-économique du bâtiment résidentiel suivie par cette thèse (*cf.* Introduction, figure 1), le présent exercice s'attache à approfondir la description de la demande (figure 16).

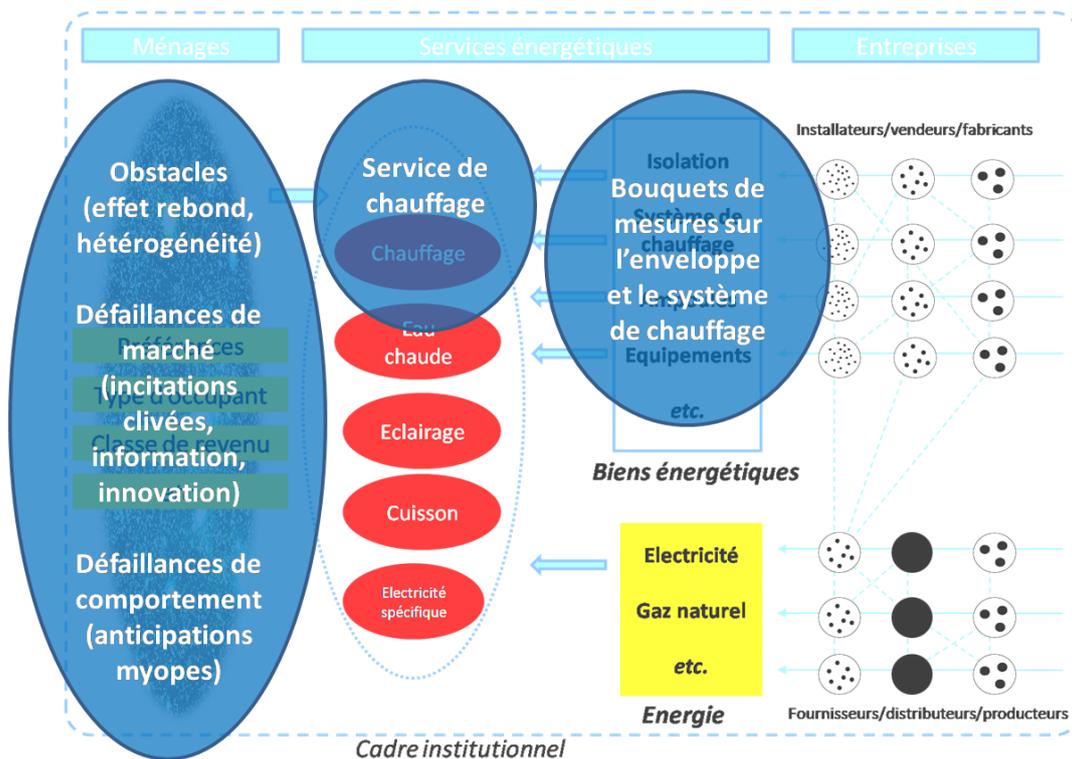


Figure 16: Ciblage du modèle 2 par rapport au système technico-économique du bâtiment résidentiel

L'analyse prend la politique française de maîtrise de l'énergie définie dans le cadre du Grenelle de l'environnement – dont les grandes lignes sont rappelée en annexe I – comme objet d'étude. La première partie résume les caractéristiques de l'architecture de modélisation ; les équations, données empiriques et analyses de sensibilité sont détaillées à l'annexe III. La deuxième partie compare l'efficacité des différents instruments simulés séparément. La troisième partie compare l'efficacité des combinaisons d'instruments les plus probables, et commente les interactions qui peuvent se produire. La quatrième partie discute ces résultats et l'apport potentiel d'autres mesures.

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

Le travail présenté ici s'inscrit dans le projet de recherche sur la modélisation hybride développé au Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED) autour du modèle IMACLIM-R³¹. Cet outil est construit dans le but d'étudier les mécanismes économiques de « second rang » et l'articulation des phénomènes de long-terme et de court-terme, enjeux majeurs des politiques climatiques. Il repose sur le couplage récursif d'un modèle d'équilibre général original, autorisant certains déséquilibres comme la rigidité des marchés du travail et l'utilisation incomplète des facteurs de production, à des modules proposant la description la plus explicite possible des technologies et des comportements microéconomiques propres aux différents secteurs de l'économie. Les modules sectoriels sont construits avec des fonctions explicites plutôt que des fonctions de production au faible réalisme physique, et la forme récursive du couplage représente le

³¹ Les thèses de doctorat de Renaud Crassous (2008), Olivier Sassi (2008) et Céline Guivarch (2010) proposent une présentation exhaustive de l'outil IMACLIM-R.

long terme comme une succession d'équilibres de court terme (Crassous *et al.*, 2006 ; Sassi *et al.*, 2010).

La contribution du travail présenté ici à ce projet de recherche fut de complexifier le module représentant le secteur du bâtiment résidentiel, à partir de la forme extrêmement réduite qui préexistait (Sassi *et al.*, 2010, p.19). Cette première partie précise d'abord la place du module, dénommé Res-IRF (*module résidentiel d'IMACLIM-R, adapté à la France*), dans l'architecture générale de modélisation ; elle résume ensuite les dynamiques économiques et technologiques qu'il incorpore ; elle commente enfin le scénario de référence et les résultats élémentaires d'analyse de sensibilité. Tous ces éléments sont repris en détail à l'annexe III.

1.1 Une architecture de modélisation hybride à deux niveaux

1.1.1 Res-IRF, un module bottom-up au développement microéconomique avancé

La modélisation du secteur du bâtiment est largement dominée par les techniques *bottom-up* ; les modèles *top-down* – dont le modèle d'équilibre partiel exposé au chapitre II peut être vu comme une forme élémentaire – et hybrides restent rares. Cet état de fait a permis d'identifier le secteur du bâtiment comme le principal gisement d'économies d'énergie et de réduction des émissions de CO₂ au niveau mondial (Levine *et al.*, 2007 ; Ürge-Vorsatz et Novikova, 2008). Cependant, il ne permet pas d'aller plus avant dans l'évaluation des moyens à mettre en œuvre pour exploiter ce gisement. La description des comportements économiques se résume pour l'essentiel à de simples formules de calcul économique, dans lesquelles les barrières à l'investissement dans l'efficacité énergétique sont au mieux introduites sous la forme d'un taux d'actualisation élevé (*cf.* chapitre I), et les variations individuelles d'utilisation des technologies sont la plupart du temps ignorés.

Le module Res-IRF s'appuie sur une description détaillée de la performance énergétique du parc de logements français. En ce sens, il est *bottom-up* ; il se distingue toutefois de cette famille de modèles en intégrant des éléments économiques qui leur font généralement défaut :

- Les comportements de sobriété énergétique sont nettement séparés des décisions portant sur l'efficacité énergétique du logement. Cette distinction, qui s'appuie ici sur des travaux empiriques d'EDF R&D, permet de quantifier 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 clivées entre propriétaires et locataires. L'information imparfaite sur les différentes options d'efficacité prend la forme de « coûts intangibles » qui décroissent dans le temps par effet d'imitation.
- La représentation agrégée des technologies 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 rénovation, déterminée de façon endogène.

D'après la définition introduite plus haut, Res-IRF peut être qualifié d'hybride au sens de « modèle *bottom-up* enrichi sur le plan microéconomique ». A ce titre, il se rapproche du modèle CIMS (*Canadian Integrated Modeling System*), développé à l'Université Simon Fraser de Vancouver au Canada (Jaccard et Dennis, 2006).

1.1.2 Bouclage macroéconomique avec le modèle d'équilibre général IMACLIM-R

Le module 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 couplé de façon récursive au modèle d'équilibre général IMACLIM-R adapté à l'économie française, représentée comme une petite économie ouverte. Conformément à la définition d'introduction, ce couplage constitue un deuxième niveau d'hybridation.

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 $n+1$. 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.

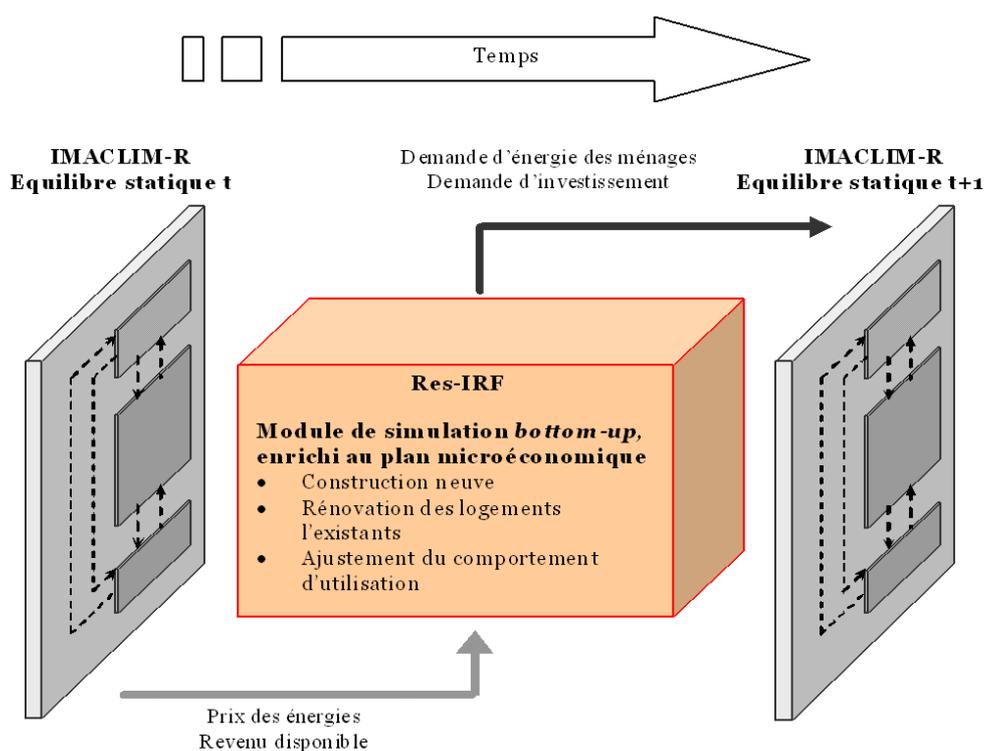


Figure 17: Bouclage récursif du module Res-IRF avec le modèle IMACLIM-R

L'architecture globale peut donc être considérée comme « hybride » à deux niveaux : (i) Res-IRF est un modèle *bottom-up* enrichi sur le plan microéconomique ; (ii) son couplage à IMACLIM-R France assure une certaine cohérence macroéconomique. Toutefois, le bouclage reste « faible », au sens où la rétroaction du module Res-IRF sur l'équilibre général porte uniquement sur les marchés de l'énergie et l'investissement des ménages. A l'avenir, il devrait être renforcé par une description

explicite du secteur de production des biens d'usage efficace de l'énergie, permettant ainsi d'évaluer l'effet des politiques de maîtrise de l'énergie sur la croissance et l'emploi industriel.

1.2 Vue d'ensemble du module Res-IRF

En France, le secteur du bâtiment concentre 43% de la consommation d'énergie finale et 23% des émissions de CO₂ en 2007. Les logements représentent deux tiers de ces consommations, qu'ils consacrent pour deux tiers à l'usage de chauffage. Res-IRF couvre les consommations d'électricité, de gaz naturel et de fioul domestique qui en découlent, soit 92% des 276,5 TWh d'énergie finale (hors bois) consommée pour le chauffage dans les résidences principales.

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 m²) ; l'efficacité énergétique du parc E_{conv}/S (en kWh/m²/an), représentée par la consommation unitaire théoriquement réalisable à comportement conventionnel (température de chauffage constante de 19°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, détaillée en fin d'annexe III, obéit à des processus très similaires.

1.2.1 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 diagnostic de performance énergétique (DPE), est calibré en 2007 à partir des données de l'Agence nationale de l'habitat (ANAH) (Marchal, 2008).

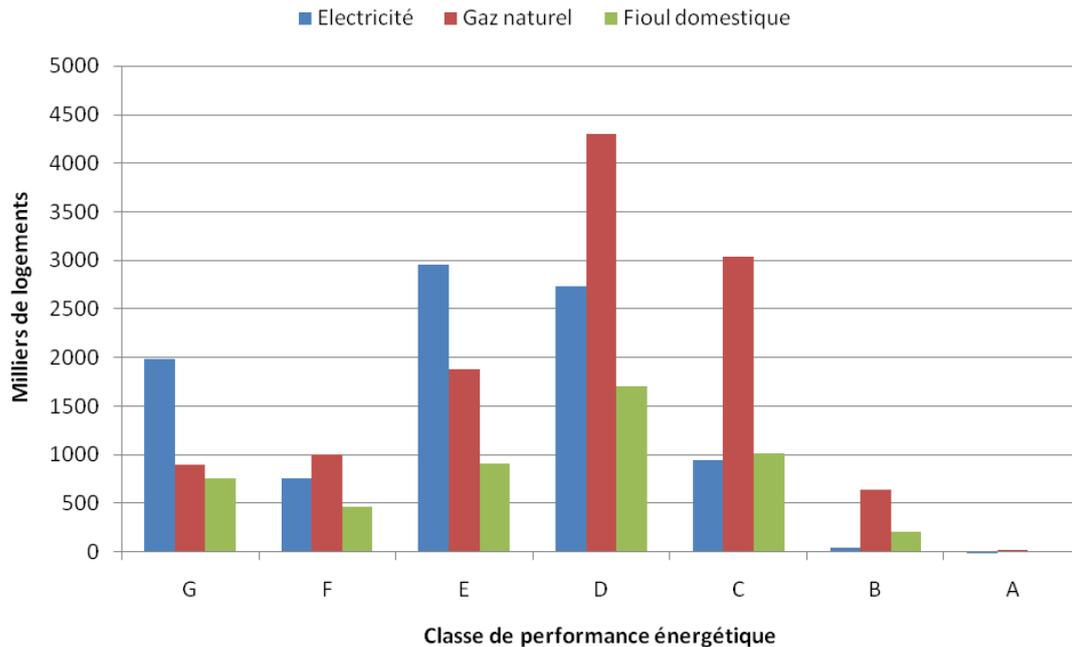


Figure 18: Structure du parc de logements en 2007 d'après les données de l'ANAH (Marchal, 2008)

Les technologies qui constituent l'infrastructure de chauffage (isolation, vitrage, chaudière, etc.) ne sont pas décrites 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 d'énergie primaire pour les usages de chauffage, climatisation et eau chaude) à la classe A, la plus efficace (moins de 50 kWh/m²/an)³². 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 usuelle qu'elles portent en priorité sur les plus mauvaises classes énergétiques (Sartori *et al.*, 2009 ; Traisnel *et al.*, 2001).

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, pour les usages de chauffage, climatisation, eau chaude et ventilation), le niveau bâtiment basse consommation (BBC, moins de 50 kWh/m²/an) et le niveau bâtiment à énergie positive (BEPOS), pour lequel la consommation d'énergie primaire est inférieure à la quantité d'énergie renouvelable produite.

³² Les plages de valeurs correspondant à chaque classe de performance sont détaillées à l'annexe III, tableau 23. Le modèle est calibré sur la valeur médiane de ces plages de consommation. Un coefficient de 0,84 est appliqué à ces valeurs, correspondant approximativement à la part du chauffage dans les trois usages couverts par le DPE.

1.2.2 Choix d'une option de rénovation

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 répartit les choix de rénovation de façon inversement proportionnelle au coût sur le cycle de vie de chaque option. Cette répartition est contrôlée par un paramètre d'hétérogénéité des préférences (ν). Le coût sur le cycle de vie de chaque option prend en compte trois types de coûts détaillés ci-après : le coût de rénovation de la classe de départ à la classe d'arrivée, les dépenses d'énergie cumulées et actualisées théoriquement associées à la classe d'arrivée, et des coûts de transition dits « intangibles ».

1.2.3 Coûts de rénovation et effet d'apprentissage

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. A partir des rares données collectées (ANAH, 2010), la matrice de coûts de rénovation utilisée satisfait aux conditions suivantes: (i) les coûts marginaux de rénovation sont croissants³³, 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) plutôt qu'une succession de rénovations de moindre ampleur équivalente à la même transition ; (iii) le coût de la rénovation la plus lourde, *i.e.* transition de G à A, est proche du coût d'une construction neuve³⁴ (environ 1 200€/m²).

		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 3: Matrice des coûts de rénovation (€/m²)

L'apprentissage du côté de l'offre (*learning-by-doing*) est représenté par une fonction classique de progrès technique endogène (Wing, 2006 ; Gillingham *et al.*, 2008 ; Sassi, 2008), selon laquelle les coûts de rénovation décroissent avec l'expérience, estimée par la quantité de rénovations cumulées

³³ Comme l'attestent certaines études empiriques (BRE, 2005 ; Lagandré *et al.*, 2010).

³⁴ Pour les constructions neuves, la matrice de coûts exposée à l'annexe III (tableau 25) 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.

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 biens considérés sont « technologiquement 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 marché³⁵.

1.2.4 Anticipations myopes et taux d'actualisation hétérogènes

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, sur la durée de vie de l'investissement (fixée à 35 ans pour l'enveloppe et 20 ans pour le système de chauffage, d'après ATEE, 2009). Comme l'a établi le chapitre I, cette hypothèse est couramment utilisée dans les études empiriques pour faciliter l'estimation du taux d'actualisation (Jaffe et Stavins, 1994). Elle peut être interprétée à la fois comme un simple obstacle à l'efficacité énergétique (réaction à l'incertitude) ou comme une défaillance de comportement (routine de calcul dérivée de la rationalité limitée).

Les dépenses d'énergie sont actualisées selon un taux propre à chaque type d'investisseur privé. Cette distinction permet d'illustrer le « dilemme propriétaire-locataire » introduit au chapitre I : le propriétaire n'a généralement pas d'intérêt à investir dans des économies d'énergie qui profiteront au locataire (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, ce dernier 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 privée classique de 7% aux agents qui sont le plus susceptible 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). Comme l'a rappelé le chapitre I (§2.1.2), la différence entre le taux d'actualisation conventionnel et le taux implicite estimé est généralement imputée aux barrières à l'efficacité énergétique ; dans Res-IRF, la différence entre une situation conventionnelle où tous les agents auraient un taux d'actualisation de

³⁵ Les difficultés portent notamment sur la fragmentation des acteurs ou l'évolution lente de la formation (*cf.* chapitre I). 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 (Lagandré, 2006).

³⁶ Les logements sociaux ne sont pas isolés des autres logements loués.

7% et le taux moyen de 21% reflète le dilemme propriétaire-locataire et les différences entre logement individuel et collectif.

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

Tableau 4: Part des types d'investisseurs (d'après INSEE) et paramétrage de leur taux d'actualisation (r)

1.2.5 Coûts intangibles et effet d'imitation

Il existe des preuves empiriques, déjà mentionnées au chapitre I, 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). Inspirés du modèle CIMS (Rivers et Jaccard, 2005 ; Jaccard et Dennis, 2006), des coûts dits « intangibles » sont utilisés dans Res-IRF pour refléter les barrières qui sous-tendent ces observations, en particulier l'information imparfaite et les coûts cachés. 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 dans les calculs de rentabilité des options d'investissement.

Les coûts intangibles comportent une part variable, qui décroît selon une fonction logistique avec la quantité cumulée de rénovation, à la manière du modèle CIMS (Mau *et al.*, 2008 ; Axsen *et al.*, 2009). Ce processus mime les effets d'imitation ou plus généralement les externalités positives d'adoption des technologies d'efficacité énergétique (*learning-by-using*) : à mesure que les coûts intangibles diminuent, l'information s'accroît et le calcul économique réalisé par le propriétaire s'approche d'un pur calcul de rentabilité financière³⁷. Cette dynamique est contrôlée par un taux d'information, analogue au taux d'apprentissage, qui correspond au pourcentage de diminution des coûts intangibles consécutif à un doublement de l'expérience. La part fixe des coûts intangibles reflète les « coûts cachés » exposés au chapitre I, comme le dérangement occasionné par les travaux d'intérieur (Scott, 1997), qui peut être considéré comme irréductible.

Les outils utilisés dans Res-IRF pour représenter les différentes barrières à l'efficacité énergétique sont résumés dans le tableau 5 :

Barrières à l'efficacité énergétique (cf. chapitre I)		Outil de représentation dans Res-IRF	
Obstacles à l'efficacité énergétique	Valeur d'option (incertitude, irréversibilité)	(anticipations myopes)	
	Coûts cachés	Part fixe des coûts intangibles	
	Hétérogénéité des préférences	Paramètre d'hétérogénéité (v)	
Défaillances des marchés de l'efficacité énergétique	Problèmes d'information	Propriété de bien public	Part variable des coûts intangibles
		Asymétries d'information	-
		Incitations clivées	Taux d'actualisation différencié
		Externalités positives d'adoption	Taux d'information
	Externalités positives d'apprentissage	Taux d'apprentissage	
	Contraintes de financement	-	
Défaillances de comportement		(anticipations myopes)	

Tableau 5: Outils de représentation des différentes barrières à l'efficacité énergétique

³⁷ Ce phénomène est illustré à l'annexe III, figure 64

1.2.6 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 base³⁸, il croît à long terme avec la rentabilité moyenne des projets de rénovation selon une fonction logistique (voir annexe III, figure 54). 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 rénovations est néanmoins tempérée par l'épuisement naturel du potentiel des mesures rentables.

1.2.7 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 ne sont pas toujours respectées : les malfaçons et la température effective de chauffage, plus proche de 20°C que de la valeur de 19°C supposée dans les calculs (Maresca *et al.*, 2009), conduisent à des consommations supérieures à celles définies par le DPE ; au contraire, le fait que le chauffage soit limité à certaines pièces et que la surface habitable soit inférieure à la surface « hors œuvre nette » utilisée dans les calculs conventionnels conduit à une consommation inférieure à celle du DPE. L'effet net de ces biais est négatif, c'est-à-dire que le DPE tend à surestimer les consommations réelles. Outre les raisons techniques qui viennent d'être évoquées, cet écart à la consommation conventionnelle s'explique par des variations individuelles de comportement (Cayla *et al.*, 2010), qui répondent à des déterminants économiques bien établis (à l'origine de l'effet rebond), et à des déterminants socio-culturels qui commencent à être identifiés (Maresca *et al.*, 2009 ; Subrémon, 2010).

L'effet rebond est introduit dans Res-IRF à partir de travaux récents d'EDF R&D, qui mettent en évidence une réponse significative du taux d'utilisation au prix implicite du service de chauffage, approché par la dépense conventionnelle d'énergie (Allibe, 2009 ; Cayre *et al.*, 2011). Le taux d'utilisation (E_{fin}/E_{conv}) est calculé pour chaque type de logement comme le ratio entre la consommation effective d'énergie pour le chauffage estimée par le Centre d'Etudes et de Recherches Economiques sur l'Energie (CEREN) et la consommation qui serait réalisée selon le calcul thermique conventionnel utilisé pour le DPE. La courbe logistique de la figure 19, issue de ces travaux, implique que plus la dépense d'énergie est faible (élevée), plus le taux d'utilisation des équipements est élevé (faible), traduisant un relâchement (renforcement) de la sobriété ou effet rebond.

³⁸ D'après les données OPEN (2008), en considérant uniquement les rénovations qui conduisent à une transition d'au moins une classe de performance énergétique.

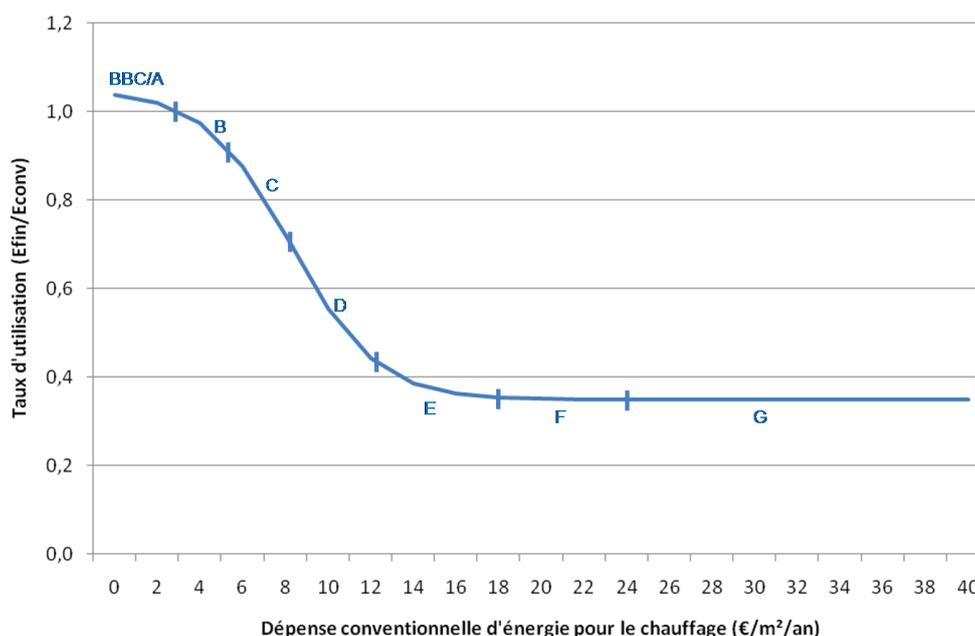


Figure 19: Courbe d'utilisation de l'infrastructure de chauffage (d'après Allibe, 2009 ; Cayre *et al.*, 2011)

Emplacement indicatif des classes de performance énergétique du DPE au prix moyen de l'énergie de 2008³⁹.

1.3 Le modèle en situation de référence

Dans tous les résultats présentés, les consommations d'énergie primaire et les émissions de CO₂ directes sont déduites de la consommation d'énergie finale par les coefficients usuels de conversion⁴⁰. Les émissions indirectes de CO₂ liées à la production d'électricité ne sont pas évaluées pour deux raisons. D'une part, seules les émissions directes sont attribuées au secteur résidentiel dans la comptabilité nationale des émissions. D'autre part, compte tenu des débats qui règnent autour du contenu moyen ou marginal en carbone de la production électrique française (ADEME et EDF, 2005 ; ADEME et RTE, 2007), la seule façon pertinente de quantifier les émissions est de réaliser un couplage complexe du module avec un module de production d'électricité ; cette tâche est en cours au CIRED mais reste pour l'heure inachevée.

1.3.1 Déterminants principaux du 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

³⁹ Alors que Res-IRF se concentre sur la consommation d'énergie pour le chauffage, la consommation d'énergie conventionnelle du DPE couvre les usages de 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. De plus, 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.

⁴⁰ Le taux de conversion de l'énergie finale en énergie primaire est de 2,58 pour l'électricité et 1 pour le gaz naturel et le fioul domestique. Les contenus en carbone respectifs du gaz naturel et du fioul domestique sont de 206 et 271gCO₂/kWh. Les résultats d'émissions de CO₂ supposent une augmentation des émissions directes de 17% entre 1990 et 2007 (CITEPA, 2010), non modélisée dans Res-IRF.

France mais déterminées par un scénario exogène de prix du pétrole mondial dérivé de l'*Annual Energy Outlook 2008* (U.S. EIA, 2008).

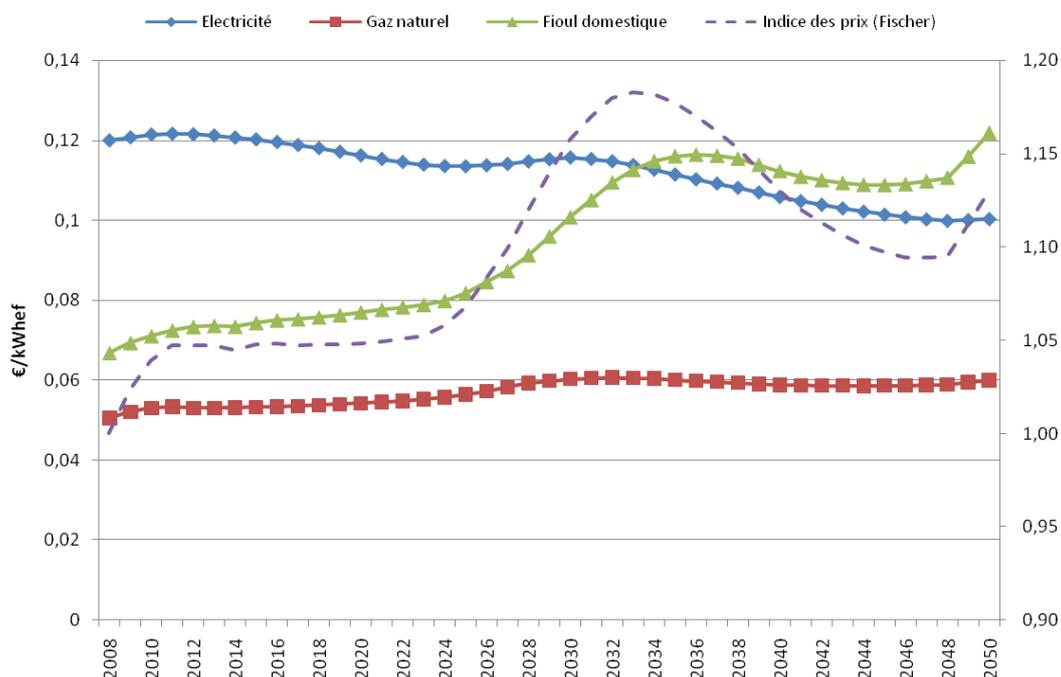


Figure 20: Prix des énergies dans le scénario de référence

La première ligne des tableaux 6 et 7 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 logements⁴¹. 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.

⁴¹ 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).

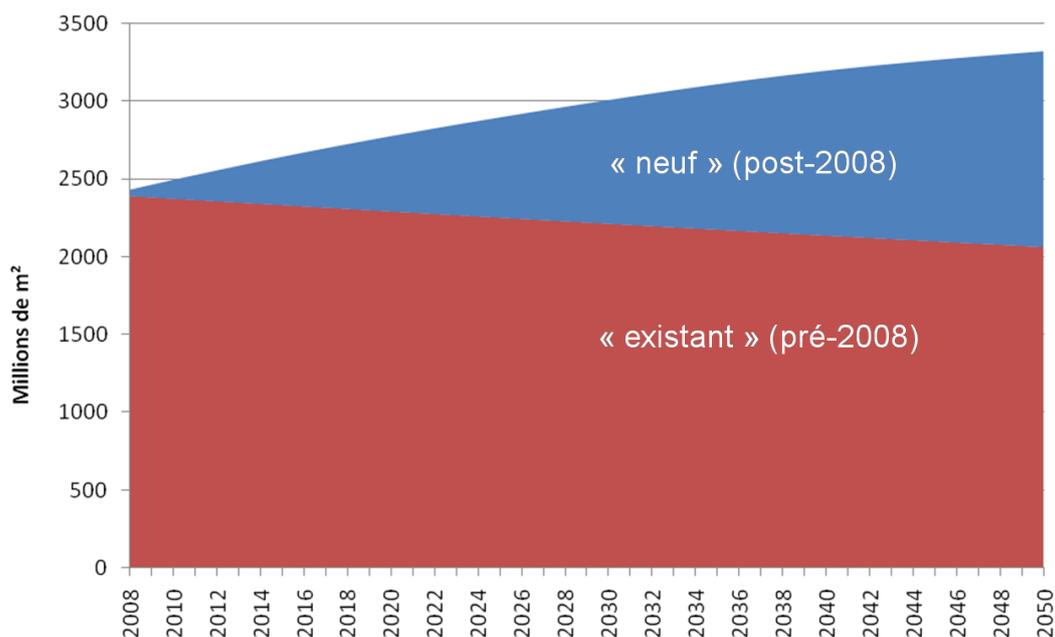


Figure 21: Projection de la superficie du parc de logements

La consommation et les émissions diminueraient de manière plus importante 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 rebond⁴² atteint 33%, ce qui le situe dans la fourchette haute des estimations données pour le chauffage (Sorrell *et al.*, 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 16% en 2020 et 34% en 2050 par rapport à la consommation de 2008, sont plus faibles que les tendances historiques exposées à l'annexe I. 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.

1.3.2 Estimation du gisement d'économies d'énergie dans le parc existant

Les analyses de sensibilité complémentaires réalisées à l'annexe III permettent d'évaluer le gisement d'économies d'énergie dans le parc existant. Par rapport à une réduction de 37 % de la demande d'énergie finale en situation de référence, une réduction additionnelle de 14 % pourrait être atteinte si les principales barrières aux économies d'énergie étaient surmontées (*cf.* annexe III, figure 71). Ces gains proviendraient pour 4% de la correction du dilemme propriétaire-locataire et pour 10% de l'annulation totale de l'effet rebond. En termes méthodologiques, cette estimation se situerait quelque part le long de la flèche (2) du diagramme de Jaffe et Stavins reproduit au chapitre I (figure 4). La croissance serait en effet forte le long de l'ordonnée représentant l'efficacité énergétique, mais partielle le long de l'abscisse représentant l'efficacité économique : si la correction du dilemme

⁴² 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. Dans la partie suivante, l'effet rebond *induit* par les instruments compare les scénarios de politique à la référence.

propriétaire-locataire améliore cette dernière, l'annulation de l'effet rebond la réduit. En conséquence, cette estimation est typiquement moins favorable du point de vue énergétique qu'une estimation issue de modèle *bottom-up*, telle que celle de Traisnel *et al.* (2010), qui se situerait à un niveau d'efficacité énergétique supérieur mais à un niveau d'efficacité économique inférieur.

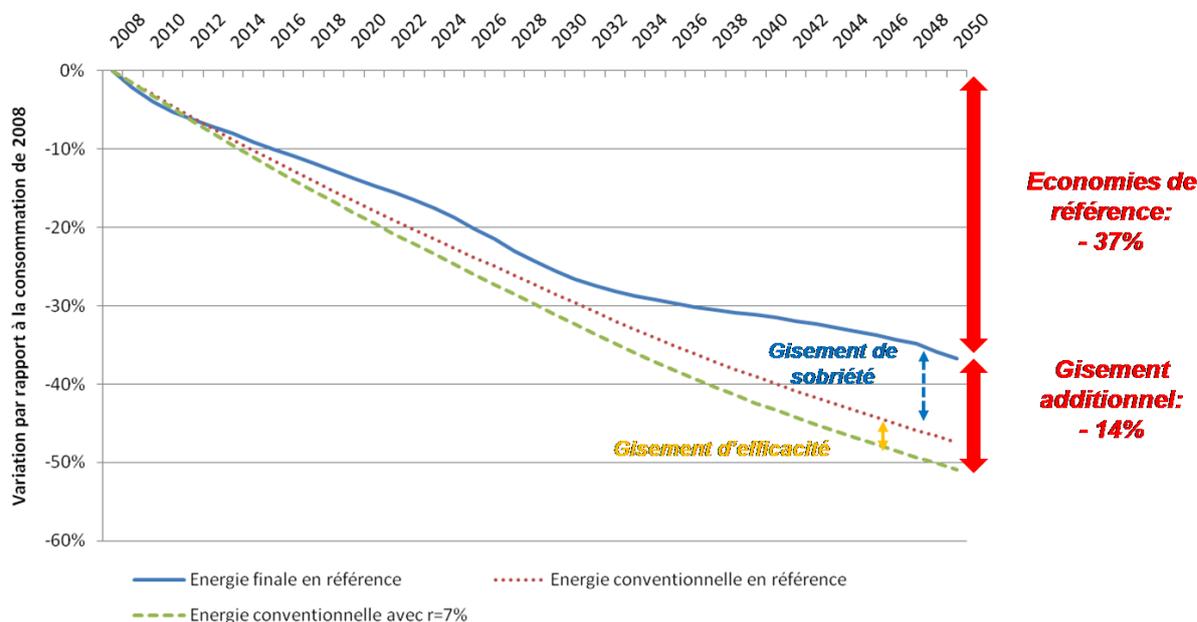


Figure 22: Potentiel technico-économique de maîtrise de l'énergie dans les logements existants

2 Mode d'action des instruments du Grenelle de l'environnement

Comme le détaille l'annexe I, le gouvernement français a fixé l'objectif « Facteur 4 » de diviser les émissions de CO₂ domestiques par quatre en 2050 par rapport à leur niveau de 1990 et l'objectif « Grenelle -38% » de réduire la consommation d'énergie primaire par m² dans les bâtiments existants de 38% en 2020 par rapport à 2008. Pour atteindre ces objectifs dans le secteur résidentiel, 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.

L'étude suivante simule l'impact de ces mesures sur la consommation d'énergie pour le chauffage résidentiel, en les ramenant à des instruments canoniques : subventions qui réduisent le coût d'investissement (CIDD et EcoPTZ), réglementations qui limitent les choix d'efficacité (RT2012-2020 et OR) et taxe (CCE) qui renchérit le coût d'usage. Après avoir détaillé comment les instruments sont paramétrés pour reproduire les dispositions réglementaires du Grenelle de l'environnement, leur efficacité est comparée.

2.1 Paramétrage des instruments

2.1.1 Crédits d'impôt développement durable (CIDD)

L'achat de biens efficaces en énergie, comme le double vitrage, l'isolation, ou encore l'installation de chaudières performantes est éligible depuis 2005 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). La loi de finances de 2009 l'a réévalué en restreignant l'éligibilité aux technologies les plus performantes, en étendant la base de calcul aux dépenses d'installation pour l'isolation, en rendant éligibles les propriétaires bailleurs et en le prorogeant jusqu'en 2012. Il vient néanmoins d'être « raboté » par la loi de finances de 2011.

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 logement⁴³. 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.

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

Des prêts bancaires à taux d'intérêt nul pour des mesures 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 800 000 ménages en 2012 et durer jusqu'en 2020 (MEEDDM, 2010).

L'EcoPTZ est représenté dans le modèle comme une subvention équivalente au montant des intérêts d'un prêt conventionnel de dix ans à 4% contracté pour une transition de classe énergétique. Par exemple, une rénovation de 15 000€ bénéficie d'une subvention de 3 490€, sachant que le bénéficiaire paye 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 sur l'enveloppe et le système de chauffage est nécessairement satisfaite pour réaliser une transition d'au moins une classe énergétique.

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

L'une des décisions les plus consensuelles du Grenelle de l'environnement fut de fixer les réglementations thermiques futures à des niveaux ambitieux (loi Grenelle 1, article 4). Soumis

⁴³ Ce plafond correspond à la valeur la plus restrictive prévue par la loi. En pratique, il est relevé en fonction du nombre de personnes habitant dans le logement.

jusqu'à présent à la réglementation thermique 2005, les constructions neuves devront se conformer au niveau BBC dans le cadre de la RT2012⁴⁴ 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).

Ces réglementations sont représentées dans Res-IRF comme des restrictions successives du choix d'investissement aux seules options d'efficacité énergétique réglementaires⁴⁵ en 2012 et 2020.

2.1.4 Obligation de rénovation (OR)

Telle qu'elle a été évoquée, l'obligation de rénovation (OR) imposerait 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 kWhep/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.

2.1.5 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

⁴⁴ Les travaux présentés ici 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, et accorde certaines dérogations au seuil de consommation de 50 kWhep/m²/an.

⁴⁵ Cette représentation fait abstraction des requêtes spécifiques en faveur de la sobriété énergétique, comme l'obligation de mettre en place des compteurs intelligents.

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 carbone⁴⁶ de 180gCO₂/kWh.

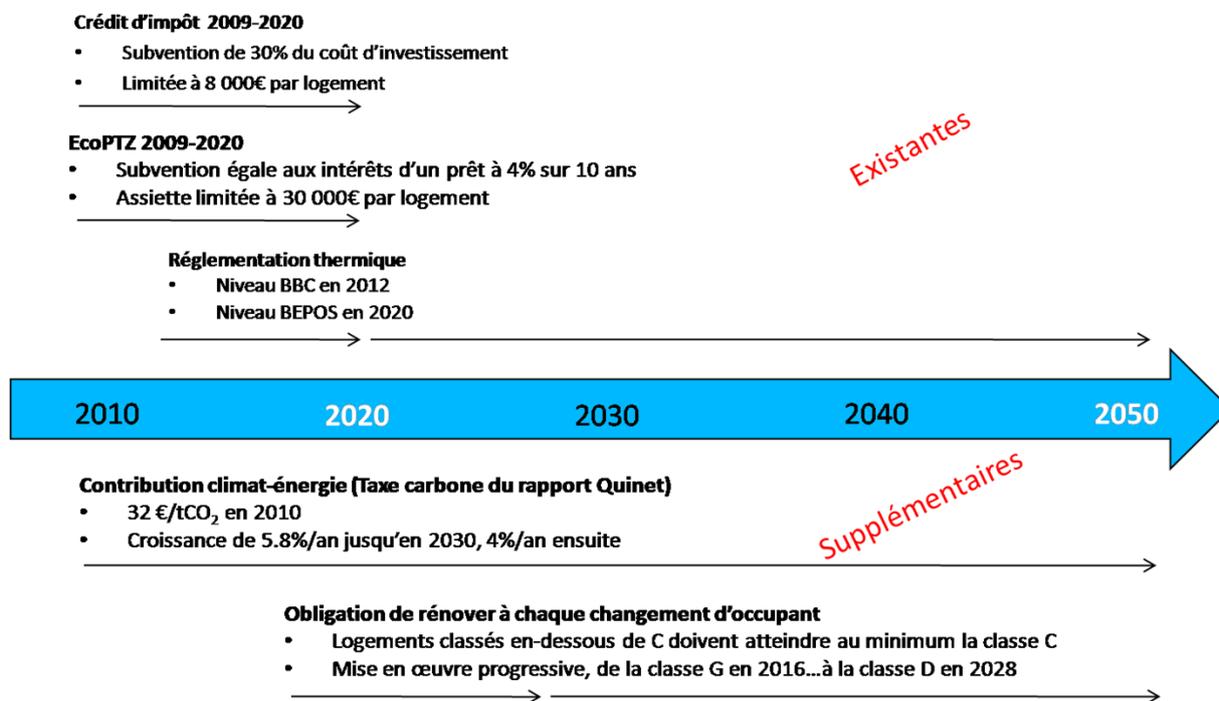


Figure 23: Principaux paramètres des mesures existantes et supplémentaires

⁴⁶ Ce mode de taxation correspond à la proposition de taxe carbone-énergie du Projet de loi de finances rectificative pour 2000.

		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 6: 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 7: Résultats complémentaires

2.2 Efficacité comparée des instruments

L'efficacité des instruments est évaluée comme la quantité d'économies d'énergie additionnelles par rapport au scénario de référence. L'évaluation distingue l'amélioration de l'efficacité énergétique et les variations de sobriété. L'amélioration de l'efficacité énergétique se décompose elle-même entre quantité et qualité des rénovations. La sobriété et l'effet rebond total sont déduits de l'évolution du taux d'utilisation ; l'effet rebond induit par chaque instrument est évalué par rapport à cette référence. L'efficacité dynamique des instruments est enfin évaluée comme leur impact sur la décroissance des coûts de rénovation par l'intermédiaire du progrès technique endogène. Toutes les simulations sont réalisées à climat constant. Les résultats numériques sont présentés dans les tableaux 6 et 7.

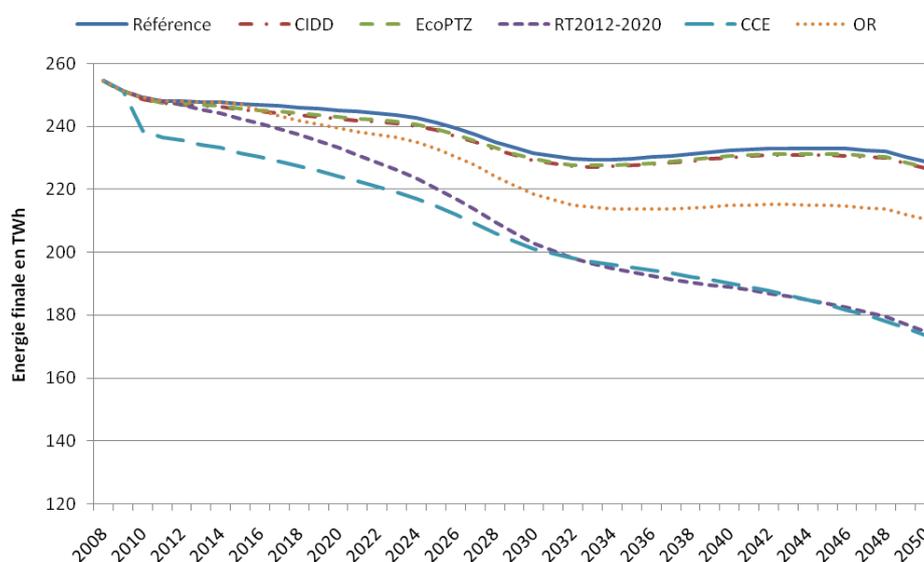


Figure 24: Consommation d'énergie finale dans le cas d'instruments isolés

Le tableau 6 et la figure 24 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 26). Ils améliorent également la qualité des rénovations, comme l'indique la moindre présence de classes « inefficaces » (G à D) et l'importance des classes « efficaces » (C à A) dans le stock final par rapport au scénario de référence (figure 28). L'amélioration de l'efficacité énergétique qui en résulte induit un léger effet rebond (tableau 7), comme l'illustre le taux d'utilisation agrégé plus élevé que dans le scénario de référence sur la figure 25.

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 28). En particulier, le nombre de rénovation est massivement impacté chaque fois que l'obligation s'applique à une nouvelle classe de performance⁴⁷ ; cette augmentation est mécaniquement suivie d'un épuisement tout aussi massif des rénovations rentables. Ce processus explique le profil temporel en dents de scie exposé à la figure 26 et la décroissance

⁴⁷ Pour la classe de performance nouvellement soumise à l'obligation, le taux annuel de rénovation correspond à la valeur moyenne du taux de changement d'occupant, soit un saut d'environ 1% à environ 7% du parc.

conséquence des coûts de rénovation en réponse au progrès technique endogène⁴⁸ (figure 27). 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. Un effet similaire a été observé aux Etats-Unis dans le cadre des standards technologiques (Nadel, 2002). 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 tous les instruments (tableau 7), qui s'explique par la localisation du seuil d'obligation C dans la partie la plus pentue de la courbe d'utilisation (cf. figure 19).

Les deux instruments les plus performants, 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, mais de façon moins importante que les subventions (figure 26). En conséquence, son impact est plus limité sur la décroissance des coûts de rénovation par accélération du progrès technique endogène pendant la période de coexistence des deux types d'instruments (figure 27). Elle améliore toutefois la qualité des rénovations pour un impact final sur l'efficacité des bâtiments existants comparable à celui des subventions. Son effet sur la structure du parc neuf est faible, en raison du faible poids des dépenses d'énergie face aux coûts de construction élevés (figure 29). Enfin, la CCE induit une forte substitution vers l'électricité. En réponse à ces progrès d'efficacité énergétique modestes, la réduction de la facture énergétique (déplacement vers la gauche sur la courbe d'utilisation de la figure 19) 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.

⁴⁸ A l'inverse, un tel accroissement de la rénovation pourrait être contraint par des goulots d'étranglement sur l'offre, qui induiraient une hausse des coûts de rénovation à court terme. Ce processus n'est pas pris en compte dans le modèle.

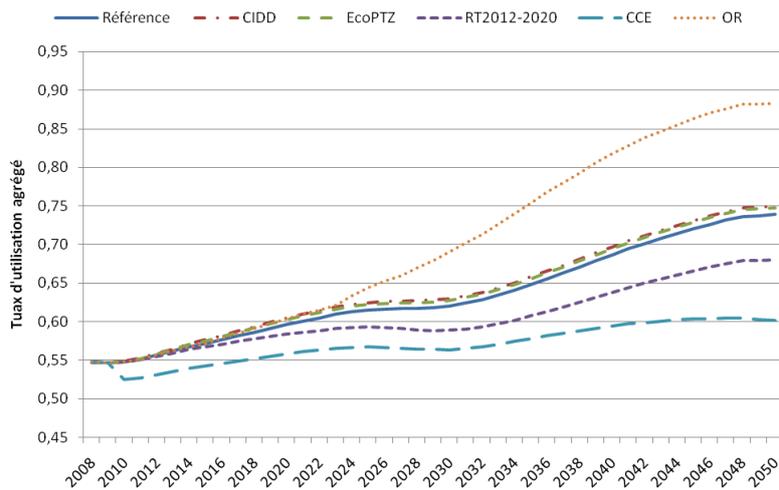


Figure 25: Taux d'utilisation agrégé dans le cas d'instruments isolés

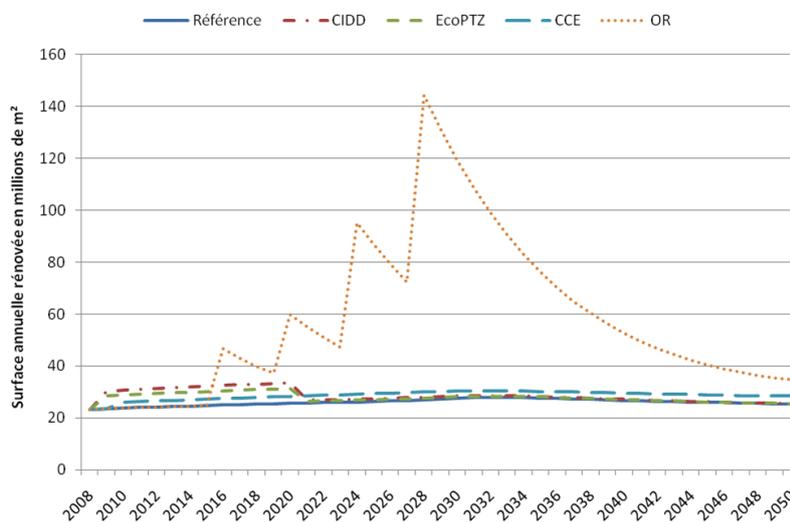


Figure 26: Nombre de rénovations dans le cas d'instruments isolés

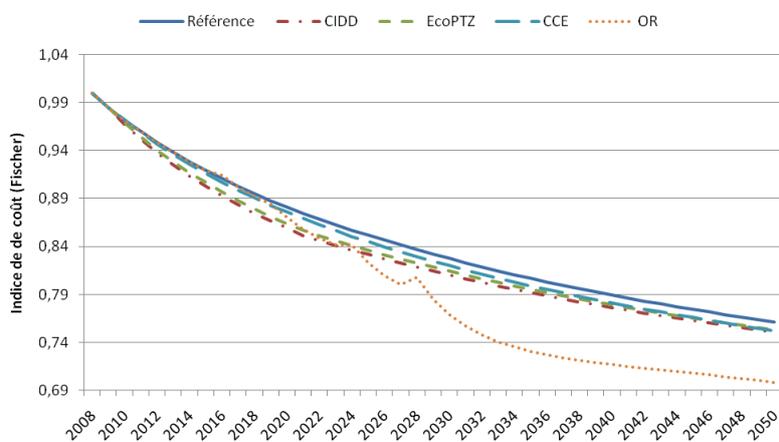


Figure 27: Impact des instruments isolés sur les coûts de rénovation

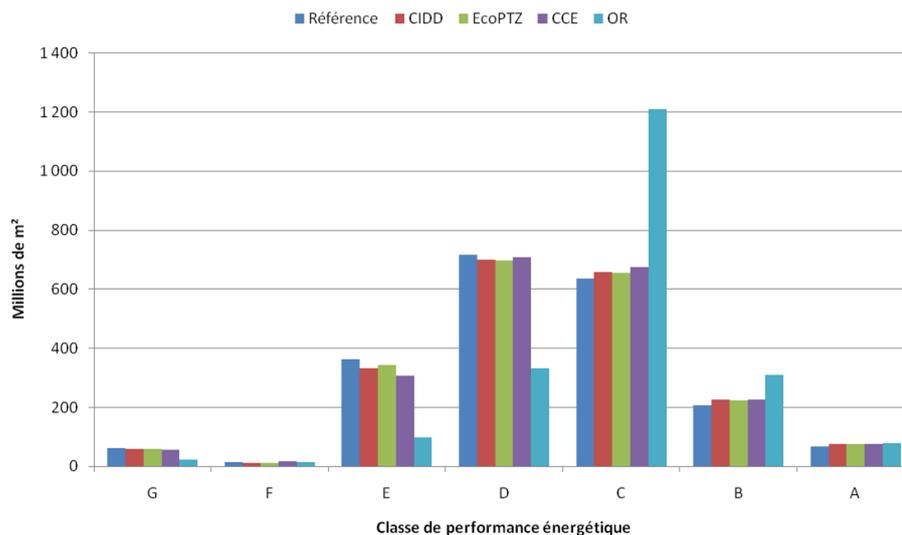


Figure 28: Structure du parc existant en 2050 dans le cas d'instruments isolés

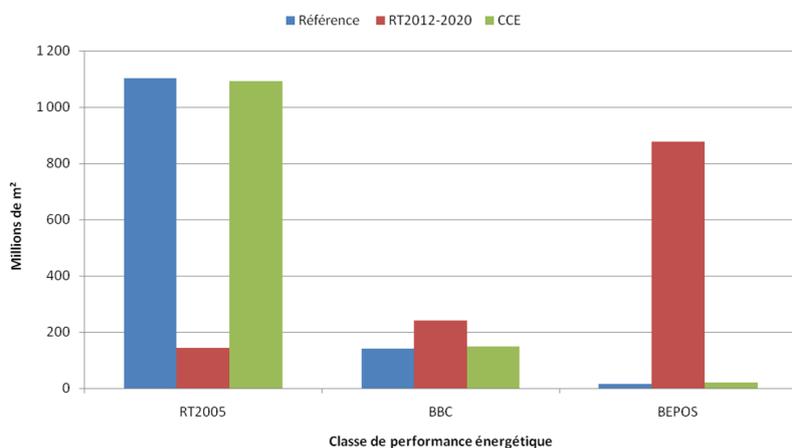


Figure 29: Structure du parc neuf en 2050 dans le cas d'instruments isolés

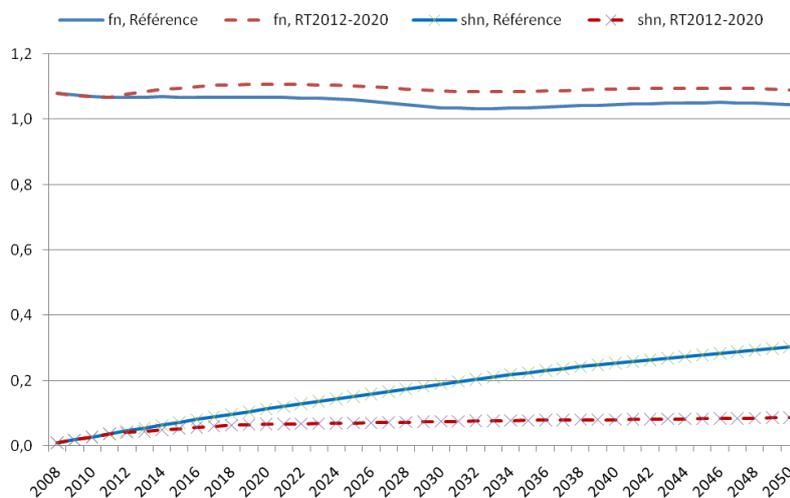


Figure 30: Effets de sobriété dans le parc neuf (voir l'équation 2)

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 25). Il s'explique en réalité par un effet de composition entre le parc neuf et le parc existant. Pour l'illustrer, il faut considérer le taux d'utilisation total f comme la moyenne des taux spécifiques f_e et f_n (pour le parc existant et neuf) pondérée par les parts sh_e et sh_n (*idem*) de chaque parc dans la demande d'énergie conventionnelle :

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

La figure 30 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, certains effets généraux 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) Du point de vue de l'efficacité dynamique, les taxes paraissent moins performantes que les subventions pour l'incitation au progrès technique. (iii) Les instruments 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. Si les deux premiers résultats sont conditionnés au paramétrage des instruments, le troisième est conforme aux résultats du modèle stylisé du chapitre II.

3 Evaluation globale des politiques du Grenelle de l'environnement

En pratique, les différentes mesures sont 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.

3.1 Bouquet avec mesures existantes (AME)

Le bouquet AME induit des gains sur la consommation primaire unitaire du parc existant de 10,3% en 2020 et une réduction totale des émissions directes de CO₂ de 33,7% en 2050 par rapport à 1990. Ces réductions sont très éloignées des objectifs respectifs de 38% et 75%. 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 de 0,2 point la somme des économies induites par chaque instrument pris séparément (*idem*, soit respectivement 1,1 et 0,9 point qui font 2,0 points). Ce résultat suggère que l'interaction entre le CIDD et l'EcoPTZ est légèrement sur-additive.

L'analyse détaillée des déterminants des économies montre que l'augmentation du taux de rénovation par rapport à la référence (figure 33) correspond approximativement à la somme des augmentations induites séparément par le CIDD et l'EcoPTZ (figure 26). Plus précisément, l'augmentation finale est légèrement sur-additive, en raison de la détermination logistique du taux de rénovation (détaillée en annexe III, figure 54). 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 améliore l'efficacité du parc de logements en 2050. En parallèle, elle induit un effet rebond supérieur à la somme des instruments pris séparément. Cet effet, à peine visible en comparant le taux d'utilisation du bouquet (figure 32) à celui des autres instruments du bouquet, y compris la RT2012-2020 (figure 25), est confirmé par l'analyse numérique.

3.2 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 toujours pas d'atteindre les objectifs « Grenelle -38% » et « Facteur 4 », comme l'indique le tableau 6 et la figure 31. La comparaison à la figure 36 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 33 et 34, les scénarios AMS2 et AMS3 ont un impact similaire sur le taux de rénovation et la structure du parc existant en 2050. Cette observation 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 34 et 35). 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 19). Au final, la figure 32 suggère que l'effet net des instruments combinés 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 AMS1 et AMS2.

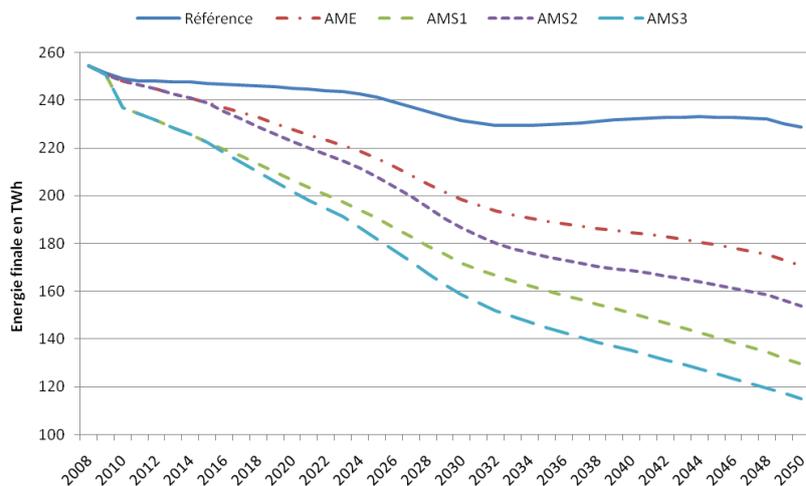


Figure 31: Consommation d'énergie finale dans le cas d'instruments combinés

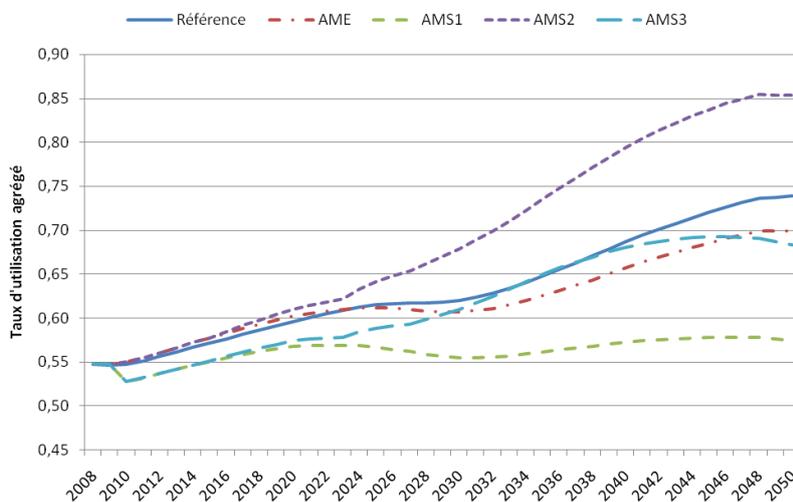


Figure 32: Taux d'utilisation agrégé dans le cas d'instruments combinés

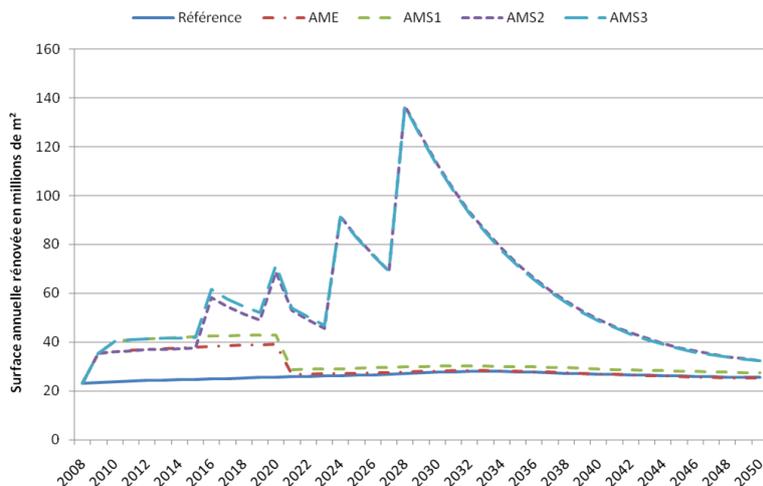


Figure 33: Nombre de rénovations dans le cas d'instruments combinés

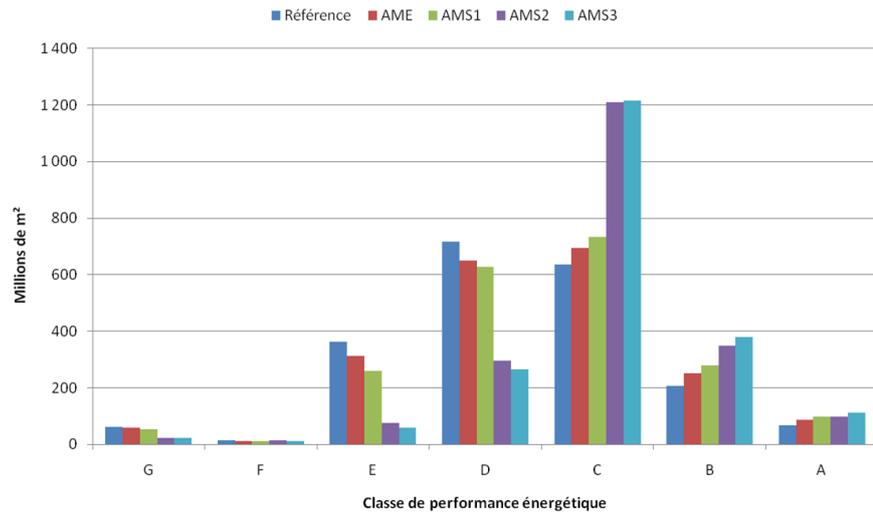


Figure 34: Structure du parc existant en 2050 dans le cas d'instruments combinés

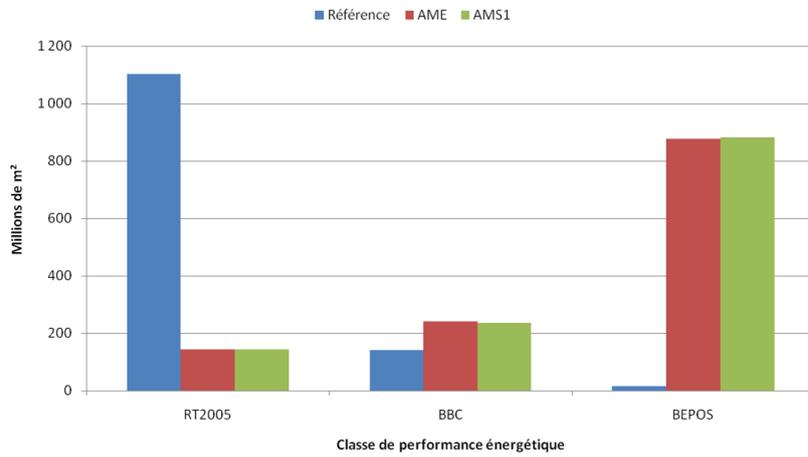


Figure 35: Structure du parc neuf en 2050 dans le cas d'instruments combinés

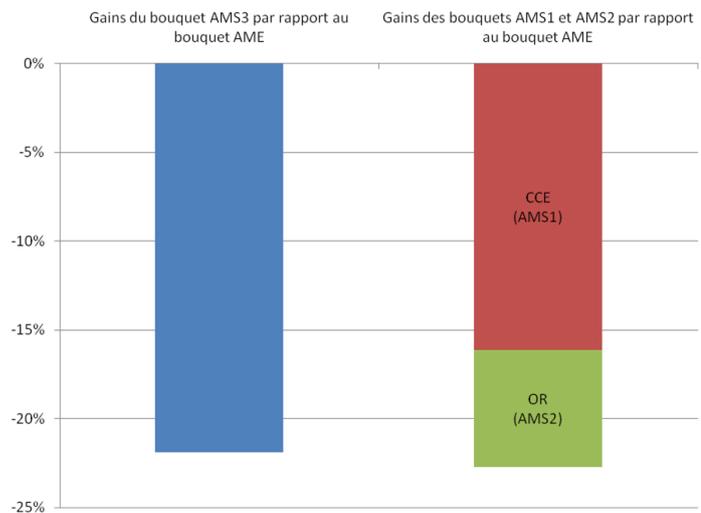


Figure 36: Gains d'énergie finale en 2050 par rapport à 2008

4 Discussion

4.1 Une évaluation positive

L'exercice réalisé a une visée positive, ce qui signifie qu'il évalue l'impact 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, comme dans le modèle du chapitre II, 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 (§ 4.3), ces réflexions appellent quelques commentaires sur les unités retenues pour la définition des objectifs et les critères d'évaluation utilisés.

4.1.1 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 (*cf.* annexe I), et la comparaison des résultats selon différentes unités à partir des tableaux 6 et 7 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 vers 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* 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.

4.1.2 Critères d'évaluation : la question des coûts

Les instruments sont comparés en termes d'*efficacité* et 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 économique* globale.

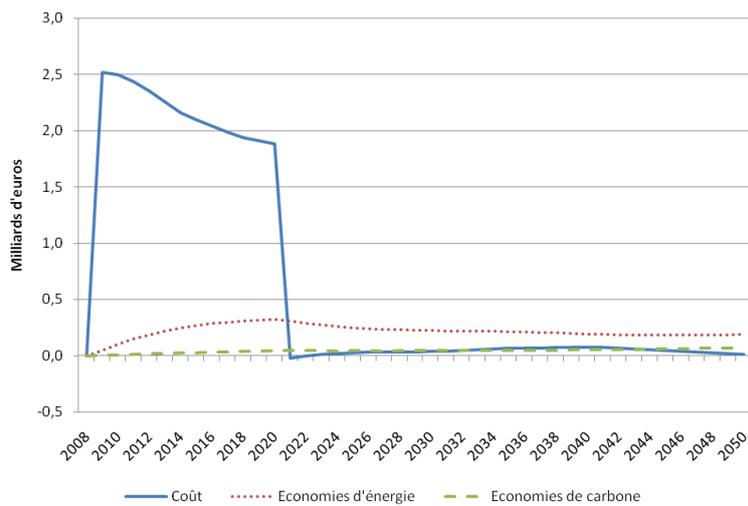


Figure 37: Profil temporel des coûts et bénéfices du CIDD par rapport au scénario de référence

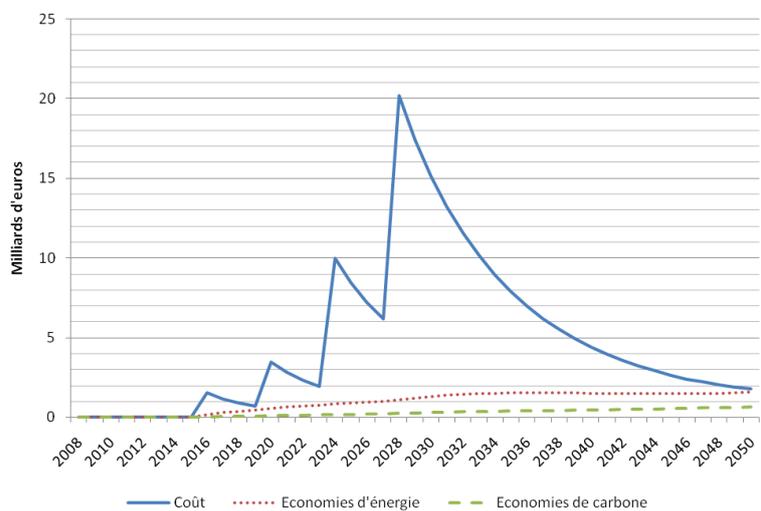


Figure 38: Profil temporel des coûts et bénéfices de l'OR par rapport au scénario de référence

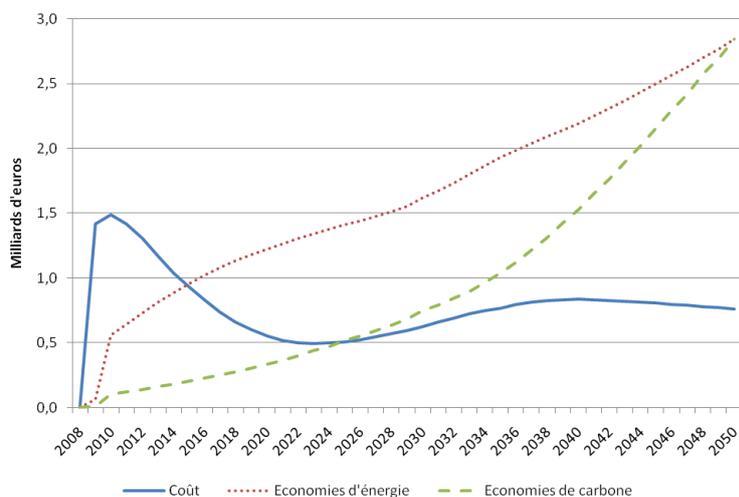


Figure 39: Profil temporel des coûts et bénéfices de la CCE par rapport au scénario de référence

Les profils temporels de coûts et bénéfices induits par les différents instruments, exposés aux figures 37 à 39, illustrent les difficultés posés par cette tâche. Les coûts sont représentés comme le surinvestissement dans les technologies efficaces par rapport à la situation de référence, les bénéfices énergétiques comme les économies d'énergie valorisées aux prix courant de l'énergie et les bénéfices environnementaux comme les réductions d'émissions directes de CO₂ valorisées à la valeur tutélaire du carbone. Dans l'exemple du CIDD (figure 37 ; l'EcoPTZ, non reproduit ici, présente un profil analogue), s'il paraît concevable d'associer les bénéfices observés aux coûts de l'instrument 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. Ce problème est plus sensible encore dans le cas d'instruments à durée indéterminée comme la réglementation thermique (figure 38 ; l'OR, non reproduite ici, présente un profil analogue), dont l'horizon d'évaluation doit être envisagé à très long terme. L'évaluation des bénéfices de la taxe (figure 39), qui a également une durée indéterminée, ajoute un problème supplémentaire, puisqu'elle ne prend pas en compte les pertes de bien-être liées à la réduction de confort. Symétriquement, il faudrait prendre en compte l'augmentation du confort corollaire de l'effet rebond et donc déduire ce dernier d'une fonction d'utilité.

Malgré ces limites qui empêchent de comparer rigoureusement la balance coût-bénéfice des instruments, les trois profils présentés suggèrent que le classement de l'efficacité des taxes, subventions et réglementations correspond au classement proposé au chapitre II (figures 12 et 13).

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.

4.2 Éléments 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.

4.2.1 Énergies 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.

4.2.2 Mesures complémentaires

Les bouquets de mesures simulés 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 dans le parc existant* améliore la performance des équipements standards non pris en compte dans le modèle. 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. Enfin, comme le montrera le chapitre suivant, l'additionnalité du CIDD et du *dispositif français de certificats blancs* est largement débattue, 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 certificats blancs.

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 maîtrise de l'énergie. L'ampleur des relâchements de comportement mise en évidence dans les différentes simulations laisse penser que des mesures de modération de l'utilisation génèreraient des économies d'énergie considérables. Les expériences étrangères de *feedback* et de *smart metering* présentent à ce titre des résultats encourageants (Abrahamse *et al.*, 2005 ; Darby, 2006 ; Fischer, 2008 ; Ayres *et al.*, 2009). Elles posent cependant des problèmes de confidentialité qui compliquent leur mise en œuvre.

4.3 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.

Dans un premier temps, la taxe permettant d'atteindre le « Facteur 4 » est déterminée par doublements successifs du taux initial de la CCE au sein du bouquet AMS3. Comme en témoigne la figure 40, 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 §2.1.5).

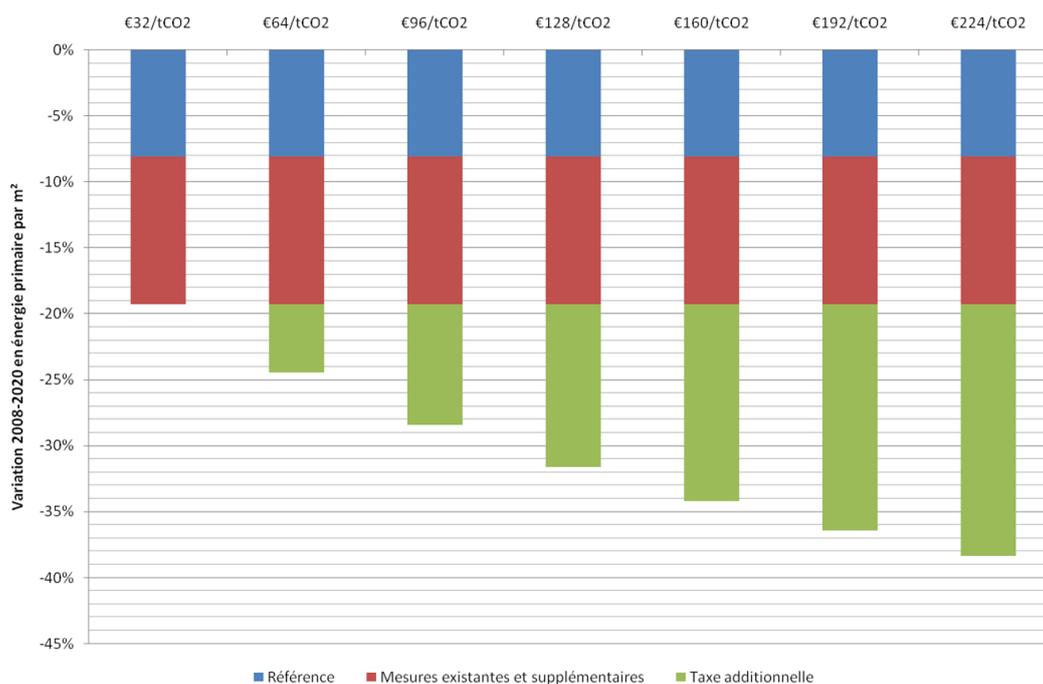


Figure 40: Gains d'énergie primaire unitaire dans le parc existant en 2020 par rapport à 2008

Deux autres scénarios volontaristes sont ensuite 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 7 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 41 montrent que chaque durcissement du bouquet d'instruments 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 42. 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 43).

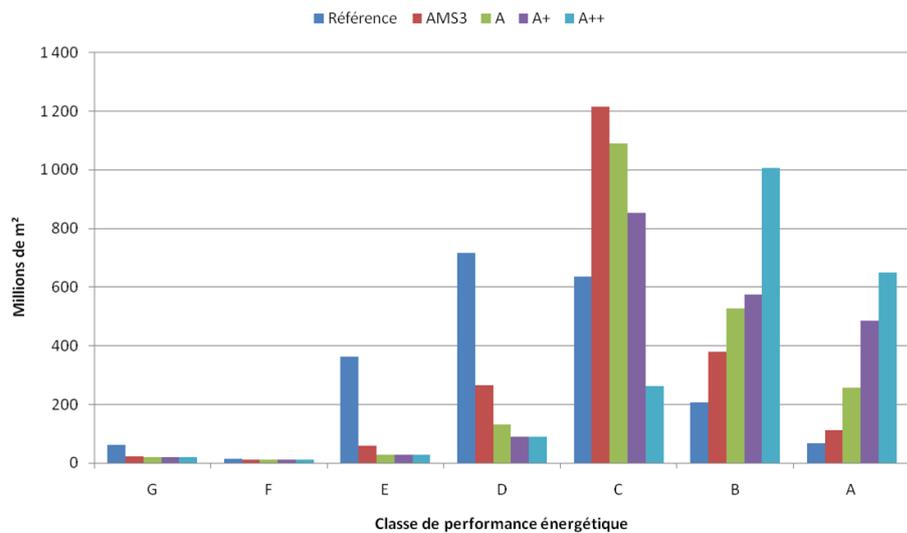


Figure 41: Structure du parc existant en 2050 dans le cas de scénarios volontaristes

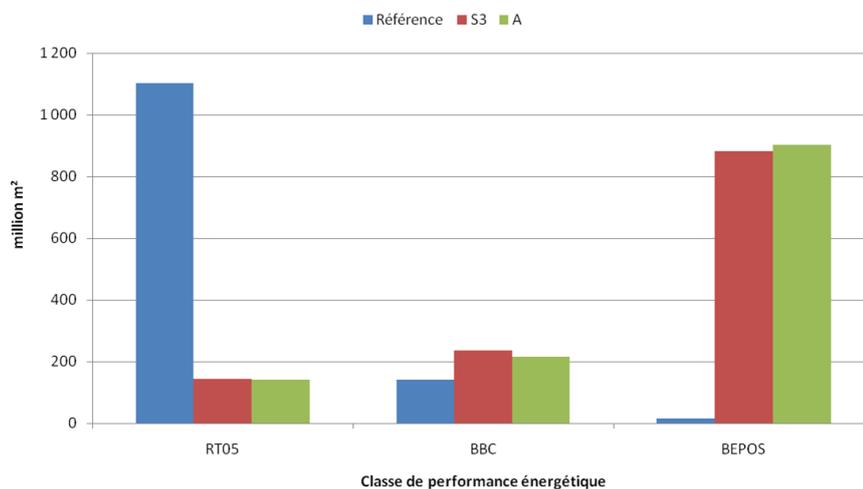


Figure 42: Structure du parc neuf en 2050 dans le cas de scénarios volontaristes

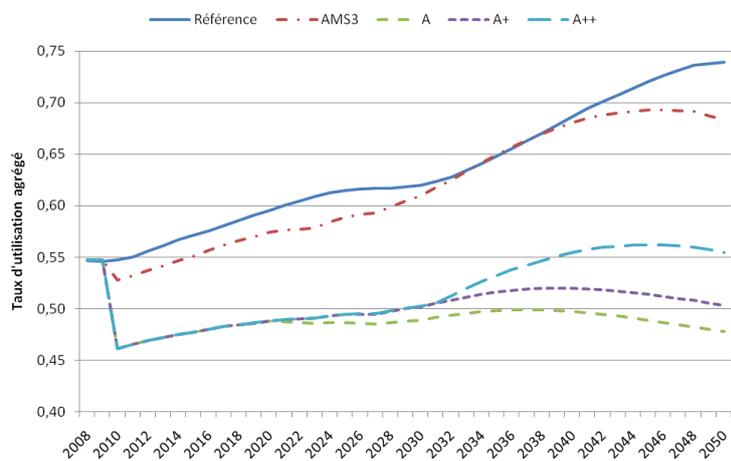


Figure 43: Taux d'utilisation agrégé dans le cas de scénarios volontaristes

5 Conclusion

Ce chapitre présente une architecture de modélisation hybride originale, qui associe des déterminants économiques spécifiques de la consommation d'énergie des ménages pour le chauffage à une description détaillée de la performance énergétique du parc de logements français. La description économique est enrichie par rapport au modèle du chapitre II, puisqu'en plus de l'effet rebond sont introduites des obstacles d'hétérogénéité des préférences et d'anticipation myope, ainsi que des défaillances des marchés de l'efficacité énergétique telles que le dilemme propriétaire-locataire, les externalités d'information et d'apprentissage. Cette avancée est permise par l'emploi de fonctions explicites, plus réalistes que des fonctions de production néo-classiques.

Cet outil permet de mettre en lumière les liens d'influence réciproque qu'entretiennent les instruments de maîtrise de l'énergie et les « barrières » au sens large, dans une perspective dynamique. Les réglementations, subventions et taxes représentées permettent toutes, à des degrés divers, d'accélérer la diffusion des technologies d'efficacité énergétique. Cette dynamique résulte d'effets auto-entretenus d'apprentissage du côté de l'offre et d'information du côté de la demande, modérés toutefois par l'épuisement naturel du gisement d'économies d'énergie. Les réglementations paraissent avoir l'effet dynamique le plus fort (surtout dans la construction neuve) et les taxes le plus faible. De plus, seule la réglementation paraît propre à corriger les incitations clivées entre propriétaires et locataires. Enfin, la contrainte d'effet rebond est aggravée par les réglementations et les subventions mais atténuée par la taxe, résultat qui confirme celui du modèle du chapitre II. L'analyse est peu conclusive à l'égard des interactions entre instruments, qui nécessitent d'être évaluées de manière plus systématique.

Outre ces faits stylisés, l'architecture de modélisation élaborée permet de paramétrer les technologies, comportements des agents et instruments d'intervention publique sur des données réelles et ainsi de simuler différents scénarios de prospective. Appliquée à la politique française du Grenelle de l'environnement, cette démarche aboutit au constat d'inefficacité des mesures existantes et supplémentaires au regard des objectifs quantifiés définis par les pouvoirs publics.

En définitive, les progrès réalisés par rapport au modèle du chapitre II résident principalement dans la représentation des comportements des consommateurs et l'élaboration d'un cadre d'évaluation dynamique. Ces progrès furent nécessairement sélectifs et certaines des avancées permises par le modèle du chapitre II n'ont pas été approfondies. D'abord, la description de l'offre de technologies d'efficacité énergétique a été réduite à une fonction de progrès technique endogène, représentation particulièrement abstraite des barrières exposées au chapitre I qui portent sur la fragmentation des filières industrielles. De plus, le coût des instruments n'a pu être mis en correspondance avec les bénéfices cumulés qu'ils génèrent à long terme. En conséquence, les critères de coût-efficacité et d'efficience qui fondent l'analyse économique des instruments (*cf.* chapitre II, §1.1) ne sont pas estimés. Enfin, les certificats blancs n'ont pas été simulés. Une première explication tient à l'absence de validation empirique du mécanisme hybride taxe-subsidation utilisé pour les représenter au chapitre II. Une seconde tient au fait que dans le cadre du couplage récursif entre Res-IRF et IMACLIM-R France, la simulation d'instruments avec objectifs en quantité nécessite une résolution par tâtonnement itératif, plus complexe que les techniques utilisées pour simuler les autres instruments (modification des coûts relatifs pour les taxes et subventions, restriction des choix d'investissement pour les réglementations).

Bibliographie

- Abrahamse, W., L. Steg, C. Vlek, T. Rothengatter, 2005, "A review of intervention studies aimed at household energy conservation", *Journal of Environmental Psychology*, 25(3):273–291
- ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie] et EDF, 2005, *Note de cadrage sur le contenu CO2 du kWh par usage en France*
- ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie] et RTE, 2007, *Le contenu en CO2 du kWh électrique : Avantages comparés du contenu marginal et du contenu par usages sur la base de l'historique*
- ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie], 2008, *Les chiffres clés 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.
- ANAH [Agence nationale de l'habitat], 2010, *Les travaux de rénovation thermique les plus efficaces*, Guide pratique
- ATEE [Association Technique Energie Environnement], 2009, *Le dispositif des certificats d'économies d'énergie*, Mémento du club C2E
- Axsen, J., D. C. Mountain, M. Jaccard, 2009, "Combining stated and revealed choice research to simulate the neighbor effect: The case of hybrid-electric vehicles", *Resource and Energy Economics*, 31(3): 221-238
- Ayres, I., S. Raseman, A. Shih, 2009, "Evidence from two large field experiments that peer comparison feedback can reduce residential energy usage", *NBER Working Paper*, No. 15386
- Baudry, P., D. Osso, 2007, "Uncertainties in the evaluation of energy savings potential", *Proceedings of the ECEEE summer study*, 583-588
- 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 [U.K. Building Research Establishment], 2005, *Costing sustainability: How much does it cost to achieve BREEAM and EcoHomes ratings?*, Information paper
- Cayla, J.-M., B. Allibe, M.-H. Laurent, 2010, "From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption", *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*
- Cayre, E., B. Allibe, M.-H. Laurent, D. Osso, 2011, "There are people in the house!: How misleading for energy policies are the results of purely technical analysis of residential energy consumption", *Proceedings of the ECEEE Summer Study*, Paper 7-277
- 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

- CITEPA [Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique], 2010, *Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et du Protocole de Kyoto*
- Crassous, R., J.-C. Hourcade, O. Sassi, 2006, "Endogenous structural change and climate targets modeling experiments with Imacim-R", *The Energy Journal*, Special Issue: Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation, 259-276
- Crassous, R., 2008, « Modéliser le long-terme dans un monde de second rang : application aux politiques climatiques », Thèse de doctorat, AgroParisTech
- Darby, S., 2006, *The effectiveness of feedback on energy consumption: A review for DEFRA of the literature on metering, billing and direct displays*, Environmental Change Institute, University of Oxford
- EIA [U.S. Energy Information Administration], 2008, *Annual Energy Outlook 2008*
- Finon, D., 2004, « Prospective énergétique et modélisation de long terme: Les voies de progression méthodologique », *Revue de l'énergie*, 553:5-20
- Fischer, C., 2008, "Feedback on household electricity consumption: a tool for saving energy?", *Energy Efficiency*, 1(1):79-104
- Gillingham, K., Newell, W.A. Pizer, 2008, "Modeling endogenous technological change for climate policy analysis", *Energy Economics*, 30(6): 2734-2753
- 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
- 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
- Jaccard, M., M. Dennis, 2006, "Estimating home energy decision parameters for a hybrid energy-economy policy model", *Environmental Modeling and Assessment*, 11(2):91-100
- Jacquot, A., 2007, « La demande potentielle de logements: un chiffrage à l'horizon 2020 », *Notes de synthèse du SESP*, n°165, 41-48
- Jaffe, A.B., R.N. Stavins, 1994, "Energy-efficiency investments and public policy", *The Energy Journal*, 15(2):43-65
- 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
- Lagandré, E., D. Marchio, P. Rivière, M. Jorio, 2010, « Quels niveaux de performance pour la rénovation énergétique ? Un détour conceptuel pour éclairer les débats », *Revue de l'énergie*, 598:392-397
- 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
- Levine, M., D. Ürge-Vorsatz, K. Blok, L. Geng, D. Harvey, S. Lang, G. Levermore, A. Mongameli Mehlwana, S. Mirasgedis, A. Novikova, J. Rilling, H. Yoshino, 2007: Residential and commercial buildings. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Marchal, J., 2008, *Modélisation des performances thermiques du parc de logements*, Rapport de l'ANAH, <http://www.anah.fr/nos-publications/etudes/pdf/rapport_performances_energetiques.pdf>
- 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
- 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
- MEEDDM [Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer], 2010, *La fiscalité environnementale prend son essor*
- Nadel, S., 2002, "Appliance and equipment efficiency standards", *Annual Review of Energy and Environment*, 27:159-192
- 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, Paris: La Documentation française
- Rivers, N., M. Jaccard, 2005, "Combining top-down and bottom-up approaches to energy-economy modeling using discrete choice methods", *The Energy Journal*, 26(1):83-106
- Sartori, I., B.J. Wachenfeldt, A.G. Hestnes, 2009, "Energy demand in the Norwegian building stock: Scenarios on potential reduction", *Energy Policy*, 37(5):1614–1627
- Sassi, O., 2008, « L'impact du changement technique endogène sur les politiques climatiques », Thèse de doctorat, Université Paris-Est
- 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
- Scott, S., 1997, "Household energy efficiency in Ireland: A replication study of ownership of energy saving items", *Energy Economics*, 19(2):187-208
- SGFGAS [Société de gestion du fonds de garantie de l'accès sociale à la propriété], 2010, *Bilan statistique des éco-prêts à taux zéro émis en 2009*
- Sorrell, S., J. Dimitropoulos, M. Sommerville, 2009, "Empirical estimates of the direct rebound effect: A review", *Energy Policy*, 37(4):1356-1371
- 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
- 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

- Tessier, L., 2008, « La structure et les métiers de la construction guident son innovation », Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, *SESP en bref*, n°24
- TNS Sofres, 2006, *Maîtrise de l'énergie, 2e 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
- Traisnel, J.-P., D. Joliton, M.-H. Laurent, S. Caffiaux, A. Mazzenga, 2010, *Habitat Facteur 4. Etude d'une réduction des émissions de CO₂ liées au confort thermique dans l'habitat à l'horizon 2050*, Les cahiers du CLIP, n°20
- Ürge-Vorsatz, D., A. Novikova, 2008, "Potentials and costs of carbon dioxide mitigation in the world's buildings", *Energy Policy*, 36(2):642-661
- Weiss, MM. Junginger, M.K. Patel, K. Blok, 2010, "A review of experience curve analyses for energy demand technologies", *Technological Forecasting & Social Change*, 77(3):411-428
- Wing, I.S., 2006, "Representing induced technological change in models for climate policy analysis", *Energy Economics*, 28(5-6):539-562

Chapitre IV : Evaluation empirique des certificats blancs, instrument multifonctionnel de maîtrise de l'énergie⁴⁹

⁴⁹ Ce chapitre reprend la majeure partie d'un *working paper* diffusé par la *Fondazione Eni Enrico Mattei*. Il a donné lieu à deux articles en anglais soumis à des revues à comité de lecture. Le premier, révisé pour *Energy Efficiency* est résumé ici et restitué en annexe IV. Le second, soumis à *Ecological Economics*, constitue le cœur du chapitre.

Bien que le modèle du chapitre III complexifie le modèle du chapitre II, il n'en reprend pas toutes les avancées : la représentation des barrières qui affectent l'offre de technologies efficace reste élémentaire et les critères d'évaluation statique (coût-efficacité, efficience) ne sont pas estimés. De surcroît, les certificats blancs, dont la représentation stylisée constituait l'apport principal du modèle du chapitre II, ne sont pas modélisés. Cette absence tient au degré de complexité élevé de l'instrument par rapport aux autres politiques de maîtrise de l'énergie et appelle une analyse spécifique.

Tel qu'il a été introduit au chapitre I, le terme générique de « certificats blancs » désigne les dispositifs d'obligations échangeables d'économies d'énergie imposées aux opérateurs énergétiques, mis en œuvre en Grande-Bretagne depuis 2002, en Italie depuis 2005 et en France depuis 2006. Fondamentalement, cet instrument oblige les opérateurs énergétiques à remplir des objectifs quantifiés d'économie d'énergie en aidant les consommateurs finaux à investir dans les technologies efficaces. L'idée sous-jacente, empruntée aux programmes américains de *Demand-side management* (DSM, cf. chapitre II), est de mobiliser les relations commerciales qui unissent ces acteurs pour exploiter le gisement considérable d'économies d'énergie des secteurs « diffus », comme le bâtiment résidentiel et tertiaire. Toutefois, dans le contexte des marchés européens de l'énergie – supposés dé-verticalisés et libéralisés en application des directives européennes⁵⁰ – dans lequel elle prend place, l'obligation d'économies d'énergie vient en contradiction avec le métier de vente d'énergie. Afin de surmonter cette contradiction, et selon la logique de marché qui influence de façon croissante la définition des politiques climatiques, des mécanismes de flexibilité sont associés à l'obligation, comme l'échange d'économies d'énergie certifiées entre opérateurs obligés. De tels mécanismes doivent permettre de minimiser le coût global d'atteinte des objectifs et d'intégrer l'offre de service d'efficacité énergétique au modèle d'affaires de la fourniture d'énergie (Eyre *et al.*, 2009 ; Langniss et Praetorius, 2006).

La flexibilité qui caractérise les dispositifs de certificats blancs autorise les opérateurs énergétiques à suivre des stratégies très différentes pour atteindre leur objectif. De plus, le degré effectif de libéralisation des marchés de l'énergie varie selon les pays, de telle sorte que chaque dispositif se développe dans un environnement institutionnel spécifique. Flexibilité et environnement institutionnel créent donc une forte variabilité dans l'architecture et le fonctionnement des dispositifs nationaux, en termes d'éventail de technologies encouragées, de services proposés aux consommateurs et d'importance accordée aux mécanismes de marché (Lees, 2005, 2008 ; Pavan, 2008 ; Bodineau et Bodiguel, 2009). Si tant est qu'elle soit validée par l'expérience, la représentation stylisée proposée au chapitre II est insuffisante pour analyser cette diversité de pratiques. Dans ce contexte, le présent chapitre compare les résultats des dispositifs britannique (période 2005-2008), italien (période 2005-2008) et français (période 2006-2009)⁵¹ en cherchant à répondre aux questions suivantes : *Quelles sont les composantes principales de chaque dispositif de certificats blancs ?*

⁵⁰ Directive 96/92/EC pour l'ouverture à la concurrence des marchés de l'électricité et directive 98/30/EC pour l'ouverture à la concurrence des marchés du gaz naturel.

⁵¹ Le dispositif britannique a été successivement dénommé EEC1 (*Energy Efficiency Commitment*, 2002-2005), EEC2 (*Energy Efficiency Commitment*, 2005-2008) et CERT (*Carbon Emissions Reduction Target*, 2008-2011). Le dispositif italien est dénommé TEE (*Titoli di Eficienza Energetica*, 2005-2012) et le dispositif français est dénommé CEE (*Certificats d'économies d'énergie*, 2006-2009). Des obligations d'économies d'énergie sont également imposées aux opérateurs énergétiques au Danemark, dans la région belge des Flandres et dans l'État australien de Nouvelle-Galles du Sud (Bertoldi et Rezessy, 2008). Ces dispositifs se distinguent des certificats blancs par l'absence de mécanismes de marché. Ils ne sont pas traités ici.

Quelles sont leurs performances en termes d'efficacité statique et dynamique ? Dans quelle mesure ces performances sont-elles influencées par l'environnement institutionnel dans lequel ils s'insèrent ?

Dans une perspective plus générale, les certificats blancs apparaissent comme le creuset de l'ensemble des problématiques abordées dans cette thèse. Leur étude apporte une dimension empirique à l'évaluation statique et dynamique des instruments de maîtrise de l'énergie. En outre, elle parachève l'exploration du système technico-économique du bâtiment résidentiel en intégrant dans l'analyse l'organisation industrielle et l'environnement institutionnel (cf. Introduction, figure 1). Ce système d'utilisation de l'énergie est appréhendé ici à la lumière du concept de « système technologique », élaboré par Carlsson et Stankiewicz (1991) pour analyser l'influence des réseaux d'acteurs et des règles institutionnelles qui les façonnent sur la diffusion des technologies⁵². La présente analyse s'appuie sur les principales catégories associées à ce concept : les *acteurs* impliqués ; les *réseaux*, en tant que relations marchandes ou non-marchandes permettant l'échange de biens ou d'information entre acteurs ; les *institutions*, en tant que normes et règles régulant les interactions entre acteurs (Jacobsson et Johnson, 2000 ; Jacobsson et Bergek, 2004).

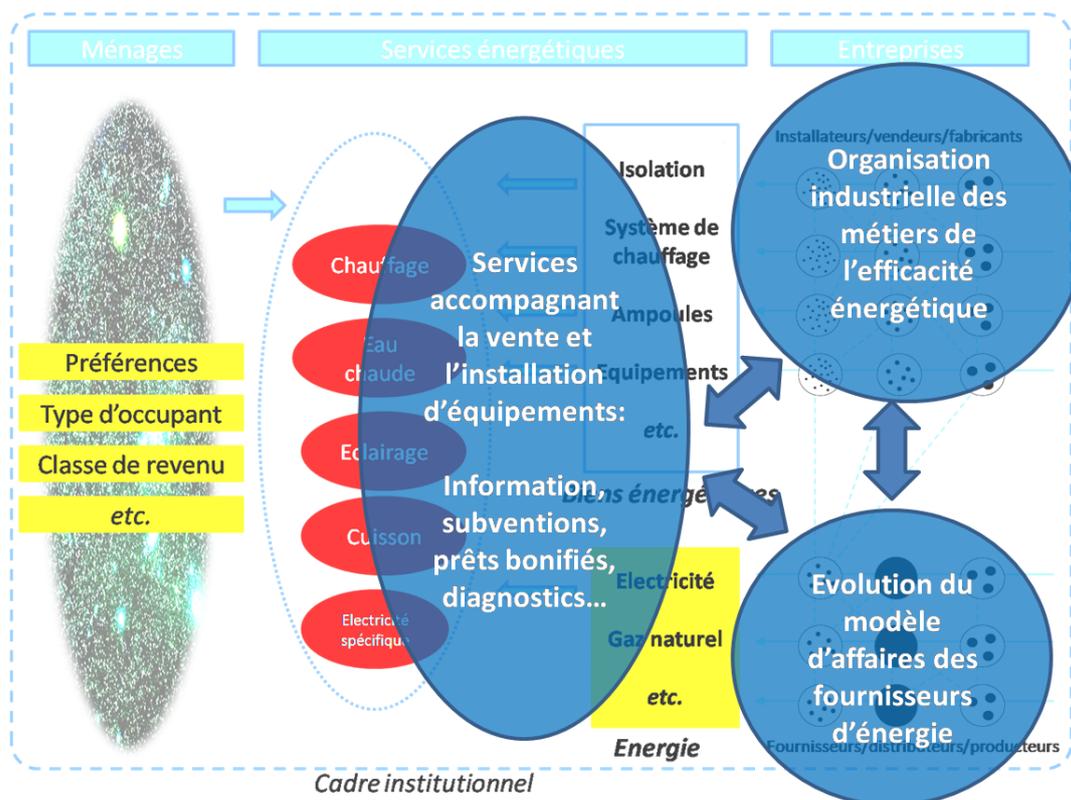


Figure 44: Ciblage du « Modèle » 3 par rapport au système technico-économique du bâtiment résidentiel

Ce chapitre est organisé de la façon suivante. La première partie énonce les propriétés des dispositifs de certificats blancs. La deuxième partie précise les spécificités de mise en œuvre dans chaque environnement institutionnel national. La troisième partie identifie les déterminants technologiques et institutionnels de l'efficacité statique de chaque dispositif. La quatrième partie analyse l'influence des options de flexibilité sur la dynamique des réseaux d'acteurs. La cinquième partie évalue les

⁵² Les auteurs définissent le système technologique de la façon suivante : « A dynamic framework of agents interacting in a specific/industrial area under a particular institutional infrastructure and involved in the diffusion of technology » (Carlsson et Stankiewicz, 1991, p.93)

incitations à l'efficacité dynamique créées par chaque dispositif et les blocages qui s'opposent à la transition des systèmes actuels vers un système d'utilisation plus rationnelle de l'énergie.

1 Propriétés des dispositifs de certificats blancs

1.1 Définition

L'objectif associé aux dispositifs de certificats blancs est d'*encourager les économies d'énergie dans les secteurs de consommation diffuse d'énergie*. Bien que cet objectif suppose à la fois une amélioration de l'efficacité et de la sobriété énergétiques, l'aide à l'investissement concentre l'essentiel des réalisations. De plus, les actions visent principalement le secteur du bâtiment résidentiel et tertiaire, même lorsque d'autres secteurs, comme l'industrie et les transports, sont couverts. Etant donné ces éléments de contexte, les trois principes suivants définissent les dispositifs de certificats blancs⁵³ :

- i. *Obligation de certificats* – Les dispositifs de certificats blancs imposent aux opérateurs énergétiques (dénommés ci-après les « obligés », qui sont les fournisseurs d'énergie dans le cas général, et les gestionnaires de réseaux de distribution d'énergie dans le cas particulier de l'Italie) de promouvoir les technologies efficaces en énergie. Des objectifs pluriannuels quantifiés, formulés en unités d'énergie à économiser (ou en tonnes de CO₂ évitées), sont attribués individuellement aux obligés en fonction de leur part de marché dans le secteur résidentiel. L'obligation est contraignante, dans la mesure où tout manquement à l'atteinte de l'objectif est pénalisé financièrement⁵⁴. Dans la situation idéale où les marchés de l'énergie seraient libéralisés et effectivement concurrentiels, la promotion de l'efficacité énergétique génère un coût qui peut être répercuté sur le prix de vente de l'énergie.
- ii. *Standardisation des opérations* – Des opérations standardisées sont définies pour réduire les coûts potentiellement élevés de contrôle et de vérification de l'atteinte des objectifs. Les économies d'énergie additionnelles par rapport à une situation de référence sont définies de façon *ex ante* à partir d'hypothèses de calcul conventionnelles (concernant les gains unitaires, la durée de vie moyenne des équipements, *etc.*). Cette méthode permet en outre de définir des droits de propriété sur les économies d'énergie, qui facilitent les transactions entre acteurs et permettent les échanges de certificats. Le « certificat blanc » constitue donc à la fois l'unité de mesure des économies d'énergie (libellé en kWh, tonne équivalent pétrole ou émissions de CO₂ évitées) et l'unité d'échange du dispositif. Des calculs spécifiques sont autorisés pour les actions techniquement complexes (courantes dans le secteur industriel) mais les opérations standardisées couvrent l'essentiel des gisements ciblés et sont supposées être le vecteur d'action principal.
- iii. *Options de flexibilité* – Les obligés sont autorisés à remplir leur obligation par différents moyens. Ils peuvent réaliser des économies d'énergie par eux-mêmes, recourir à un partenariat avec un tiers (fabricant, vendeur ou installateur d'équipement, société de service énergétique) ou encore nouer des relations de sous-traitance. S'ils n'atteignent pas leur

⁵³ Pour une définition exhaustive, voir Bertoldi et Rezessy (2008).

⁵⁴ Outre sa fonction de contrôle, la pénalité joue le rôle de signal économique. En particulier, une pénalité au montant prédéfini, comme c'est le cas en France, agit comme prix plafond (*buy-out price*).

objectif, ils peuvent acheter des économies d'énergie certifiées à un obligé ayant dépassé son objectif, ou à un acteur « éligible », qui n'est pas obligé mais autorisé sous certaines conditions législatives à participer au dispositif. Les relations entre obligés et éligibles peuvent prendre la forme d'un échange *ex post* de certificats blancs au prix du marché, ou d'un contrat de sous-traitance élaboré sur la base d'un prix du certificat blanc négocié *ex ante*.

L'hypothèse de marchés de l'énergie dé-verticalisés et libéralisés est inhérente à la définition de l'instrument. La concurrence doit stimuler la différenciation commerciale des obligés par l'intégration des services d'efficacité énergétique (Vine *et al.*, 2003).

1.2 Caractérisation théorique

Parmi les catégories d'instruments de politique climatique, les dispositifs de certificats blancs apparaissent comme une obligation de performance *en quantité*, qui fixe un plancher de réalisations, complété par des possibilités d'échange et des sanctions. Le contrôle *ex ante* des réalisations différencie l'instrument des dispositifs de *cap and trade* pour la pollution atmosphérique (SO₂ et de NO_x au Etats-Unis, CO₂ dans l'Union européenne) et des dispositifs de « certificats verts » pour la promotion des énergies renouvelables, qui reposent tous deux sur un contrôle *ex post* des réalisations.

Parmi les catégories d'instruments de maîtrise de l'énergie, les dispositifs de certificats blancs se distinguent en combinant à des degrés divers des formes « pures » d'instrument de marché et de réglementation. Du point de vue des obligés, l'instrument associe un mécanisme de marché et une obligation attribuée en fonction des volumes de vente. Du point de vue des consommateurs, il apparaît comme un dispositif hybride associant deux types d'incitations, une subvention à l'efficacité énergétique et une taxe sur l'énergie, comme l'ont montré le modèle du chapitre II et d'autres travaux (Bye et Bruvoll, 2008 ; Oikonomou *et al.*, 2008 ; Peerels, 2008 ; Sorrell *et al.*, 2009). Cette propriété est toutefois établie au prix de certaines abstractions qui ne sont pas nécessairement validées par l'expérience. D'une part, le mécanisme hybride suppose que les fournisseurs d'énergie ont toute latitude pour répercuter le coût de la subvention par une taxe sur leur prix de vente d'énergie ; en pratique, cette possibilité dépend des règles institutionnelles. De plus, il est établi dans un modèle où les bénéficiaires de la subvention et les contributeurs de la taxe sont confondus sous la forme d'un consommateur représentatif unique ; en pratique, la subvention bénéficie à un nombre réduit de consommateurs (souvent les plus riches) tout en étant financée par l'ensemble des clients des obligés.

2 Les différences de mise en œuvre des dispositifs nationaux

A partir de cette caractérisation commune, les dispositifs développent des architectures profondément différentes⁵⁵. Elles sont ici détaillées systématiquement selon les trois catégories qui définissent un « système technologique » : les acteurs impliqués, les relations qui les unissent et les règles définies par l'environnement institutionnel national (Jacobsson et Johnson, 2000 ; Jacobsson et Bergek, 2004).

⁵⁵ Des comparaisons exhaustives des dispositifs existants sont réalisées dans les travaux suivants : Bertoldi et Rezessy (2008), Oikonomou *et al.* (2007), Mundaca *et al.* (2008), Vine et Hamrin (2008) , Eyre *et al.* (2009).

2.1 Acteurs

2.1.1 Opérateurs énergétiques obligés

En Grande-Bretagne et en France, l'obligation est imposée aux *fournisseurs d'énergie*, qui peuvent mettre à profit leurs liens commerciaux avec les consommateurs finaux pour encourager les mesures d'efficacité énergétique. Alors qu'elle est limitée aux fournisseurs de gaz et électricité en Grande-Bretagne, l'obligation s'applique à tous les fournisseurs d'énergie domestique en France, y compris les vendeurs de fioul et les sociétés de chauffage urbain⁵⁶. En Italie, l'obligation est imposée aux *distributeurs d'électricité et de gaz*, qui sont des monopoles locaux ou régionaux. Ces acteurs n'ont pas d'intérêt commercial à œuvrer auprès de consommateurs d'énergie qui ne sont pas leurs clients, et donc peu d'incitation à développer des stratégies commerciales basées sur l'offre de services et d'équipements performants. Ce choix réglementaire fut motivé par la volonté de développer le marché des sociétés de services énergétiques, afin de contourner les tensions éventuelles entre les objectifs d'accroissement des ventes et de rationalisation des consommations (Pavan, 2008).

Le nombre d'obligés est lié au type d'acteur retenu et aux structures industrielles nationales. L'obligation concerne six fournisseurs d'électricité et de gaz en Grande-Bretagne, 30 distributeurs d'électricité et de gaz en Italie et plus de 2 500 fournisseurs d'énergie domestique en France, dont une grande majorité de petites entreprises de vente de fioul et une cinquantaine d'acteurs industriels de l'électricité et du gaz. En dépit d'un nombre élevé d'obligés, le nombre d'acteurs majeurs en France et en Italie est fortement réduit par la concentration des marchés (voir §2.3.1).

2.1.2 Consommateurs d'énergie

D'après la représentation hybride proposée au chapitre II, les consommateurs sont impliqués à la fois comme bénéficiaires et comme contributeurs du dispositif. En pratique, les subventions à l'efficacité énergétique sont concentrées sur un nombre limité de consommateurs, alors que tous sont censés les financer en payant une taxe sur l'énergie. Cette asymétrie du rôle des consommateurs soulève des questions d'équité, qui deviennent particulièrement critiques lorsque l'obligation est fixée à un niveau si élevé qu'elle exige d'exploiter les gisements coûteux d'économies d'énergie, comme l'isolation à grande échelle. Une telle situation accroît à la fois les dépenses sélectives de subvention des obligés et les taxes uniformes qui doivent les répercuter. Toutefois, ce problème d'équité peut être partiellement corrigé en orientant de façon précoce l'instrument vers la lutte contre la précarité énergétique. Ainsi, le dispositif britannique impose aux obligés de consacrer 50% de leurs actions aux ménages à faible revenu, notamment par l'isolation des logements sociaux⁵⁷.

2.1.3 Tierces parties

Les obligés, dont le cœur de métier n'inclut pas la vente d'équipements d'efficacité énergétique, nouent des relations avec des tierces parties compétentes, telles que les installateurs, vendeurs et fabricants d'équipements, ainsi que les professions d'audit et de conseil spécialisées dans l'énergie. En France et en Grande-Bretagne, ils œuvrent préférentiellement avec les filières d'équipement d'efficacité énergétique, organisées selon des structures variables. Par exemple, la filière de l'isolation – enjeu technologique majeur qui sera commenté par la suite – semble bien structurée en Grande-Bretagne autour de quelques acteurs dominants de l'industrie du bâtiment, qui peuvent agir à grande échelle. En revanche, elle est portée par une multitude de petites entreprises artisanales en

⁵⁶ Pour la période 2011-2013, l'obligation a été étendue aux vendeurs de carburant.

⁵⁷ Pour la période actuelle CERT, cette part a été fixée à 40%.

France. En Italie, les tierces parties sont principalement des petites sociétés de services énergétiques, dont beaucoup sont des filiales créées par les distributeurs obligés pour créer un lien avec la consommation finale (Pavan, 2008).

En Italie et en France, certaines tierces parties sont *éligibles*, c'est-à-dire qu'elles sont autorisées à promouvoir des opérations d'économies d'énergie de leur propre initiative et à vendre les certificats correspondants à des obligés, créant ainsi une offre supplémentaire de certificats blancs.

2.1.4 Pouvoirs publics

Dans le cas le plus fréquent, le ministère en charge de l'énergie fixe les règles du dispositif et l'autorité de régulation de l'énergie – *Office of Gas and Electricity Markets (OFGEM)* en Grande-Bretagne et *Autorità per l'energia elettrica e il gas (AEEG)* en Italie – l'administre. En France, ces deux tâches sont assurées par les directions ministérielles en charge du dispositif⁵⁸, sans que la Commission de régulation de l'énergie (CRE) ne soit impliquée.

Outre ces fonctions, il arrive que l'Etat contribue indirectement au dispositif *via* certaines interactions avec des mesures fiscales pour la maîtrise de l'énergie (voir §2.3.4).

	Grande Bretagne 2005-08	Italie 2005-08	France 2006-09
Opérateurs obligés	6 fournisseurs de gaz et électricité	30 distributeurs de gaz et électricité	2560 fournisseurs d'énergie (sauf carburant)
Métiers associés	Fabricants, vendeurs et entreprises du bâtiment, structurés autour de quelques acteurs dominants	Petites sociétés de service énergétique	Fabricants, vendeurs et installateurs d'équipements dans un secteur considéré comme artisanal
Autres	Consommateurs ; Etat et autorité de régulation ; collectivités locales (politique contre pauvreté)	Consommateurs ; Etat et autorité de régulation AEEG ; tiers éligibles	Consommateurs ; Etat ; tiers éligibles

Tableau 8: Les acteurs des dispositifs de certificats blancs

2.2 Réseaux d'acteurs

Les réseaux représentent l'ensemble des relations par lesquelles les acteurs interagissent et exploitent les options de flexibilité offertes par le dispositif. Dans cette optique, les opérations standardisées constituent un vecteur fondamental d'information et de transactions entre les obligés, les tierces parties et les consommateurs.

2.2.1 Périmètre des dispositifs

Les réseaux d'acteurs sont délimités par le périmètre sectoriel des dispositifs. En Grande-Bretagne, le dispositif ne couvre que le secteur résidentiel. Ailleurs, le champ d'application est étendu à tous les secteurs de consommation finale d'énergie, notamment le secteur industriel ; en France cependant, cette couverture exclut les installations soumises au système communautaire d'échange des quotas d'émission (SCEQE). En théorie, l'extension du champ d'application accroît la flexibilité du dispositif mais augmente les coûts administratifs de contrôle, en particulier si les opérations spécifiques se

⁵⁸ La Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC) pour la définition des règles et les Directions régionales de l'industrie, de la recherche et de l'environnement (DREAL) pour l'administration des dossiers.

développement de façon importante dans l'industrie (Bertoldi et Rezessy, 2008 ; Langniss et Praetorius, 2006 ; Mundaca *et al.*, 2008). Malgré ces différences de périmètre, le secteur résidentiel concentre la grande majorité des actions dans chaque pays (86% en Italie, selon AEEG, 2008 ; 87% en France, selon DGEC, 2009).

2.2.2 Relations « aval » entre obligés et consommateurs

Du point de vue des obligés, les relations « aval » avec les consommateurs finaux reposent d'abord sur le contrat de fourniture d'énergie. Les dispositifs de certificats blancs sont censés enrichir ce lien en développant des services d'aide à l'investissement dans les technologies efficaces, voire des services plus complets d'information et d'accompagnement de projet de rénovation énergétique (Bodineau et Bodiguel, 2009 ; Parag et Darby, 2009).

2.2.3 Relations « amont » horizontales ou verticales

Les relations « amont » font référence aux transactions qui lient les obligés à toute autre partie, qu'elle soit également obligée ou simplement éligible. D'après Radov *et al.* (2006), ces relations peuvent prendre différentes formes⁵⁹ :

- Les transactions *verticales* correspondent à une externalisation des actions des obligés vers des *acteurs* différents, *i.e.* aux compétences distinctes. Visant à diminuer le *coût de la fourniture d'efficacité énergétique*, elles peuvent prendre la forme de simples relations de sous-traitance ou d'échanges de certificats blancs avec des éligibles.
- Les transactions *horizontales* correspondent à l'échange de certificats blancs entre des obligés dont les *coûts de respect de l'obligation* sont différents. Elles visent à réduire le *coût global du dispositif* par égalisation des coûts marginaux.

Si l'analyse dominante tend à envisager les échanges de certificats blancs uniquement comme des transactions horizontales, cette distinction permet également, dans le cas où elles impliquent des acteurs de types différents, de les envisager comme des transactions verticales. En Italie et en France, les échanges de certificats blancs sont facilités par l'organisation de marchés de gré à gré, voire d'une bourse d'échange dans le premier cas. En Grande-Bretagne, les échanges de certificats blancs sont légalement autorisés, mais découragés en pratique par certaines contraintes administratives comme la nécessité d'un accord préalable du régulateur.

⁵⁹ En plus des deux types de transaction traités ici, les auteurs considèrent la mise en réserve des économies d'énergie comme une troisième forme de transaction « intertemporelle », visant essentiellement à réduire le risque. Bien que significative dans tous les pays (voir annexe IV, §3.2.1), cette composante n'est pas considérée ici comme pertinente pour analyser les questions d'organisation et, par conséquent, tenue en dehors de l'analyse.

	Grande Bretagne 2005-08	Italie 2005-08	France 2006-09
Périmètre	Secteur résidentiel; 37 actions standardisées	Tous secteurs ; 22 actions standardisées	Tous secteurs sauf les installations industrielles soumises au SCEQE ; 170 actions standardisées
Relations « amont » entre obligés et tierces parties	Transactions verticales ; pas d'échanges entre obligés	Prédominance des transactions verticales, principalement par des échanges sur la bourse et le marché de gré à gré	Transactions verticales ; échanges de gré à gré en très faibles quantités
Relations « aval » entre obligés et consommateurs	Incitations financières pour l'achat d'équipements efficaces	Coupons de réduction, information	Information de conseil, mise en avant du crédit d'impôt, incitations financières directes

Tableau 9: Les différents types de relations entre acteurs

2.3 Institutions

L'environnement institutionnel dans lequel s'insère chaque dispositif détermine les règles spécifiques qui vont structurer les réseaux d'acteurs et déterminer la nature des transactions ; il conditionne également les interactions avec les autres instruments de maîtrise de l'énergie.

2.3.1 Structure et régulation des marchés de l'énergie

La dé-verticalisation et l'ouverture complète des marchés énergétiques de gros et de détail ont été achevées en Grande-Bretagne à la fin des années 1990, en Italie en 2004 et en France en 2007. Toutefois, les différences considérables qui subsistent entre ces pays dans le degré de concurrence sur le segment de la fourniture d'énergie aux particuliers ont des conséquences importantes sur l'architecture et le fonctionnement des dispositifs.

En Grande-Bretagne, les actifs des anciens monopoles nationaux ont été dispersés et la fourniture de gaz et d'électricité aux particuliers est aujourd'hui pleinement concurrentielle, les parts de marché des six fournisseurs obligés variant de 11% à 32% (Lees, 2008, p.21). À l'inverse, en Italie et en France, les marchés de fourniture d'électricité et de gaz demeurent concentrés et difficilement accessibles à de nouveaux entrants. ENEL domine le marché de l'électricité et ENI domine le marché du gaz en Italie. En France, ces marchés sont dominés respectivement par EDF et GDF SUEZ ; l'extension de l'obligation aux fournisseurs de fioul domestique visait notamment à pallier ce problème de concentration.

En outre, le processus de libéralisation n'est pas complètement abouti en France puisque les prix de l'énergie correspondent aux tarifs par défaut du fournisseur historique, décrochés des prix du marché de gros et alignés sur le coût de production de l'électricité d'origine nucléaire.

2.3.2 Niveau quantitatif de l'obligation

Le montant d'économies d'énergie à atteindre est la principale composante réglementaire des dispositifs de certificats blancs. Les objectifs nationaux sont généralement exprimés en unités d'énergie économisée, cumulées pendant la durée de vie théorique de la mesure mise en place. Ces objectifs sont réévalués à chaque nouvelle période, en général multipliés par deux à trois tous les trois ans. L'expression des objectifs nationaux dans une métrique commune dans le tableau 10 (en kWh d'énergie finale économisée, cumulés et actualisés à 4% ; calculs détaillés à l'annexe IV, §2.2)

révèle que le dispositif britannique est le plus ambitieux et le dispositif français le plus modeste. Selon les estimations convergentes de Eyre *et al.* (2009) et Mundaca et Neij (2009), ces objectifs représentent respectivement 0,6%, 0,3% et 0,14% de la consommation totale d'énergie couverte par le dispositif en Grande-Bretagne, en Italie et en France.

2.3.3 Règles de recouvrement des coûts

L'organisation mise en place par les opérateurs énergétiques pour remplir leur obligation dépend de la latitude qui leur est accordée pour en répercuter le coût sur le prix de vente d'énergie. Dans un cadre normal de marché libéralisé, où les prix de l'énergie sont fixés librement, rien n'est censé s'opposer à une répercussion intégrale du coût de l'obligation. En pratique, une telle situation existe en Grande-Bretagne et sur le segment du fioul domestique en France. En revanche, en France, le coût de l'obligation n'est pas pris en compte par la CRE dans la définition des tarifs réglementés de l'électricité et du gaz aux particuliers. En Italie, les distributeurs d'énergie obligés sont des monopoles régulés et le coût de l'obligation est inclus dans le prix du service de distribution sous la forme d'une contribution tarifaire uniforme, fixée à 100€/tep lors de la période 2005-2008 (Pavan, 2008).

2.3.4 Co-existence avec d'autres instruments de politique publique

Le chapitre I a rappelé que les combinaisons d'instruments sont un fait récurrent de la mise en œuvre des politiques climatiques (Bennear et Stavins, 2007). Les certificats blancs, qui ne font pas exception à cette situation, coexistent sur les marchés de l'efficacité énergétique avec d'autres instruments, comme les subventions, les réglementations thermiques et l'information aux consommateurs (Child *et al.*, 2008 ; AIE et AFD, 2008)⁶⁰. Les dispositifs de certificats blancs sont généralement correctement coordonnés avec les réglementations thermiques, qui fournissent une base de référence dynamique pour définir l'additionnalité des économies d'énergie dans les calculs standardisés *ex ante* (Sorrell *et al.*, 2009). En France, les interactions qui découlent du cumul du dispositif avec le crédit d'impôt développement durable (CIDD) sont difficiles à anticiper : si un effet d'aubaine important est à craindre, la présence simultanée des deux instruments peut accélérer la diffusion de technologies efficaces dont la part de marché est encore faible (Monjon, 2006).

⁶⁰ Les dispositifs de certificats blancs interagissent également sur les marchés de l'énergie avec le SCEQE et les politiques de promotion des énergies renouvelables, telles que les tarifs de rachat en France et les obligations de certificats « verts » en Grande-Bretagne et en Italie. La mise en place de ces politiques est justifiée par des objectifs de décarbonisation et de réduction de l'intensité énergétique complémentaires. Ces interactions ne sont pas traitées dans le présent chapitre ; pour une analyse approfondie, voir Bye et Bruvoll (2008), Farinelli *et al.* (2005), Oikonomou *et al.* (2008) et Sorrell *et al.* (2009).

	Grande Bretagne 2005-08	Italie 2005-08	France 2006-09
Régulation des marchés de l'énergie	Marchés de l'électricité et du gaz dé-verticalisés et concurrentiels	Marchés de l'électricité et du gaz dé-verticalisés, mais concentrés	Marchés de l'électricité et du gaz dé-verticalisés, mais très concentrés ; marchés du fioul atomisés
Niveau de l'obligation	64 TWh/an	48 TWh/an	18 TWh/an
Règles de recouvrement des coûts	Répercussion dans les prix de l'énergie fixés librement	Coût financé par une contribution au tarif de distribution, d'un montant fixe de 100€/tep	Prix de l'énergie régulés sans intégration des coûts de l'obligation pour l'électricité et le gaz ; prix libres pour le fioul
Politiques coexistantes	Réglementation thermique Programme "Warmfront", destiné à la lutte contre la pauvreté énergétique	Réglementation thermique Exemptions d'impôt pour les mesures d'efficacité énergétique	Réglementation thermique Crédit d'impôt pour les mesures d'efficacité énergétique

Tableau 10: Les différentes règles institutionnelles

3 Efficience statique

La partie qui suit évalue les performances des dispositifs britannique et français sur les dernières périodes réglementaires achevées, à la lumière des critères fondamentalement « statiques » de coût-efficacité et d'efficience. Elle propose également une interprétation des déterminants techniques et institutionnels de ces performances. Cette partie est développée à l'annexe IV.

3.1 Analyse coût-bénéfice

L'évaluation des coûts du dispositif s'appuie sur la distinction entre coûts directs et indirects introduite au chapitre II et utilisée par Lees (2005, 2008) pour l'évaluation du dispositif britannique. Les coûts directs correspondent au coût de l'efficacité énergétique additionnelle par rapport à la situation de référence : ils prennent en compte l'intégralité du coût des technologies dans les cas d'investissement « de rationalisation », comme c'est le cas de l'isolation, et le surcoût par rapport à la technologie moyenne du parc ou du marché dans les cas d'investissement « de renouvellement », comme c'est le cas pour les systèmes de chauffage. Les obligés contribuent aux coûts directs en offrant des incitations financières ; la part restante de l'investissement est financée en propre par le client, avec l'aide éventuelle d'autres acteurs, comme les gestionnaires de logements sociaux en Grande-Bretagne, ou l'Etat en France, en tant que bailleur du crédit d'impôt. Les coûts indirects sont propres aux seuls obligés ; ils correspondent au coût de gestion des actions mises en œuvre pour satisfaire à l'obligation, telles que le développement de projets, le marketing et les formalités administratives nécessaires à la certification des économies d'énergie.

Les bénéfices sociaux générés par les dispositifs incluent la réduction de la facture énergétique des consommateurs et les émissions de CO₂, évitées. Ils sont calculés à partir des économies d'énergie réalisées en suivant les anticipations communément admises des prix de l'énergie et les valeurs tutélaires nationales du carbone (Quinet *et al.*, 2008 ; DECC, 2010).

	Grande Bretagne 2005-08	France 2006-09	Italie 2005-08
Coûts			
Coût direct pour les obligés (M€)	1 085	74	216
Coût indirect pour les obligés (M€)	195	136	-
Coût pour les consommateurs (M€)	325	504	-
Coût porté par les autres acteurs (M€)	153	1 305	-
COÛTS TOTAUX (M€)	1 758	2 019	-
Bénéfices			
Economies d'énergie finale (TWh)	192	54	193
Valeur monétaire des économies d'énergie (M€)	13 020	4 320	16 905
Réductions démissions de CO ₂ (Mt)	72,6	20,0	64,5
Valeur monétaire central des réductions d'émission (M€)	7,686	921	-
BENEFICES TOTAUX (M€)	20 702	5 241	-
Bénéfices sociaux nets, hors réductions d'émission (M€)	11 262	2 301	-
Bénéfices sociaux nets, réductions d'émission incluses (M€)	18 948	3 222	-
Coût-efficience, hors émissions (€ gagné par € dépensé)	7,41	2,14	-
Coût-efficience, émissions incluses (€ gagné par € dépensé)	11,78	2,60	-
Coût-efficacité (c€ dépensé par kWh économisé)	0,91	3,74	-
Coût unitaire pour les obligés (c€ dépensé par kWh économisé)	0,67	0,39	0,11

Tableau 11: Coûts et bénéfices des dispositifs de certificats blancs

L'évaluation des coûts et bénéfices des dispositifs britannique et italien s'appuie sur des données collectées dans la littérature (Lees, 2008 ; Pavan, 2008 ; Eyre et al., 2009 ; Bertoldi et al., 2010). L'évaluation des coûts et bénéfices du dispositif français a été réalisée par le CIRED et l'ADEME à partir d'un atelier d'échanges réunissant les trois principaux obligés français (EDF, GDF SUEZ et Ecofioul, l'association professionnelle qui réunit les vendeurs de fioul domestique ; ces acteurs supportent respectivement 56%, 27% et 10% de l'obligation de totale, soit 48 des 54 TWh). Ces calculs sont détaillés à l'annexe IV.

Le rapport coût-efficacité estimé est de 0,91 c€ par kWh économisé en Grande-Bretagne et de 3,74 c€ par kWh économisé en France. Ces valeurs sont jusqu'à dix fois inférieures aux prix de l'énergie dans le premier cas et légèrement en dessous dans le second⁶¹. En termes d'efficience, les deux dispositifs génèrent des bénéfices sociaux nets qui s'élèvent respectivement à 19 milliards d'euros et 3 milliards d'euros. Ce résultat rejoint celui d'autres études (Eyre et al., 2009 ; Mundaca et Neij, 2009) et il n'est pas remis en cause si les bénéfices environnementaux sont exclus de la balance. Les

⁶¹ Cette comparaison est basée sur des prix de référence de 13,94 c€/kWh pour l'électricité et 3,7 c€/kWh pour le gaz en Grande-Bretagne, et de 9,4 c€/kWh pour l'électricité et 4,4 c€/kWh pour le gaz en France (données: Eurostat, 2008).

coûts du dispositif italien exposés au tableau 11 sont simplement évalués comme le montant de l'obligation valorisé au prix moyen des échanges de certificats blancs de 60€/tep. Même si elle n'est pas calculée ici pour cause de données incomplètes, la balance coût-bénéfice paraît largement positive, résultat confirmé par l'Autorité qui administre le dispositif (Pavan, 2008).

Au-delà de ce constat général d'efficience, les différences qui s'observent entre pays doivent être analysées en fonction des composantes techniques et institutionnelles de chaque dispositif.

3.2 Déterminants techniques de l'efficience statique

Dans chaque pays, les réalisations sont dominées par des mesures d'efficacité énergétique bien identifiées : l'isolation en Grande-Bretagne (75% des réalisations), l'installation de lampes fluo-compactes en Italie à (64%), et le changement de système de chauffage au profit de chaudières à condensation et de pompes à chaleur électriques en France (68%). En première analyse, la flexibilité prêtée à l'instrument devrait pourtant conduire les obligés à se concentrer dans tous les pays sur les mesures d'isolation, reconnue comme le gisement d'économies d'énergie le plus volumineux et le plus rentable dans les pays développés par de nombreuses études *bottom-up* (Ürge-Vorsatz et Navikova, 2008 ; McKinsey & Company, 2009).

L'écart entre cette anticipation et les réalisations effectives s'explique par la variété architecturale des bâtiments à isoler. En Grande-Bretagne, les maisons traditionnelles ont la spécificité de posséder des murs creux, dont la cavité peut être comblée par du matériau isolant. Cette technique d'isolation (*cavity wall insulation*) est peu onéreuse, occasionne peu de dérangement pour l'occupant du logement et peut être déployée à l'échelle d'un quartier. Au final, elle s'avère près de dix fois moins coûteuse⁶² que la technique plus conventionnelle de fixation de panneaux isolants aux murs (*solid wall insulation*), qui est la seule technique appropriée aux types architecturaux français et italiens. En conséquence, l'exploitation intensive du gisement de l'isolation des murs creux⁶³ est à l'origine des bonnes performances du dispositif britannique en termes de coût-efficacité et d'efficience. Toutefois, à mesure que le gisement s'épuise, les obligés commencent à investir les techniques d'isolation conventionnelles ; ce changement semble induire une forte augmentation de coût, comme l'attestent les observations les plus récentes (Purchas, 2009).

Quoique plus coûteuse qu'en Grande-Bretagne, l'isolation reste le gisement d'économies d'énergie le plus important en France (Baudry et Osso, 2007). Le fait qu'elle représente moins de 10% des économies d'énergie réalisées au cours de la première période 2006-2009 atténue l'efficience du dispositif par rapport à son homologue britannique. Plus généralement, le classement des réalisations effectives du dispositif français est largement déconnecté de leur ordre de mérite en termes de coût du kWh économisé, comme le montre le tableau 12. En Italie, les certificats blancs

⁶² Ces comparaisons de coûts sont développées à l'annexe IV. Une telle différence s'explique également par l'expérience plus ancienne des fournisseurs d'énergie britannique, qui ont pu explorer différents gisements et identifier les options les plus rentables lors du dispositif *Energy Efficiency Standard of Performance*. EESoP était une obligation de moyens à consacrer à l'efficacité énergétique imposée aux fournisseurs d'énergie, mise en œuvre en 1993 et remplacée en 2002 par le dispositif de certificats blancs, qui lui substitue une obligation de performance.

⁶³ D'autres gisements comme l'« électroménager blanc » (appareils de lavage et appareils frigorifants efficaces) ont été activement exploités lors de la période EEC1. De même, le marché des chaudières à condensation a atteint sa pleine maturité lors de la période EEC2, et certains marchés comme les téléviseurs numériques intégrés et les économiseurs de veille ont été transformés en profondeur grâce au dispositif (Lees, 2005, 2008).

sont crédités sur une période de cinq ans (à l'exception des mesures d'isolation, créditées sur huit ans), sans considération pour la durée de vie physique des mesures sous-jacentes. Cette disposition réglementaire n'encourage pas la réalisation de mesures à longue durée de vie, comme l'isolation, dont les gains sont calculés en Grande-Bretagne et en France sur des périodes de trente à quarante ans.

	<i>Part des économies d'énergie réalisées</i>	<i>Taux de crédit d'impôt</i>	<i>Coût unitaire (c€/kWh)</i>
Chaudière à condensation individuelle	22,5%	25-40%	6,4
Chaudière basse température individuelle	12,8%	15%	10,9
Chaudière à condensation collective	7,1%	25-40%	1,0
Pompe à chaleur air-air	6,9%	50%	10,9
Isolation de la toiture et des combles	5,8%	25-40%	1,9
Changement de fenêtre	4,6%	25%	18,2
Pompe à chaleur air-eau	4,0%	50%	10,0
Chaudière basse température collective	2,7%	15%	1,6
Appareil indépendant de chauffage au bois	2,6%	50%	7,0
Isolation des murs	2,3%	25-40%	4,8

Tableau 12: Mesures réalisées en France dans le secteur résidentiel (Source: DGEC, 2009)

En complément des considérations relatives au coût des gisements d'économies d'énergie, des considérations institutionnelles expliquent les différences de réalisations entre dispositifs.

3.3 Influence des règles institutionnelles sur les relations « aval »

Alors que les obligés britanniques supportent 73% du coût total du dispositif, à un coût unitaire de 0,67 c€ par kWh économisé, ces valeurs atteignent respectivement 10% et 0,39 c€/kWh pour leurs principaux homologues français. Ce résultat révèle une moindre propension des fournisseurs d'énergie français à l'usage de subventions directes pour inciter les consommateurs à investir dans l'efficacité énergétique. Il est corrélé aux règles de recouvrement des coûts décrites précédemment (§2.3.3).

En Grande-Bretagne, l'octroi de subvention aux consommateurs est le principal mécanisme par lequel les fournisseurs remplissent leur obligation. Ce mode d'action est favorisé par l'absence de régulation des prix de vente d'énergie, qui permet aux fournisseurs de répercuter le coût de leur obligation⁶⁴. De plus, la subvention peut apparaître comme un facteur de différenciation commerciale sur ces marchés effectivement concurrentiels. Lees (2008) évalue les dépenses moyennes des obligés à 9,7 € par client et par an, soit, au cas où elles sont intégralement transmises dans leur prix de vente, une hausse de la facture annuelle d'énergie de 1 à 2% par client.

⁶⁴ Ce coût est égal au coût de la subvention, le cas échéant, plus le coût des pertes de vente d'énergie.

Les mêmes raisons institutionnelles s'accompagnent des mêmes effets sur le segment du fioul domestique⁶⁵ en France, où les obligés, libres de fixer leur prix de vente, proposent des subventions conséquentes pour le remplacement de chaudière⁶⁶. A l'inverse, sur les marchés dominants de l'électricité et du gaz naturel, la persistance de tarifs régulés n'autorise pas la répercussion des coûts et entame la propension des fournisseurs à offrir des subventions, qui est le mode d'action le plus approprié pour exploiter les gisements coûteux d'économies d'énergie. Les obligés visent plutôt à minimiser ces dépenses en intégrant dans leur stratégie commerciale des services peu coûteux comme l'information, le conseil et l'accompagnement de projet.

La mise en œuvre d'une telle stratégie est facilitée par la superposition du dispositif avec le crédit d'impôt. Comme l'illustre le tableau 12, les dix mesures les plus réalisées sont toutes éligibles à des déductions fiscales couvrant 15 à 50% du coût d'investissement. La superposition des deux dispositifs semble avoir eu un effet mutuellement bénéfique, en stimulant particulièrement la pénétration des pompes à chaleur et des chaudières à condensation (Bodineau et Bodiguel, 2009). Alors que la contrainte de minimisation du coût de l'obligation amenait les fournisseurs à se concentrer sur les mesures les plus proches de leur cœur de métier, en particulier le remplacement de systèmes de chauffage, ils ont pu faire valoir l'argument du crédit d'impôt pour convaincre les consommateurs d'investir, avec l'appui de leurs partenaires installateurs traditionnels. En revanche, la superposition des deux dispositifs s'est avérée inefficace pour promouvoir l'isolation : les certificats blancs ne favorisent pas nécessairement le rapprochement des fournisseurs d'énergie avec cette catégorie d'installateurs, tandis que le crédit d'impôt ne couvre pas les coûts d'installation⁶⁷, qui constituent une part importante de l'investissement dans l'isolation.

En Italie, les coûts supportés par les distributeurs obligés sont remboursés par une contribution tarifaire des consommateurs au service de distribution. Cette disposition a généré des bénéfices privés considérables pour les obligés qui, jusqu'en 2009, percevaient une contribution d'un montant fixe de 100€/tep, alors qu'ils pouvaient acheter des certificats blancs à un prix moyen de 60 €/tep⁶⁸. Si le principe d'un remboursement à hauteur des dépenses engagées peut favoriser les mesures coûteuses, comme c'est le cas en Grande-Bretagne, dès lors que le niveau de remboursement est fixe, l'obligé a uniquement intérêt à minimiser son coût. En conséquence, les distributeurs italiens se sont concentrés sur les actions les plus élémentaires, comme les lampes basse consommation et les économiseurs d'eau chaude, en se contentant de distribuer des bons de réduction ou de gratuité, qui leur accordaient des certificats blancs sans condition de passage à l'achat du consommateur ni vérification de l'installation. L'épuisement de ces gisements de moindre coût, associé à la correction

⁶⁵ Les observations les plus récentes indiquent que ce mécanisme se produit également sur le segment nouvellement obligé de la vente de carburant, où le prix de vente est fixé librement : ainsi, des compagnies de grande distribution, obligées au titre de leur vente de carburant, offrent des subventions importantes à leur clientèle en magasin pour des mesures portant sur l'isolation et les systèmes de chauffage.

⁶⁶ Un tel comportement est également motivé par la nécessité de contrecarrer la baisse progressive de la consommation de fioul domestique face à la montée des préoccupations environnementales. Fait intéressant, les vendeurs de fioul, voyant dans le dispositif une occasion de redonner une forme de vigueur à leur marché, ont spontanément demandé à y participer en 2004.

⁶⁷ Cette lacune a été comblée par la loi de finances de 2009.

⁶⁸ Cette situation a généré des bénéfices privés importants pour les distributeurs obligés au détriment des consommateurs. Elle a conduit le régulateur à intervenir sur les marchés de certificats blancs, notamment en unifiant les certificats d'économies d'électricité et de gaz, dont les marchés étaient séparés. Le marché a réagi par une augmentation du prix moyen des certificats blancs, réduisant ainsi les bénéfices réalisés par les distributeurs (AEEG, 2008).

des incohérences réglementaires et à la baisse de la contribution tarifaire en 2008 sont certainement à l'origine des difficultés croissantes rencontrées par les distributeurs pour atteindre leurs objectifs annuels récents. Des mesures plus exigeantes sur le plan organisationnel ont commencé à se développer, comme des campagnes d'information et des programmes de formation d'installateurs (Pavan, 2008).

En définitive, une tendance commune importante émerge de l'analyse comparée des trois dispositifs : le respect de l'obligation s'effectue à des niveaux de coût-efficacité et d'efficience *favorables* mais pas nécessairement *minimaux* du point de vue social. En d'autres termes, les mesures mises en œuvre en priorité ne sont pas nécessairement les moins coûteuses pour les particuliers, les obligés et le budget public, mais les plus faciles à mettre en œuvre en termes organisationnels et les plus rémunératrices pour les obligés, compte tenu des structures d'incitation créées par l'environnement institutionnel. Les stratégies des obligés vers l'« aval » apparaissent influencées par les possibilités de recouvrement des coûts, définies par les règles d'administration des prix de l'énergie. A ce titre, le mécanisme hybride subvention-taxe proposé dans l'exercice théorique du chapitre II paraît valide, mais conditionné à la structure institutionnelle libéralisée qu'il prend pour hypothèse, comme c'est le cas en Grande-Bretagne. Dans les cas où la « taxe » est impossible, comme en France, ou constante quel que soit le niveau de réalisations finales, comme en Italie, la « subvention » laisse place à des actions peu coûteuses et plus faciles à mettre en œuvre sur le plan organisationnel, comme l'information ou la distribution de coupons gratuits, parfois soutenus par les instruments coexistant.

4 Les options de flexibilité dans la dynamique des réseaux d'acteurs

Lors des discussions préalables à la mise en œuvre des dispositifs, l'argument de « flexibilité » a été mis en avant par les pouvoirs publics pour convaincre les obligés des bénéfices qu'ils pourraient tirer des mécanismes de marché. Si ce principe a grandement façonné les dispositifs français et italien, il convient de s'interroger sur son importance effective : *Dans quelle mesure les échanges de certificats blancs apportent-ils de la flexibilité aux dispositifs ? Quelle est l'influence des options de flexibilité sur les relations « amont », i.e. les stratégies développées par les obligés à l'égard des entreprises d'efficacité énergétique (équipementiers, chaînes de distribution, installateurs, sociétés de service énergétique) ? Dans quelle mesure diffèrent-elles en fonction de la nature de l'acteur obligé, qu'il soit fournisseur ou distributeur d'énergie ?*

4.1 Malgré des échanges, un faible recours aux transactions horizontales

Le fort contraste d'activité des marchés de certificats blancs est l'un des résultats les plus évidents de l'analyse comparée des dispositifs : alors que les échanges ont été négligeables en Grande-Bretagne⁶⁹ et n'ont couvert que 4% des économies d'énergie réalisées en France, cette part a atteint 79 % en Italie (Eyre *et al.*, 2009). Deux facteurs principaux déterminent *a priori* l'importance de l'activité de marché. Le premier est la nature de l'obligé : alors qu'une obligation imposée aux fournisseurs

⁶⁹ Les seuls échanges qui ont eu lieu en Grande Bretagne concernent des économies d'énergie produites dans le cadre du *Warm Front* (fonds public destiné à la réduction de la pauvreté énergétique) et achetées en faibles quantités par certains obligés pour s'acquitter de leur obligation au cours de la période EEC1 (Mundaca *et al.*, 2008).

d'énergie, comme c'est le cas en Grande-Bretagne et en France, encourage les réalisations directes plutôt que les échanges, son application aux distributeurs d'énergie, étrangers au consommateur final, favorise l'externalisation des activités, notamment par l'achat de certificats blancs produits par des tiers éligibles. Le second facteur potentiel est l'existence de facilités d'échanges, qui caractérise les dispositifs français et italiens, allant jusqu'à l'organisation d'une bourse dans le dernier cas. La proximité des résultats des dispositifs britannique et français par rapport à leur homologue italien suggère que le premier facteur prime sur le second pour expliquer l'importance de l'activité de marché.

En Italie, la distance commerciale qui sépare la distribution d'énergie de la consommation finale, ajoutée au niveau élevé de la contribution tarifaire évoqué précédemment (*cf.* §3.3), ont amené les distributeurs obligés à maximiser leur marge en moissonnant le gisement des actions les moins additionnelles (lampes basse consommation et économiseurs d'eau chaude) et surtout en sous-traitant les mesures d'efficacité énergétique *via* l'achat de certificats blancs. Les échanges de gré à gré ont prévalu sur les échanges sur la bourse organisée, par nature plus risqués (28%). Les offreurs de certificats blancs sont dans une grande majorité des cas des petites sociétés de services énergétiques, souvent filiales du distributeur obligé contrepartie (34%), plus rarement sous-traitants liés par des contrats de long terme (17%). Dans la mesure où des acteurs non-obligés prennent part à ces échanges, ils doivent être interprétés comme des transactions verticales. Les réalisations en propre des distributeurs (21%) portent sur des mesures pour lesquelles ils ont une licence d'exploitation avec les municipalités, comme l'éclairage public et les réseaux de chaleur.

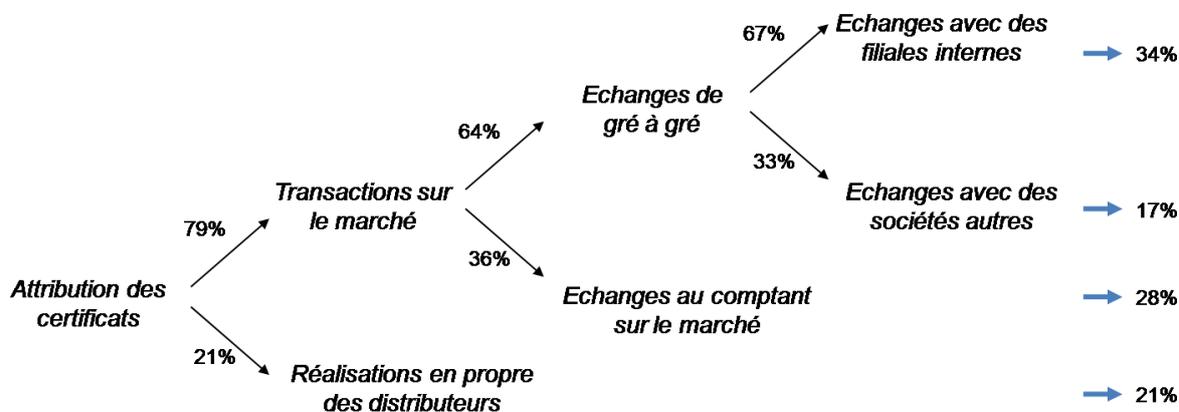


Figure 45: Mode de délivrance des certificats blancs en Italie en 2008 (Source: Pavan, 2008; Eyre *et al.*, 2009)

La quasi-absence d'échanges de certificats blancs – et donc de transactions horizontales – en France et en Grande-Bretagne relève d'un problème classique⁷⁰. Les premières estimations quantitatives suggèrent que l'hétérogénéité de coûts entre obligés, qui est la condition des transactions horizontales dans le cadre des instruments de marché (Newell et Stavins, 2003), y est relativement

⁷⁰ La même absence d'échanges s'observe aux Etats-Unis pour la première période des dispositifs d'*Energy Efficiency Resource Standards*, récemment mis en place dans le Massachusetts, la Pennsylvanie, le Vermont et le Connecticut (Loper *et al.*, 2010).

faible (cf. annexe IV, §6.1 ; Mundaca, 2007). Même dans le cas où elle serait plus importante, les fournisseurs d'énergie sont spontanément réticents à vendre les certificats blancs générés au-delà de leur objectif, qui pourraient aider leurs concurrents ou leur fournir des informations stratégiques, et préfèrent agir en propre pour consolider leurs relations commerciales (Mundaca *et al.*, 2008). Ces stratégies « autarciques »⁷¹ sont comparables à celles observées au cours des années 1990 avec le système des permis transférables de lutte contre la pollution atmosphérique par le dioxyde de soufre (Burtraw, 1996).

4.2 La prédominance des transactions verticales

La partie précédente a montré que la position distante des distributeurs italiens par rapport aux consommateurs finaux implique un recours aux transactions verticales, même si celles-ci prennent la forme d'échanges de certificats blancs, intuitivement plus apparentés à des transactions horizontales. En Grande-Bretagne et en France, la plus grande proximité des fournisseurs d'énergie avec le client final crée également une situation favorable aux transactions verticales avec les entreprises gravitant en amont, selon une relation mutuellement bénéfique : les obligés peuvent s'appuyer sur les installateurs pour diffuser l'information nécessaire au déclenchement de l'action⁷², tandis que les installateurs bénéficient d'un accès stratégique au portefeuille client des fournisseurs d'énergie. Dans tous les pays, les transactions verticales sont donc l'option de flexibilité communément privilégiée, selon des formes variées détaillées ci-après.

En Grande-Bretagne, les fournisseurs d'énergie s'associent étroitement aux entrepreneurs du bâtiment, aux promoteurs immobiliers, aux gestionnaires d'immeubles, aux fabricants et vendeurs d'équipements, et développent des partenariats avec des bailleurs sociaux et des organisations caritatives. Les mesures d'isolation, par exemple, ont été intégralement sous-traitées à la poignée d'entreprises qui dominent le secteur (cf. §2.1.3) ; pour s'attacher leurs services, les fournisseurs d'énergie se sont livrés à une compétition intense qui a contribué à l'égalisation des coûts individuels d'obligation (Eyre *et al.*, 2009 ; Lees, 2008 ; Mundaca *et al.*, 2008). De même, certains fournisseurs ont traité directement avec les fabricants d'équipements particulièrement innovants, comme les téléviseurs numériques et les économiseurs de veille électrique (Lees, 2008), qui bénéficiaient de calculs d'économies d'énergie bonifiés.

En Italie, le dispositif visait initialement, entre autres objectifs, au développement des entreprises de services énergétiques pour combler l'espace vacant entre les distributeurs d'énergie et les consommateurs finaux. Cet objectif n'a été que partiellement atteint, dans la mesure où les sociétés qui ont développé des compétences autonomes d'accompagnement de projet d'efficacité énergétique sont très rares. La majorité d'entre elles sont des filiales de distributeurs obligés, parfois créées dans le seul but de distribuer des coupons de réduction sur les lampes fluo-compactes aux consommateurs.

⁷¹ Cela n'empêche pas d'avoir, à la marge, un comportement classique d'optimisation. Un des principaux fournisseurs français déclare avoir acheté des certificats blancs en petite quantité afin d'avoir une référence de coût marginal. Bien que les prix soient très volatiles sur le marché français, ils s'établissent en moyenne à 0,32 c€/kWh, soit une valeur très proche du coût unitaire supporté par les obligés, estimé à 0,39 c€/kWh (cf. §3.1).

⁷² Mahapatra et Gustavsson (2008) montrent, par exemple, que les installateurs de chauffage constituent le principal canal d'information aux consommateurs d'énergie finale en Suède.

En France, les actions des fournisseurs obligés sont toutes réalisées par des installateurs recommandés à leur clientèle. Les fournisseurs se consacrent activement à la formation⁷³ et la labellisation des professionnels de la rénovation énergétique, afin de renforcer les réseaux de compétences. Cette stratégie résulte d'une convergence de besoins et d'opportunités. D'une part, les filières professionnelles sont encore artisanales, fragmentées, et doivent être structurées pour envisager de promouvoir l'efficacité énergétique à grande échelle (Lagandré, 2006). D'autre part, étant réticents à engager des dépenses élevées auprès des consommateurs (hors du segment du fioul), les fournisseurs trouvent en cette pratique des actions organisationnelles peu coûteuses et profitables à long terme.

En définitive, si les transactions verticales tendent à se généraliser, elles n'induisent pas toutes les mêmes changements organisationnels. Un de leurs aboutissants supposé, en contexte libéralisé, est la transformation du modèle d'affaires des opérateurs énergétiques vers des stratégies commerciales intégrant la fourniture de service énergétique (Hinnels, 2008). Ce processus semble engagé en France, où les obligés en concurrence se différencient par le conseil et l'information, comme le souligne un responsable de la branche commerce d'EDF (Poiroux, 2008). En Grande-Bretagne, en revanche, les fournisseurs d'énergie maintiennent une certaine séparation entre leur cœur de métier et la promotion de l'efficacité énergétique (Eyre *et al.*, 2009 ; Lees, 2008), en se concentrant sur des programmes qui nécessitent des compétences techniques plutôt que du *marketing*⁷⁴.

5 Les conditions d'efficience dynamique des dispositifs de certificats blancs

La partie 3 a établi l'efficience économique des dispositifs de certificats blancs sur des périodes pluriannuelles courtes et laissé entrevoir une hausse récente des coûts. La partie 4 a décrit les arrangements organisationnels développés par les obligés pour satisfaire leur obligation immédiate tout en envisageant la promotion de l'efficacité énergétique à plus long terme. La partie suivante évalue, à partir du critère d'efficience dynamique introduit au chapitre II, la capacité de l'instrument à accompagner sur le long terme le changement technologique et organisationnel nécessaire à l'avènement d'un « système technologique » d'utilisation plus rationnelle de l'énergie.

5.1 La nécessaire résolution des incohérences institutionnelles

La condition première d'efficience dynamique des dispositifs de certificats blancs est l'adaptation de leur environnement institutionnel aux structures d'incitations inhérentes à la forme canonique l'instrument. De ce point de vue, l'analyse a mis en évidence l'incohérence des règles de recouvrement des coûts de l'obligation qui prévalent en France et en Italie : en France, le coût de l'obligation *ne peut* être répercuté dans les tarifs réglementés de l'électricité et du gaz ; en Italie, il est *de fait* répercuté, mais à un niveau fixe ; dans les deux cas, le comportement d'optimisation qui s'ensuit vise à minimiser les dépenses et décourage la pratique de subventions, privant ainsi

⁷³ En 2008, 10 400 employés des 356 000 entreprises artisanales du bâtiment ont participé aux formations du programme FEEBAT, financé par EDF à 95% (CAPEB, 2008).

⁷⁴ Des observations récentes indiquent que certains obligés commencent à intégrer l'offre de services énergétiques (Phillips, 2011)

l'ensemble des acteurs du mécanisme permettant d'encourager les mesures les plus coûteuses. Une seconde incohérence tient, en Italie, à la définition des opérations standardisées dans un sens qui ne favorise pas les actions à longue durée de vie, comme c'est le cas de l'isolation.

La correction de ces incohérences est cependant amorcée. En Italie, le montant de la contribution tarifaire a été abaissé et davantage soumis aux performances individuelles des distributeurs en 2009 ; il s'est depuis établi en moyenne à 93,68€/tep. De plus, les calculs d'économies d'énergie devraient mieux prendre en compte la durée de vie physique des mesures à l'avenir (Pavan, 2011). En France, au cours des négociations qui visaient à définir les règles de la deuxième période du dispositif (2011-2013), les fournisseurs d'énergie ont opposé l'argument d'une hausse des tarifs réglementés à l'objectif d'obligation élevé voulu par l'Etat.

L'instrument doit enfin être finement coordonné avec les outils de maîtrise de l'énergie coexistant, de manière à limiter l'effet d'aubaine, tout en favorisant les interactions synergétiques, vecteurs d'efficacité dynamique. Cela suppose, en France, de limiter la superposition du dispositif avec le crédit d'impôt aux technologies les plus innovantes.

5.2 Le développement de nouvelles incitations

La revue de littérature du chapitre II (§2) a montré qu'en économie de l'environnement, les performances relatives des instruments réglementaires (*command-and-control*) et des instruments de marché (*market-based*) en termes d'efficacité dynamique étaient débattues (Taylor *et al.*, 2005). Cette question se pose de façon originale dans le cas des dispositifs de certificats blancs, qui combinent une obligation de performance et des possibilités d'échange entre obligés. Aux stades actuels, la quasi-absence de transactions horizontales – qui sont l'analogue des mécanismes de marché étudiés dans le domaine de l'environnement – implique que le fonctionnement de l'instrument est principalement déterminé par sa composante réglementaire. En reprenant la formule employée par Driesen (2003) dans le domaine de l'environnement, l'obligation peut être considérée comme une « incitation économique négative », qui stimule le changement technologique par la contrainte. Cette forme d'incitation amène les obligés à soutenir la diffusion des technologies au moindre coût, comme l'a révélé l'analyse de leurs dépenses, en collaborant avec des tiers qui possèdent les compétences appropriées.

Ainsi régi par sa composante réglementaire, l'instrument voit ses performances conditionnées aux anticipations des obligés sur la rigueur future de l'objectif (Taylor *et al.*, 2005). Le maintien annoncé des dispositifs britannique et français⁷⁵ jusqu'en 2020 encourage les obligés à s'investir durablement dans la diffusion des technologies d'efficacité énergétique. Le relèvement des objectifs à des niveaux ambitieux a un impact significatif sur l'activité, comme en témoignent la récente hausse des coûts supportés par les obligés en réponse au doublement de l'objectif britannique en 2008 (Purchas, 2009) et les difficultés accrues rencontrées par les distributeurs italiens pour remplir leur obligation, fortement réévaluée en 2008⁷⁶ (Pavan, 2011). Afin de faciliter cette transition, les obligés privilégient la mise en réserve des dépassements d'objectifs à la vente des certificats blancs excédentaires

⁷⁵ Le système italien a été prolongé jusqu'en 2012 et sera probablement étendu à 2020, compte tenu des efforts administratifs et institutionnels importants qui ont été consacrés par tous les acteurs.

⁷⁶ Entre 2005 et 2008, les objectifs annuels ont été systématiquement dépassés ; entre 2008 et 2009, ils ont été légèrement manqués ; pour l'année 2010, l'AEEG envisage qu'ils ne seront qu'à moitié atteints (Pavan, 2011).

(Mundaca et Neij, 2009). En France, l'objectif triennal a été récemment relevé (345 TWh pour la période 2009-2011) et la base d'obligation a été étendue aux vendeurs de carburant.

Sous réserve que les incohérences signalées précédemment soient surmontées, l'élévation des objectifs devrait s'accompagner d'une montée en puissance de la composante de marché de l'instrument. La recherche de nouveaux gisements devrait conduire les obligés à se rapprocher des tiers éligibles, comme les collectivités locales en France, par le biais de transactions verticales basées notamment sur l'échange de certificats blancs. De plus, l'accessibilité inégale des obligés aux différents gisements d'économie d'énergie devrait induire une différenciation de leurs coûts ; les bénéficiaires de l'égalisation des coûts marginaux par des transactions horizontales pourraient alors dépasser ceux d'une stratégie autarcique. A partir de simulations numériques appliquées à différents pays (Finlande, Royaume-Uni, Hongrie, Pays-Bas), Peerels (2008) montre ainsi que l'échange de certificats ne se produit que lorsque l'objectif couvre une part significative du gisement d'économies d'énergie, bien supérieure aux objectifs actuels. Afin d'accompagner l'émergence de ces nouvelles formes d'incitation, les facilités d'échanges devraient être généralisées.

5.3 Un dispositif d'accompagnement de la transition technologique

Les dispositifs de certificats blancs peuvent jouer un rôle majeur dans l'avènement d'un « système technologique » d'utilisation plus rationnelle de l'énergie. Ce processus repose théoriquement sur une transition du système d'une phase de « formation » à une phase d'« expansion », conditionnée aux aménagements institutionnels nécessaires (Jacobsson et Bergek, 2004).

Dans le domaine prépondérant de la rénovation énergétique des logements, une multitude de technologies, comme le double vitrage, l'isolation, les appareils de chauffage ou les équipements électriques et électroniques, composent le système. Durant la phase de formation, ces technologies sont commercialement disponibles, mais encore peu ou mal diffusées. L'expansion du système vers une forme d'utilisation rationnelle de l'énergie appelle une offre de rénovation globale⁷⁷, qui génère des synergies techniques en coordonnant l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment et le remplacement du système de chauffage. Le développement d'une telle offre suppose de rapprocher les marchés des différentes technologies⁷⁸, assis sur des compétences toujours cloisonnées. Les dispositifs de certificats blancs offrent différentes options de flexibilité pour satisfaire cet objectif.

En premier lieu, ils rapprochent des compétences par l'intermédiaire de transactions verticales entre les obligés et l'ensemble des acteurs de l'« amont ». Sous des formes variées, telles que les contrats de long terme, les co-entreprises, ou encore la labellisation des professionnels, ces transactions accompagnent l'exploitation de gisements d'économies d'énergie de complexité croissante. Chaque nouveau gisement exploité déclenche des apprentissages technologiques et organisationnels, qui réduisent le coût de la technologie diffusée. D'abord concentrés sur la stimulation de la demande des technologies disponibles en partenariat avec les installateurs, les obligés portent progressivement leurs efforts sur la stimulation de l'innovation en amont avec les fabricants. Ces deux stratégies sont vouées à être intégrées dans une démarche active de construction de filières.

⁷⁷ De telles offres commencent à être disponibles, comme l'offre « Optireno », portée conjointement par Banque Populaire (établissement bancaire), Isover (produits d'isolation) et GDZ SUEZ (fournisseur d'énergie).

⁷⁸ Cette étape peut également donner lieu à l'activation de marchés de niche ou d'« incubation » pour les technologies innovantes.

A mesure que les dispositifs prennent de l'ampleur et que les incohérences institutionnelles sont surmontées, l'utilisation des mécanismes de marché s'accroît. En créant des droits de propriété, tout en assurant la fongibilité d'économies d'énergie produites par différentes technologies, le « certificat blanc » apparaît en effet comme un « produit financier dérivé » propre à soutenir le rapprochement des marchés des différentes technologies d'efficacité énergétique.

En définitive, l'instrument doit s'inscrire dans la durée pour délivrer sa pleine efficacité statique et dynamique. Même si les environnements institutionnels tendent à s'homogénéiser, sous l'influence notamment des directives européennes, leur irréductible spécificité devrait maintenir des architectures de dispositif variées, qui favorisent de façon sélective les multiples fonctions de l'instrument.

6 Conclusion

Le deuxième chapitre de cette thèse a proposé une représentation stylisée des dispositifs de certificats blancs, qui demandait à être confrontée aux faits empiriques. En pratique, cette tâche est compliquée par la variabilité des formes prises par l'instrument – en réponse à la flexibilité qui le définit et la variété des environnements institutionnels dans lesquels il s'insère – et des fonctions qui en découlent. Dans la mesure où l'analyse des expériences européennes se prête peu à des conclusions d'ordre général, le présent chapitre a tenté d'identifier les composantes principales qui régissent le fonctionnement de chaque dispositif dans son environnement institutionnel. Le concept de « système technologique », fondé sur les notions d'institutions et de réseaux d'acteurs, a fourni un cadre méthodologique approprié à cette étude comparée ; il offre de plus un cadre prospectif qui permet d'envisager la performance future de l'instrument.

L'évaluation des dispositifs britannique, italien et français révèle qu'en termes d'efficacité statique, tous génèrent des bénéfices sociaux nets, dans un rapport de coût-efficacité (€/kWh) inférieur au prix des énergies. L'ampleur variable de ces bénéfices tient principalement aux différences d'objectifs et à l'hétérogénéité technique des gisements d'économies d'énergie entre pays. En termes d'efficacité dynamique, la transformation des marchés est évidente en Grande-Bretagne pour les technologies d'isolation et d'équipement électroménager, mais difficilement décelable en Italie et en France, où elle est entravée par des règles de recouvrement du coût de l'obligation inadéquates. Du point de vue organisationnel, le dispositif a favorisé les transactions verticales entre les obligés et les acteurs de l'amont, sous la forme de contrats de sous-traitance en Grande-Bretagne, de contrats de long terme organisant les échanges de certificats blancs en Italie, de partenariats commerciaux et d'accords de labellisation en France. La diversification des compétences des obligés vers un modèle d'affaire étendu à la fourniture de services énergétiques, qui est l'aboutissant supposé des dispositifs, n'est pas encore partout manifeste.

Ces interprétations empiriques amènent à amender la caractérisation théorique de l'instrument. Du point de vue des obligés, l'instrument associe une composante réglementaire et des mécanismes de marché. Aux stades actuels des dispositifs, la première composante prédomine. Du point de vue des consommateurs finaux, la validité du mécanisme hybride subvention-taxe proposé au chapitre II dépend de la conformité de l'environnement institutionnel réel au cadre libéralisé pris pour hypothèse ; hors de ce cadre, les obligés semblent privilégier les mesures peu coûteuses vers l'aval, comme l'information et l'accompagnement de projet, aux subventions. Même dans les cas où le

mécanisme hybride paraît valide, il soulève des questions d'équité non prises en compte dans le modèle : alors que le nombre de bénéficiaires de la subvention est limité, les contributeurs de la taxe sont indifférenciés. Dans leur grande variété, les dispositifs de certificats blancs apparaissent au final comme un instrument de maîtrise de l'énergie multifonctionnel, dont les composantes s'adaptent à l'environnement institutionnel. Dans la panoplie des instruments de maîtrise de l'énergie, ils se distinguent en mobilisant l'ensemble des acteurs de l'offre de technologies efficaces, quand les autres instruments ciblent davantage la demande.

Dans le cheminement plus général de cette thèse, ce chapitre a d'abord mis en évidence les contraintes organisationnelles (fragmentation des marchés et des compétences, faible structuration des filières) et institutionnelles (régulation des prix des énergies) qui pèsent sur l'offre de technologies d'efficacité énergétique ; il fait ainsi écho au chapitre I, qui rappelait que ces contraintes sont rarement prises en compte dans l'analyse conventionnelle des barrières aux économies d'énergie. De plus, il a montré l'intérêt de multiplier les critères d'évaluation : aux performances relativement faibles du dispositif français en termes d'efficacité statique, par exemple, répondent des bonnes performances d'efficacité dynamique, puisque la France apparaît comme le pays où l'évolution du modèle d'affaires des fournisseurs d'énergie est la mieux engagée. Enfin, ce quatrième chapitre a soulevé une nouvelle fois la question des interactions entre instruments, en des termes toujours plus complexes : non seulement les dispositifs de certificats blancs combinent les propriétés de la plupart des autres instruments de maîtrise de l'énergie (taxe, subvention, voire réglementation), mais en plus ils se superposent souvent aux formes « pures » de ces instruments.

Bibliographie

- AEEG [Autorità per l'energia elettrica e il gas], 2008, *Terzo rapporto annuale sul meccanismo dei titoli di efficienza energetica*
- AIE [Agence internationale de l'énergie] et AFD [Agence française pour le développement], 2008, *Promoting energy efficiency investments. Case studies in the residential sector*, Paris
- Baudry, P., D. Osso, 2007, "Uncertainties in the evaluation of energy savings potential", *Proceedings of the ECEEE summer study*, 583-588
- Benbear, L.S., R.N. Stavins, 2007, "Second-best theory and the use of multiple policy instruments", *Environmental and Resource Economics*, 37(1):111-129
- Bertoldi, P., S. Rezessy, 2008, "Tradable white certificate schemes: fundamental concepts", *Energy Efficiency*, 1(4):237-255
- Bertoldi, P., S. Rezessy, E. Lees, P. Baudry, A. Jeandel, N. Labanca, 2010, "Energy supplier obligations and white certificate schemes: comparative analysis of experiences in the European Union", *Energy Policy*, 38(3):1455-1469
- Bodineau, L., A. Bodiguel, 2009, "Energy Savings Certificates (ESC) scheme in France: initial results", *Proceedings of the ECEEE summer study*, 669-675
- Burtraw, D., 1996, "The SO₂ emissions trading program: cost savings without allowance trades" *Contemporary Economic Policy*, 14:79-94.
- Bye, T., A. Bruvoll, 2008, "Multiple instruments to change energy behavior: the emperor's new clothes?", *Energy Efficiency*, 1(4):373-386
- CAPEB [Confédération de l'Artisanat et des Petites Entreprises du Bâtiment], 2008, *Artisanat du bâtiment. Chiffres clés 2008*
- Carlsson, B., R. Stankiewicz, 1991, "On the nature, function and composition of technological systems", *Journal of Evolutionary Economics*, 1(2):93-118
- Child, R., O. Langniss, J. Klink, D. Gaudioso, 2008, "Interactions of white certificates with other policy instruments in Europe", *Energy Efficiency*, 1(4):283-295
- DECC [Department of Energy and Climate Change], 2010, *Carbon Appraisal in UK Policy Appraisal: A revised Approach*
- DGEC [Direction Générale de l'Énergie et du Climat], 2009, *Lettre d'information certificats d'économies d'énergie*, juillet
- Driesen, D.M., 2003, *The Economic Dynamics of Environmental Law*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- Eurostat, 2009, *Energystatistics – prices*:
<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/main_tables>
- Eyre, N., M. Pavan, L. Bodineau, 2009, "Energy company obligations to save energy in Italy, the UK and France: what have we learnt?" *Proceedings of the ECEEE summer study*, 429-439
- Farinelli, U., T.B. Johansson, K. McCormick, L. Mundaca, V. Oikonomou, M. Ortenvik, M. Patel, F. Santi, 2005, ""White and Green": Comparison of market-based instruments to promote energy efficiency", *Journal of cleaner production*, 13(10-11):1015-1026

- Hinnells, M., 2008, "Building market transformation: transforming markets from the inside", *BIEE 2008 working paper*
- Jacobsson, S., A. Bergek, 2004, "Transforming the energy sector: the evolution of technological systems in renewable energy technology", *Industrial and Corporate Change*, 13(5):815-849
- Jacobsson, S., A. Johnson, 2000, "The diffusion of renewable energy technology: an analytical framework and key issues for research", *Energy Policy*, 28(9):625-640
- 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
- Langniss, O., B. Praetorius, 2006, "How much market do market-based instruments create? An analysis for the case of "white" certificates", *Energy Policy*, 34(2):200–211
- Lees, E., 2005, *Evaluation of the Energy Efficiency Commitment 2002-05*, Report to DEFRA
- Lees, E., 2008, *Evaluation of the Energy Efficiency Commitment 2005-08*, Report to DECC
- Loper, J., S. Capanna, R. Sobin, T. Simchak, 2010, *Energy Savings Credits: Are Potential Benefits Being Realized?*, Alliance to save energy
- Mahapatra, K., L. Gustavsson, 2008, "An adopter-centric approach to analyze the diffusion patterns of innovative residential heating systems in Sweden", *Energy Policy*, 36(2):577-590
- McKinsey & Company, 2009, *Pathways to a Low-Carbon Economy, Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve*
- Monjon, S., 2006, "Interactions between tradable white certificates and tax credits—the French case". EuroWhiteCert Project, Work Package 5, Annex 7 Report.
- Mundaca, L., 2007, "Transaction costs of Tradable White Certificate schemes: The Energy Efficiency Commitment as a case study", *Energy Policy*, 35(8):4340-4354
- Mundaca, L., L. Neij, N. Labanca, B. Duplessis, L. Pagliano, 2008, "Market behaviour and the to-trade-or-not-to-trade dilemma in 'tradable white certificate' schemes", *Energy Efficiency*, 1(4):323–347
- Mundaca, L., L. Neij, 2009, "A multi-criteria evaluation framework for tradable white certificate schemes", *Energy Policy*, 37(11): 4457-4573
- Newell, R.G., R.N. Stavins, 2003, "Cost Heterogeneity and the Potential Savings from Market-Based Policies", *Journal of Regulatory Economics*, 23(1):43-59
- Oikonomou, V., M. Rietbergen, M. Patel, 2007, "An ex-ante evaluation of a White Certificates scheme in The Netherlands: A case study for the household sector", *Energy Policy*, 35(1):1147–1163
- Oikonomou, V., C. Jepma, F. Becchis, D. Russolillo, 2008, "White Certificates for energy efficiency improvement with energy taxes: A theoretical economic model", *Energy Economics*, 30(6):3044–3062
- Parag, Y., S. Darby, 2009, "Consumer-supplier-government triangular relations: Rethinking the UK policy path for carbon emissions reduction from the UK residential sector", *Energy Policy*, 37(10):3984-3992
- Pavan, M., 2008, "Tradable energy efficiency certificates: the Italian experience", *Energy Efficiency*, 1(4):257-266
- Pavan, M., 2011, *Distributor obligations and white certificates in Italy: developments and future plans*, Presentation at the European Workshop on experiences and policies on energy saving obligations and white certificates, Varese, January 27th

- Perrels, A., 2008, "Market imperfections and economic efficiency of white certificate systems", *Energy Efficiency*, 1(4):349–371
- Phillips, C., 2011, *The Carbon Emission Reduction Target and the Community Energy Savings target: latest results and developments with supplier obligations in the UK*, Presentation at the European Workshop on experiences and policies on energy saving obligations and white certificates, Varese, January 27th
- Poiroux, R., 2008, Interview in *Modèles d'organisation des services en réseaux et développement (urbain) durable, Flux*, n°74, pp.77-82
- Purchas, G., 2009, *UK energy supplier obligation*, Presentation at the European Commission Workshop on tradable certificates for energy savings (white certificates) and supplier obligation, Brussels
- 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, Paris: La Documentation française
- Radov, D., P. Klevnas, S. Sorrell, 2006, *Energy Efficiency and Trading. Part I: Options for Increased Trading in the Energy Efficiency Commitment*, Report to Defra
- Sorrell, S., D. Harrison, D. Radov, P. Klevnas, A. Foss, 2009, "White certificate schemes: Economic analysis and interactions with the EU ETS", *Energy Policy*, 37(1):29-42
- Taylor, M.R., E.S. Rubin, D.A. Hounshell, 2005, "Regulation as the mother of innovation: the case of SO2 control", *Law and Policy*, 27(2):348-378
- Ürge-Vorsatz, D., A. Novikova, 2008, "Potentials and costs of carbon dioxide mitigation in the world's buildings", *Energy Policy*, 36(2):642-661
- Vine, E., J. Hamrin, N. Eyre, D. Crossley, M. Maloney, G. Watt, 2003, "Public policy analysis of energy efficiency and load management in changing electricity businesses", *Energy Policy*, 31(5):405-430
- Vine, E., J. Hamrin, 2008, "Energy savings certificates: A market-based tool for reducing greenhouse gas emissions", *Energy Policy*, 36(1):467-476

Conclusion générale

La maîtrise de l'énergie, enjeu d'action publique discuté depuis bientôt quarante ans, connaît un nouvel élan avec le constat généralisé qu'elle recèle des opportunités de lutte contre le changement climatique considérables, notamment dans le secteur du bâtiment résidentiel (Levine *et al.*, 2007). Dans de nombreux pays, dont la France, elle est élevée au rang de priorité par la définition d'objectifs quantitatifs d'économies d'énergie ambitieux, auxquels sont associés des instruments d'intervention publique parfois innovants. Ces mesures politiques créent un besoin social d'évaluation économique, auquel cette thèse a cherché à répondre.

Cette finalité a été soumise à deux contraintes, dont la première s'est imposée d'elle-même. Il est en effet rapidement apparu que la question la plus immédiate – *comment représenter les instruments ?* – ne trouverait de réponses pertinentes que si elle était liée à une réflexion plus en amont sur les barrières qui s'opposent à la maximisation des économies d'énergies : *comment représenter les défaillances de marché et de comportement qui justifient la mise en œuvre d'instruments, et les obstacles qui en affectent l'efficacité ?* La seconde contrainte fut, en revanche, délibérée. Le choix a été fait de diversifier les méthodes d'analyse, motivé par l'idée que leur complémentarité donnerait davantage de consistance aux résultats, et offrirait une vision plus complète des tenants et aboutissants du « paradoxe de l'efficacité énergétique », problème fondamental de la maîtrise de l'énergie (Jaffe et Stavins, 1994). Ces différentes dimensions méthodologiques, récapitulées dans le tableau 14 ci-dessous, ont porté à la fois sur le *type d'approche* (modélisation quantitative ou observation qualitative, approche statique ou dynamique) et sur *l'objet d'étude* (une partie spécifique du système, un instrument particulier, une combinaison d'instruments). En contrepartie, la recherche de cohérence a conduit à appréhender les différents instruments et barrières au sein d'un *système* technico-économique unique, en l'occurrence le secteur du bâtiment résidentiel dans les pays industrialisés (figure 1) ; leur généralisation à d'autres secteurs de l'économie (bâtiment tertiaire, transport) et d'autres types de pays nécessite des adaptations du cadre d'analyse.

A la suite d'un cadrage théorique préalable, l'analyse s'est déroulée en trois temps, en intégrant à chaque étape un peu plus de la complexité du monde réel. Dans un premier temps, un *modèle microéconomique* a permis d'évaluer les performances statiques de coût-efficacité des différents instruments de maîtrise de l'énergie (taxe, subvention, réglementation, certificats blancs), en prenant en compte tous les acteurs du système (consommateurs, producteurs d'énergie et producteurs de biens d'efficacité énergétique) et l'effet rebond. Dans un deuxième temps, un *modèle hybride* a permis d'approfondir la description des technologies et des comportements et d'inscrire l'évaluation dans une perspective dynamique ; cette complexification a eu pour contrepartie de restreindre l'analyse aux déterminants de la demande, aux instruments les plus courants et au critère d'efficacité, « plus petit dénominateur commun » de l'évaluation. Dans un troisième temps, une *évaluation empirique comparée* des nouveaux dispositifs de certificats blancs a été menée. La complexité s'est encore accrue, autorisant une forme de synthèse de la démarche générale : l'instrument combine sous certaines conditions les propriétés des autres instruments ; l'utilisation du concept de « système technologique » a permis d'étendre l'analyse aux barrières liées aux organisations et aux institutions, et d'associer les critères d'efficacité statique et dynamique.

Le croisement des trois approches apporte des conclusions générales sur quatre points : (i) la représentation des barrières ; (ii) les critères d'évaluation ; (iii) le mode d'action et les performances des instruments ; (iv) les implications politiques.

(i) Le chapitre I a rappelé que les barrières aux économies d'énergie étaient empiriquement mal connues, et donc la plupart du temps ignorées des exercices de modélisation. La suite des travaux cherchait à aller à rebours de cette tendance, en proposant des représentations simples des barrières à partir des rares informations collectées. D'abord, *l'effet rebond* a été introduit dans les modèles des chapitres II et III en dissociant les comportements d'investissement (efficacité) et d'utilisation des technologies (sobriété). Les simulations réalisées convergent vers les valeurs fréquemment citées dans la littérature, qui situent l'effet rebond pour l'usage de chauffage entre 10 et 30% des économies d'énergie maximales attendues (Sorrell *et al.*, 2009). De plus, l'inclusion de coûts intangibles variables et de taux d'actualisation hétérogènes dans le modèle du chapitre III a permis une prise en compte élémentaire des *défaillances de marché et de comportement* qui s'opposent à la diffusion de l'efficacité énergétique, comme l'information imparfaite et les incitations clivées. L'amélioration de leur représentation est tributaire des progrès de l'économie comportementale, qui paraît la plus pertinente pour les expliquer. Enfin, le chapitre IV a montré que *l'offre de technologies* était également affectée par des contraintes négligées, comme la fragmentation des filières d'équipement d'efficacité énergétique. Ce phénomène a été pris en compte au chapitre III par des fonctions de progrès technique induit paramétrées à des rythmes « lents » de diffusion des technologies. Un modèle d'économie industrielle paraît nécessaire pour approfondir la question des changements organisationnels qui sous-tendent le progrès technique.

(ii) Les instruments ont été communément évalués par le critère relatif d'*efficacité*, défini par rapport à une cible d'économies d'énergie à atteindre. Ils devraient être idéalement évalués par le critère absolu d'*efficience* économique, qui fait référence à une situation d'optimum collectif. Les difficultés d'évaluation des *coûts* et *bénéfices* des instruments sont à l'origine de cet inaboutissement. Différentes notions de coût ont été mobilisées : le chapitre II l'envisage en termes purement économiques comme la somme des pertes de bien-être des agents (*cf.* figures 12 et 13) ; le chapitre III considère le surcoût d'investissement dans l'efficacité énergétique subi par les ménages (*cf.* figures 37 à 39) ; le chapitre IV a complété cette notion de coût « direct » par la notion de coût « indirect », qui couvre les dépenses de gestion induites par les politiques (*cf.* tableau 11). Le chapitre IV a montré que les bénéfices pouvaient être délimités sur des périodes précisément identifiées, grâce à des calculs standardisés *ex ante* ; le chapitre III a montré que sur des périodes plus longues, il était difficile de les circonscrire et de les mettre en balance avec les coûts ; dans tous les cas, ces calculs ne sont qu'une monétarisation des économies d'énergie, ne prenant pas en compte les effets sur l'emploi ni, plus généralement, le bien-être de l'ensemble des agents. L'approfondissement des effets d'équilibre général dans le modèle hybride pourrait permettre de combler l'écart entre efficacité et efficience ; la segmentation des ménages par classe de revenus pourrait également permettre d'aborder les questions d'*équité*. Malgré ces limites relatives aux critères d'évaluation statiques, cette thèse a permis de juger de l'impact des instruments sur le changement organisationnel et technologique par le critère d'*efficience dynamique*. Ce critère qualitatif demande à être étayé par quelques indicateurs quantitatifs.

(iii) L'identification du mode d'action des instruments et la comparaison de leurs performances, résumées dans le tableau 13, devrait contribuer à une analyse quantitative des instruments de maîtrise de l'énergie encore limitée, comme l'a montré la revue bibliographique du chapitre II. Par leur effet sur la sobriété des comportements, les *taxes sur l'énergie* apparaissent comme l'instrument de maîtrise de l'énergie le plus efficace, en dépit de performances modestes sur l'amélioration de l'efficacité énergétique. Dans l'ordre de mérite viennent ensuite les

réglementations sur l'efficacité énergétique qui, à défaut d'encourager la sobriété, ont l'impact dynamique le plus fort sur la diffusion de l'information et des technologies. Enfin, les *subventions à l'efficacité énergétique* ont un effet significatif sur la diffusion des technologies, compensé cependant par un large effet rebond. Par rapport à ces instruments « canoniques », les *dispositifs de certificats blancs* apparaissent comme l'instrument « total » de maîtrise de l'énergie, prenant différentes formes en fonction de l'environnement institutionnel dans lequel il s'insère : du point de vue des opérateurs énergétiques obligés, il constitue une réglementation ; du point de vue des consommateurs finaux, il associe une taxe et une subvention si les obligés sont libres de répercuter le coût de l'obligation dans leur prix de vente d'énergie, et comme un outil d'information dans le cas contraire. Dans la mesure où il encourage activement les acteurs privés à structurer les filières professionnelles, cet instrument apparaît comme un levier puissant de transformation de l'offre de technologies d'efficacité énergétique.

	Taxe sur l'énergie	Subvention à l'efficacité énergétique	Réglementation sur l'efficacité énergétique	Dispositifs de certificats blancs
Effet sur l'efficacité	+	++	+++	++
Effet sur la sobriété	++	-	-	0
Economies d'énergie nettes	+++	+	++	++
Efficience dynamique	+	++	+++	+++

Tableau 13: Synthèse des performances des instruments de maîtrise de l'énergie

L'évaluation des instruments accomplie ici soulève deux questions. La première porte sur les *interactions entre instruments*, qui sont la plupart du temps mis en œuvre simultanément. Le problème se complexifie lorsqu'aux instruments canoniques viennent s'ajouter les dispositifs de certificats blancs, eux-mêmes multifonctionnels. Il convient d'approfondir l'analyse économique des défaillances de marché et des obstacles à l'efficacité énergétique en présence, qui peuvent fournir des « conditions nécessaires » à la superposition d'instruments (Bennear et Stavins, 2007) ; au-delà de cette question, l'additivité des interactions doit être analysée pour déterminer l'efficacité des superpositions (Boonekamp, 2006). Cette thèse apporte une première réponse : compte tenu de l'effet rebond, une taxe sur l'énergie paraît nécessaire dans le bouquet des politiques de maîtrise de l'énergie. Les deux modèles utilisés ici pourraient apporter des réponses plus complètes, en évaluant systématiquement les interactions pour différents paramétrages des instruments. La seconde question soulevée par l'évaluation des instruments porte sur les *politiques d'information*. Leur absence ici peut surprendre, dans la mesure où elles correspondent à la fois à la prescription la plus immédiate et l'outil visiblement le plus efficace et efficient dans le domaine de la maîtrise de l'énergie, comme l'a révélé l'étude bibliographique du chapitre II. Cependant, l'information demeure difficile à quantifier en termes physique et monétaire, et l'évaluation de ses effets suppose un degré de représentation des mécanismes comportementaux supérieur à celui des modèles utilisés dans cette thèse.

(iv) Les différentes approches développées ici permettent d'éclairer les tensions existantes entre la définition d'objectifs quantitatifs ambitieux par les pouvoirs publics et la faiblesse des moyens mis en œuvre. L'évaluation du cas français a montré que la combinaison la plus complète des mesures existantes (crédit d'impôt et éco-prêt à taux zéro pour la rénovation énergétique) et potentiellement applicables (taxe carbone du rapport Quinet et obligation de rénovation) n'amènent les consommations d'énergie dans le bâtiment existant, sur le périmètre du chauffage, qu'à la moitié du

chemin imposé par les objectifs politiques proches (2020), alors que près d'un quart du chemin est déjà réalisé en situation de référence. Ce constat appelle à un redressement significatif de ces instruments, y compris des certificats d'économie d'énergie, et l'adjonction éventuelle de nouveaux outils visant plus spécifiquement la sobriété des comportements, qui apparaît comme un levier de maîtrise de l'énergie plus important que la diffusion des technologies.

En définitive, l'efficacité énergétique est, jusqu'à un certain point, génératrice d'efficacité économique ; au-delà, l'atteinte d'objectifs d'économies d'énergie extrêmement ambitieux sacrifie à l'efficacité économique (cf. figure 4). L'étude biologique de la cellule vivante offre une analogie qui nous paraît pertinente pour envisager cet arbitrage en pratique. Certains échanges cellulaires dits « actifs », indispensables à la vie de la cellule, semblent thermodynamiquement impossibles mais sont toutefois réalisés par couplage à un échange spontané, dit « passif », qui libère suffisamment d'énergie pour rendre possible l'autre échange impossible. C'est le cas, par exemple, lorsque la cellule, pour satisfaire ses besoins indispensables mais « actifs » en glucose, importe parallèlement un ion sodium, dont l'entrée dans la cellule est « passive » et suffisamment spontanée (Anselme, 1996). Dans la mise en œuvre des politiques de maîtrise de l'énergie, si l'objectif « vital » considéré est la maximisation des économies d'énergie, alors il doit être couplé à des mesures qui mobilisent d'autres « réservoirs » d'efficacité économique. Dans cette logique de « double-dividende », les objectifs ambitieux de maîtrise de l'énergie ne pourront être atteints que s'ils accompagnent la correction d'autres problèmes économiques et sociaux contemporains, dont les plus proches sont la pauvreté énergétique et le financement des retraites (Combet *et al.*, 2010).

Anselme, B., 1996, *L'énergie dans la cellule*, Paris: Nathan

Benear, L.S., R.N. Stavins, 2007, "Second-best theory and the use of multiple policy instruments", *Environmental and Resource Economics*, 37(1):111-129

Boonekamp, P.G.M., 2006, "Actual interaction effects between policy measures for energy efficiency – A qualitative matrix method and quantitative simulation results for households", *Energy*, 31(14):2848-2873

Combet, E., B. Perrissin Fabert, P. Quirion, 2010, « La contribution climat-énergie pour sauver les retraites », *Mediapart*, 24 novembre

Jaffe, A.B., R.N. Stavins, 1994, "The energy paradox and the diffusion of conservation technology", *Resource and Energy Economics*, 16(2):91-122

Levine, M., D. Ürge-Vorsatz, K. Blok, L. Geng, D. Harvey, S. Lang, G. Levermore, A. Mongameli Mehlwana, S. Mirasgedis, A. Novikova, J. Rilling, H. Yoshino, 2007: Residential and commercial buildings. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Sorrell, S., J. Dimitropoulos, M. Sommerville, 2009, "Empirical estimates of the direct rebound effect: A review", *Energy Policy*, 37(4):1356-1371

		Modèle 1	Modèle 2	« Modèle » 3
Approche méthodologique	Paradigme	Néo-classique	Second rang	Diffusion des technologies
	Type de modèle	Modèle microéconomique en équilibre partiel	Modèle hybride énergie-économie	Système technologique
	Technique de résolution	Statique comparative, optimisation	Dynamique réursive, simulation	Etude empirique comparée, observation
Comportement supposé des agents	Consommateur	Maximisateur d'utilité sous contrainte budgétaire ; Fonction de production ; arbitrage efficacité/sobriété	Fonctions de choix explicites, basées sur le calcul économique ; consommateurs hétérogènes (préférences, actualisation) ; coûts intangibles ; arbitrage efficacité/sobriété	[implication du consommateur assez lointaine dans les dispositifs de certificats blancs, cf. Eyre <i>et al.</i> (2009)]
	Producteur d'énergie	Maximisateur de profit	Non représenté explicitement	Optimisation sous contraintes (pressions aux économies d'énergie, prix parfois réglementés, évolution du modèle d'affaires) et opportunités (obligation comme « incitation économique négative », mécanismes de marché)
	Producteur d'efficacité énergétique	Maximisateur de profit	Progrès technique induit paramétré à un rythme « lent »	Filières fragmentées, structurées par l'intermédiaire des fournisseurs d'énergie
	Environnement institutionnel	Marchés de l'énergie et de l'efficacité énergétique libéralisés	Non pris en compte explicitement	Mouvement de libéralisation, achevé à des degrés divers selon les pays
Techniques d'évaluation des instruments	Coûts	Coût en bien-être : pertes d'utilité des consommateurs et réduction du profit des firmes	Coût direct : surcoût d'investissement dans les économies d'énergie par rapport à la situation de référence (décroissant sous l'effet du progrès technique)	Coût direct (coût total des investissements de « rationalisation » et surcoût des investissements de « renouvellement »). Coût indirect liés aux dépenses de gestion.
	Bénéfices	Bénéfices physiques non monétarisés (les quantités physiques d'énergie ne sont pas explicites)	Réduction des dépenses d'énergie valorisées au prix courant de l'énergie, réductions d'émissions de CO ₂ valorisées à la valeur tutélaire du carbone	Bénéfices cumulés actualisés calculés <i>ex ante</i> pour des opérations standardisées
	Critères d'évaluation	Coût-efficacité	Efficacité, efficience dynamique	Efficacité, efficience, efficience dynamique

Tableau 14: Récapitulatif des approches suivies

Annexe I : La maîtrise de l'énergie en France : tendances passées et enjeux futurs

Cette annexe illustre, à partir de l'examen du cas français, différents enjeux soulevés tout au long du chapitre II : les difficultés d'évaluation *ex post* des politiques, la définition des objectifs qualitatifs et quantitatifs, le choix *ex ante* des instruments d'intervention. Elle pose également le cadre national sur lequel portent les évaluations prospectives et rétrospectives réalisées dans les chapitres suivants. Elle reprend une partie d'un rapport remis au CGDD sur l'évaluation des mesures du Grenelle de l'environnement sur le parc de logements français.

1 Impact des mesures de maîtrise de l'énergie de 1974 aux années 2000

Mise en place à partir de 1974, la maîtrise de l'énergie fut 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 fut nettement corrélée au prix du pétrole brut importé (Martin *et al.*, 1998, p.22). L'attention fluctuante portée par les pouvoirs publics à la maîtrise de l'énergie a-t-elle permis de générer des économies par rapport à la tendance spontanée de la consommation résidentielle d'énergie ?

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).

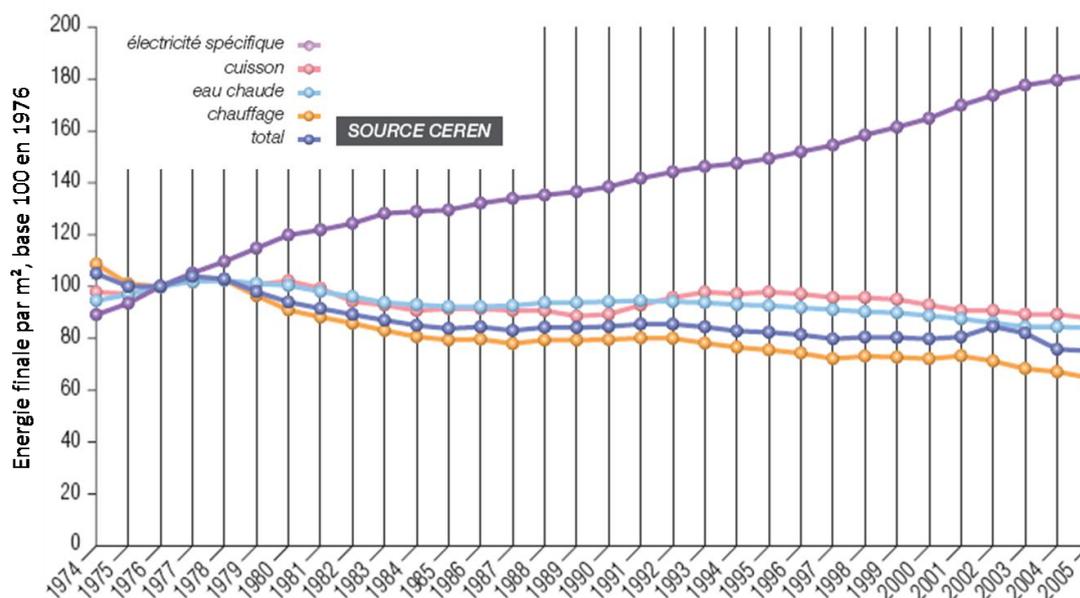


Figure 46: Evolution passée de la consommation unitaire d'énergie des logements, par usage (ADEME, 2008)

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 maîtrise de l'énergie. Elle est généralement attribuée à l'accroissement 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 maîtrise de l'énergie effective sur la période 1973-1998.

2 La nouvelle donne issue du Grenelle de l'environnement

2.1 Les années 2000 : la maîtrise de l'énergie 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 maîtrise de l'énergie. 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 « POPE⁷⁹ », 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 maîtrise de l'énergie 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 1⁸⁰ » et « Grenelle 2⁸¹ » et leur application est depuis suivie par les directions techniques du MEEDDM. L'élaboration de mesures supplémentaires est pilotée par le Plan Bâtiment Grenelle, présidé par Philippe Pelletier.

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 kWh/m²/an, soit un déplacement de la performance énergétique moyenne de la fourchette basse

⁷⁹ Loi n°2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique

⁸⁰ Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement

⁸¹ Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement

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. 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 2009⁸². Selon la logique 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 République⁸³, 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.

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

Girault, M., 2008, « Baisse des consommations d'énergies de chauffage dans les logements depuis 2001 », *Notes de synthèse du SESP*, n°170, 29-34

Leray, T., B. de la Roncière, 2002, *30 ans de maîtrise de l'énergie*, Association technique énergie environnement, Arcueil

Martin, Y., Y. Carsalade, J.-P. Leteurtois, F. Moisan, 1998, *La maîtrise de l'énergie : rapport d'évaluation*, Paris: La Documentation française

Traisnel, J.-P., 2001, *Habitat et développement durable. Bilan rétrospectif et prospectif*, Les cahiers du CLIP, n°13

⁸² Loi n° 2008-1425 du 27 décembre 2008 de finances pour 2009

⁸³ Discours de M. le Président de la République à l'occasion de la restitution des conclusions du Grenelle de l'Environnement, Palais de l'Élysée, Jeudi 25 Octobre 2007

Annexe II: Efficiency and distributional impacts of tradable white certificates compared to taxes, subsidies and regulations

Cette annexe détaille les équations, le calibrage et les résultats du modèle du chapitre II. Elle retranscrit un article publié dans la *Revue d'économie politique* :

Giraudet, L.-G., P.Quirion, "Efficiency and distributional impacts of tradable white certificates compared to taxes, subsidies and regulations", *Revue d'économie politique*, 2008(6), Volume 118, p. 885-914

L'annexe III propose une actualisation des calculs présentés ici au §2 et détaillés en annexe 2.

Introduction

Energy efficiency and energy savings, which had somewhat dropped from the political agenda following the counter-oil shock of the late 1980's, have recently raised more attention, especially due to climate change and security of supply concerns. Meanwhile, the end of state monopolies in the electricity and gas sectors has led to design new policy instruments to save energy.

In particular, energy efficiency certificates, dubbed Tradable White Certificates (TWC), were recently implemented in Great Britain (UK Ofgem, 2005; Sykes, 2005), Italy (Pagliano *et al.*, 2003; Pavan, 2005) and France (Moisan, 2004; Dupuis, 2007). Setting aside various differences among these systems, they may be schematically described as follows. Energy suppliers have to generate a given quantity of energy savings, or, if they are short of their target, to buy certificates from other suppliers. Vice versa, suppliers who have funded more measures than their target are allowed to sell such white certificates to those who are short of their target. In general, in order to be taken into account, energy savings have to take place in energy consumers' dwellings or plants, not in energy suppliers' facilities. In practice, suppliers typically fund energy savings in their own customers' dwellings, or contract with retailers who increase their sales of energy-efficient goods in exchange for a funding from the energy supplier.

The peer-reviewed literature on TWC schemes is increasing but still scarce. Langniss and Praetorius (2006) as well as Mundaca (2007) discuss the transaction costs associated with the generation of TWC and their implication for TWC markets, an issue that we do not address here. Bertoldi and Huld (2006) discuss some implementation issues as well as the interaction of TWC schemes with other trading systems, a question that we do not address either. Vine and Hamrin (2008) present the experience to date with TWC schemes and outline potential opportunities in the United States. Farinelli *et al.* (2005), Mundaca (2008) and Oikonomou *et al.* (2007) quantify the potential for a TWC scheme, in Europe for the first two papers and in the Netherlands for the latter. To date, an analysis of the economic mechanisms at stake when implementing a TWC scheme and of its relative efficiency compared to other policy instruments seems to be lacking.

In the present paper, we compare two types of TWC schemes to other policy instruments for energy efficiency, *i.e.*, taxes, subsidies and regulations. On this purpose, we develop a simple partial equilibrium model representing the markets for four commodities: energy, energy-saving goods or services, a composite good and TWCs. This paper builds on a working paper by Quirion (2006) but enhances it by (i) using more general functional forms (CES instead of Cobb-Douglas) thereby allowing a sensitivity analysis of the elasticities; (ii) allowing for an endogenous level of energy service; (iii) assessing another policy instrument (the subsidy).

Although this simple model cannot by far address all the issues raised when choosing between TWC schemes and other policy instruments, it is able to shed a first light on their economic efficiency and on their contrasted distributional consequences.

The paper is organised as follows. In the first section we present some background information on TWC schemes in practice. The first model and the policy instruments are presented in section 2 and numerical results in section 3. These results are discussed in section 4 and section 5 concludes. Appendix 1 lists the model's variables and parameters and Appendix 2 provides the method used to compare the national targets.

1 Tradable white certificates in practice

What is generally called a TWC is the commodity potentially traded between suppliers⁸⁴. A TWC scheme can then formally be understood as an obligation to save a given quantity of energy coupled with a flexibility mechanism, actually the market for TWCs. Although this instrument targets potentially every final consumption sector (including industry or transports), it focuses in practice on existing buildings (mainly residential but commercial as well), considered as the greatest potential for cost-efficient energy savings.

Although the existing schemes in the UK, Italy and France largely conform to this definition, there are some differences among them, for example the obligation to achieve half of the target in poor households in the UK.

In the UK, the first such system, labelled the “Energy Efficiency Commitment” (EEC1), required suppliers to save 62 TWh of energy in three years, from 1st April 2002 to 31 March 2005. This target refers to savings cumulated and discounted over the lifetime of the equipments funded, not only over the 3-year commitment period. This aggregate goal was exceeded by 40% and the suppliers who exceeded their target were allowed to bank these energy efficiency measures for the second period (EEC2), running from 1st April 2005 to 31 March 2008, with a roughly twice more ambitious target of 130 TWh. This was indeed the reason for the overachievement of the target: as in the U.S. SO₂ cap-and-trade programme (Ellerman and Montero, 2002), emitters used the banking provision to ease the transition between the first and the second (more ambitious) commitment period. Twelve suppliers groups were set a target under the EEC. Among them, two did not meet their target, generating a shortfall of nearly 1 TWh. Since these companies had ceased energy trading, no penalty was imposed on them because it would have served no practical purpose.

To tackle “fuel poverty”, at least half of the target had to be achieved in the “Priority group”, defined as those households receiving certain-income related benefits and tax credits. This requirement was fulfilled during EEC1. The last available information indicates that one quarter before the end of the EEC2, the target had already been overachieved by 26%, including the carry-over from EEC1 (UK Ofgem, 2008). Although committed suppliers were allowed to trade commitments or energy efficiency activities, such trades occurred neither in the first nor in the second period.

Note that for the third period (2008-2011) the government replaced the EEC by the CERT (carbon emission reduction target) with the following characteristics: a target expressed in CO₂ equivalent rather than in energy; a roughly doubled quantitative objective (154 Mt CO₂) compared to the EEC2; a larger scope including micro-generation and biomass heating; and increased trading opportunities (UK Ofgem, 2008).

In France, the three-year scheme started in July 2006 and the target is 54 TWh, also cumulated and discounted over the lifetime of the equipments funded. The latest available data (September 2008) show that 25 TWh have already been achieved, most of them (93%) in the residential sector. The

⁸⁴ Bertoldi and Rezessy (2006, p. 35) give the following definition: “A white certificate is an instrument issued by an authority or an authorised body providing a guarantee that a certain amount of energy savings has been achieved. Each certificate is a unique and traceable commodity that carries a property right over a certain amount of additional savings and guarantees that the benefit of these savings has not been accounted for elsewhere”.

actors' strategies are still not well described, but we know that some agents have already banked some certificates.

In Italy, the five-year scheme started in 2005, but energy saved by suppliers between 2001 and 2004 can be accounted to achieve the target until 2009. The 2005 and 2006 targets were respectively 0.2 and 0.4 Mtoe (million tonnes of oil-equivalent) increasing each year up to 2.9 Mtoe in 2009. Contrarily to the two other TWC schemes, these figures refer to annual savings, neither cumulated nor discounted. The 2005 and 2006 targets were both largely exceeded and 240% of the 2006 objective were achieved, including the 2001-2004 savings. In comparison to the British scheme, the Italian one has an active market since 24% of the certificates or "titles" (equivalent to one toe) delivered have been traded (76% through bilateral transactions and 24% on a specific market). Between 2006 and 2007 the part of traded titles has increased from 17 to 24% and the average market price has decreased (-57% for electricity titles and -11% for gas titles).

In Table 15 we compare the targets in the three existing TWC schemes by translating them in a standardised unit, which leads to the following results (see Appendix 2 for calculation steps and hypotheses). As is apparent from table 15, these targets amount to roughly 1 to 2% of final national energy consumption.

	UK 02-05	UK 05-08	Italy 05-09	France 06-09
Absolute target (cumulated & discounted)	27 TWh/year	43 TWh/year	25 TWh/year	18 TWh/year
Target in % of final energy consumption	1.4	2.3	1.5	0.9

Table 15: Targets in the British, Italian and French schemes

The savings occur through different measures as indicated in Figure 47, based on reports from the public bodies in charge of the TWC schemes (UK Ofgem 2007, AEEG 2007 and DGEMP 2008). It appears that even though similar measures are addressed in different countries their share in the savings differs a lot. For further developments on the existing TWC schemes see the above-mentioned references, Bertoldi and Rezessy (2006) or Giraudet (2007).

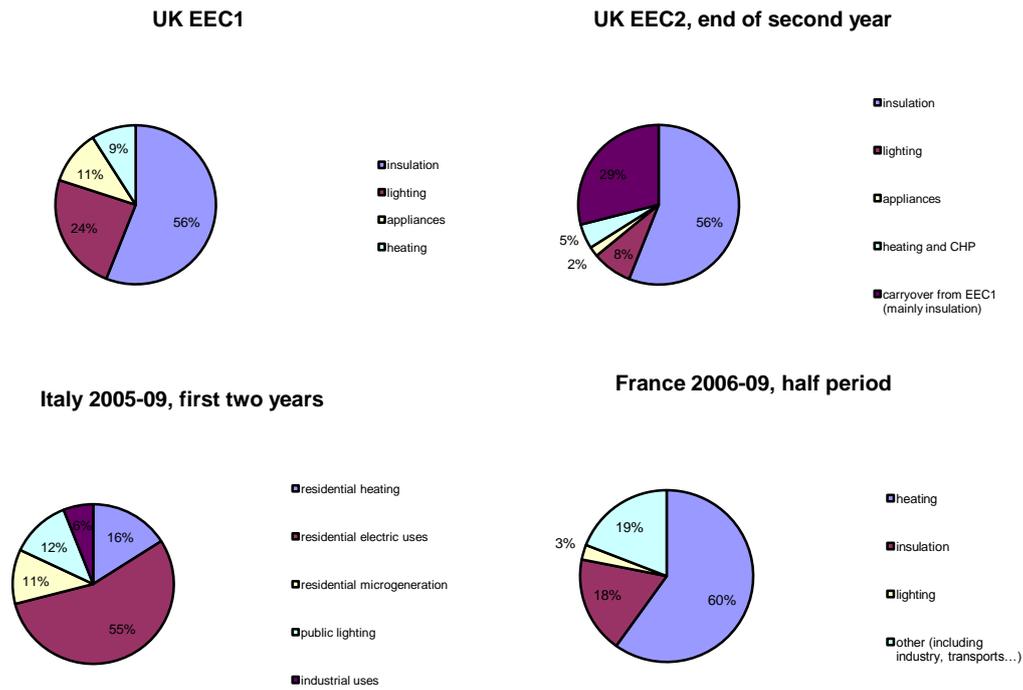


Figure 47: Types of saving in the existing TWC schemes

2 The model⁸⁵

2.1 The model in business-as-usual (*i.e.*, no energy-saving policy)

This simple partial equilibrium model features four agents: energy consumers, suppliers of energy, suppliers of energy-saving goods and services, and suppliers of the composite good.

Energy consumers (who may be firms or households) are represented by a nested CES utility function (figure 48).

⁸⁵ The model is coded using Scilab and the code is available from the authors upon request. Appendix 1 lists the variables and parameters.

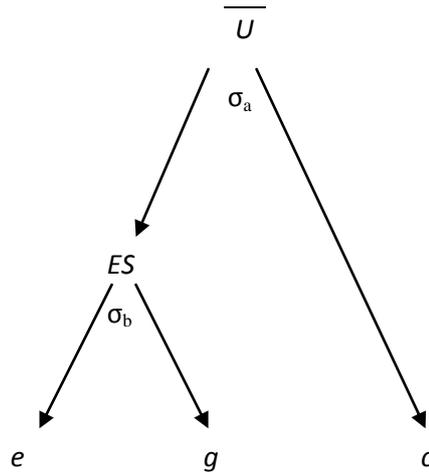


Figure 48: Consumer demand system

They buy energy (labelled e) and energy-saving goods or services (labelled g for "green") to generate a certain level of energy service ES ⁸⁶. ES is "produced" by consumers, by combining e and g in a CES function, with an elasticity of substitution σ_b . Consumers choose the combination of e and g that minimises their cost subject to the constraint that energy service reaches a level ES :

$$\text{Min}_{e,g} P_e \cdot e + P_g \cdot g \quad (1)$$

$$\text{s.t. } ES = (\alpha_e \cdot e^{\frac{\sigma_b-1}{\sigma_b}} + \alpha_g \cdot g^{\frac{\sigma_b-1}{\sigma_b}})^{\frac{\sigma_b}{\sigma_b-1}} \quad (2)$$

First-order conditions lead to good demands:

$$e_d = \alpha_e^{\sigma_b} \left(\frac{P_{ES}}{P_e} \right)^{\sigma_b} ES \quad (3)$$

$$g_d = \alpha_g^{\sigma_b} \left(\frac{P_{ES}}{P_g} \right)^{\sigma_b} ES \quad (4)$$

where P_{ES} is the shadow price of the program, defined by the following equation:

$$P_{ES}^{1-\sigma_b} = \alpha_e^{\sigma_b} \cdot P_e^{1-\sigma_b} + \alpha_g^{\sigma_b} \cdot P_g^{1-\sigma_b} \quad (5)$$

⁸⁶ Examples of energy services are transportation, light or heat. ES thus represents a certain number of kilometres travelled at a certain speed, comfort and reliability, a number of lumens/m², the heating of a dwelling at a certain temperature, etc. Examples of goods and services represented by g are thermal insulation panels, energy-saving devices that make a fridge-freezer more energy-efficient, and so on.

Consumers also buy a composite good labelled c , which is combined with ES in a CES function, with an elasticity of substitution σ_a , to create utility. Consumers choose the combination of ES and c that minimises their cost subject to the constraint that utility reaches an exogenous level \bar{U} :

$$\text{Min}_{ES,c} P_{ES} \cdot ES + P_c \cdot c \quad (6)$$

$$\text{s.t. } \bar{U} = (\alpha_{ES} \cdot ES^{\frac{\sigma_a-1}{\sigma_a}} + \alpha_c \cdot c^{\frac{\sigma_a-1}{\sigma_a}})^{\frac{\sigma_a}{\sigma_a-1}} \quad (7)$$

Throughout the paper we take $\sigma_a < \sigma_b$ to represent the fact that e and g are closer substitutes to one another than to c .

First-order conditions lead to good demands:

$$ES_d = \alpha_{ES}^{\sigma_a} \left(\frac{P_U}{P_{ES}} \right)^{\sigma_a} \bar{U} \quad (8)$$

$$c_d = \alpha_c^{\sigma_a} \left(\frac{P_U}{P_c} \right)^{\sigma_a} \bar{U} \quad (9)$$

where P_U is the shadow price of program, defined by the following equation:

$$P_U^{1-\sigma_a} = \alpha_{ES}^{\sigma_a} \cdot P_{ES}^{1-\sigma_a} + \alpha_c^{\sigma_a} \cdot P_c^{1-\sigma_a} \quad (10)$$

Firms maximise their profit under perfect competition and produce under linearly decreasing returns. Our model represents the short term, *i.e.* the productive capital is fixed, hence the assumption of decreasing returns. We assume that public authorities do not intervene in price setting, and especially that the energy market is fully liberalised. Without loss of generality, we normalise the number of firms and consumers to one in order to simplify the notations, but we assume that the real number is large enough for them to be price-takers on all markets.

Suppliers in every sector maximise their profit under perfect competition and produce under linearly decreasing returns:

$$\text{Max}_c \pi_c = P_c \cdot c - \left(\gamma_c \cdot c + \frac{\delta_c}{2} c^2 \right) \quad (11)$$

The first order condition leads to the supply function:

$$c_s = \frac{P_c - \gamma_c}{\delta_c} \quad (12)$$

$$\text{Max}_e \pi_e = P_e \cdot e - \left(\gamma_e \cdot e + \frac{\delta_e}{2} e^2 \right) \quad (13)$$

$$e_s = \frac{P_e - \gamma_e}{\delta_e} \quad (14)$$

$$\text{Max}_g \pi_g = P_g \cdot g - \left(\gamma_g \cdot g + \frac{\delta_g}{2} g^2 \right) \quad (15)$$

$$g_s = \frac{P_g - \gamma_g}{\delta_g} \quad (16)$$

The equalisation of supply and demand on every market, *i.e.* $e_d = e_s$, $g_d = g_s$ and $c_d = c_s$ leads to the three equations:

$$\frac{P_e - \gamma_e}{\delta_e} = \alpha_e^{\sigma_b} \left(\frac{P_{ES}}{P_e} \right)^{\sigma_b} ES \quad (17)$$

$$\frac{P_g - \gamma_g}{\delta_g} = \alpha_g^{\sigma_b} \left(\frac{P_{ES}}{P_g} \right)^{\sigma_b} ES \quad (18)$$

$$\frac{P_c - \gamma_c}{\delta_c} = \alpha_c^{\sigma_a} \left(\frac{P_U}{P_c} \right)^{\sigma_a} \bar{U} \quad (19)$$

We incorporate the expressions of ES , P_U and P_{ES} using equations (8), (5) and (10), so that we are left with three unknowns: P_e , P_g and P_c . Since this system features no analytical solution, it is solved numerically, after a calibration procedure explained in paragraph 2.2 below. Knowing P_e , P_g and P_c , it is then easy to compute the four quantities c , e , g and ES and the last two prices P_{ES} and P_U , with equations (3-5) and (8-10).

The cost incurred by consumers to get a given utility from consumption \bar{U} is:

$$CC = P_e \cdot e + P_g \cdot g + P_c \cdot c = P_{ES} \cdot ES + P_c \cdot c = P_U \cdot \bar{U} \quad (20)$$

Since we have a partial equilibrium model in which firms' profits are not distributed to consumers, the total cost is the cost incurred by consumers minus firms' profits:

$$TC = CC - \pi_e + \pi_g + \pi_c \quad (21)$$

2.2 Calibration of the parameters

In the next two sections, we present the results for different values of the elasticities of substitution σ_a, σ_b . We calibrate the other parameters $(\alpha_j)_{j \in c, g, e, ES}$, $(\gamma_i)_{i \in c, g, e}$, $(\delta_i)_{i \in c, g, e}$ in order to represent roughly the French residential sector, using the following data and assumptions:

- a. The budget share of residential energy in households' consumption in France is around 4% (from Besson, 2008).

- b. We assume that the budget share of g is half that of e . This figure is a crude approximation, needed because there is little data on households' spending in energy-saving goods and services. According to Ademe (2008) this spending amounted to 11.1 billion euros in 2006, roughly one third of energy-related spending (excluding transportation in both cases). The figure we retain in our calibration is higher because the coverage of the Ademe study is not exhaustive. Sensitivity analysis, not displayed here, shows that a different figure would not change the results significantly.
- c. The gross profit ratio (gross operating surplus/value added) of energy producers in France in 2004 is around 50% (INSEE, 2007).
- d. The gross profit ratio in France in average in 2004 is around 30% (INSEE, 2007). We assume that this ratio applies to firms in the g and c sectors.

Without loss of generality we set every price (in business-as-usual) equal to one and $U = 10$. From assumptions a and b above, for a given value of σ_a and σ_b we can then calibrate the α_j . For example, setting $\sigma_a = 0.5$ and $\sigma_b = 1$ leads to: $\alpha_c = 0.8836$, $\alpha_{ES} = 0.0036$, $\alpha_e = 0.666667$, $\alpha_g = 0.333333$. Combining these results with assumptions c and d above, we get $\gamma_e = 0$, $\gamma_g = \gamma_c = 0.4$, $\delta_e = 2.5$, $\delta_g = 3$ and $\delta_c = 0.0638298$.

We compare the energy saving policies for the same target of energy saving, or, which is equivalent, for the same energy consumption. Formally, to compute the equilibrium with an energy saving policy, we set e at an exogenous value less than its business-as-usual value and modify some of the above equations as described in sections 2.3 to 2.8 below⁸⁷. We are thus able to compare the outcome of these policy instruments for a given level of energy saving. We implicitly assume that an excessive energy use entails external costs (air pollution, climate change, threats on supply security...), justifying an energy-saving policy, but we do not model this part of the issue. In other words, we set a cost-efficiency framework, not a cost-benefit one.

2.3 White certificates with a target as a percentage of energy sold (WC%)

Under this policy instrument, energy suppliers have to generate a given amount of energy efficiency measures, in a quantity $w \cdot e$ proportional to the quantity of energy they sell, e . To fulfil this obligation, we assume that they can only subsidise energy-saving goods and services g . For each unit of g they subsidise, they get one white certificate. We assume that firms comply with this obligation, so the quantity of white certificates equals the aggregate target. Since we model only one type of energy-saving goods and services, it is impossible to distinguish business-as-usual purchase of g from additional energy efficiency measures⁸⁸. We thus assume that every sale of g is subsidised.

A new equation appears, the energy-efficiency constraint put by public authorities on energy suppliers:

$$w \cdot e \leq g \quad (22_{WC\%})$$

⁸⁷ Admittedly, in reality, the government sets the value of the policy instrument and this drives the value of e , not the other way around. However, since we want to compare the policy instruments for a given level of energy saving, we treat e as an exogenous variable, set it at the same level for every policy instrument and compute the value of the policy instrument that entails such a level of e .

⁸⁸ In the real world, such a distinction is very costly. Accordingly, the regulator of the UK scheme recognises that "the target included business as usual energy efficiency activity" (UK Ofgem, 2005, p. 5).

We assume that this constraint is binding. Otherwise, the price of white certificates P_w would drop to zero and the policy would have no effect at all. Hence we have:

$$w \cdot e = g \quad (22'_{WC\%})$$

Neither consumers nor suppliers of composite goods are directly affected; hence the first twelve equations do not change. Equations (17-18) do not change either.

Equations (13) to (16) are modified as below:

$$Max_e \pi_e = P_e - P_w \cdot w \cdot e - \left(\gamma_e \cdot e + \frac{\delta_e}{2} e^2 \right) \quad (13_{WC\%})$$

where P_w is the price of a white certificate.

$$e_s = \frac{P_e - P_w \cdot w - \gamma_e}{\delta_e} \quad (14_{WC\%})$$

$$Max_g \pi_g = P_g + P_w \cdot g - \left(\gamma_g \cdot g + \frac{\delta_g}{2} g^2 \right) \quad (15_{WC\%})$$

$$g_s = \frac{P_g + P_w - \gamma_g}{\delta_g} \quad (16_{WC\%})$$

The equilibrium condition on the composite good market (19) remains unaffected while the equilibrium conditions on the other markets become:

$$\frac{P_e - P_w \cdot w - \gamma_e}{\delta_e} = \alpha_e^{\sigma_b} \left(\frac{P_{ES}}{P_e} \right)^{\sigma_b} ES \quad (17_{WC\%})$$

$$\frac{P_g + P_w - \gamma_g}{\delta_g} = \alpha_g^{\sigma_b} \left(\frac{P_{ES}}{P_g} \right)^{\sigma_b} ES \quad (18_{WC\%})$$

To solve the system, we first set the energy consumption target \bar{e} and a new equation:

$$e = \bar{e} \quad (23_{WC\%})$$

We incorporate the expressions of ES , P_U and P_{ES} using equations (8), (5) and (10). The system to be solved is composed of the six equations (14_{WC%}), (17_{WC%}), (18_{WC%}), (19), (22'_{WC%}) and (23_{WC%}), with the six unknowns P_e , P_g , P_c , P_w , e and w .

2.4 White certificates with an absolute target (WCA)

The only difference with WC% is that energy suppliers now have to deliver white certificates in a fixed quantity W meaning that each producer's target is defined independently of this producer's current

and future decisions⁸⁹. The target may for instance be proportional to the historical output of each producer – but not to its current output, otherwise we are back to WC%.

We will see in section 3 that this distinction has important consequences. The energy-efficiency constraint put by public authorities on energy suppliers is now:

$$W \leq g \quad (22_{WCA})$$

where W is the energy producer's target.

As explained above, we assume that this constraint is binding, hence we have:

$$W = g \quad (22'_{WCA})$$

Here again, neither consumers nor suppliers of composite goods are directly affected, hence neither the first twelve equations nor equations (17-18) change.

Compared to the model in business-as-usual, equations (13) to (16) are modified as below:

$$Max_e \quad \pi_e = P_e \cdot e - P_w \cdot W - \left(\gamma_e \cdot e + \frac{\delta_e}{2} e^2 \right) \quad (13_{WCA})$$

$$e_s = \frac{P_e - \gamma_e}{\delta_e} \quad (14_{WCA})$$

$$Max_g \quad \pi_g = P_g + P_w \cdot g - \left(\gamma_g \cdot g + \frac{\delta_g}{2} g^2 \right) \quad (15_{WCA})$$

$$g_s = \frac{P_g + P_w - \gamma_g}{\delta_g} \quad (16_{WCA})$$

The equilibrium conditions on the energy market (17) and on the composite good market (19) remain unaffected while the equilibrium condition on the energy-saving goods market becomes:

$$\frac{P_g + P_w - \gamma_g}{\delta_g} = \alpha_g^{\sigma_b} \left(\frac{P_{ES}}{P_g} \right)^{\sigma_b} ES \quad (18_{WCA})$$

To solve the system, we first set the energy consumption target \bar{e} and a new equation:

$$e = \bar{e} \quad (23_{WCA})$$

We incorporate the expressions of ES , P_U and P_{ES} using equations (8), (5) and (10). The system to be solved is composed of the six equations (14_{WCA}), (17), (18_{WCA}), (19), (22'_{WCA}) and (23_{WCA}), with the six unknowns P_e , P_g , P_c , P_w , e and W .

⁸⁹ The existing TWC schemes are somewhat intermediary. In the UK, targets are a function of the number of customers, a case which would require a more complex model to be explicitly analysed. In France and Italy, they are proportional to energy sales in the last year for which data were available when targets were fixed. An updating is likely at the end of the every period (three years in France, five in Italy).

2.5 Tax rebated lump-sum to consumers (TH)⁹⁰

Under this policy instrument, energy produced is taxed at a rate t and receipts from the tax are given lump-sum to consumers. A new equation describes the public budget balance:

$$t \cdot e = LS \quad (22_{TH})$$

where LS is the lump-sum subsidy received by the representative consumer.

Compared to the model in business-as-usual, equations (13), (14) and (18) are modified as below⁹¹:

$$Max_e \pi_e = P_e - t \cdot e - \left(\gamma_e \cdot e + \frac{\delta_e}{2} e^2 \right) \quad (13_{TH})$$

$$e_s = \frac{P_e - t - \gamma_e}{\delta_e} \quad (14_{TH})$$

$$TC = CC - \pi_e + \pi_g + \pi_c - LS \quad (21_{TH})$$

The equilibrium conditions on the energy-saving goods market (18) and on the composite good market (19) remain unaffected while the equilibrium condition on the energy market (17) becomes:

$$\frac{P_g + P_w - \gamma_g}{\delta_g} = \alpha_g^{\sigma_b} \left(\frac{P_{ES}}{P_g} \right)^{\sigma_b} ES \quad (18_{TH})$$

To solve the system, we first set the energy consumption target \bar{e} and a new equation:

$$e = \bar{e} \quad (23_{TH})$$

We incorporate the expressions of ES , P_U and P_{ES} using equations (8), (5) and (10). The system to be solved is composed of the six equations (14_{TH}), (17), (18_{TH}), (19), (22_{TH}) and (23_{TH}), with the six unknowns P_e , P_g , P_c , t , e and LS .

2.6 Tax rebated lump-sum to energy suppliers (TE)⁹²

The only difference with the previous policy instrument is that the receipts from the tax are now rebated (lump-sum) to energy suppliers and not to consumers. As we shall see, this distinction does not affect the overall economic cost but only the burden distribution. Again, a new equation describes the public budget balance:

$$t \cdot e = LS \quad (22_{TE})$$

Compared to the model in business-as-usual, equations (13) and (14) are modified, as below:

⁹⁰ Since we do not model uncertainty on costs nor market power, this policy instrument is equivalent to a tradable permits scheme imposed to energy suppliers, with permits auctioned and receipts transferred to consumers. However, in general, tradable permits cover noxious emissions, not energy sold.

⁹¹ Note that under the taxes and the subsidy, P_e and P_g are the prices paid by the consumers.

⁹² In our model, this would be equivalent to a tradable permits scheme with permits grandfathered, i.e., distributed for free to energy suppliers.

$$\text{Max}_e \pi_e = P_e - t e - \left(\gamma_e \cdot e + \frac{\delta_e}{2} e^2 \right) + LS \quad (13_{TE})$$

$$e_s = \frac{P_e - t - \gamma_e}{\delta_e} \quad (14_{TE})$$

The equilibrium conditions on the energy-saving goods market (18) and on the composite good market (19) remain unaffected while the equilibrium condition on the energy market (17) becomes:

$$\frac{P_g + P_w - \gamma_g}{\delta_g} = \alpha_g^{\sigma_b} \left(\frac{P_{ES}}{P_g} \right)^{\sigma_b} ES \quad (18_{TE})$$

To solve the system, we first set the energy consumption target \bar{e} and a new equation:

$$e = \bar{e} \quad (23_{TE})$$

We incorporate the expressions of ES , P_U and P_{ES} using equations (8), (5) and (10). The system to be solved is composed of the six equations (14_{TE}), (17), (18_{TE}), (19), (22_{TE}) and (23_{TE}), with the six unknowns P_e , P_g , P_c , t , e and LS .

2.7 Subsidy on energy-efficient goods and services (S)

Under this policy instrument, the production of g is subsidised at a rate s and the cost of the subsidy is covered by a lump-sum tax on consumers. A new equation describes the public budget balance:

$$s \cdot g = LS \quad (22_s)$$

where LS is the lump-sum tax paid by the representative consumer.

Compared to the model in business-as-usual, equations (15), (16) and (21) are modified as below:

$$\text{Max}_g \pi_g = P_g + S g - \left(\gamma_g \cdot g + \frac{\delta_g}{2} g^2 \right) \quad (15_s)$$

$$g_s = \frac{P_g + S - \gamma_g}{\delta_g} \quad (16_s)$$

$$TC = CC - \pi_e + \pi_g + \pi_c + LS \quad (21_s)$$

The equilibrium conditions on the energy market (17) and on the composite good market (19) remain unaffected while the equilibrium condition on the energy-saving goods market (18) becomes:

$$\frac{P_g + S - \gamma_g}{\delta_g} = \alpha_g^{\sigma_b} \left(\frac{P_{ES}}{P_g} \right)^{\sigma_b} ES \quad (18_s)$$

To solve the system, we first set the energy consumption target \bar{e} and a new equation:

$$e = \bar{e} \quad (23_s)$$

We incorporate the expressions of ES , P_U and P_{ES} using equations (8), (5) and (10). The system to be solved is composed of the six equations (14), (17), (18_s), (19), (22_s) and (23_s), with the six unknowns P_e , P_g , P_c , s , e and LS .

2.8 Energy-efficiency regulation (R)

Consumers still minimise their cost according to equations (1-2) but now subject to a new constraint:

$$\frac{ES}{e} \geq r \quad (22_R)$$

Which we assume binding. This is a classical and straightforward way of modelling energy efficiency regulation; cf. Wirl (1989)⁹³.

Assuming that both constraints (2) and (22_R) are binding, equations (3) and (4) become:

$$e_d = \frac{ES}{r} \quad (3_R)$$

$$g_d = ES \left(\frac{1 - \alpha_e \cdot r^{\frac{1-\sigma b}{\sigma b-1}}}{\alpha_g} \right)^{\frac{\sigma b}{\sigma b-1}} \quad (4_R)$$

The equilibrium condition on the composite good market (19) remains unaffected while the equilibrium conditions on the other markets become:

$$\frac{P_e - \gamma_e}{\delta_e} = \frac{ES}{r} \quad (17_R)$$

$$\frac{P_g - \gamma_g}{\delta_g} = ES \left(\frac{1 - \alpha_e \cdot r^{\frac{1-\sigma b}{\sigma b-1}}}{\alpha_g} \right)^{\frac{\sigma b}{\sigma b-1}} \quad (18_R)$$

To solve the system, we first set the energy consumption target \bar{e} and a new equation:

$$e = \bar{e} \quad (23_R)$$

We incorporate the expressions of ES , P_U and P_{ES} using equations (8), (5) and (10). The system to be solved is composed of the five equations (3_R), (17_R), (18_R), (19) and (23_R), with the five unknowns P_e , P_g , P_c , e and r .

⁹³ In the transport sector, the US CAFÉ (Corporate average fleet efficiency) regulation for cars and light trucks is expressed in this way, ES being a number of miles and e being expressed in gallons of gasoline. Japan has a similar (although more ambitious) regulation and in the European Union, such a regulation has been recently proposed by the Commission.

In the building sector, many thermal regulations are also expressed in such a way, ES being a number of m² heated at a certain temperature, for a given external temperature.

3 Numerical results

As explained above, we solve the model for a given level of energy consumption for each policy instrument, in order to compare the latter. We choose an energy-saving target of 2% compared to business-as-usual, a figure in line with the existing TWC schemes (*cf.* section 1 above). It turns out that the evolution of every variable is monotonous with the energy-saving target so contrarily to Quirion (2006) we do not present the results for different levels of energy-savings. Instead, we present the results for different values of σ_a and σ_b . More precisely, for every variable we present the results for $\sigma_a = 0.5$ and different values of σ_b , as well as the results for different values of σ_a and for $\sigma_b \approx 1$ ⁹⁴. The choice of $\sigma_a = 0.5$ and $\sigma_b \approx 1$ as benchmark values is in line with the CGE literature, *cf.* Gerlagh and Kuik (2007, p. 9).

3.1 Total costs and quantities

The first row of Figure 49 displays the increase in total cost compared to the business-as-usual equilibrium (note that the scale of the y-axis for TC is logarithmic). It turns out that for $\sigma_a = 0$ every policy instrument entails the same overall cost. However, as soon as $\sigma_a > 0$, the two taxes entail the lowest overall cost⁹⁵, followed by WC_% and R, whereas WC_A and S entail the highest cost. The explanation is the following. To reach a given level of energy savings at the lowest aggregate cost, it is optimal both to substitute g to e , *i.e.*, to increase energy efficiency, and to reduce the level of energy service ES , *i.e.*, to progress towards sufficiency⁹⁶. As is apparent from the second row of Figure 49, all instruments lead to substitute g for e , but (third row) only the taxes lead to a decrease in ES . The other instruments induce an increase in ES , either moderate (WC_%, R) or significant (WC_A, S)⁹⁷. In other terms, they generate a rebound effect: a part of the increase in energy efficiency (SE/e) is "lost" because of an increase in ES . To compensate for this rebound effect, the substitution of g for e has to be higher, especially for WC_A and S. The lower row of Figure 49 presents the rebound ratio, defined as $\frac{\Delta ES/ES}{\Delta ES/ES - \Delta e/e}$. This ratio indicates the share of energy savings that is "lost" because of

the increase in ES (if any). As the value of σ_a tends towards that of σ_b , this ratio also tends to 100% with S or WC_A whereas it only tends to 10% with R or WC_%.

Quantitatively, the difference in total cost across instruments is massive. For example, for the benchmark case with $\sigma_a = 0.5$ and $\sigma_b \approx 1$, the cost of reaching the energy-savings target is 20 times higher with WC_A and S than with taxes and 9 times more costly than with WC_% and R. Even with $\sigma_a = 0.1$ and $\sigma_b \approx 1$, WC_A and S are twice more costly than taxes.

⁹⁴ The CES function is not defined for a unitary elasticity of substitution – in this case it tends to a Cobb-Douglas function – so we take the closest to one value numerically computable.

⁹⁵ A benevolent social planner minimising total cost under a constraint on energy consumption would choose the same levels of production of e , g and c (hence also of ES) as in a decentralised economy with an energy tax. The energy tax is thus the optimal policy (for a given energy saving target), which is not surprising given our assumptions of perfect competition and information.

⁹⁶ On this way of framing the issue, *cf.* Salomon *et al.* (2005) and Alcott (2008).

⁹⁷ Note that a similar issue arises in the analysis of allocation rules for CO₂ allowances: under an output-based allocation rule, too much CO₂-intensive goods are produced compared to the optimum, while auctioning and lump-sum allocation lead to the optimal production, at least in a closed economy with perfect competition (Quirion, 2007).

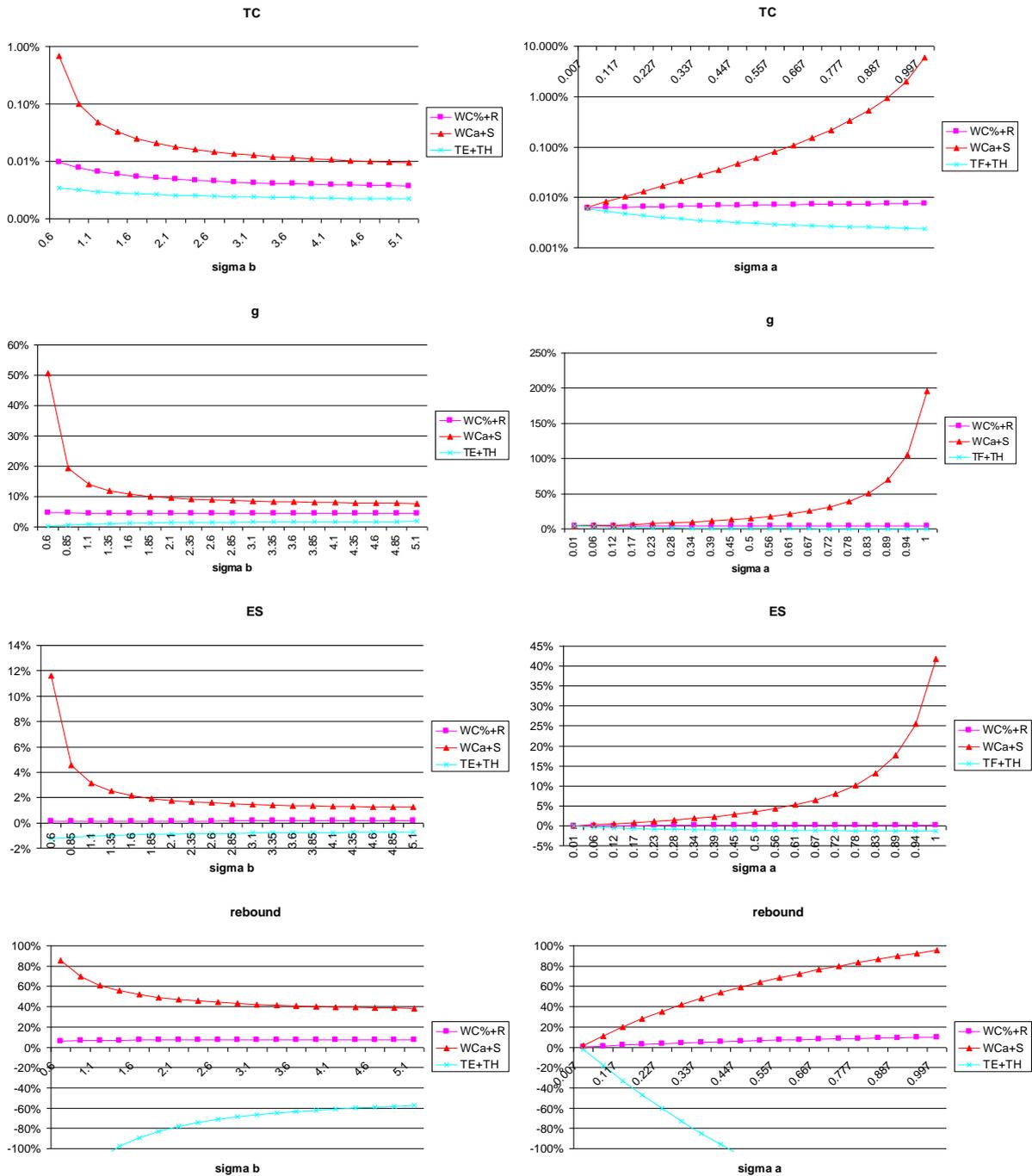


Figure 49: Impact of a 2% energy-saving target on total cost and on quantities

Left panels: $\sigma_a = 0.5$. Right panels: $\sigma_b \approx 1$. Note the log scale for the y-axis in 1st row.

3.2 Consumers' prices

As indicated by the first row of figure 50, the evolution of the consumers' energy price is much contrasted: it goes down with WC_A , S and R; and up with T_E , T_H and $WC_{\%}$, more sharply with taxes than with $WC_{\%}$. These evolutions may be explained as follows. Under all policy instruments, the decrease in energy consumption makes the energy price go downward, since the energy supply curve

is upward-sloping. Under WC_A , S and R, this is the only influence on energy price. However, under both taxes, the energy price rises since suppliers pass the tax on to consumers. The same stands under $WC_{\%}$: since suppliers must generate more certificates if they increase their production, the certificates' cost is a part of their marginal cost (*cf.* eq. 14 _{$WC_{\%}$} above), hence of energy price. However the rise in energy price is lower under $WC_{\%}$ than under the taxes because under the former, substitution of g for e comes from two channels: the decrease in P_g and the rise in P_e , thus for a given level of energy saving, the evolution of each of these prices may be lower than if only one channel was used.

$WC_{\%}$ and WC_A have a contrasted impact on P_e : under WC_A , since every supplier's target is exogenous, the suppliers do not include the certificates' cost in their marginal cost (*cf.* eq. 14 _{WC_A} above⁹⁸). This distinction has important distributional and efficiency consequences. In particular, since WC_A decreases P_g without raising P_e , P_{ES} decreases so ES increases; this rebound effect explains why WC_A is so costly (*cf.* section 3.1 above).

Of course, the higher σ_b , *i.e.*, the more substitutable e and g , the lower the increase in P_e necessary to get a given level of energy savings under T_E , T_H and $WC_{\%}$. Also, the higher σ_a , *i.e.*, the more substitutable ES and c , the lower the increase in P_e necessary to get a given level of energy savings under T_E and T_H . Yet the opposite is true for $WC_{\%}$, because the higher σ_a , the higher the rebound effect.

The second row of figure 50 displays the impact on P_g , the consumers' price of g . It rises with R, T_F and T_H because the supply curve is upward-sloping and demand for g rises. Under S, WC_A and $WC_{\%}$, it goes down since this good is subsidised, but less so under $WC_{\%}$ because in this case, as we have just seen, a part of the energy savings comes from the increase in P_e . Of course, for S, WC_A and $WC_{\%}$, the higher σ_b , the lower the decrease in P_g necessary to get a given level of energy savings. However, the higher σ_a , the higher the decrease in P_g necessary, because in this case the rebound effect is higher.

The price-index of the energy service P_{ES} (not shown here) is a combination of P_e and P_g hence it stems from the above-mentioned evolutions. It increases under the two taxes, decreases sharply under WC_A and S and is slightly reduced under $WC_{\%}$ and R. Finally P_c (not shown here) is almost unaffected; it increases slightly under the taxes because consumers substitute c for ES and the supply curve is upward sloping; and vice-versa for WC_A and S.

⁹⁸ This conclusion stems from our short-term, perfect competition model, but it would not necessarily stand in the longer run, especially in a more complex model with imperfect competition, free entry and exit.

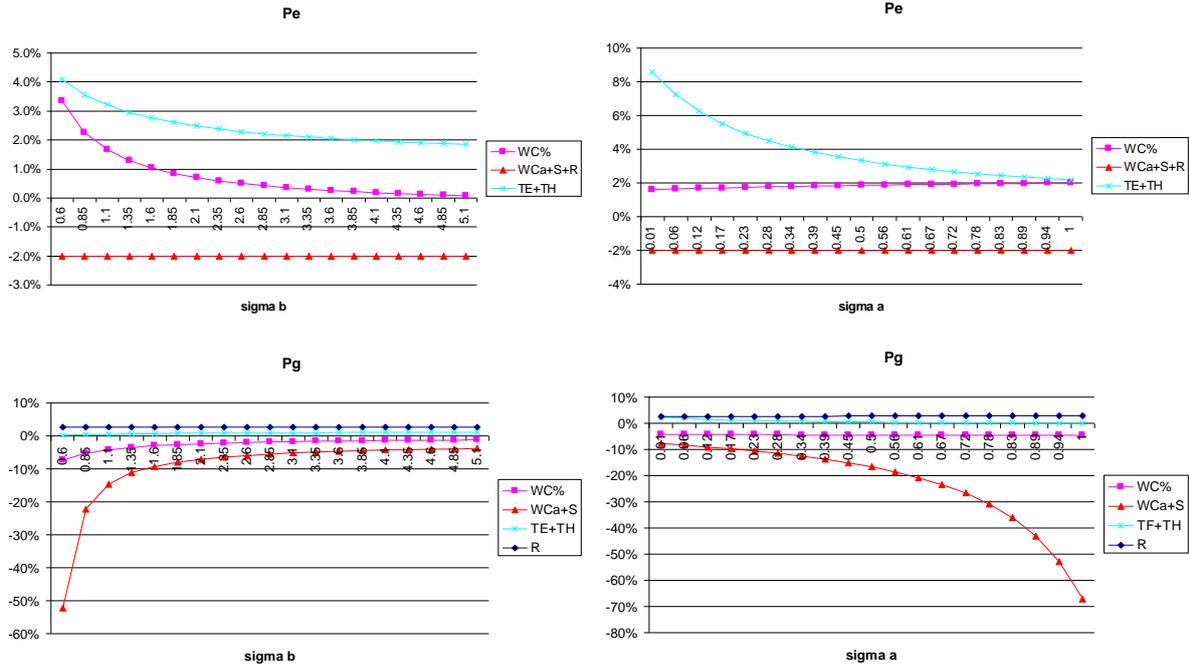


Figure 50: Impact of a 2% energy-saving target on Pe and Pg

Left panels: $\sigma_a = 0.5$. Right panels: $\sigma_b \approx 1$

3.3 Distributional consequences

The upper-left panel of figure 51 displays energy suppliers' profit, which drops in the same proportion with all policy instruments except WC_A and T_E . Under WC_A , it decreases much more since energy suppliers pay the cost of white certificates while, as already explained, they do not pass this cost on to consumers, due to the lump-sum nature of their targets. Note that for a low σ_b or a high σ_a , profit can become negative: suppliers still make some money by selling energy but this not enough to pay the cost of white certificates⁹⁹. Under T_E , it rises since the energy price increases despite energy suppliers receiving a rebate: since this rebate is lump-sum, it does not influence their pricing behaviour, based on marginal cost. Energy suppliers thus benefit from a windfall profit under this policy instrument, as they do under the EU ETS (Sijm *et al.*, 2006).

The profit of energy-saving goods and service (g) producers' rises with every instrument. The increase is identical for $\sigma_a \approx 0$, otherwise it is proportional to the rise in demand for g , *i.e.*, higher for WC_A and S and lower for the taxes.

The profit of composite goods (c) producers also evolves proportionally to the demand for c , but with much more moderate changes.

⁹⁹ In the real world, some firms would most likely exit the market, pushing up the energy price. Alternatively, governments may put a cap on the price of white certificates, which they did in France.

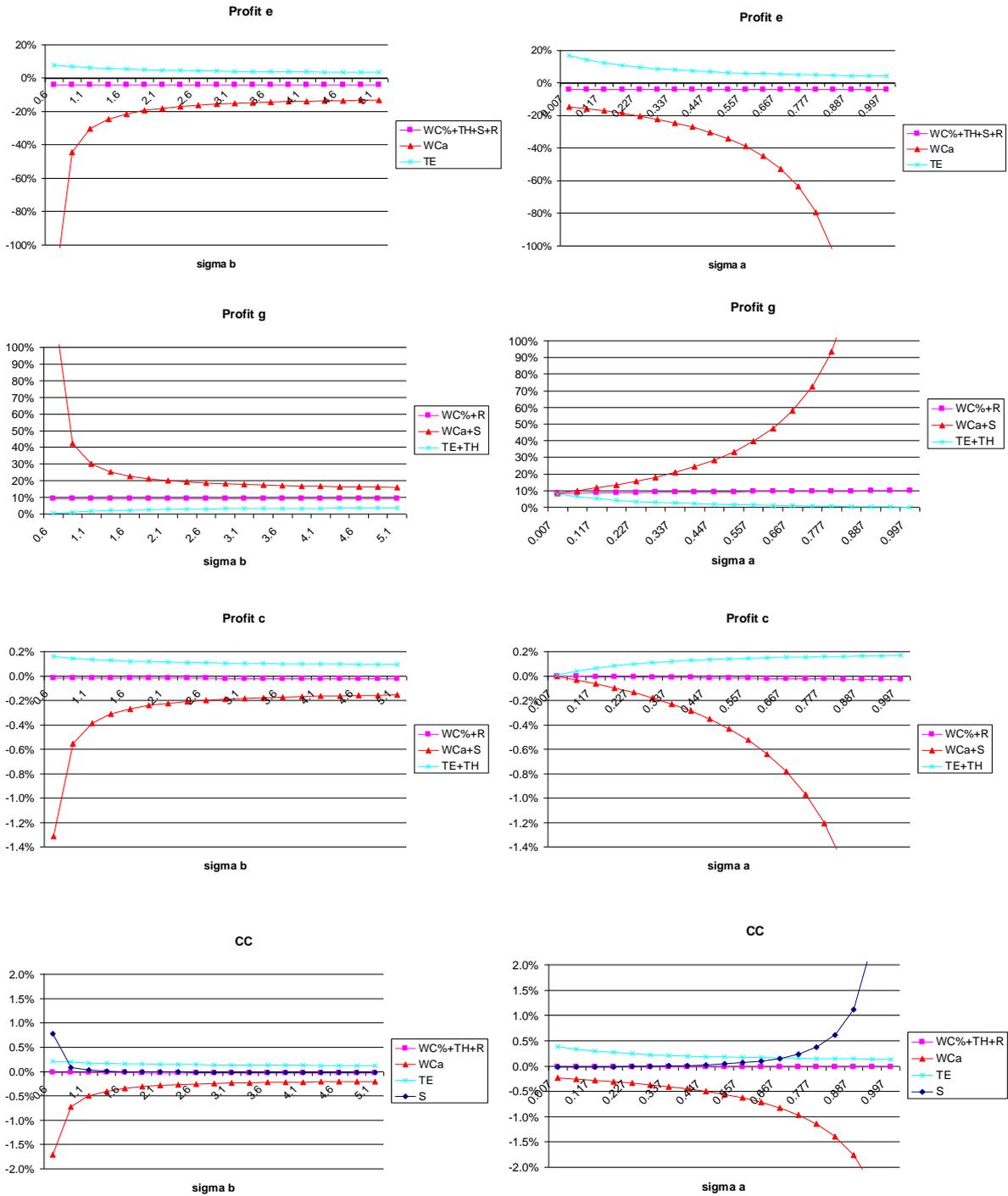


Figure 51: Impact of a 2% energy-saving target on the components of total cost

Left panels: $\sigma_a = 0.5$. Right panels: $\sigma_b \approx 1$

The last row of Figure 51 displays the cost for consumers CC , which is the cost of purchasing the goods allowing a utility from consumption \bar{U} plus LS with S (since the subsidy is financed by a lump-sum tax on households) or minus LS with T_H (since the receipts from the tax on energy are rebated lump-sum to households). Consumers are net winners under WC_A and net losers under T_E . The impact of these instruments on CC is thus symmetric to their impact on π_g . Consumers are pretty

much unaffected under $WC\%$, T_H and R . So are they with S if σ_a is low enough and/or if σ_b is high enough, but otherwise the cost to consumers is relatively high. These are also the parameters for which S entails the highest total cost; in this case, a very high subsidy rate has to be paid, hence consumers have to pay a very high lump-sum tax.

4 Discussion

4.1 Where to apply which policy instrument?

We have seen that the relative cost of policy instruments depends crucially on the value of σ_a . If this value is close to zero, there is little rebound effect and every instrument entails the same overall cost, but if it is high, there is a large rebound and taxes are much more cost-efficient than $WC\%$ and R and even more so than WC_A and S . Many empirical estimates of the rebound effect have been published. Greening *et al.*, 2000 performed a review of over 75 estimates and conclude that no significant rebound exist for white appliances, and only a limited one for residential lighting. The cost penalty (compared to taxes) associated with $WC\%$ or R is thus probably limited for these applications. On the opposite a larger rebound seems to exist for automobile transport, space cooling, space heating and water heating, hence the cost difference between taxes and the other policy instruments should be higher.

4.2 Equity and political acceptability

Although the taxes entail the lowest aggregate cost, they may be politically more difficult to implement than other instruments because they lead to a higher (and highly visible) increase in energy price. WC_A causes a significant drop in energy suppliers' profit so the latter are likely to lobby against this instrument.

$WC\%$, R and S have politically the advantage of transferring a part of the cost on the producers of the composite good, a heterogeneous group unlikely to engage in the policy process on such an issue since energy is not a part of their business and since they are only marginally affected. In addition, they increase π_g significantly (10% at least), so producers of energy-saving goods and services may form an influent lobby group in favour of such policies. This may explain why regulations and subsidies form the bulk of energy-saving policy instruments in the real world and why many countries have launched, or are considering¹⁰⁰, a TWC Scheme.

4.3 Issues not included in the model

4.3.1 Equalisation of the marginal cost of energy saving

TWC schemes, just like taxes and tradable allowances, allow an equalisation of the marginal cost of energy savings among energy suppliers under certain conditions. This is the very rationale for implementing tradable certificates rather than rigid energy savings targets. On the opposite, rigid energy-efficiency regulations do not provide such flexibility. For example, it may be cost efficient to keep appliances, light bulbs and dwellings with low energy efficiency where they are scarcely used (*e.g.* incandescent light bulbs in toilets, cheap insulation in second homes...). A rigid set of regulation would rule out this possibility. Yet more flexible forms of regulation exist: the US CAFÉ regulation

¹⁰⁰ According to EuroWhiteCert (2007) Denmark and the Netherlands consider implementing such a system.

does not limit the fuel consumption of every car but of the average of the cars sold by each manufacturer. Proposals go around in the US to add flexibility among manufacturers, through tradable allowances. To sum up, equalisation of the marginal cost of energy saving is an advantage of TWC schemes over rigid regulation, but not necessarily over more flexible forms of regulation.

4.3.2 The "energy-efficiency gap"

The "energy-efficiency gap" refers to the fact that many opportunities to save energy are not implemented by consumers although the decrease in fuel cost would outweigh the cost of the energy efficiency investment according to standard cost-benefit analysis¹⁰¹. This raises some doubts on the efficiency of energy taxes: if consumers take little account of energy price in their behaviour, raising this price is unlikely to cut energy consumption sharply. On the opposite, regulation, if strictly implemented, may be economically efficient by forcing consumers to implement energy-efficiency measures that are financially profitable but bypassed in business-as-usual.

Would TWC schemes help mobilising the energy-efficiency gap? The answer obviously depends on what explains this gap. Many explanations have been put forward (*cf.* Jaffe and Stavins, 1994, and Sorrell *et al.*, 2004). We will not restate them here but simply stress that TWC schemes may help alleviating some (but not all) of them. Indeed several explanations of the energy-efficiency gap point out that some consumers give more importance to investment costs than to energy costs, for various reasons: limited access to credit due to asymmetric information by lenders on the credit market, split incentives to save energy, *e.g.*, in collective housing or commercial centres, rigid separation between investment and operating budget in organisations...

By reducing the cost of energy-efficient capital goods for the consumers, TWC schemes may thus help mobilising a part of the energy-efficiency gap more easily than taxes. However this intuition should be checked in a formal model featuring some factors which explain the energy-efficiency gap, including those mentioned above. We leave this for future research.

4.3.3 Transaction costs

In the case of TWC schemes, more precisely of the British EEC, Mundaca (2007) identified and quantified transaction costs through a questionnaire distributed to energy suppliers and through interviews. He found out that transaction costs include search for information, persuasion of customers, negotiation with business partners, measurement and verification activities and due accreditation of savings. Mundaca estimated that transaction costs represented 8% to 12% of investment costs for lighting measures and 24% to 36% for insulation measures.

These figures are quite significant and most likely higher than transaction costs that could be generated with taxes or regulations.

¹⁰¹ In the model we assume that economic agents (in particular energy suppliers and consumers) are perfectly rational and that the information provided is perfect. As a consequence, we rule out the energy-efficiency gap, while this gap may be seen as one of the main reasons for implementing energy-efficiency policies. Yet various economic mechanisms may explain it and no theoretical model can represent all of them. Hence, choosing a model featuring one of the economic mechanisms behind the energy-efficiency gap appears certainly desirable, but only as a second step, once results from a more canonical model with perfect rationality and information are available.

5 Conclusion

Although simple and transparent, our partial equilibrium model allows us to compare in a single framework tradable white certificate schemes with the main existing policy instruments for energy efficiency: energy taxes, subsidies on energy-saving goods and regulations setting a minimum level of energy efficiency. We highlight the importance of the rebound effect and more generally of the impact of the policy instruments on the consumption of energy service. We provide three major conclusions.

First, if a tradable white certificate scheme is to be implemented, a generally neglected but important issue is whether the energy-efficiency target imposed to every energy supplier is in proportion of the current quantity of energy sold by this firm or whether this target is disconnected from the firm's current decisions. We argue for the former option, which reduces the distributive impact of the policy, the rebound effect and the overall cost.

Second, a tradable white certificate scheme (with targets in proportion of the current quantity of energy sold by this firm) entails an overall cost higher than an energy tax but less than a subsidy on energy-saving goods. The difference in cost among policy instruments is low for energy services with a low elasticity of demand, such as white appliances, but may be high for energy services with a higher elasticity of demand, such as automobile transportation, space heating, water heating or space cooling.

Third, a tradable white certificate scheme (with the above precision) may be politically easier to implement than an energy tax because it entails little wealth transfers.

We also discuss informally some mechanisms not included in our models. Firstly, compared to rigid standards, a TWC scheme has the advantage of equalising the marginal cost of energy saving, but generate more transaction costs. Secondly, compared to taxes, they also generate more transaction costs but they are probably more able to address the energy-efficiency gap.

Acknowledgements

We thank two anonymous referees, Emmanuel Combet, Damien Demailly, Dominique Finon, François Gusdorf, Jean Mercenier, Michel Moreaux, Franck Nadaud, Martin Quaas, Michèle Sadoun, Richard Sykes, Henri Waisman and participants at the CIRED seminar, ECEEE Summer study and EAERE congress for their comments on earlier drafts of this paper, as well as the *Institut français de l'énergie* and the CNRS energy program (grant PE3.1-1 APC-SE) for financial support. The usual caveat applies.

Appendix 1

Variable	Domain	Signification	policy instrument
e	> 0	Quantity of energy	All
g	> 0	Quantity of energy-saving goods and services	"
c	> 0	Quantity of composite good	"
ES	> 0	Level of energy service	"
$P_i, i \in e, g, c, ES$	> 0	Price of good i	"
w	≥ 0	Energy savings target for each unit of energy sold	WC%
W	≥ 0	Energy savings target	WC _A
P_w	≥ 0	Price of tradable white certificates	WC%, WC _A
t	≥ 0	Tax rate	TH, T _E
s	≥ 0	Subsidy rate	S
LS	≥ 0	Lump-sum tax/subsidy/rebate	TH, T _E , S
r	≥ 0	Minimum ratio of energy efficiency ES/e	R

Table 16: List of model variables

Parameter	Domain	Signification
$\alpha_i, i \in e, g, c$	$\in 0, 1$	Share parameter of good i in consumers' utility
$\gamma_i, i \in e, g, c$	≥ 0	Intercept of suppliers' marginal production cost curve
$\delta_i, i \in e, g, c$	≥ 0	Slope of suppliers' marginal production cost curve
σ_a	≥ 0	Elasticity of substitution in the utility function (upper level)
σ_b	> 0	Elasticity of substitution in the utility function (lower level)

Table 17: List of model parameters

Appendix 2: Comparison of national targets

We compare national targets by formulating them in the same way: in *TWh of final energy savings, cumulated* over the measures lifetime and *discounted*. This is actually the way the British and French targets are formulated (with close discount rates of respectively 3.5% and 4%). The difficulty is thus to convert into this way the Italian target, originally formulated in ton of oil equivalent (toe) of primary energy.

For that purpose, we interpret the Italian target as follows (Pavan, 2005):

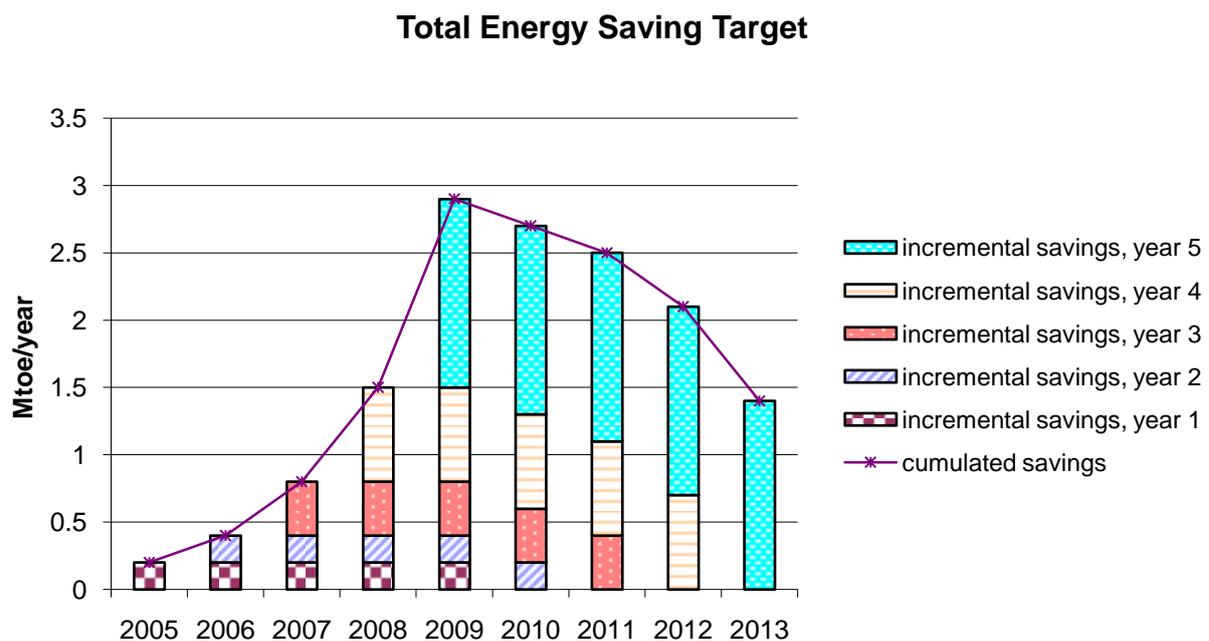


Figure 52: Italian energy saving target

The undiscounted cumulated savings are the area under the curve, which is equal to five times the amount of savings in year 2009 (2.9 Mtoe). Since we use a 4% discount rate, the multiplying factor is not 5 but actually 4.63. Since this figure is in primary energy, we multiply it by 0.8^{102} to convert it in final energy and by 11.63 to convert it in TWh.

We thus have: $2.9 * 4.63 * 0.8 * 11.63 = 125$ TWh.

We then divide every national absolute target by the scheme's length and formulate them in "annual TWh". This unit has no physical meaning but allows us to compare the *absolute* constraint levels in a standardised way. Eventually we compare these amounts to the national final energy consumption in order to have an idea of the *relative* constraint of each scheme, using the IEA statistics of year 2005.

¹⁰² This is approximately the ratio between final consumption (148.07 Mtoe according to IEA) and primary consumption (186.8 Mtoe according to Eurostat) in Italy in 2005.

	UK 02-05	UK 05-08	Italy 05-09	France 06-09
Quantitative target (standardised TWh)	81 TWh ¹⁰³	130 TWh	125 TWh	54 TWh
Scheme length	3 years	3 years	5 years	3 years
Annual constraint	27 TWh/year	43 TWh/year	25 TWh/year	18 TWh/year
Annual final energy consumption in 2005	1886 TWh/year	1886 TWh/year	1722 TWh/year	2052 TWh/year
Target in % of final energy consumption	1.43%	2.28%	1.45%	0.88%

Table 18: Comparison of national targets

The results of this standardization exercise must be interpreted carefully since similar measures do not generate the same amount of credits in every country. In particular the energy savings generated by insulation measures are cumulated over 8 years in Italy, 35 in France and 40 in the UK. Hence our comparison probably underestimates the Italian target compared to the others.

¹⁰³ The original figure is 62 TWh with a 6% discount rate; it amounts to 81 TWh with a 3.5% discount rate (Defra, 2004, p.4)

References

- ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie], 2008, *Marchés, emplois et enjeu énergétiques des activités liées à l'efficacité énergétique et aux énergies renouvelables : situation 2006-2007 – perspectives 2012*
- AEEG [Autorità per l'energia elettrica e il gas], 2007, *Secondo rapporto annuale sul meccanismo dei titoli di efficienza energetica. Situazione al 31 maggio 2007*
- AIE [Agence internationale de l'énergie], *Energy balances of OECD countries, 2004-2005*, Paris
- Alcott, B., 2008, "The sufficiency strategy: Would rich-world frugality lower environmental impact?", *Ecological Economics*, 64(4): 770-786
- Bertoldi, P., T. Huld, 2006, "Tradable certificates for renewable electricity and energy savings", *Energy Policy*, 34(2):212-222
- Bertoldi, P., S. Rezessy, 2006, *Tradable certificates for energy savings (white certificates) – theory and practice*, Institute for Environment and Sustainability, JRC, European Commission, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. Reference EUR 22196 EN
- Besson, D., 2008, « Consommation d'énergie: autant de dépenses en carburants qu'en énergie domestique », *Note INSEE PREMIERE*, n°1176
- DGEMP [Direction générale de l'énergie et des matières premières], 2008, *Lettre d'information des Certificats d'économies d'énergie*, mars
- Dupuis, P., 2007, *Les certificats d'économies d'énergie: Le dispositif français*, <<http://www.industrie.gouv.fr/energie/developp/econo/pdf/cee-diaporama.pdf>>
- Ellerman, A.D., J.P. Montero, 2002, "The temporal efficiency of SO₂ emissions trading", *MIT Center for Energy and Environmental Policy Research Working Paper*, No. 02-003
- EuroWhiteCert, 2007, *White Certificates: concept and market experiences*
- Gerlagh, R., O. Kuik, 2007, "Carbon leakage with international technology spillovers", *FEEM Working Paper*, 33.2007
- Giraudet, L.-G., 2007, *Comment comprendre les systèmes de « certificats blancs échangeables » ?*, Mémoire de Master Economie du développement durable, de l'énergie et de l'environnement
- Greening, L.A., D. L. Greene, C. Difiglio, 2000, "Energy efficiency and consumption – the rebound effect – a survey", *Energy Policy*, 28(6-7):389-401
- INSEE [Institut national de la statistique et des études économiques], 2007, *Tableau entrées-sorties 2004 niveau 118 base 2000*
- Jaffe, A.B., R.N. Stavins, 1994, "The energy-efficiency gap: What does it mean?", *Energy Policy*, 22(10):804-810
- Langniss, O., B. Praetorius, 2006, "How much market do market-based instruments create? An analysis for the case of "white" certificates", *Energy Policy*, 34(2):200–211
- Moisan, F., 2004, « Les certificats blancs : un nouvel instrument de marché pour la maîtrise de l'énergie », *Revue de l'énergie*, 553:21-28
- Mundaca, L., 2007, "Transaction costs of Tradable White Certificate schemes: The Energy Efficiency Commitment as a case study", *Energy Policy*, 35(8):4340-4354

- Mundaca, L., 2008, "Markets for energy efficiency: Exploring the implications of an EU-wide 'Tradable White Certificate' scheme", *Energy Economics*, 30(6):3016-3043
- OFGEM [U.K. Office and Gas and Electricity Markets], 2005, *A review of Energy Efficiency Commitment 2002-2005, A report for the Secretary of State for Environment, Food and Rural Affairs*
- OFGEM [U.K. Office and Gas and Electricity Markets], 2007, *A review of the second year of the Energy Efficiency Commitment 2005-2008*
- OFGEM [U.K. Office and Gas and Electricity Markets], 2008, *EEC update*, 23, February
- Oikonomou, V., M. Rietbergen, M. Patel, 2007, "An ex-ante evaluation of a White Certificates scheme in The Netherlands: A case study for the household sector", *Energy Policy*, 35(1):1147-1163
- Quirion, P., 2006, "Distributional impacts of energy-efficiency certificates vs. taxes and standards", *FEEM working paper*, 18.2006
- Quirion, P., 2007, « Comment faut-il distribuer les quotas échangeables de gaz à effet de serre ? », *Revue française d'économie*, 13(2):129-164
- Salomon, T., C. Couturier, M. Jedliczka, T. Letz, B. Lebot, 2005, "A negawatt scenario for 2005-2050", *Proceedings of the ECEEE Summer Study*
- Sijm, J., K. Neuhoff, Y. Chen, 2006, "CO₂ cost pass-through and windfall profits in the power sector", *Climate Policy*, 6: 49-72
- Sorrell S., E. O'Malley, J. Schleich, S. Scott, 2004, *The economics of energy efficiency: barriers to cost-effective investment*, Cheltenham: Edward Elgar
- Sykes, R., 2005, *Ten Years of Energy Efficiency in the UK Residential Market*, Conférence "Les certificats d'économies d'énergie: un nouvel instrument pour l'efficacité énergétique", Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, ADEME, Paris, 8 Novembre
- Vine, E., J. Hamrin, 2008, "Energy savings certificates: A market-based tool for reducing greenhouse gas emissions", *Energy Policy*, 36(1):467-476
- Wirl, F., 1989, "Analytics of demand-side conservation programs", *Energy Systems and Policy*, 13:285-300

Annexe III: Exploring the potential for energy conservation in French households through hybrid modelling

Cette annexe détaille les équations, le calibrage et les analyses de sensibilité du modèle du chapitre III. Elle retranscrit un *working paper* soumis à *Energy Economics* le 5 janvier 2011 :

Giraudet, L.-G., C. Guivarch, P. Quirion, 2011, "Exploring the potential for energy conservation in French households through hybrid modeling", *CIREN working paper DT/WP*, No 2011-26

1 Introduction

Until the last decade, the debate in energy-economy modelling was polarised between economists' top-down and engineers' bottom-up techniques. Since then, so-called "hybrid" models have been used, in some sectors, to combine the technological explicitness typically found in bottom-up models with the economic mechanisms typically found in top-down models (Hourcade *et al.*, 2006). To date, hybrid models have focused on electricity generation and, to a lesser extent, on transportation, but rarely on the building sector¹⁰⁴, in spite of its major potential for energy conservation and carbon dioxide emissions mitigation (Levine *et al.*, 2007). Yet hybrid modelling represents a promising tool for addressing the complex economic and technological dynamics in this sector, which conventional bottom-up or top-down models fail to capture.

The first weakness, frequently pointed out in conventional modelling, is the emphasis placed on technology adoption rather than technology utilization (Ürge-Vorsatz *et al.*, 2009; Moezzi *et al.*, 2009; Kavgić *et al.*, 2010). Energy conservation can be seen as the interplay between *efficiency*, *i.e.* investment in energy efficient technologies, and *sufficiency*, *i.e.* a decrease in the utilization of energy consuming durables (Herring, 2009; Alcott, 2008). The former has received more attention from forward-looking studies, but the latter must also be included to fully assess the potential for energy conservation. Furthermore, considering together efficiency and sufficiency allows the rebound effect to be addressed (Sorrell and Dimitropoulos, 2008; Sorrell *et al.*, 2009), *i.e.* when energy efficiency improvements are followed by a less-than-proportional decrease (or even increase) in absolute energy consumption due to increased load or frequency of use of the equipment.

Although efficiency has been prioritized, conventional models have failed to satisfactorily address the "energy efficiency gap" (Jaffe and Stavins, 1994b; Sanstad and Howarth, 1994), *i.e.* the under-provision in energy efficient durables despite the social profitability of such investments. Purchase decisions are subject to a set of "barriers", categorized either as *market failures* that blur cost-minimizing investment decisions, *e.g.* imperfect information, split incentives or liquidity constraints, or *behavioural failures*, such as bounded rationality and heuristic decision-making, that move investment decisions away from cost-minimization (Gillingham *et al.*, 2009; Sorrell, 2004). Pure top-down models tend to ignore the gap, whereas pure engineering bottom-up models tend to overestimate it (Hourcade *et al.*, 2006). Between the two, the problem is generally restated, rather than directly addressed, by using particularly high discount rates to represent the whole set of barriers (Jaffe and Stavins, 1994a,b; Mundaca, 2008).

The aim of this paper is to introduce a hybrid framework specifically developed to overcome these problems. It builds on the connection of Res-IRF, a bottom-up module of the French building stock, to the general equilibrium model IMACLIM-R (Crassous *et al.*, 2006; Sassi *et al.*, 2010) adapted to France. Res-IRF focuses on the consumption of electricity, natural gas and fuel oil for space heating¹⁰⁵ which accounts for 20% of total French energy consumption (ADEME, 2008). It is designed with a flexible simulation architecture which allows the incorporation of insights from both engineering and

¹⁰⁴ Hybrid models addressing residential buildings include CIMS in Canada (Jaccard and Dennis, 2006), Hybris in Denmark (Jacobsen, 1998) and NEMO-ICARUS in the Netherlands (Koopmans and te Velde, 2001).

¹⁰⁵ Other residential uses are represented more roughly by price and income elasticities but not detailed here.

various economic fields. The overall modeling framework can be regarded as hybrid¹⁰⁶ in two ways: (i) Res-IRF is a bottom-up model enriched with microeconomic mechanisms; (ii) its linkage to IMACLIM-R France ensures macroeconomic consistency.

This paper considers the questions: *How can the major barriers to energy conservation be represented in a hybrid model? What potential for energy conservation is hindered by such barriers?* Section 2 describes the simulation module and the grounds for modelling choices. Section 3 analyses a reference scenario to illustrate the basic phenomena addressed by Ref-IRF. Section 4 provides a sensitivity analysis that allows quantifying the potential for energy conservation in existing dwellings. Section 5 concludes.

2 The Residential module of IMACLIM-R France (Res-IRF)

Res-IRF models the evolution of building stock energy performance through new constructions, energy retrofits and fuel switches¹⁰⁷. This section comments on the main equations of the model; the parameter settings are outlined in annex 1.

2.1 Determinants of the demand for space heating

At the most aggregate level, the *final* energy demand for space heating (E_{fin} , in kWh/year) can be decomposed as a product of total building stock (S , in m²), an “efficiency” term (E_{conv}/S in kWh/m²/year) standing for specific energy consumption under *conventional* utilization, and a “sufficiency” term, or dimensionless service factor (E_{fin}/E_{conv}) representing the continuous short-term adjustment of heating infrastructure utilization. This is summarized by the following identity:

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

(S) is made up of “existing” buildings, *i.e.* those standing prior to the calibration year 2007, and “new” buildings, constructed from 2008 onwards. Both stocks are disaggregated into detached houses and collective dwellings, by energy carrier (electricity, natural gas, fuel oil) and by energy performance class. The heating infrastructure is not described explicitly, but implicit packages of measures on the building envelope (insulation, glazing) and the heating system are assumed to reach discrete levels of energy efficiency. The performance of the existing building stock ranges from class G, the least efficient (over 450 kWh/m²/year of primary energy for heating, cooling and hot water) to class A, the most efficient (below 50 kWh/m²/year of primary energy), as labelled by the French energy performance certificate (Marchal, 2008; MEEDDAT, 2008). The new building stock is split into three performance categories: the ‘BC05’ or building code 2005 level (from 250 to 120 kWh/m²/year of primary energy, depending on the local climate, for heating, cooling, hot water and ventilation), ‘LE’ or Low-Energy buildings (50 kWh/m²/year) and ‘ZE’ or Zero-Energy buildings for which primary energy consumption is lower than the renewable energy they can produce (MEEDDM, 2010). After

¹⁰⁶ Hourcade *et al.* (2006) define hybrid models as “those bottom-up or top-down energy-environment models that have made at least one modification that shifts them substantially away from their conventional placement [along the three dimensions of technological explicitness, microeconomic realism and macroeconomic completeness]”.

¹⁰⁷ Hence, it features a “putty-semi-putty” capital specification, stating that capital malleability is higher *ex ante* than *ex post* (Koopmans and te Velde, 2001).

denoting $I=\{G,\dots,A\}$ the set of efficiency classes in existing dwellings, $J=\{BC05, LE, ZE\}$ the set of construction categories, ρ_k a parameter representing the inverse efficiency of class k and F_k a variable representing the service factor of class k , identity (1) can be restated as:

$$E_{fin} = \sum_{k \in I \cup J} S_k \rho_k F_k \quad (2)$$

This equation is very similar to those used for energy demand relations in conventional models (Jacobsen, 1998; Swan and Ugursal, 2009). The association of the last two terms follows a classical discrete-continuous approach (Hausman, 1979 ; Dubin and McFadden, 1984 ; Nesbakken, 2001). Section 2.2 concentrates on the retrofitting process that determines S_i $i \in I$, assuming unchanged energy carrier; fuel switching is described in annex 2, and the growth of new building stock S_j $j \in J$, determined in a very classical manner by population and income growth, is described in annex 3.

2.2 Retrofitting dynamics

Retrofits are modelled as transitions from an initial efficiency class i ($i \in I$) to any higher final class f ($f \in I, f > i$). Overall, energy efficiency improvements in existing dwellings come from variations in the quantity and/or the quality (*i.e.* the ambition) of retrofits; both derive from changes in the relative profitability of retrofitting options. Such variations are induced by energy prices and sustained by retrofitting cost decreases. The latter is consecutive to the self-reinforcing processes of information acceleration on the demand side and learning-by-doing on the supply side. Finally, this evolution is countervailed by the natural exhaustion of the potential for profitable retrofitting actions. The general dynamics is mediated by parameters reflecting consumer heterogeneity and some barriers to energy efficiency.

The equation system determining the retrofitting dynamics is mapped in figure 53 and developed hereafter. Note that without explicit temporal subscript, variables hold at the year considered.

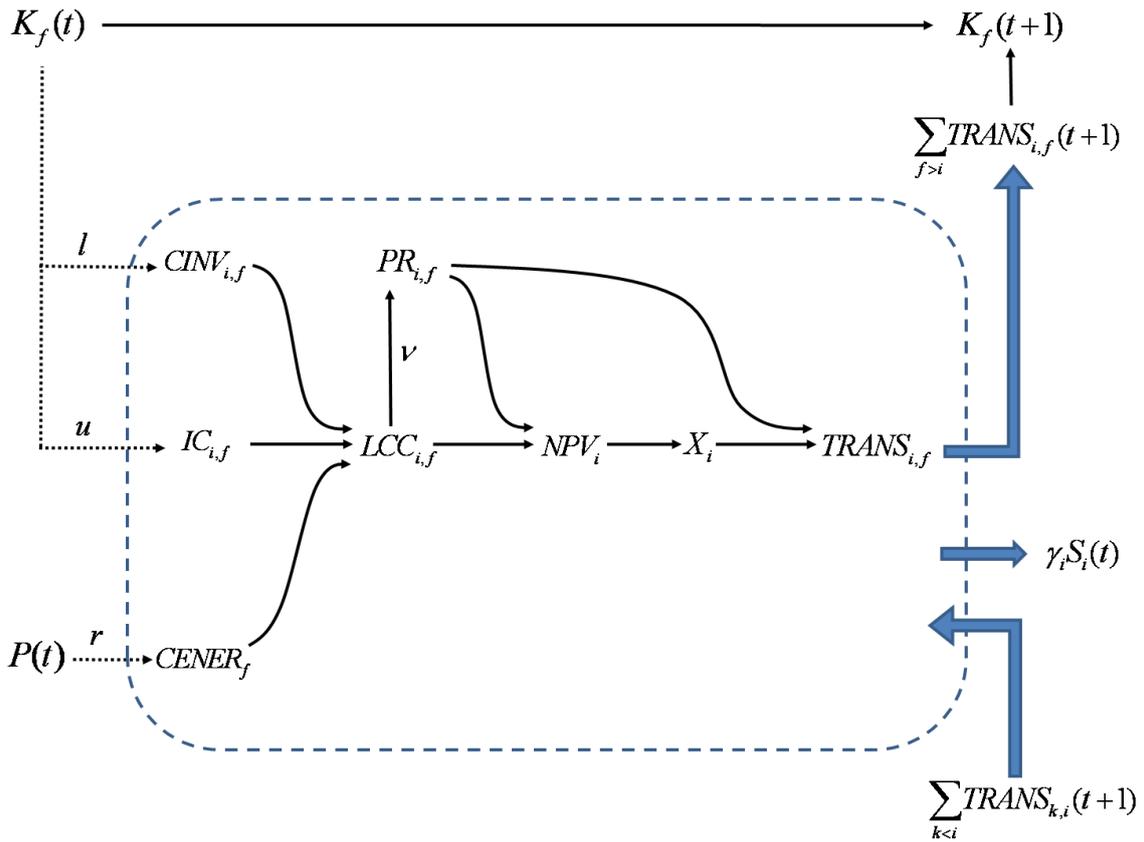


Figure 53: The retrofitting dynamic system

The dashed box delineates stock $S_i(t+1)$. Above are classes $f > i$ and below are classes $k < i$. Dotted arrows indicate how input variables enter the system. Thin arrows refer to other deterministic relations. Thick arrows indicate physical flows of dwellings that quit or enter stock $S_i(t+1)$. Capital letters refer to variables and small ones to main parameters.

2.2.1 Capital turn-over

Each year, the building stock S_i is eroded by demolition of a fraction γ_i of class i dwellings. Following Sartori *et al.* (2009), this process is assumed to affect the worst energy classes first. In addition, stock S_i gains some dwellings that are retrofitted from any lower class k ($k \in I, k < i$) to class i , and loses some dwellings retrofitted to any higher energy class f ($f \in I, f > i$):

$$S_i(t+1) = (1 - \gamma_i)S_i(t) + \sum_{k < i} TRANS_{k,i}(t+1) - \sum_{f > i} TRANS_{i,f}(t+1) \quad (3)$$

Transitions $TRANS_{i,f}$ apply to a fraction X_i of the remaining stock of initial class i , with final class f being chosen in proportion $PR_{i,f}$:

$$TRANS_{i,f}(t+1) = (1 - \gamma_i)S_i(t)X_i(t+1)PR_{i,f}(t+1) \quad (4)$$

2.2.2 Choice of a retrofitting option

The proportion $PR_{i,f}$ of class i dwellings that are retrofitted to higher classes f is inferred from the life cycle cost of the transition compared to the life cycle costs of all other possible transitions to higher classes h ($h \in I, h > i$):

$$PR_{i,f} = \frac{LCC_{i,f}^{-\nu}}{\sum_{h>i} LCC_{i,h}^{-\nu}} \quad (5)$$

Life cycle costs are the sum of transition costs $CINV_{if}$, lifetime energy operating expenditures $CENER_f$ borne in final class f and intangible costs IC_{if} :

$$LCC_{i,f} = CINV_{i,f} + CENER_f + IC_{i,f} \quad (6)$$

Equation 5 is inspired by the CIMS model (Rivers and Jaccard, 2005; Jaccard and Dennis, 2006). It incorporates a positive parameter ν , implying that the lower the life cycle cost of one transition compared to all others, the higher its proportion. Moreover, ν allows allocating a non-null market share to each option, hence overcoming the simplistic representation of a “mean householder” choosing exclusively the least life cycle cost option. In other words, ν reflects the heterogeneity of markets and preferences, provided that people might be randomly interested in some attributes of the technology other than energy efficiency. In Res-IRF, ν is set exogenously to 8 which allocates a 44% proportion to the least-cost transition departing from class G.

2.2.3 Transition costs and learning-by-doing

Numerous possible combinations of measures on the envelope and the heating system are abstracted into a limited number of average transition packages. However, information about implicit transition costs is less readily available than information about underpinning technology costs. To cope with lacking data, the matrix of initial transition costs $CINV_{if}(0)$, *i.e.* the sum of equipment purchase and installation cost, is constructed with respect to the following principles: (i) retrofitting has marginally decreasing returns (BRE, 2005), *i.e.* the marginal cost of reaching the next more efficient class is increasing; (ii) some technical synergies make it more profitable to co-ordinate measures rather than to undertake them successively (Gustafsson, 2000), *i.e.* the cost for one direct transition (*e.g.* from i to f) is lower than for any combination of smaller successive transitions leading to an equivalent upgrade (*e.g.* from i to an intermediate class k to f); (iii) retrofitting a very inefficient dwelling is roughly as costly as destructing and reconstructing it, *i.e.* the cost of transition G to A is slightly below the cost of a new construction, which is around €1,200/m² (MEEDDM, 2010).

		Final energy class (<i>f</i>)					
		F	E	D	C	B	A
Initial energy class (<i>i</i>)	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

Table 19: Matrix of initial transition costs (€/m²)

A variable share α of transition costs is subject to learning-by-doing, *i.e.* cost decrease with experience accumulated over time. This process is implemented as a classical power function (Wing, 2006; Gillingham *et al.*, 2008), parameterized by a learning rate l , which controls for the cost decrease induced by a doubling of cumulative experience K_f :

$$CINV_{i,f}(t) = CINV_{i,f}(0) \left(\alpha + (1-\alpha)(1-l)^{\frac{\log(K_f(t)/K_f(0))}{\log 2}} \right) \quad (7)$$

The same variable K_f applies to all transitions to final class f , whatever the initial class i , hence assuming implicit spillovers among transitions leading to the same final class. Cumulative experience K_f is approximated as the sum of past transitions to final class f :

$$K_f(t+1) = K_f(t) + \sum_{i < f} TRANS_{i,f}(t+1) \quad (8)$$

Learning-by-doing is well established for energy supply technologies, but less for the more diverse end-use technologies (Laitner and Sanstad, 2004; Jakob and Madlener, 2004). Yet a recent review of empirical works tends to show that learning rates for end-use technologies are around 18+/-9%, which is close to those historically estimated for supply technologies (Weiss *et al.*, 2010). Setting learning rate values in Res-IRF from these empirical estimates is challenging in two ways. First, the technological abstraction of energy class transitions raises the tricky issue of how to aggregate the learning rates of underpinning technologies (Feroli *et al.*, 2009). Second, empirical estimates are derived from technology purchase prices, hence abstracting from installation costs that might be high and less likely to decrease. Accordingly, Res-IRF assumes modest learning rates, as is further developed in annex 1.

2.2.4 Myopic expectation and heterogeneous discounting

Res-IRF incorporates “myopic expectation”, *i.e.* annual streams of energy operating expenditures borne in class f of inverse efficiency ρ_f are valued at current energy prices P (assuming unchanged energy carrier), projected over the lifetime n of the investment and discounted at rate r :

$$CENER_f(P) = P \left(\frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r} \right) \rho_f \quad (9)$$

This assumption, shared by most models of household energy demand¹⁰⁸, is primarily driven by technical constraints. According to Jaffe and Stavins (1994a), myopic expectation has been used routinely for estimating discount rates in a context of under-determined observations¹⁰⁹. Furthermore, the alternative assumption of perfect foresight is difficult to implement in recursive simulation models such as Res-IRF. It is *a fortiori* not realistic and theoretical grounds for using myopic expectations can be invoked, compatible with various market barriers or behavioural failures. Some authors see it as a reaction to uncertainty about the future energy prices (Hassett and Metcalf, 1993). Others refer to “folk quantification of energy” as Kempton and Montgomery (1982), who bring that feature under the heading of bounded rationality.

Private discount rate estimates for insulation and space heating investments typically reach 20-25% (Hausman, 1979; Dubin and McFadden, 1984; Train, 1985; Metcalf and Hassett, 1999; see Mundaca, 2008, Annex A.2, for the most up-to-date review). Such high values compared to conventional household investments have been interpreted as a manifestation of the energy efficiency gap (Sanstad and Howarth, 1994). As such, they are just “a restatement of the phenomena to be explained”, namely the multiple barriers to energy efficiency investments (Jaffe and Stavins, 1994b, p.807; Sorrell, 2004, p.31). Res-IRF leans on the discount rate to illustrate some of the barriers, but not all. Indeed, heterogeneous discount rates are used to account for the ‘landlord-tenant dilemma’. This refers to the split-incentives faced by the owner and the renter of a dwelling: the former is unable to recover energy efficiency investments whose benefits will accrue to the latter; the renter is neither able to recover investments whose paybacks are longer than his typical occupancy period. This phenomenon is confirmed by the observation that rented dwellings consume more energy than owner-occupied ones (Scott, 1997, for Ireland; Leth-Petersen and Togeby, 2001, for Denmark; Levinson and Niemann, 2004, in the U.S.; Rehdanz, 2007, for Germany).

Against this background, Res-IRF assumes that homeowners who face the dilemma (*i.e.* non-occupying ones) have higher profitability requirements for energy efficiency investments (*i.e.* higher discount rates) than those who do not (*i.e.* occupying homeowners)¹¹⁰. This discrepancy is further split with respect to the type of dwelling. Owners of detached houses are assumed to be more willing to undergo energy efficiency investments (*i.e.* have lower discount rates) than owners of collective dwellings, who may be discouraged by condominium rules or the imperfect appropriation of energy

¹⁰⁸ Note that the inverse calculation, *i.e.* weighting annual energy costs against the investment annuity, is generally used. See for instance Dubin and McFadden (1984, p.350-1).

¹⁰⁹ “The effects of [the energy price] and [the discount rate] are indistinguishable from each other. [...] In practice, we cannot measure either of these. So instead, what is typically done is to [...] assume that [the energy price] is equal to the current price, and then *estimate* the discount rate [...]” (Jaffe and Stavins, 1994a, p.50)

¹¹⁰ This tentative way of addressing the ‘landlord-tenant dilemma’ leaves aside some important issues. It abstracts from the reimbursement of the investment via possible gains on the real estate value of the dwelling (Jaffe and Stavins, 1994a; Scott, 1997). Moreover, it does not take into account the “sufficiency” side of the dilemma, which arises in cases where energy bills are included in the rent, hence reducing the renters’ incentives to lower utilization (Levinson and Niemann, 2004). Those issues are a fruitful area for further research and modelling.

savings due to heat transfers with adjacent dwellings. Following these principles, numerical values shown in table 20 are set in Res-IRF so as to (i) assign a conventional private discount rate of 7% to agents that are the most likely to invest, *i.e.* occupying homeowners, and (ii) allow the average discount rate weighted by the share of each type of investor to match the ‘credit card’ value of 21% commonly estimated for energy efficiency investments. Such a method implies that only a fraction of the population might be responsive to policies (IEA, 2007).

	Detached house	Collective dwelling
Owner-occupied	45% ; $r = 7\%$	12% ; $r = 10\%$
Rented	11% ; $r = 35\%$	32% ; $r = 40\%$

Table 20: Numbers (as % of the total stock) and discount rates (in %/year) in each type of dwelling

2.2.5 Intangible costs and information acceleration

Leaning solely on financial costs $CINV_{i,f}$ and $CENER_f$ to determine the proportion of transition $PR_{i,f}$ (equations 5 and 6) would not necessarily allow reproducing the transitions observed in reality. Indeed, there is empirical evidence in France for a straight mismatch between the rankings of energy efficiency options according to their pure financial cost and their relative realisation (Laurent *et al.*, 2009). Likewise, a French household survey showed that when people were asked about the main reason for which they had undergone energy efficiency actions, ‘alleviating fuel bill’ covers only 27% of the answers (TNS Sofres, 2006, p.33). Res-IRF copes with this difficulty by adding to financial costs some “intangibles costs”, as extensively used in the CIMS model (Rivers and Jaccard, 2005; Jaccard and Dennis, 2006), in order to reproduce the energy class transitions observed in 2008. The calibration of initial intangible costs is detailed in annex 4. Intangible costs appear as a convenient abstraction for the monetization of all the determinants of energy investment decisions that remain unexplained by direct financial costs. Interpreting them in the light of economic theory is more challenging, but they can be seen as partially expressing imperfect information, recognized as the major market failure that prevents energy efficiency investments (Ürge-Vorsatz *et al.*, 2009).

In a dynamic perspective, there is compelling evidence from various fields of social science, such as behavioural economics, public policy evaluation or marketing (see Wilson and Dowlatabadi, 2007) that information about technology adoption spills over with cumulative experience¹¹¹, thus inducing positive externalities that might justify public intervention (Jaffe and Stavins, 1994a, Jaffe *et al.*, 2004). Following CIMS model (Mau *et al.*, 2008; Axsen *et al.*, 2009), this process is represented in Res-IRF as decreasing intangible costs $IC_{i,f}$ with cumulative capital stock K_f of final class f (as introduced in equation 8). Hence, as intangible costs decrease, the proportion of energy class transitions become increasingly determined by sole financial costs (thus ameliorating the *quality* of retrofits). This process is bounded by a share β of fixed intangible costs, representing, for instance, the inconvenience due to indoor insulation works (Scott, 1997). The remaining share of variable intangible costs follows a logistic fit parameterized by $c > 0$ and $d > 0$, both expressed as a combination

¹¹¹ This process is labelled in many different ways, such as “learning-by-using” (Jaffe *et al.*, 2004; Gillingham *et al.*, 2009), “social contagion” (Mahapatra and Gustavsson, 2008), “social learning” (Darby, 2006a) or “the neighbour effect” (Mau *et al.*, 2008; Axsen *et al.*, 2009). Among other factors, it builds on the fact that investments in energy efficiency have a socially distinctive, cumulative function (Maresca *et al.*, 2009). Empirical quantification of the phenomenon is scarce, but tends to handle it as a logistic process (*e.g.* Darby, Axsen *et al.*, Mau *et al.*).

of β and the “information rate” u . Like the learning rate in the learning-by-doing process, parameter u controls for the magnitude of intangible cost decrease induced by a doubling of the capital stock:

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

with $c = (1-\beta)(1-u) \exp(1)$ and $d = \frac{1}{c} \frac{\beta}{1-\beta}$ (10)

2.2.6 Endogenous retrofitting rate

Upgrading the energy performance of an existing dwelling implies a binary decision about *whether or not to retrofit*, inextricably linked to the discrete choice of an energy efficiency option (Cameron, 1985; Mahapatra and Gustavsson, 2008; Banfi *et al.*, 2008). Modelling efforts tend to focus on the latter decision, holding the former exogenous (*e.g.* Siller *et al.*, 2007). Res-IRF deals with this issue by computing endogenously the fraction X_i of the remaining stock $(1-\gamma_i)S_i$ that is upgraded annually (see equation 3). For each initial energy class i , X_i is deduced from the “net present value of retrofitting” NPV_i (in euro per dwelling) by a sigmoid curve parameterized by $a > 0$ and $b > 0$:

$$X_i = f_{a,b}(NPV_i) = \frac{1}{1+a \exp(-bNPV_i)} \quad (11)$$

The net present value of retrofitting is the difference between energy operating expenditures borne in the current energy class $CENER_i$ and the life cycle cost of an average retrofitting project, *i.e.* the sum of the life cycle costs $LCC_{i,f}$ of all possible transitions, weighted by their respective proportion $PR_{i,f}$:

$$NPV_i = CENER_i - \sum_{f>i} PR_{i,f} LCC_{i,f} \quad (12)$$

This specification makes the net present value, and thus the retrofitting rate, responsive to economic factors such as energy prices. The sigmoid curve implies that the more profitable the retrofitting (*i.e.* the higher the net present value), the larger the fraction of retrofitted dwellings. The curve used in figure 54 is calibrated by selecting the positive values of a and b that minimize the realisation of retrofitting projects with null net present value¹¹², subject to the reproduction of total retrofits¹¹³ $TRANS^0$ observed for year 0 (2007):

¹¹² Since the sigmoid is monotonically increasing, this is a sufficient condition for minimizing the realisation of all retrofitting projects with a negative net present value. Some unprofitable projects are undergone – in tiny numbers though –, which prevents discontinuities in the retrofitting process.

¹¹³ This refers exclusively to the significant retrofits that induce transitions by at least one energy class. The total retrofitting activity is quite stable at 11% of the building stock per year in France, but dominated by basic

$$\begin{cases} \text{Min}_{a,b} f_{a,b}(0) \\ \text{s.t.} \sum_{i \in I} S_i^0 f_{a,b}(NPV_i^0) = TRANS^0 \\ \text{s.t.} a > 0, b > 0 \end{cases} \quad (13)$$

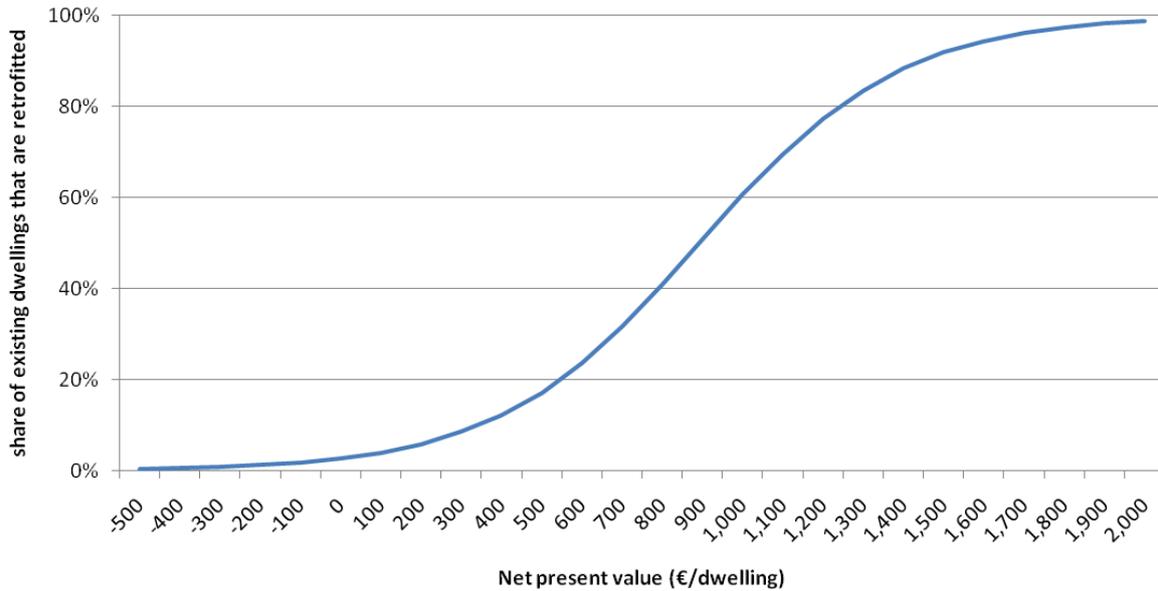


Figure 54: Share of retrofitted dwellings with respect to the net present value of retrofitting

2.3 Sufficiency and the rebound effect

Once new energy-consuming capital is embodied in new and existing buildings, one can observe systematic deviations between effective energy consumption E_{fin} and the energy E_{conv} that should be consumed under the conventional assumptions set by performance labels (efficiency classes I and construction categories J), e.g. setting thermostat to 19°C. This gap stems from technical defects (Sanders and Phillipson, 2006) and more importantly from individual variations in the utilization of the heating infrastructure (Cayla *et al.*, 2010). Such behavioural change is underpinned by economic and non-economic determinants (Ürge-Vorsatz *et al.*, 2009). The former refers to rational responses to economic signals such as the price of the energy service (derived from the price of equipments and energy inputs), which gives rise to the direct rebound effect¹¹⁴ (Sorrell and Dimitropoulos, 1998). The latter refers to psychological, cultural or lifestyle determinants that are still poorly known but increasingly analysed (Maresca *et al.*, 2009; Subrémon, 2010).

measures that do not yield energy efficiency gains, like wall painting. Overall, it is estimated that only 1% of the building stock has received measures leading to effective and significant energy savings in 2007 (OPEN, 2008).

¹¹⁴ At the microeconomic level, the direct rebound effect operates as follows: “Improved energy efficiency for a particular energy service will decrease the effective price of that service and should therefore lead to an increase in consumption of that service. This will tend to offset the reduction in energy consumption provided by the efficiency improvement” (Sorrell and Dimitropoulos, 2008, p.637). Note that this mechanism abstracts from income effects.

Ref-IRF focuses on the economic determinants of capital utilization or “sufficiency”. These are, at best, considered in bottom-up models through a price elasticity of the demand for energy service¹¹⁵. Shortcomings stem from holding elasticity constant, whereas such a relation is unlikely to be isoelastic (Haas and Schipper, 1998). In contrast, Res-IRF builds on a logistic relation that links the “service factor” or utilization variable F (which reflects the gap between effective and conventional energy consumption E_{fin}/E_{conv}) to the annual heating expenditure, as a proxy for the price of the heating service. For any dwelling of class k ($k \in I \cup J$), the annual heating expenditure being the product of inverse efficiency parameter ρ_k and energy price input P , variable F_k is defined as follows:

$$F_k(P) = 1.16 \left(0.35 + \frac{0.7}{1 + 4 \exp\left(\frac{\rho_k P - 11}{2}\right)} \right) \quad (14)$$

This relation is empirically established for space heating in France by Allibe (2009), following an original specification of Haas *et al.* (1998). It states that the higher the efficiency of the dwelling (*i.e.* the lower ρ_k), the higher the service factor, thus inducing sufficiency relaxation. Conversely, the higher the energy price, the lower the service factor, thus inducing sufficiency strengthening. Both efficiency and energy price effects are illustrated in figure 54 for the main efficiency classes and fuel types¹¹⁶. Along one single curve, investments that move a dwelling from a domain of low efficiency to a domain of a higher one (*e.g.* from class F to class C) increase the service factor, *i.e.* induce a rebound effect. Similarly, switching from a certain energy carrier to one fuelled by a cheaper energy (*e.g.* from oil to gas) within the same efficiency domain implies a vertical shift from a sharp curve to a gentler one, determining a higher service factor. More generally, any decrease in energy price stretches the curve (*i.e.* lowers the steepness at one point), thus raising the service factor, even though the fuel and efficiency of the energy carrier remain unchanged. The opposite occurs if energy price increases.

¹¹⁵ In top-down models, behavioural changes are generally merged together with efficiency improvements into price and income elasticities of the demand for energy.

¹¹⁶ For the purpose of illustration, figure 55 expresses the service factor as a function of efficiency, which takes continuous values on the x-axis, parameterized by the 2008 prices of the three main fuels. In Res-IRF, however, the efficiency parameter takes discrete values, as specified in equation 14, and the service factor fits a step curve.

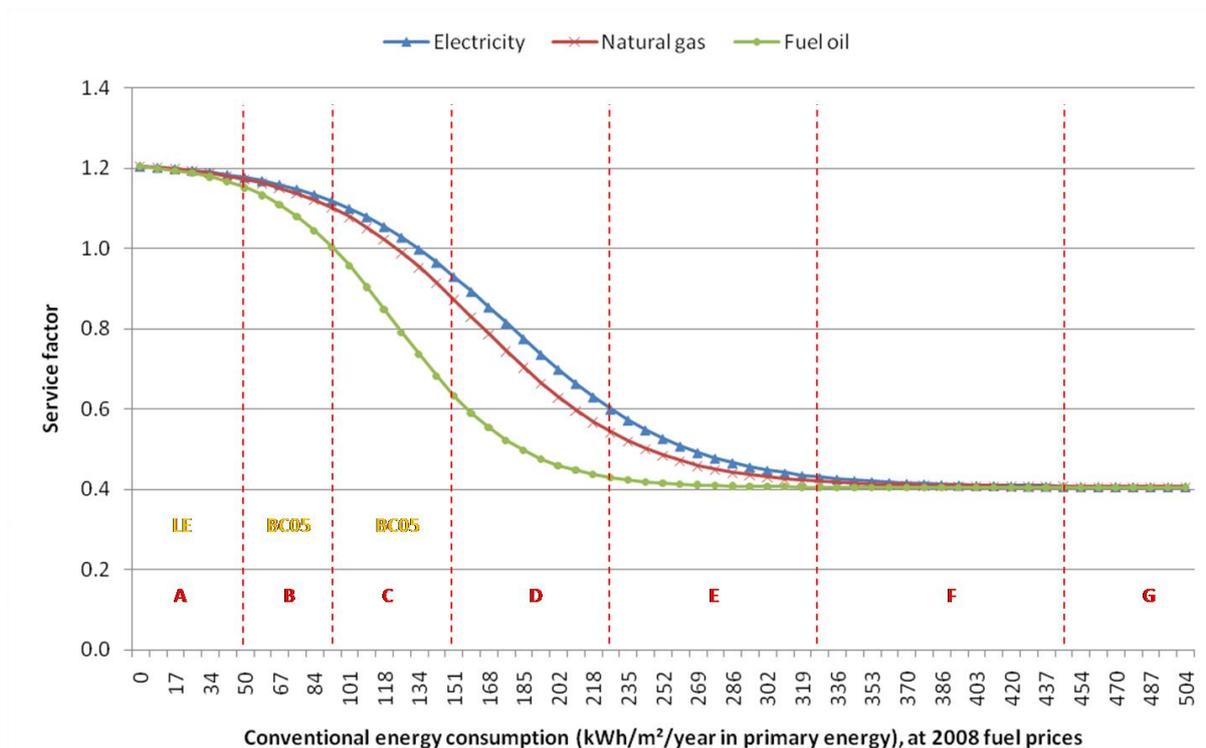


Figure 55: Sufficiency curve (adapted from Allibe, 2009)

2.4 IMACLIM-R macroeconomic feedback

Overall, the household energy demand system encapsulated in Res-IRF is determined by three input variables: the energy price P , which determines efficiency and sufficiency behaviours (see equations 9 and 14), population L and disposable income Y , which both determine the growth of the total building stock (see annex 3). In a broader perspective, Res-IRF is recursively connected to the computable general equilibrium model IMACLIM-R (Crassous *et al.*, 2006; Sassi *et al.*, 2010), adapted to France as a small open economy. Within this hybrid framework, energy prices and disposable income are endogenous variables: according to figure 56, disposable income and energy prices are solved at year (t) in the static equilibrium module of IMACLIM-R, then sent as inputs to Res-IRF, which in turn generates new demands for investment and energy that are ultimately used to compute income and energy prices in the static equilibrium at year (t+1).

Therefore, the retroaction of Res-IRF over the general equilibrium affects only energy markets and household consumption. Note that disposable income increases the total building stock, but it has no direct effect on efficiency and sufficiency behaviours in Res-IRF. Population growth is an exogenous variable for both IMACLIM-R France and Res-IRF.

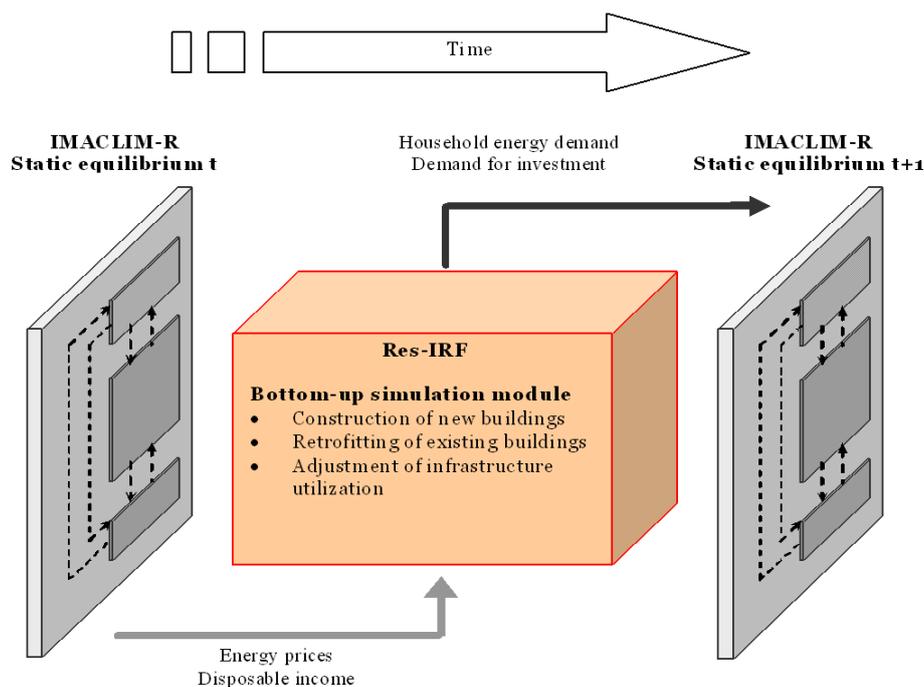


Figure 56: Recursive connection of Res-IRF to IMACLIM-R France

3 Business as usual scenario

Res-IRF is run to provide a reference or *business as usual* scenario, assuming constant climate and no change in the current regulation. In particular, forthcoming regulation that will set building codes at the 'Low-energy' level in 2013 and probably at the 'Zero-energy' level in 2020 (MEEDDM, 2010), is ignored. The following section comments on the basic phenomena exhibited by this *business as usual* run. Present results are labelled in final energy, which is the primary output of the model.

3.1 Input data

The linked hybrid model is run with two exogenous inputs: growth of the French population based on INSEE (2006), and crude oil importation price based on the Annual Energy Outlook 2008 (U.S. EIA, 2008)¹¹⁷. Domestic energy retail prices and disposable income are determined endogenously from these inputs in the static equilibrium module of IMACLIM-R. As far as Res-IRF is concerned, population increases regularly by 13% and total income approximately doubles over the 2008-2050 period. The price index of energy consumed for space heating rises up to 18%, with fluctuations of a few percentage points (pp) due to contrasting trends for different fuel prices: the price of electricity decreases slightly, the price of natural gas increases slightly and the price of fuel oil increases markedly (figure 57).

¹¹⁷ This scenario is close to the reference scenario used during the Energy Modeling Forum 25, to which Res-IRF participated (see Giraudet *et al.*, 2010).

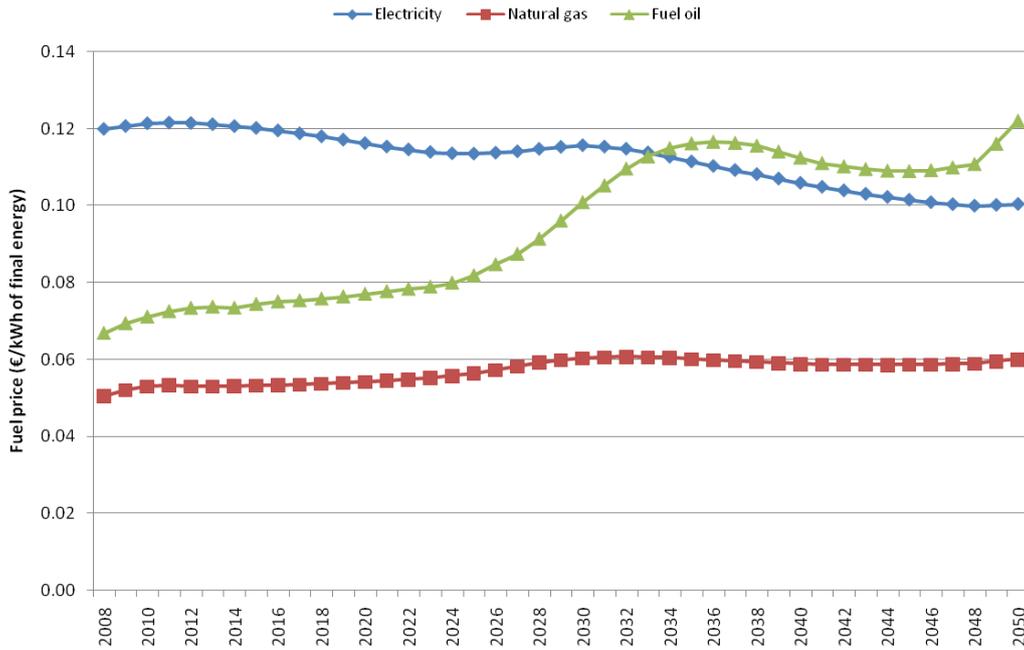


Figure 57: Reference energy prices

3.2 Evolution of the primary drivers of energy consumption

According to the *business as usual* scenario, energy consumption for space heating decreases by 93 TWh in existing dwellings and increases by 69 TWh in new dwellings in 2050, compared to the 254 TWh consumed in 2008. Overall, final energy consumption decreases by 10% over the 2008-2050 period, yielding an average annual growth rate of -0.3%. This evolution can be decomposed with respect to the three “primary drivers” introduced in identity 1, namely the total building stock, aggregate energy efficiency and aggregate sufficiency¹¹⁸. As pictured in figure 58, energy savings accruing from energy efficiency gains (conventional specific consumption decreases by an average of 1.7% per annum) are almost entirely cancelled by the rise in the building stock (by an average annual rate of 0.7%) and the fluctuating relaxation in sufficiency (the service factor increases by an average annual rate of 0.7%). Whereas the building stock and efficiency gains follow a regular trend over the long term, sufficiency adjusts to short-term energy price fluctuations. Let us examine in more detail the evolution of each of these drivers in new and existing dwellings.

¹¹⁸ Identity 1 is thus differentiated annually as $\delta E_{fin}/E_{fin} \approx \delta S/S + \delta (E_{conv}/S)/(E_{conv}/S) + \delta (E_{fin}/E_{conv})/(E_{fin}/E_{conv})$.

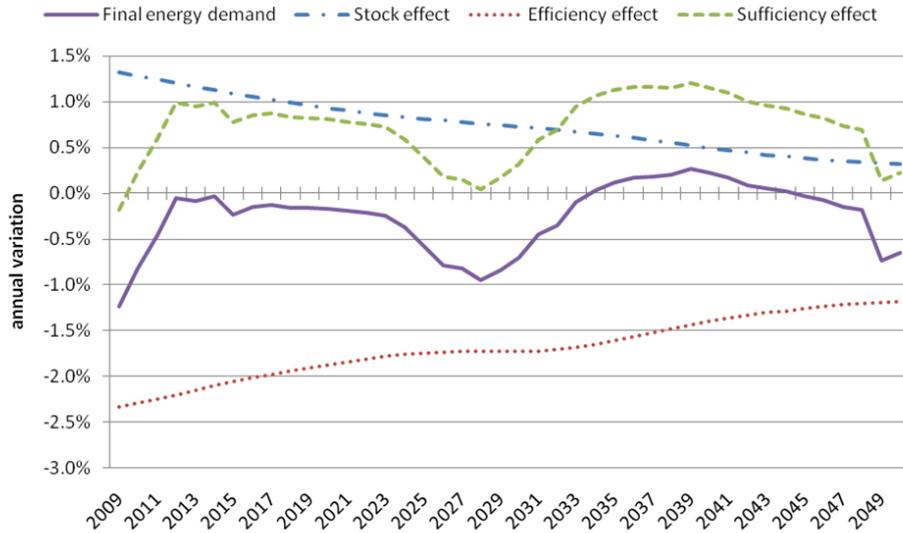


Figure 58: Decomposition of the primary drivers of the final energy demand for space heating

Total building stock increases by 31% in quantity and by 37% in surface area over the 2008-2050 period. This projection is in line with other estimates of French building stock (Traisnel, 2001; Jacquot, 2007). Dwellings in existence in 2007 represent 62% of the total surface area in 2050 (figure 59) so retrofitting is of key importance. Note that the assumed destruction of dwellings in the lowest efficiency classes is crucial: running the model under a “no destruction” scenario (*i.e.* all parameters γ_i equal 0) implies a net decrease in total energy consumption of 5% in 2050 compared to 2008, instead of 10% in the *business as usual* scenario.

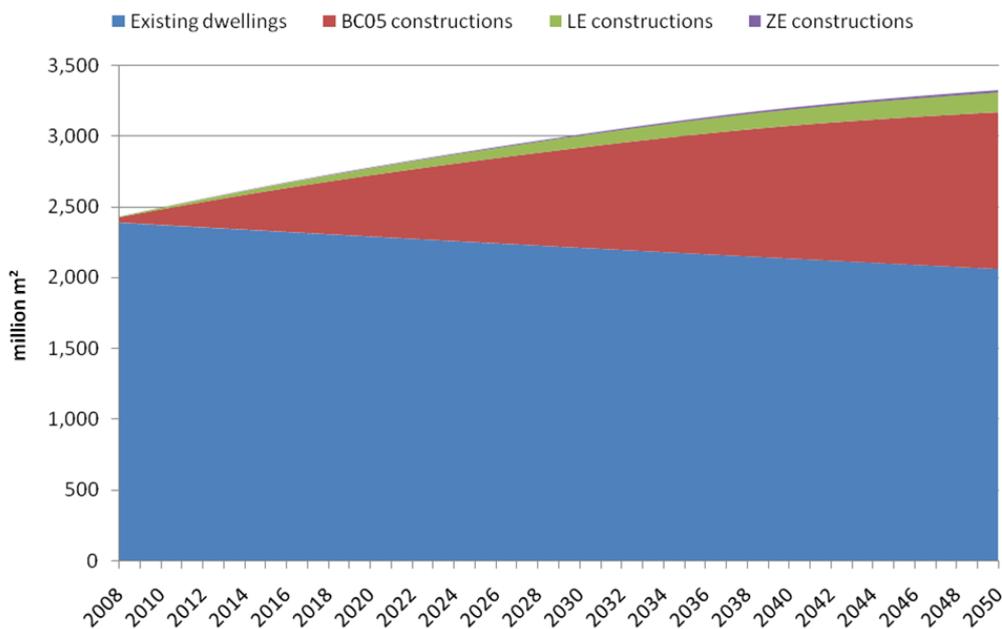


Figure 59: Growth of the total building stock, with new dwellings split by construction categories

Energy efficiency gains arise from substituting efficient dwellings for inefficient ones and from fuel switching. The relative shares of energy performance categories in the cumulative stock of new

buildings appear quite stable (figure 59) as construction decisions are influenced more by construction costs than by energy price variations (as reported in table 25, annex 3). The existing building stock shows the progressive disappearance of low efficiency classes G to D, together with a phased-in increase of high classes C to A (figure 60). This results from changes in the quality of retrofitting transitions, as well as in their quantity (figure 64, see below for explanations), both induced by energy price variations. As regards fuel switching, figure 61 suggests that the relative share of electricity in the consumption of existing dwellings increases¹¹⁹. Albeit less distinguishable, this observation holds also for new dwellings. When total building stock in 2050 is compared to 2008, the shares of electricity and natural gas in final energy consumption gain 15 pp and 1 pp, respectively, whereas fuel oil loses 15 pp. In other words, there is a general switch from fuel oil to electricity.

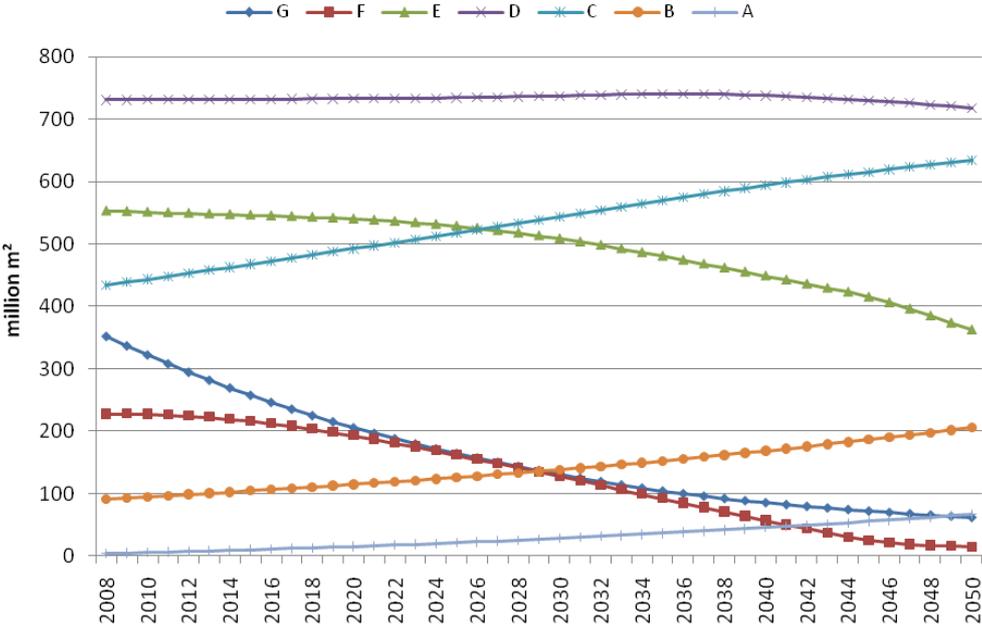


Figure 60: Numbers and efficiency of existing dwellings by efficiency class

¹¹⁹ Note that conventional energy consumption labeled in primary energy must be converted into final energy. In France, the usual coefficients of primary energy units per unit of final energy are 2.58 for electricity and 1 for natural gas and fuel oil (MEEDDAT, 2008). Hence, electricity heated dwellings have *de facto* a lower final energy consumption than dwellings of the same efficiency class that are heated by other fuels.

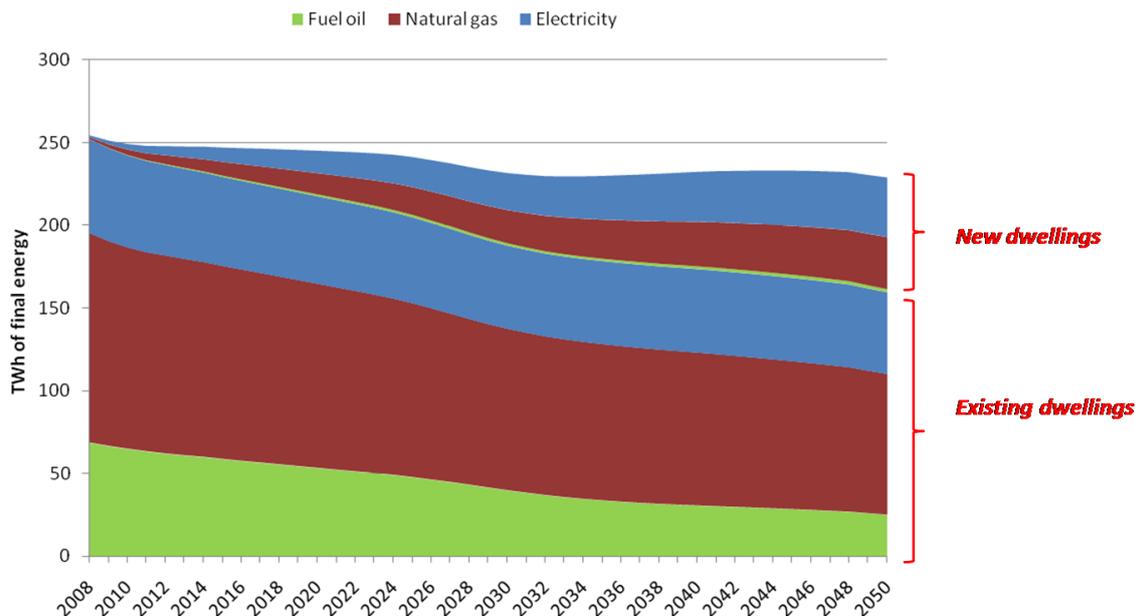


Figure 61: Evolution of energy consumption by fuel type, in new and existing dwellings

Sufficiency relaxation is established by the rise in the total service factor, calculated, following identity 1, as the ratio of total final consumption over total conventional consumption. Figure 62 shows that this aggregate trend combines contrasting trends in new and existing dwellings; one should bear in mind that efficiency gains and increasing energy prices may have opposite effects on the service factor, as introduced in section 2.3. In existing dwellings the former prevails over the latter to yield a net augmentation in the service factor. The reverse situation occurs in new buildings where efficiency gains are insufficient to counteract the energy price increase, thus lowering the related service factor¹²⁰. As a result, the service factor increases faster in the total stock than in the existing one. Indeed, as new buildings penetrate the total stock, the total factor becomes increasingly weighted by the related factor, which is declining but still higher than in existing dwellings.

¹²⁰ Not only are the efficiency gains low, but larger gains would yield a less than proportional increase in the service factor, as it saturates in the high efficiency domain of new construction categories (cf. figure 55).

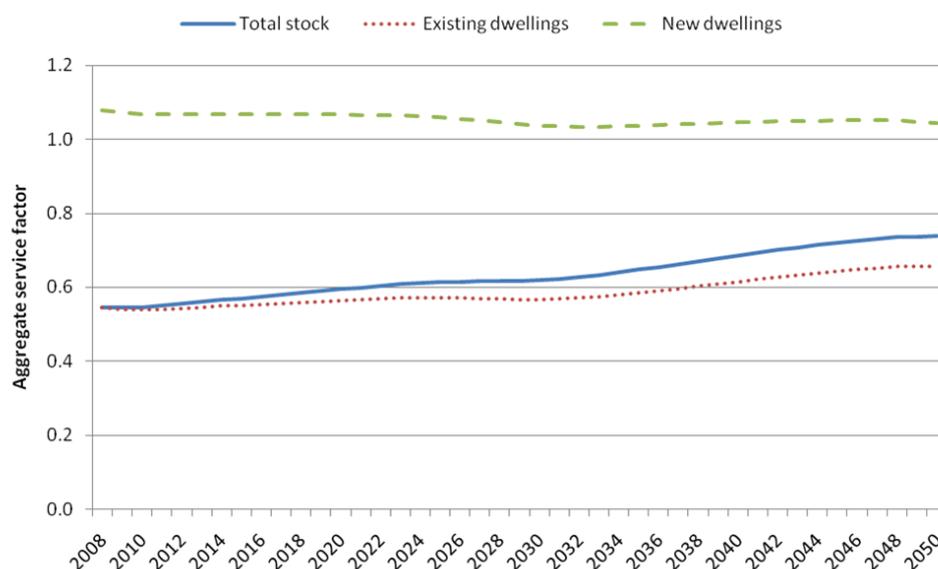


Figure 62: Sufficiency effect

3.3 Reliability of the model

The reliability of the model is assessed by examining how closely it reproduces some variables of the initial situation that do not enter the calibration process, as well as how its dynamics compares to past tendencies.

	Usual values	Model outcomes
Annual energy expenditures for space heating	€21.2 billion in 2006, <i>i.e.</i> €342/inhabitant for all energy, including wood (Besson, 2008)	€18 billion in 2008, <i>i.e.</i> €282/inhabitant for electricity, natural gas and fuel oil only
Total retrofitting expenditures	€11.6 billion in 2006 for a total retrofitting rate, regardless of efficiency, of 11% of the stock (Girault, 2008)	€4.8 billion in 2008 for 1% of the stock subject to the most aggressive retrofits
Average cost of the aggressive retrofits addressed by the model	€12,000 to €30,000 per dwelling, mean value of €20,000 (OPEN, 2008)	€20,000 per dwelling for transitions by at least one energy class
Direct rebound effect for space heating	Best guess ranges from 10 to 30% (Sorrell <i>et al.</i> , 2009)	9% in 2020 and 35% in 2050
Price elasticity of the energy demand	Long run estimates range from -0.26 to -1.89 for residential uses (Gillingham <i>et al.</i> , 2009, table 1). They reach -0.2 in the short run in France (Besson, 2008).	-0.45 for space heating in the long run (for a 23% uniform increase in energy prices)
Trends in specific demand (m²) of final energy for space heating	-3.3% in 2005 and -2% p.a. over the 1973-2005 period (ADEME, 2008)	-2.5% in 2008 and -1% p.a. over the 2008-2040 period

Table 21: Comparison of model outcomes to usual values

The first three rows of table 21 show that cost estimates are fairly well reproduced by the model. The rebound effect, approximated by the growth rate of the aggregate service factor¹²¹, tends to increase but remains in the range of best guess estimates reviewed by Sorrell *et al.* (2009) for space heating.

According to equations 9 and 14, energy prices influence both sufficiency and efficiency decisions. Following EMF13 (1996) and Boonekamp (2007), the price sensitivity of the model is assessed by changes in energy consumption due to changes in energy prices. Figure 63 compares the outcomes of two exogenous energy price scenarios: one with constant prices and one with prices increasing by 0.5% p.a. (note the limited range of values on the y-axis). The 23% price differential induces a -10% energy consumption differential in 2050 which yields a long run price elasticity of energy demand for space heating of -0.45. Again, this is in line with the usual estimates, as reviewed by Gillingham *et al.* (2009).

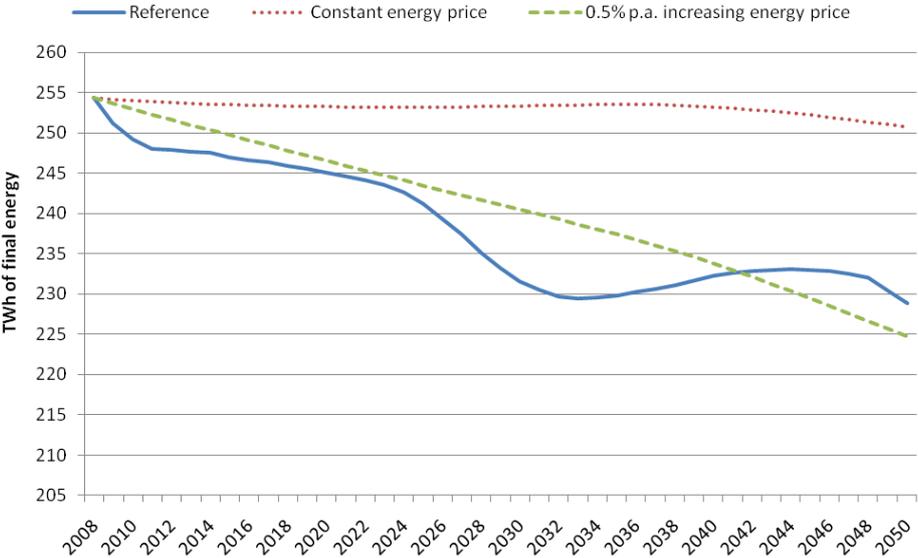


Figure 63: Sensitivity to alternative energy price scenarios

On the whole, this first run brings confidence in the model. The last row of table 21 shows that the *business as usual* decrease in specific energy demand is slower than past trends. If the reliability of the model is accepted¹²², this may owe more to the advanced exhaustion of the potential for aggressive retrofits, or to autonomous energy efficiency improvement measures that do not count towards an upgrade of energy class.

4 The potential for energy conservation in existing dwellings

This section looks at the potential for energy conservation as different barrier parameters are varied. It concentrates on the priority issue of retrofitting, the endogenous treatment of which is a

¹²¹ That is, $\Delta(E_{fin}/E_{conv})/(E_{fin}/E_{conv}) \approx (\Delta E_{fin}/E_{fin})/(\Delta E_{conv}/E_{conv})$. This can be seen as an elasticity of the energy demand to an efficiency term, which is the genuine way of defining the rebound effect (Sorrell and Dimitropoulos, 2008).

¹²² Comparing past trends to those projected by the model over the same period would have been a relevant way to address this issue (e.g. Boonekamp, 2007). However, this cannot be achieved, since the 2007 data used to calibrate the building stock by energy performance category are the oldest available.

distinctive feature of Res-IRF (see section 2.2.6). As depicted in figure 53, determination of the quantity of retrofits (variable X_i) is linked to determination of their quality (variable $PR_{i,f}$). More generally, this process stands at the end of the determining chain, hence it is affected by all the barriers incorporated in the model.

4.1 Determinants of technological change

The effective retrofit numbers, pictured in figure 64, follow a flat but slightly bell-shaped curve. To reveal the underlying mechanism, this curve is flanked by two dashed curves stemming from alternative scenarios: one excluding intangible costs (but assuming unchanged calibration parameters) and one assuming constant intangible costs. Both curves are unambiguously decreasing, as they are subject to the exhaustion of profitable retrofit potential. The early increase in the effective retrofitting numbers is due to information acceleration, as comparison with the frozen intangibles alternative suggests. This process enables the reference case to narrow in the long run the “absent intangibles” alternative, whereby retrofitting decisions are determined by sole financial costs: while reference retrofitting numbers reach 58% of the potential uncovered by the “absent intangibles” alternative, this ratio grows to reach 91% in 2050. Overall, the bell-shaped curve is the consequence of the countervailing effects of information acceleration, which prevails in the short and medium term, and the exhaustion of potential, which prevails in the long term.

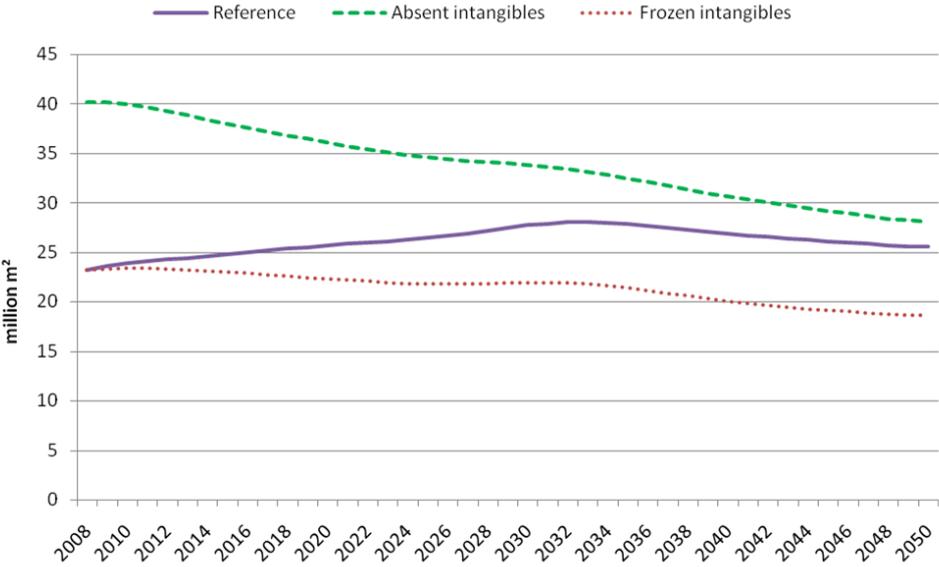


Figure 64: Annual retrofits, in reference and in alternative scenarios

In addition to information acceleration, other factors, such as learning-by-doing and the increase in energy price, influence the general process of technological change. The price indexes of the underlying variables, namely intangible costs IC , transition costs $CINV$ and energy prices for heating uses P , are portrayed in figure 65. The power-shaped decrease in transition costs and the logistic-shaped decrease in intangible costs appear clearly.

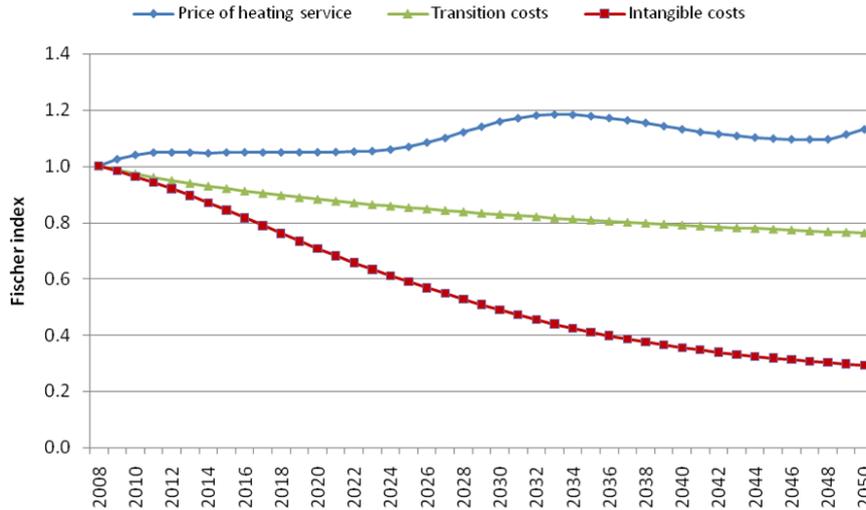


Figure 65: Evolution of retrofitting variables

The quantitative impact of each of these variables on retrofitting numbers can be assessed by freezing them, one after the other, *i.e.* setting parameters u and l to zero and using a constant energy price scenario. The influence of energy prices on technological change turns out to be negligible compared to other factors, as figure 66 suggests¹²³. This may be due to the relative stability of energy price input and its regular effect on retrofitting numbers. In contrast, learning-by-doing and information acceleration are self-reinforcing processes whose magnitude inexorably increases over time. Admittedly, this is inherent in the modelling choices made in Res-IRF regarding the characterization of the processes and the parameterization of the *business as usual* scenario. In particular, the overwhelming effect of information acceleration relies on a vigorous logistic process, parameterized at a high information rate (see annex 1).

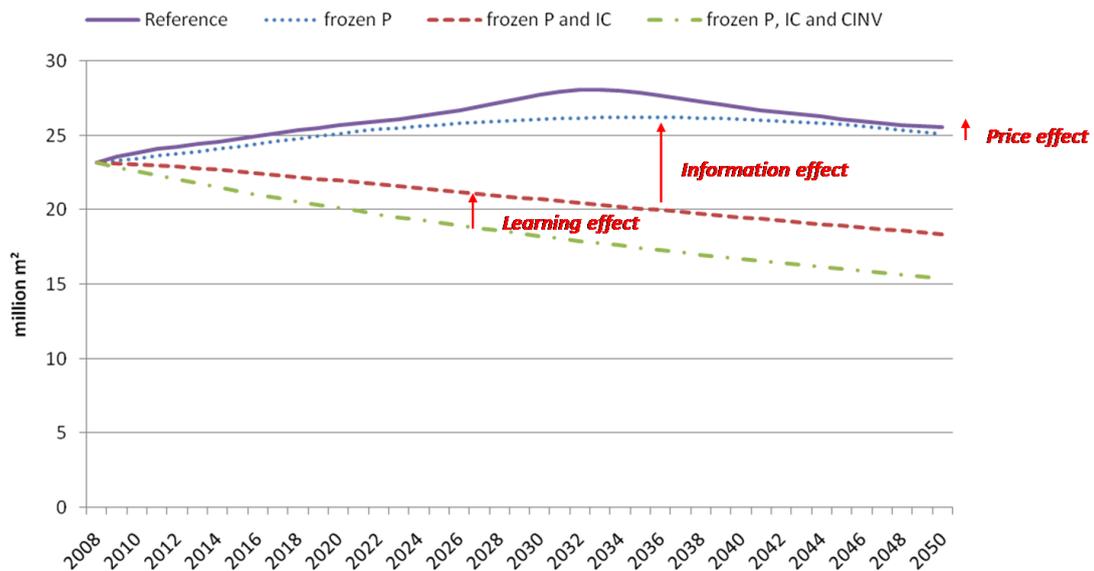


Figure 66: Change in annual retrofits due to freezing retrofitting variables

¹²³ Figure 66 illustrates one scenario combination among six possibilities, depending on which variables are frozen first and second. All combinations have been tested and they yield close results.

4.2 Sensitivity to investment parameters

The previous sensitivity analysis dealt with parameters that determine the dynamics of the model. The discount rate and the heterogeneity of preferences also determine the dynamics, but in addition, they are used to calibrate initial intangible costs (see annex 4) and retrofitting parameters (see section 2.2.6). Therefore, to illustrate their dynamic impact, alternative values are incorporated for 2010, which do not alter the calibration process. This should be interpreted as massive and durable change in investment behaviour in 2010, which is unrealistic but serves the purpose of quantifying the potential for energy conservation. For each parameter, a high and a low value is tested.

Parameter	Alternative values	Meaning
ν (Nu)	0	The heterogeneity is maximal and all options have the same proportion. For instance, the proportion of any of the six possible transitions from class G is around 17%.
	100	The heterogeneity is minimal and only the least cost option is chosen. For instance, the least cost transition from class G is allocated a 98% proportion
r (DR)	7% for all decision-makers	All decision-makers have a conventional private discount rate, as assumed by McKinsey&Company (2009): the landlord-tenant dilemma, as incorporated in the model, is ignored
	21% for all decision makers	All decision-makers have a discount rate equal to the average one: the landlord-tenant dilemma is present but it affects indistinctively all decision-makers

Table 22: Alternative parameter setting

As illustrated by figure 68, retrofitting numbers decrease with $\nu = 0$ and $r = 21\%$ and increase with $\nu = 100$ and $r = 7\%$, compared to the intermediate reference scenario parameterized by $\nu = 8$ (*i.e.* the least cost option gets 44%) and the heterogeneous discount rates outlined in table 20. If $\nu = 100$, the proportion of costly transitions is lower than in the reference case (equation 5). This lowers the weighted average of transition costs, hence the net present value of retrofitting increases (equation 12), as does the retrofitting rate (equation 11). Similarly, if $r = 7\%$ for all decision-makers, the relative weight of energy operating expenditure in life cycle costs increases (equations 9 and 6), which favours the highest efficiency options compared to less efficient ones. Again, this increases the net present value of retrofitting and thus its rate. In contrast, the opposite effect occurs for alternatives $\nu = 0$ and $r = 21\%$.

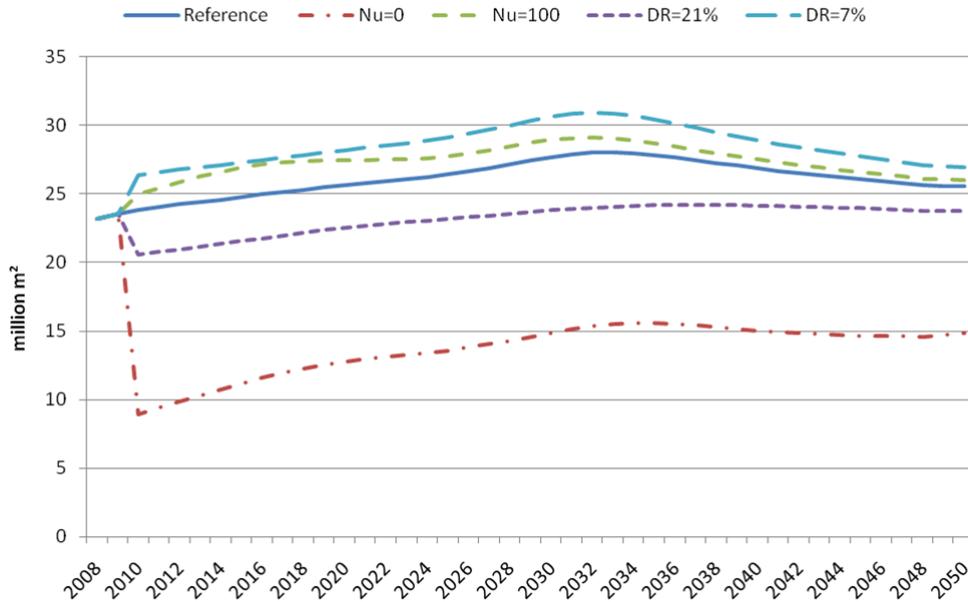


Figure 67: Change in annual retrofits due to parameter variation

The clear impact of parameter ν on the quantity of retrofits is more ambiguous when dealing with their quality (figure 68). Compared to the $\nu = 100$ case, the $\nu = 0$ case emphasizes the tail distributions, e.g. the lowest efficiency class (G) but also the highest (A) in existing dwellings in 2050. Things are clearer with parameter r , as there are relatively fewer inefficient dwellings (classes G to D) and relatively more efficient ones (C to A) in the 7% case compared to the 21% case.

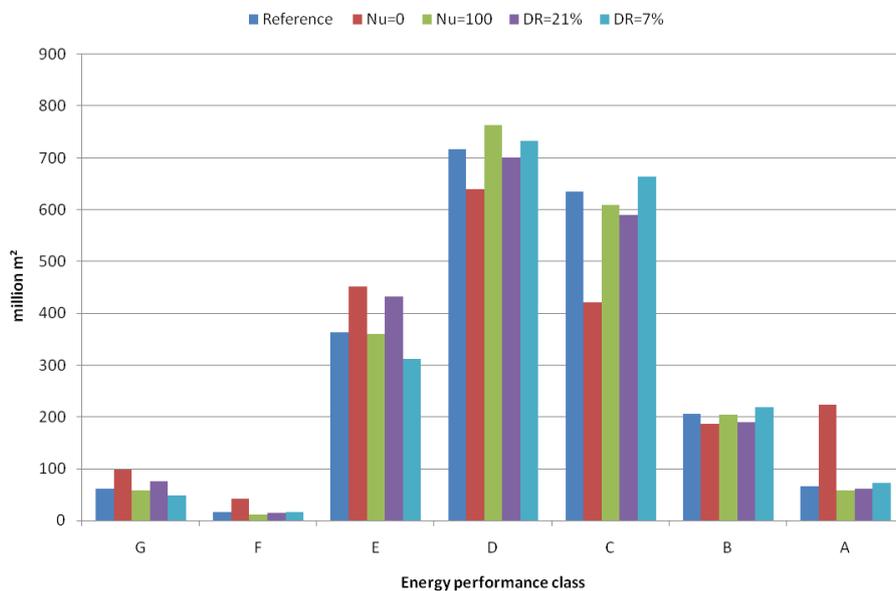


Figure 68: Change in 2050 energy class repartition due to parameter variation

Figure 69 provides conventional energy consumption (E_{conv}) directly related to the efficiency of existing dwellings for alternative scenarios, as percentage changes of the reference scenario. Unsurprisingly, cases that lower the retrofitting rate ($\nu = 0$ and $r = 21\%$) raise conventional consumption, and other cases ($\nu = 100$, $r = 7\%$ and their combination) have the opposite effect. The

picture is reversed when one considers the changes in the service factor compared to the reference scenario (figure 70), as the rebound effect retroacts over energy efficiency gains. Note that in terms of conventional energy consumption, the ability of the $\nu = 0$ case to foster very efficient choices compensates for its dramatically depressing effect on the retrofitting rate, as its proximity to the $r = 21\%$ case suggests (figure 69) and despite a large discrepancy in the retrofitting numbers (figure 67). Hence, the trade-off between the quantity and quality of retrofits is a non-trivial issue. Note, also, that the discount rate disaggregation by decision-maker occupancy status matters, since the uniform $r = 21\%$ case yields lower energy efficiency gains than the business as usual case in which heterogeneous discount rates have the same average value. Lastly, between the $\nu = 100$ and $r = 7\%$ cases, the latter has a stronger impact on efficiency, which suggests that the landlord-tenant dilemma (as represented in the model) is the most significant barrier.

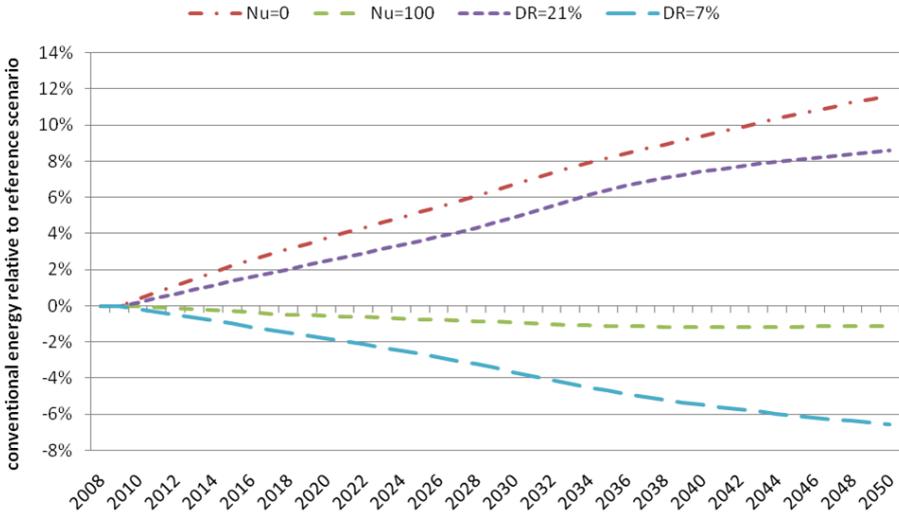


Figure 69: Change in conventional energy demand of existing dwellings due to parameter variation

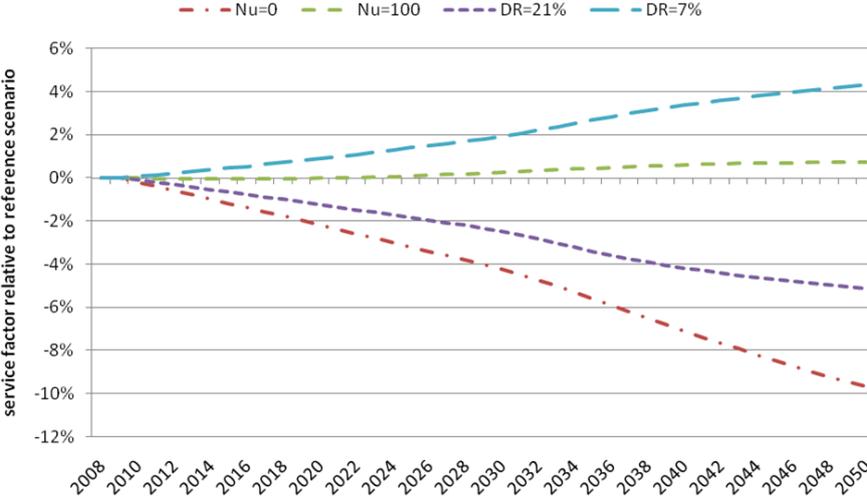


Figure 70: Change in the aggregate service factor of existing dwellings due to parameter variation

4.3 Potential energy savings due to efficiency and sufficiency

By comparing the $r = 7\%$ case with the *business as usual* projection, the potential for energy savings accruing from both sufficiency relaxation and efficiency gains can be quantified. The potential for efficiency has been more thoroughly investigated than the potential for sufficiency (BC Hydro, 2007; Moezzi *et al.*, 2009). From the seminal energy efficiency classification proposed by Jaffe and Stavins (1994b, figure 1) and EMF13 (1996, figure 7 and p.24), the present assessment can be characterized as a techno-economic one, since the efficiency potential is inferred from parameter variations within a range compatible with general economic conditions. It does not quantify the maximum technical potential, as it ignores the emergence of new technologies, and fails to assume the general use of the best available technologies. This could be done by constraining transition choices to the sole most profitable option, *i.e.* for any initial class i , final class $f = A$ is the only chosen option. However, this would disrupt the endogenous determination of the retrofiting rate.

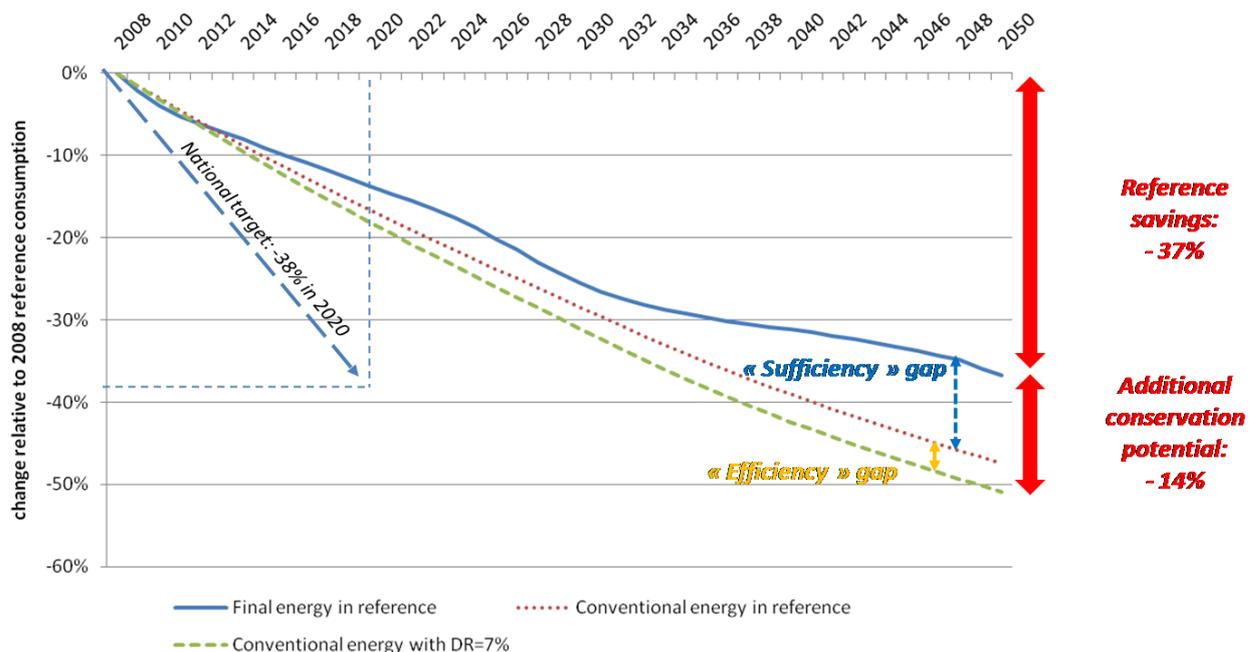


Figure 71: Techno-economic potential for energy conservation in existing dwellings

Figure 71 shows that, compared to reference savings of 37% in existing dwellings, 10 pp could be gained if the rebound effect was totally cancelled. This could be achieved by energy taxation or information tools. In particular, giving households feedback about their energy saving has proven to be very effective, especially when peer comparison is provided (Abrahamse *et al.*, 2005; Ek and Söderholm, 2010; Darby, 2006b; Ayres *et al.*, 2009). Abstracting from the rebound effect, another 4 pp reduction in final consumption could be achieved through efficiency improvements. In comparison, the 13rd session of the Energy Modeling Forum reported estimates of the techno-economic potential ranging from 3 to 25%; this was established by comparing four models subject to variations in private discount rates (EMF13, 1996, figure 9). This potential could be tapped by a wide range of policies, such as information, incentives (tax and subsidy) and regulations. On the whole, 14 pp reduction could be gained or, put another way, the potential for reference savings could be enhanced by 38%, including 27% of sufficiency relaxation and 11% of efficiency improvements. In methodological terms, this is much less than the purely technical potential assessed by Baudry and

Osso (2007, figure 1), according to whom tens of TWh of final energy could be saved annually in the French residential sector. In terms of policy-making, this is far from the target recently set by the French Government of reducing energy consumption in existing buildings by 38% between 2008 and 2020¹²⁴.

5 Conclusion

This paper exposes and evaluates the representation of household energy demand in the IMACLIM-R hybrid framework adapted to France. Res-IRF, a bottom-up module of household energy consumption for space heating, is first introduced, stressing the following distinctive features: (i) a clear distinction between energy efficiency and sufficiency, owing to a non-constant elasticity of energy demand to the price of the heating service; (ii) the incorporation of intangible costs, heterogeneity parameters (in consumer preferences and discounting), and learning-by-doing to handle some important barriers to energy efficiency; (iii) an endogenous determination of retrofitting which allows the representation of trade-offs between quantity and quality. Then, Res-IRF is recursively linked to the IMACLIM-R computable general equilibrium model to generate scenarios of future energy demand, subject to a slightly increasing energy price input. This exercise shows that, compared to a 37% reduction in final energy demand achieved in the *business as usual* scenario, an additional reduction of 14% could be achieved if relevant barriers to efficiency and sufficiency in space heating consumption were overcome.

From the methodological point of view, these developments are part of a general attempt to represent short term and “second best” mechanisms in hybrid models, which lies at the core of the IMACLIM-R research agenda (Crassous *et al.*, 2006; Sassi *et al.*, 2010). In the case of the building sector addressed by Res-IRF, inertia draws from a putty-semi-putty capital specification and the use of heterogeneous discounting and intangible costs in investment decisions. Moreover, the natural exhaustion of the physical potential for energy conservation tempers the dynamics of energy efficiency improvements. Second-best elements draw from myopic expectations. These innovations are made possible by the incorporation of explicit relations in the flexible bottom-up architecture of Res-IRF, instead of building on neo-classical production functions that do not guarantee the reproduction of physical quantities. As a result, the model yields an intermediate statement between the “absent efficiency gap”, generally assumed in top-down models, and the “huge efficiency gap”, generally exhibited by bottom-up models (Hourcade *et al.*, 2006).

From the economic point of view, sensitivity analysis to the relevant parameters of the model uncovers a relatively modest potential for energy conservation, notably in regard to the target recently set by the French Government for reducing energy consumption in existing buildings by 38% in 2020 compared to 2008. Although parameter variations should be interpreted carefully, the sensitivity analysis suggests that imperfect information and the landlord-tenant dilemma are prominent barriers to energy efficiency. They might be barriers to sufficiency as well, which has important consequences for policy intervention. In particular, energy taxation can simultaneously improve efficiency and sufficiency (Giraudet and Quirion, 2008). This can also be achieved by information campaigns and specific contracts aimed at overcoming the landlord-tenant dilemma.

¹²⁴ Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, Article 5.

However, since sufficiency has more of a short-term, reversible impact on the energy demand than efficiency, it requires a more sustained intervention.

Policy intervention is further explored in a companion paper, which evaluates the stand-alone and combined impact of taxes, subsidies and regulations on future energy demand for space heating in France (Giraudet *et al.*, 2010). From a broader perspective, there is room for further developments along three dimensions of hybrid modelling (Hourcade *et al.*, 2006). On the *technological* side, efforts should be made to incorporate heating technologies fuelled by renewable energy, such as fuel wood and district heating, and depict usages other than space heating in more detail. On the *microeconomic* side, consumer heterogeneity could be enhanced by disaggregating income classes, allowing the distributive impacts of policy intervention to be assessed. Furthermore, the “green value” of energy efficient dwellings should enter the investment decision and the non-economic determinants of sufficiency should be handled. On the *macroeconomic* side, productivity and employment in the energy efficiency industry should be addressed then demand and supply of end-use technologies could be confronted, thus illustrating any short-term disequilibria that might emerge.

Acknowledgements

We are thankful to Benoît Allibe, Alain Bernard, Patrice Dumas, Stéphane Hallegatte, Hill Huntington, Mark Jaccard, Olivier Sassi and Henri Waisman for their support at different steps of the development of the model. Useful comments from participants were gathered at the Energy Modeling Forum 25 meetings held in Stanford University, April 2009 and Washington, DC, October 2009, the 10th European conference of the International Association for Energy Economics held in Vienna, September 2009 and the 3rd Behavior, Energy and Climate Change conference held in Washington, DC, November 2009, where preliminary versions of the results have been presented. This work has benefited from funding from the French General Commission for Sustainable Development (*Commissariat général au développement durable*), for which we thank Jean-Jacques Becker, Lucile Penot-Antoniou and Olivier Teissier.

Annex 1: Parameter settings

The model combines processes that are established by both engineering and economic studies. Very few consolidated data are available and the parameterization of the model builds on piecemeal data that stem from different origins (*e.g.* academic and grey literature).

Parameter	Meaning	Value	Empirical foundation
ρ_k	Inverse efficiency of category k dwelling	In kWh/m ² /year of primary energy: Class G: 750 Class F: 390 Class E: 280 Class D: 190 Class C: 120 Class B: 70 Class A: 40	The ranges set by the French energy performance certificate (MEEDDAT, 2008) are depicted in figure 55. The values adopted here correspond to the centre of the interval. In addition, a 0.84 coefficient in order to extract space heating consumption from the three uses covered by the energy performance certificate (heating, cooling, hot water). See text (section 2.1) for values adopted in the construction process. The same 0.84 coefficient applies.
γ_i	Destruction rate of efficiency class i	0.35% on average	Allaire <i>et al.</i> (2008) find a range of 0.3%-0.4%. In Res-IRF, a routine is used to allocate higher destruction rates to low efficiency classes and lower rates to high classes.
v	Heterogeneity of markets and preferences	8	Own assumption. From class G, the least cost transition has a proportion of 44%.
r	Discount rate	Values ranging from 7% to 40% in existing dwellings. Uniform rate of 7% in new constructions	Existing dwellings: see table 20. New constructions follow a pure private perspective, assuming no heterogeneity among dwellings that will be owner-occupied and those that will be rented.
n, m	Investment lifetimes	35 years for energy retrofits 20 years for fuel switching 30 years for new constructions	Energy retrofits and fuel switching lifetimes are estimated from ATEE (2009). In new buildings, a lifetime of 30 years is assumed to mimic the term of a conventional loan for real estate investments.
$K_i(0)$	Initial stock of experience	Combination of numbers of pre-existing dwellings	Calibrated so as to reflect that the building sector is considered as technologically “mature” (CGDD, 2010)
α	Share of fixed transition costs	20%	Own assumptions
β	Share of fixed	20% for retrofits	Own assumptions

	intangible costs	5% for new constructions	
<i>l</i>	Learning rate	10% for retrofits 15% for new constructions	For the reasons exposed in section 2.2.3, these values stand in the lower range of the estimates found in the literature for separate energy consuming technologies. The higher value used for new constructions assumes greater perspectives of economies of scale for a task involving fewer actors (Lagandré, 2006; Levine <i>et al.</i> , 2007)
<i>u</i>	Rate of information acceleration	25% for retrofit and new constructions	Own assumptions
<i>a</i>	Retrofitting parameter (equation 11)	35.62592	Calibrated following optimization program 13
<i>b</i>	Retrofitting parameter (equation 11)	0.0040018	Calibrated following optimization program 13
<i>TRANS⁰</i>	initial retrofitting rate	1% of 2007 existing stock	Estimated from OPEN (2008). See explanations at footnote 11
<i>CINV₀</i>	Initial transition costs	See table 19	See section 2.2.3
<i>sph</i>	Average surface of existing dwellings	91 m ² on average, 66 m ² for collective dwellings and 111 m ² for detached houses	INSEE, 2006

Table 23: Model parameters

Annex 2: Fuel switching in existing dwellings

For new dwellings, the energy carrier is chosen at the time of construction (see annex 3). In existing dwellings, fuel switching may occur once the final energy class has been chosen (*i.e.* once ρ_f is fixed) during the retrofitting process. Let $\Omega = \{\text{electricity, gas, oil}\}$ be the set of energy carriers. The proportion $PRS_{ei,ef|f}$ of switch from any carrier ei to any other carrier ef , conditional to final class f , is determined as follows:

$$PRS_{ei,ef|f} = \frac{LCCS_{ei,ef|f}^{-\nu}}{\sum_{eh \in \Omega} LCCS_{ei,eh|f}^{-\nu}} \quad (\text{A2.1})$$

$LCCS_{ei,ef|f}$ is the life cycle cost of switching, defined as the sum of switching cost $switch_{ei,ef}$ and energy operating expenditures borne at price P_{ef} in class f of inverse efficiency ρ_f :

$$LCCS_{ei,ef|f} = switch_{ei,ef} + P_{ef} \left(\frac{1 - (1+r)^{-m}}{r} \right) \rho_f \quad (\text{A2.2})$$

This relation assumes no intangible costs or switch cost decrease through learning-by-doing, because of insufficient data to parameterize and calibrate such processes. Switch costs are simply a set of constant parameters estimated from OPEN (2008):

		Final carrier (ef)		
		Electricity	Natural gas	Fuel oil
Initial carrier (ei)	Electricity	0	70	100
	Natural gas	55	0	80
	Fuel oil	55	50	0

Table 24: Matrix of fuel switching costs (€/m²)

For any of the three initial energy carriers ei , there are two switching possibilities to final carriers ef , hence $PRS_{ei,ef|f}$ can take $3 \times 2 = 6$ values. Moreover, the matrix of transitions from any initial class i to any final class f being triangular, $PR_{i,f}$ can take $((7 \times 6) / 2 - 1) = 20$ possible values. Overall, the total proportion of transitions $PRT_{i,f,ei,ef}$ takes $20 \times 6 = 120$ values:

$$PRT_{i,f,ei,ef} = PRS_{ei,ef|f} PR_{i,f} \quad (\text{A2.3})$$

Note that this process is repeated for each of the four types of decision-makers with heterogeneous discount rates. However, there are no switches between the types of decision-makers.

Annex 3: Building stock growth

Overall, the total building stock S is determined by two input variables, namely population L and disposable income Y .

Total housing needs H are determined annually by the increase in population L and the decrease in average inhabitant per household LPH :

$$H = \frac{L}{LPH} \quad (A3.1)$$

L follows an exogenous projection, and LPH decreases exogenously to match past trends, both from INSEE (2006). Hence, total housing needs increase faster than total population, even though this trend gets slower as LPH tends towards an asymptote.

New constructions are required in order to fill the gap between housing needs and current stock. Construction requirements dH are thus equal to projected needs H , net from the “existing” dwellings constructed before 2007 – simply deduced from $\sum_{j \in J} S_j$ by a constant surface area per dwelling sph –, and the “new” dwellings constructed since 2008 $\sum_{j \in J} H_j$:

$$dH(t+1) = H(t+1) - \frac{1}{sph} \sum_{i \in I} S_i(t+1) - \sum_{j \in J} H_j(t) \quad (A3.2)$$

Note that the stock of existing dwellings erodes annually, hence $dH(t+1)$ implicitly incorporates reconstruction needs $\sum_{i \in I} \gamma_i S_i(t)$. The surface of new constructions is determined by the construction requirements dH and an average surface area per dwelling SPH , which is determined by a positive but exogenously decreasing elasticity to income Y :

$$dS = SPH(Y)dH \quad (A3.3)$$

Construction categories J are distributed among new constructions in proportion PRN_j :

$$dH_j = PRN_j dH \quad \text{and} \quad dS_j = PRN_j dS \quad (A3.4)$$

As in existing dwellings, the choice of a new construction is based on the comparison of the life cycle cost of all options:

$$PRN_j = \frac{LCCN_j^{-\nu}}{\sum_{k \in J} LCCN_k^{-\nu}} \quad (A3.5)$$

With life cycle cost being the sum of construction costs $CINVN$, operating energy expenditures $CENERN$ and intangible costs ICN :

$$LCCN_j = CINVN_j + CENERN_j + ICN_j \quad (A3.6)$$

The only difference with the retrofitting decision process is that j represents the simultaneous choice of a construction category and an energy carrier from nine options. Intangible costs are calibrated as in existing dwellings (see annex 4) and investment costs are approximated as in table 6. According to MEEDDM (2010), cost differentials reach 15% for a Low-energy building and 30% for a Zero-energy building, compared to conventional ones. Note that compared to other buildings of the same category, the cost of constructions heated by electricity is assumed to be lower for conventional buildings and higher for low-energy buildings. This reflects the fact that cheap radiant heaters are installed in conventional buildings, whereas costlier but more efficient heat pumps are installed in low-energy ones.

	Building Code 2005	Low Energy	Zero Energy
Electricity carrier	1,150	1,370	1,600
Natural gas carrier	1,200	1,350	1,600
Fuel oil carrier	1,200	1,350	1,600

Table 25: Matrix of new construction costs (€/m²)

Annex 4: Calibration of intangible costs

As introduced in Section 2.2.5, intangibles costs allow the decision process determined by equations 5 and 6 to reproduce the energy class transitions observed in 2008. Let function x , parameterized by the discount rate r , summarize equation 4:

$$LCC_{i,f} = x_r(CINV_{i,f}, CENER_f, IC_{i,f}) \quad (A4.1)$$

Likewise, let function y , parameterized by the heterogeneity of preferences v , summarize equation 5:

$$PR_{i,f} = y_v(LCC_{i,f}) \quad (A4.2)$$

The whole decision process is determined by function z , which is the composite of functions x and y :

$$z_{v,r} = y_v \circ x_r \quad (A4.3)$$

At the calibration step, for each initial class i , a set of initial intangible costs $\{IC_{i,f}^0\}_{f>i}$ is sought to allow function z to reproduce observed transitions $\{PR_{i,f}^{obs}\}_{f>i}$, assuming the discount rate r , the heterogeneity of preferences v , initial transition costs $CINV^0$ and initial energy operating costs $CENER^0$. Indeed, infinite sets of intangible costs can be found to reproduce the *relative* market shares, regardless of their size with respect to the other costs. In other words, if $N=Card(I)$, the system of $N-i+1$ equations linking $\{IC_{i,f}^0\}$ to $\{PR_{i,f}^{obs}\}_{f>i}$ (whose sum equals 1) is under-determined and must be solved with an additional condition. Accordingly, intangible costs $\{IC_{i,f}^0\}$ are calibrated by incorporating one equation controlling for λ , the ratio of average intangible costs over average life cycle costs:

$$\begin{cases} PR_{i,i+1}^{obs} = z_{v,r}(CINV_{i,i+1}^0, CENER_{i,i+1}^0, IC_{i,i+1}^0) \\ \dots \\ PR_{i,N-1}^{obs} = z_{v,r}(CINV_{i,N-1}^0, CENER_{i,N-1}^0, IC_{i,N-1}^0) \\ \sum_{k=i+1}^N PR_{i,k}^{obs} IC_{i,k}^0 = \lambda \sum_{k=i+1}^N PR_{i,k}^{obs} LCC_{i,k}^0 \end{cases} \quad (A4.4)$$

Initial transitions $\{PR_{i,f}^{obs}\}$ are derived from the analysis of around 500 retrofitting operations undertaken in social housing and reported by PUCA (2008):

		Final energy class (<i>f</i>)						
		F	E	D	C	B	A	
Initial energy class (<i>i</i>)	G	25%	27%	27%	21%	$\varepsilon\%$	$\varepsilon\%$	100%
	F		40%	26%	31%	2%	$\varepsilon\%$	100%
	E			66%	28%	6%	$\varepsilon\%$	100%
	D				95%	5%	$\varepsilon\%$	100%
	C					91%	9%	100%
	B						100%	100%

Table 26: Matrix of 2008 transition choices, with ε indicating a negligible term (adapted from PUCA, 2008)

Parameter λ is set exogenously at 18%, which is the minimum value for which the system can be solved. Parameter ν takes the same value as usual (see annex 1). In contrast, the discount rate r takes the uniform value of 4%, as observed transitions were undertaken by public authorities using social rather than private discount values. This calibration process yields the following initial intangible costs:

		Final energy class (<i>f</i>)						
		F	E	D	C	B	A	
Initial energy class (<i>i</i>)	G	162	65	66	21	215	289	
	F		141	172	15	39	330	
	E			125	31	58	313	
	D				88	62	216	
	C					134	77	
							0	

Table 27: Matrix of initial intangible costs (€/m²)

The process and parameter setting is very similar in new constructions where initial choices $\{PR^{obs}_j\}$ are estimated from OPEN (2008) as follows:

	Building Code 2005	Low Energy	Zero Energy	
Electricity carrier	62.30%	7.00%	0.70%	70%
Natural gas carrier	24.03%	2.70%	0.27%	27%
Fuel oil carrier	2.67%	0.30%	0.03%	3%
	89%	10%	1%	100%

Table 28: Matrix of new construction choices, as observed in 2008 (adapted from OPEN, 2008)

Using the construction cost matrix estimated in annex 3 (table 25), a 7% discount rate and a minimal λ value of 45%, the calibration process yields following intangible costs matrix:

	Building Code 2005	Low Energy	Zero Energy
Electricity carrier	367	673	1,155
Natural gas carrier	511	953	1,504
Fuel oil carrier	1,052	1,680	2,485

Table 29: Matrix of intangible costs for new constructions (€/m²)

References

- Abrahamse, W., L. Steg, C. Vlek, T. Rothengatter, 2005, "A review of intervention studies aimed at household energy conservation", *Journal of Environmental Psychology*, 25(3):273-291
- ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie], 2008, *Les chiffres clés du bâtiment AIE* [Agence internationale de l'énergie], 2007, *Mind the gap: Quantifying principal-agent problems in energy efficiency*, Paris
- Alcott, B., 2008, "The sufficiency strategy: Would rich-world frugality lower environmental impact?", *Ecological Economics*, 64(4): 770-786
- 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
- ATEE [Association Technique Energie Environnement], 2009, *Le dispositif des certificats d'économies d'énergie*, Mémento du club C2E
- Axsen, J., D. C. Mountain, M. Jaccard, 2009, "Combining stated and revealed choice research to simulate the neighbor effect: The case of hybrid-electric vehicles", *Resource and Energy Economics*, 31(3): 221-238
- Ayres, I., S. Raseman, A. Shih, 2009, "Evidence from two large field experiments that peer comparison feedback can reduce residential energy usage", *NBER Working Paper*, No. 15386
- Banfi, S., M. Farsi, M. Filippini, M. Jakob, 2008, "Willingness to pay for energy-saving measures in residential buildings", *Energy Economics*, 30(2):503-516
- Baudry, P., D. Osso, 2007, "Uncertainties in the evaluation of energy savings potential", *Proceedings of the ECEEE summer study*, 583-588
- BC Hydro [British Columbia Hydro and Power Authority], 2007, *Conservation potential review. The potential for electricity savings, 2006-2026. Residential, commercial and industrial sectors in British Columbia*, Summary report, Submitted by Marbek Resource Consultants Ltd.
- Besson, D., 2008, « Consommation d'énergie: autant de dépenses en carburants qu'en énergie domestique », *Note INSEE PREMIERE*, n°1176
- Boonekamp, P.G.M., 2007, "Price elasticities, policy measures and actual developments in household energy consumption – A bottom up analysis for the Netherlands", *Energy Economics*, 29(2):133-157
- BRE [U.K. Building Research Establishment], 2005, *Costing sustainability: How much does it cost to achieve BREEAM and EcoHomes ratings?*, Information paper
- Cameron, T.A., 1985, "A Nested Logit Model of Energy Conservation Activity by Owners of Existing Single Family Dwellings", *The Review of Economics and Statistics*, 67(2):205-211
- Cayla, J.-M., B. Allibe, M.-H. Laurent, 2010, "From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption", *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*
- CGDD [Commissariat général au développement durable], 2010, « Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte », Rapport
- Crassous, R., J.-C. Hourcade, O. Sassi, 2006, "Endogenous structural change and climate targets modeling experiments with Imacim-R", *The Energy Journal*, Special Issue: Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation, 259-276

- Darby, S., 2006a, "Social learning and public policy: Lessons from an energy-conscious village", *Energy Policy*, 34(17):2929-2940
- Darby, S., 2006b, *The effectiveness of feedback on energy consumption: A review for DEFRA of the literature on metering, billing and direct displays*, Environmental Change Institute, University of Oxford
- Dubin, J.A., D.L. McFadden, 1984, "An econometric analysis of residential electric appliance holdings and consumption", *Econometrica*, 52(2):345-362
- EIA [U.S. Energy Information Administration], 2008, *Annual Energy Outlook 2008*
- Ek, K., P. Söderholm, 2010, "The devil is in the details: Household electricity saving behavior and the role of information", *Energy Policy*, 38(3):1578-1587
- EMF13 [Energy Modeling Forum 13], 1996, *Markets for energy efficiency*, EMF Report 13, Volume I, Stanford University
- Feroli, F., K. Schoots, B.C.C. van der Zwaan, 2009, "Use and limitations of learning curves for energy technology policy: a component-learning hypothesis", *Energy Policy*, 37(7):2525-2535
- 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
- Girault, M., 2008, « Baisse des consommations d'énergies de chauffage dans les logements depuis 2001 », *Notes de synthèse du SESP*, n°170, 29-34
- Gustafsson, S.-I., 2000, "Optimisation of insulation measures on existing buildings", *Energy and Buildings*, 33(1):49-55
- Haas, R., H. Auer, P. Biermayr, 1998, "The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating", *Energy and Buildings*, 27(2):109-205
- Haas, R., L. Schipper, 1998, "Residential energy demand in OECD-countries and the role of irreversible efficiency improvements", *Energy Economics*, 20(4): 421-442
- Hausman, J.A., 1979, "Individual discount rates and the purchase and utilization of energy-using durables", *The Bell Journal of Economics*, 10(1):33-54
- Herring, H., 2009, "Sufficiency and the rebound effect", pp. 224-239, in Herring, H., S. Sorrell (eds), *Energy efficiency and sustainable consumption: the rebound effect*, Palgrave MacMillan Ed.
- 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
- 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
- Jaccard, M., M. Dennis, 2006, "Estimating home energy decision parameters for a hybrid energy-economy policy model", *Environmental Modeling and Assessment*, 11(2):91-100
- Jacobsen, H.K., 1998, "Integrating the bottom-up and top-down approach to energy-economy modelling: the case of Denmark", *Energy Economics*, 20(4):443-461
- Jacquot, A., 2007, « La demande potentielle de logements: un chiffrage à l'horizon 2020 », *Notes de synthèse du SESP*, n°165, 41-48

- Jaffe, A.B., R.N. Stavins, 1994a, "Energy-efficiency investments and public policy", *The Energy Journal*, 15(2):43-65
- Jaffe, A.B., R.N. Stavins, 1994b, "The energy-efficiency gap: What does it mean?", *Energy Policy*, 22(10):804-810
- Jaffe, A.B., R.N. Stavins, 1995, "Dynamic incentives of environmental regulations: the effects of alternative policy instruments on technology diffusion", *Journal of Environmental Economics and Management*, 29(3):S43-S63
- Jaffe, A.B., R.G. Newell, R.N. Stavins, 2004, "Economics of energy efficiency", 79-90 in Cleveland, C.J. (ed), *Encyclopedia of Energy, Volume 2*, San Diego and Oxford (UK): Elsevier
- Jakob, M., R. Madlener, 2004, "Riding down the experience curve for energy-efficient building envelopes: the Swiss case for 1970–2020", *International Journal of Energy Technology and Policy*, 2(1-2):153-178
- Kavgic, M., A. Mavrogianni, D. Mumovic, A. Summerfield, Z. Stevanovic, M. Djurovic-Petrovic, 2010, "A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector", *Building and Environment*, 45(7):1683-1697
- Kempton, W., L. Montgomery, 1982, "Folk quantification of energy", *Energy*, 7(10): 817-827
- Koopmans, C.C., D.W. te Welde, 2001, "Bridging the energy efficiency gap: using bottom-up information in a top-down energy demand model", *Energy Economics*, 23(1):57-75
- 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
- Laitner, J.A.S., A.H. Sanstad, 2004, "Learning-by-doing on both the demand and the supply sides: implications for electric utility investments in a Heuristic model", *International Journal of Energy Technology and Policy*, 2(1-2):142-152
- 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
- Levine, M., D. Ürge-Vorsatz, K. Blok, L. Geng, D. Harvey, S. Lang, G. Levermore, A. Mongameli Mehlwana, S. Mirasgedis, A. Novikova, J. Rilling, H. Yoshino, 2007: Residential and commercial buildings. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Levinson, A., S. Niemann, 2004, "Energy use by apartment tenants when landlords pay for utilities", *Resource and Energy Economics*, 26(1):51-75
- Mahapatra, K., L. Gustavsson, 2008, "An adopter-centric approach to analyze the diffusion patterns of innovative residential heating systems in Sweden", *Energy Policy*, 36(2):577-590
- Marchal, J., 2008, *Modélisation des performances thermiques du parc de logements*, Rapport de l'ANAH, <http://www.anah.fr/nos-publications/etudes/pdf/rapport_performances_energetiques.pdf>
- 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
- 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
- MEEDDAT [Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire], 2008, *Le diagnostic de performance énergétique*

- MEEDDM [Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer], 2010, « Jean-Louis BORLOO et Benoist APPARU présentent la Réglementation Thermique « Grenelle Environnement 2012 ». Une avancée majeure du Grenelle Environnement, sans équivalent en Europe : la généralisation des Bâtiments Basse Consommation (BBC), un saut énergétique plus important que celui réalisé ces 30 dernières années », Dossier de Presse
- Metcalf, G.E., K.A. Hassett, 1999, "Measuring the Energy Savings from Home Improvement Investments: Evidence from Monthly Billing Data", *The Review of Economics and Statistics*, 81(3):516-528
- McKinsey & Company, 2009, *Pathways to a Low-Carbon Economy, Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve*
- Moezzi, M., M. Iyer, L. Lutzenhiser, J. Woods, 2009, *Behavioral assumptions in energy efficiency potential studies*, Report prepared for CIEE Behavior and Energy Program, Oakland, California
- Moisan, F., 2004, « Les certificats blancs : un nouvel instrument de marché pour la maîtrise de l'énergie », *Revue de l'énergie*, 553:21-28
- Mundaca, L., 2008, "Markets for energy efficiency: Exploring the implications of an EU-wide 'Tradable White Certificate' scheme", *Energy Economics*, 30(6):3016-3043
- Nesbakken, R., 2002, "Energy consumption for space heating: A discrete-continuous Approach", *The Scandinavian Journal of Economics*, 103(1):165-184
- OPEN [Observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement], 2009, *Rapport final*
- 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
- Rehdanz, K., 2007, "Determinants of residential space heating expenditures in Germany", *Energy Economics*, 29(2):167-182
- Rivers, N., M. Jaccard, 2005, "Combining top-down and bottom-up approaches to energy-economy modeling using discrete choice methods", *The Energy Journal*, 26(1):83-106
- Sanders, C., M. Phillipson, 2006, *Review of differences between measured and theoretical energy savings for insulation measures*, Report for the Energy Saving Trust, Centre for Research on Indoor Climate and Health, Glasgow Caledonian University
- Sanstad, A.H., R.B. Howarth, 1994, "'Normal' markets, market imperfections and energy efficiency", *Energy Policy*, 22(10):811-818
- Sartori, I., B.J. Wachenfeldt, A.G. Hestnes, 2009, "Energy demand in the Norwegian building stock: Scenarios on potential reduction", *Energy Policy*, 37(5):1614-1627
- 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
- Scott, S., 1997, "Household energy efficiency in Ireland: A replication study of ownership of energy saving items", *Energy Economics*, 19(2):187-208
- Siller, T., M. Kost, D. Imboden, 2007, "Long-term energy savings and greenhouse gas emissions reductions in the Swiss residential sector", *Energy Policy*, 35(1):529-539
- Sorrell, S., 2004, "Understanding barriers to energy efficiency", pp.25-93 in Sorrell S., E. O'Malley, J. Schleich, S. Scott (eds), *The economics of energy efficiency: barriers to cost-effective investment*, Cheltenham: Edward Elgar

- Sorrell, S., J. Dimitropoulos, 2008, "The rebound effect: microeconomic definitions, limitations and extensions", *Ecological Economics*, 65(3):636-649
- Sorrell, S., J. Dimitropoulos, M. Sommerville, 2009, "Empirical estimates of the direct rebound effect: A review", *Energy Policy*, 37(4):1356-1371
- 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
- TNS Sofres, 2006, *Maîtrise de l'énergie, 2e 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
- Ürge-Vorsatz, D., A. Novikova, S. Köppel, B. Boza-Kiss, 2009, "Bottom-up assessment of potentials and costs of CO₂ emission mitigation in the buildings sector: insights into the missing elements", *Energy Efficiency*, 2(4):293-316
- Weiss, MM. Junginger, M.K. Patel, K. Blok, 2010, "A review of experience curve analyses for energy demand technologies", *Technological Forecasting & Social Change*, 77(3):411-428
- Wilson, C., H. Dowlatabadi, 2007, "Models of decision making and residential energy use", *Annual Review of Environment and Resources*, 32:169-203
- Wing, I.S., 2006, "Representing induced technological change in models for climate policy analysis", *Energy Economics*, 28(5-6):539-562

Annexe IV: The costs and benefits of white certificate schemes

Cette annexe détaille les calculs des coûts et bénéfices des dispositifs de certificats blancs présentés au chapitre IV. Elle retranscrit un manuscrit rédigé soumis à *Energy Efficiency* le 3 juin 2010 et révisé le 28 octobre 2010, qui développe et actualise le *working paper* suivant :

Giraudet, L.-G., D. Finon, "On the Road to a Unified Market for Energy Efficiency: The Contribution of White Certificates Schemes", *Fondazione Eni Enrico Mattei Nota di Lavoro*, No 132.2010

1 Introduction

White certificate schemes are a new policy instrument aimed at accelerating the diffusion of energy efficient technologies¹²⁵. They are characterised by three main components: (i) an obligation is placed on energy companies (hereafter “the obliged parties”) to achieve a quantified target of energy savings; (ii) energy savings are certified using standardized calculations that minimize transaction costs; (iii) certified energy savings can be traded so as to allow obliged parties to fulfil their target (Bertoldi and Rezessy, 2008). The combination of a binding constraint (non-compliance is financially penalized) with flexibility provisions like trading places this instrument in the family of market-based instruments, which have received much emphasis in the field of environmental policy (Labanca and Peerels, 2008).

White certificate schemes have been implemented in Great Britain in 2002, in Italy in 2005 and in France in 2006. Whilst meeting the common definition above, they have been adapted to national contexts, with different energy market structures and regulations. According to early *ex post* comparisons, this variety of designs leads to country-specific outcomes (Eyre *et al.*, 2009; Mundaca and Neij, 2009, Bertoldi *et al.*, 2010) that complicate the analysis in two ways. First and foremost, it blurs any judgement about whether white certificate schemes are cost-effective and economically efficient. Second, it prevents from empirically validating the stylized representation established by theoretical works, that tend to define white certificate schemes as a hybrid subsidy-tax instrument, by which energy companies provide rebates for energy efficient durables that are recovered through increased energy prices (Bye and Bruvoll, 2008; Giraudet and Quirion, 2008; Oikonomou *et al.*, 2008; Peerels, 2008; Sorrell *et al.*, 2009). Overall, the understanding of white certificate schemes is far from complete and requires extensive evaluation.

Useful insights can be gathered from the retrospective examination of demand-side management (DSM) programs, in which the rationale for white certificate schemes is firmly rooted (Waide and Bucher, 2008; Eyre *et al.*, 2009). DSM has been implemented in the United States during the mid-1980s as part of integrated resource planning, aimed at optimizing the electric system on both the supply and demand sides. DSM obliged electric utilities to promote electricity load management, as well as to provide information and financial incentives for energy efficiency investments to end-use customers (Gillingham *et al.*, 2006). The assumption behind these programs was that energy utilities can influence final energy consumption through commercial relationships, and are hence the best suited agents to tap the scattered potentials for energy efficiency. Such potentials are particularly present in the commercial and residential sectors.

¹²⁵ Theoretically, white certificate schemes aim at energy conservation, *i.e.* both energy efficiency improvements and changes in energy consumption patterns (Gillingham *et al.*, 2006). In practice, most of the measures target energy efficiency (*e.g.* lighting, heating, insulation) while only a few “soft measures” target behavioural change (*e.g.* training for construction workers in France).

Yet since the end of the 1990s, the European Union has pushed through major reforms to liberalize electricity and gas markets¹²⁶, which changed the motivations for energy efficiency policies compared to DSM imposed to public vertical monopolies. On the one hand, the unbundling of vertically integrated utilities removes incentives for energy efficiency along the whole value chain: transmission and distribution businesses have no hold over end-use consumers to implement programs, while generation and retail businesses (which often remain integrated) are not willing to reduce demand. On the other hand, the introduction of competition on retail supply presumably creates an incentive for suppliers to provide energy service for commercial differentiation (Vine *et al.*, 2003; Eyre *et al.*, 2009; Langniss and Praetorius, 2006). The use of flexibility options, in particular the trading of white certificates, is supposed to accompany this evolution of energy business models.

The primary concern about evaluating white certificate schemes is to assess their cost-effectiveness and social efficiency¹²⁷, which are the most common criterion for comparing outcomes of energy efficiency policies (Gillingham *et al.*, 2006; Goulder and Parry, 2008). This calls for the quantification of two sensitive variables: (i) the energy savings specifically induced by the scheme, dependent upon assumptions on the reference situation and its trend over time (Boonekamp, 2005; Thomas, 2009); (ii) the costs of energy savings, a significant share of which is borne by obliged companies, thus not necessarily subject to disclosure and transparency.

In DSM, both sets of data were to be reported by utilities to the U.S. Energy Information Administration (EIA). This allowed for extensive evaluation of utility programs, although different econometric specifications gave rise to a debate about whether self-reports underestimate (Joskow and Marron, 1992; Laughran and Kulick, 2004), overestimate (Horowitz, 2004) or reasonably estimate (Auffhammer *et al.*, 2008; Vine and Kushler, 1995) cost-effectiveness. White certificate schemes make different cases for the two types of data. Achieved energy savings are generally (but not exclusively) certified on *ex ante* basis by standardized calculation, which increases transparency and eases data aggregation. The point is much more problematic with regards to costs. One of the principles of white certificate schemes is to mandate performance rather than means, and monitoring of obliged parties' expenditures goes against this principle. Moreover, in liberalized energy markets, cost is sensitive information that energy suppliers are reluctant to disclose. Cost information is therefore not reported and readily available, hence must be specifically evaluated. The market price of certificates may appear to be meaningful data for this task, but in fact this rarely turns out to be the case. First, according to economic theory, the market price of white certificates equals the marginal cost of compliance, yet the average cost is the most appropriate for estimating the total cost of the scheme. Second, its

¹²⁶ This is according to the European Commission directives of 1996 regarding the internal electricity market (Directive 96/92/EC) and 1998 regarding the internal gas market (Directive 98/30/EC).

¹²⁷ The following social efficiency assessment concentrates on environmental benefits. A range of other collective benefits, such as health improvement or employment in the energy efficiency industry, might accrue, but they are not addressed here.

significance as a marginal cost indicator depends upon the liquidity in the white certificates market, which is high in Italy but very low in France and almost absent in Great Britain (Mundaca *et al.*, 2008; Eyre *et al.*, 2009). Lastly, it is even more problematic if the market for white certificates can be manipulated by a few dominant actors or influenced by a cost recovery mechanism, which is the prevailing situation in Italy, as will be discussed later.

The goal of this paper is to overcome those limitations and estimate the costs and benefits of white certificate schemes under a common framework for the three countries. For this purpose, it builds on existing evaluations of the achieved periods¹²⁸ in Great Britain (Lees, 2005, 2008; Mundaca and Neij, 2008) and provides comparable results for France and also – at least partly – for Italy. This enables to provide answers to elementary evaluation questions such as: *Are white certificate schemes cost-effective and economically efficient? How do heterogeneous country characteristics explain differences in national outcomes? What type of strategies do obliged energy companies develop to cope with compliance costs?*

The paper is organised as follows. Section 2 outlines the basic differences among national schemes that are relevant to the study. Section 3 assesses the effectiveness of energy savings. Section 4 concentrates on the costs borne by obliged energy companies. Section 5 balances total costs with benefits to assess the social efficiency of the scheme. Section 6 moves on to the interpretation of the costs to enlighten the strategies developed by energy companies to comply with their obligation. Section 7 concludes.

2 Main differences in national designs

Differences across white certificate schemes have been widely discussed (Bertoldi and Rezessy, 2008; Eyre *et al.*, 2009; Mundaca *et al.*, 2008; Oikonomou *et al.*, 2007; Vine and Hamrin; 2008) and only the differences that are relevant to the study are stressed hereafter. In addition to the common objectives presented above, national schemes can have particular focuses. Notably, the British scheme is designed to address fuel poverty and imposes a certain amount of energy savings to be promoted towards low-income households. Nevertheless, outcomes related to country-specific objectives are not detailed here.

2.1 Scope of the obligation

The energy market liberalization process has been achieved in Great Britain in 1998, in Italy in 2004 and in France in 2007. Electricity and gas markets can now be regarded as fully unbundled in these countries. In this context, the nature of the obligation holder is a prominent element of scheme differentiation. In Great Britain and France, the obligation is

¹²⁸ These refer to the EEC1 (Energy Efficiency Commitment, 2002-2005) and EEC2 (Energy Efficiency Commitment, 2005-2008) schemes in Great Britain, TEE (Titoli di Efficienza Energetica, 2005-2012) in Italy and CEE (Certificats d'économies d'énergie, 2006-2009) in France. In Great Britain, the superseding CERT scheme (Carbon Emissions Reduction Target, 2008-2011) includes important changes compared to EEC2, such as a doubling of the target, a switch from kWh to CO₂ savings accounting and a new definition of the priority group (Lees, 2008).

borne by energy suppliers, who have close relationships with final consumers and favour direct actions. The British scheme is limited to electricity and gas suppliers whereas in France, all type of end-use energy suppliers are covered, except gasoline.¹²⁹ In Italy, the obligation is borne by electricity and gas distributors operating on local and regional networks. Such actors have barely any commercial interest to support consumers that are not directly their own. In France¹³⁰ and Italy, some non-obliged parties are allowed to promote energy savings and sell them to obliged parties, thus creating an additional supply of white certificates. This possibility is coupled in these countries to the organisation of *over the counter* markets, and even a *spot* market in Italy. In Great Britain white certificates exchanges are legally allowed, but discouraged in practice by the absence of organised markets and the need for a preliminary agreement by the Regulator.

In addition to the type of obliged parties, their numbers differ across the three countries. In Great Britain, six electricity and gas suppliers compete within an oligopoly, with market shares on the household sector ranging from 11% to 32% (Lees, 2008, p.21). In France, around 2,500 energy suppliers hold an obligation. Provided that both electricity and gas markets are concentrated and still dominated by historical operators (EDF and GDF SUEZ, respectively), this large number should not distract from the fact that the array of major players is reduced. In Italy, the obligation is placed on 30 electricity and gas distributors of very different size. Being regional monopolies, they do not compete on energy distribution, but they might face oligopolistic competition on the markets for white certificates (Oikonomou *et al.*, 2009).

Lastly, whereas the British scheme covers solely the household sector, the scope in other countries is extended to all end-use sectors, except installations covered by the European Union Greenhouse Gas Emission Trading System (EU-ETS) in France. However, in all schemes, deemed measures focus on the household sector, where saving accounting methods can be more easily standardized. Basic technologies are identical across countries and cover the most relevant potentials for energy efficiency (*e.g.* efficient lighting, efficient appliances, efficient heating systems and insulation). There are 37 standardized actions in Great Britain, 22 in Italy and 170 in France.

2.2 Metrics of the obligation

National targets and standardized energy savings are formulated in very different units across countries. The main difference between national portfolios, however, lies in the certificates issuance, in particular in the assumptions made for energy savings calculation on conventional unitary consumption, conventional lifetimes and discount rates. Savings are expressed similarly in France and Great Britain (EEC2) in kilowatt-hour (kWh) of end-used energy saved, accumulated over average lifetimes of 20-30 years and discounted at close

¹²⁹ This was the case during the first period assessed in this paper. The next period, starting in 2011, will extend the obligation to gasoline distributors.

¹³⁰ Insofar as this does not increase their revenue, which deters the participation of pure ESCOs

rates of 4% and 3.5%, respectively. In Italy, annual savings are calculated in ton of oil equivalent (toe) of primary energy, and issued over a fixed lifetime of five years (eight years for insulation measures as an exception). For purpose of comparison, efforts were made to express each target in the normalized unit of the French scheme. The main assumptions made throughout the paper are summarized in the Annex (Table 34).

The French 2006-2009 target is 54 TWh of end-use energy, accumulated over the average lifetime of the measures and discounted at 4%. In Great Britain, the quantitative obligation of the EEC2 period was 130 TWh of cumulated energy savings fuel standardized, discounted at 3.5%. When converted *ex post* in their original fuel units and appropriately discounted at 4%¹³¹, energy savings reach 192 TWh, thus 64 TWh/year for the three years of EEC2. In Italy, one preliminary task is to convert annual savings of primary energy in toe into lifetime end-use savings in kWh. First, a 2/3 ratio is used to convert primary savings into end-use savings, following Eyre *et al.* (2009). Second, savings are accumulated assuming an eight years average lifetime, which reflects the predominance within final realisations of measures with short lifetimes, such as CFLs or water economizers, and the noticeable absence of measures with long lifetimes, such as insulation (see Section 3.2). As such and discounted at 4%, the target covering the 2005-2008 period equals 193 TWh, thus 48 TWh/year (see Annex, Table 35).

3 Energy effectiveness

As a performance-based instrument, the effectiveness of white certificate schemes is measured against the target compliance. Albeit a matter of concern in itself (Mundaca and Neij, 2009), the intrinsic ambition of the target will not be discussed. Target compliance does indeed, however, raise an array of issues that are addressed hereafter.

3.1 Delimitation of energy savings

3.1.1 General effects impacting energy effectiveness

The question as to whether or not the savings considered are fully effective is a heavily debated issue (Geller and Attali, 2005). The most controversial point deals with “free-riders”, *i.e.* beneficiaries from the scheme that would have undertaken energy efficiency measures even in the absence of the scheme. Some authors find that if they are appropriately accounted for, they reduce the effectiveness of DSM programs by 50% to 90% (Joskow and Marron, 1992; Laughran and Kulick, 2004). Nevertheless, it has also been acknowledged that thanks to usual self-reinforcing technology diffusion patterns, such programs create “free-drivers”, *i.e.* adopters of energy efficient technologies that are not direct beneficiaries of the scheme (Blumstein and Harris, 1993; Eto *et al.*, 1996). By working in the opposite direction, free-drivers and free-riders partly compensate each other (Thomas, 2009).

¹³¹ Lees (2008, Table A4.4 and personal communication).

Another prominent issue is that energy efficiency improvements generate behavioural changes towards increased comfort, *e.g.* when insulation or boiler replacement measures are followed by setting a higher indoor temperature. Well known as the rebound effect, the gap between observed energy savings and theoretical energy efficiency gains may undermine the effectiveness of white certificate schemes (Giraudet and Quirion, 2008; Sorrell and Dimitropoulos, 2008). Its magnitude will vary with the type of measure (Geller and Attali, 2005) and the type of measure beneficiary, provided that low-income participants are more subject to take back energy savings to increase comfort (Blumstein and Harris, 1993).

It is remarkable that the evaluator of the British white certificate scheme has taken into account most of these effects. Final figures are net from a 20% “deadweight” factor to account for free-riding, and a 15% “comfort increase” factor to account for some rebound effect (Lees, 2008). Such calculations were not possible for other countries, thus will not be considered in the following, so as to allow for cross-country comparison.

3.1.2 Methodological issues in energy savings accounting

In practice, the relevance of energy savings depends on methodological choices such as baseline setting and the type of certification system (Bertoldi and Rezessy, 2008). The baseline for energy savings must be consistent with *business as usual* market projections and the rebound effect inherent in each technology. In all countries, the baseline is set in line with national regulations transposing European directives such as the recent EPBD¹³², which guarantees to some extent the additionality of the savings. In Great Britain, the additionality must be demonstrated for all actions by obliged parties. Yet this does not prevent some pitfalls. For instance in France, the baseline used for boilers is a mix of the stock average and the market average, which makes low temperature boilers eligible, in spite of their poor additionality compared to a pure market reference.

The certification system can take several forms, depending on whether savings are measured on a specific or deemed basis and verified on *ex ante* or *ex post* basis. The most favoured system is deemed *ex ante* certification¹³³, designed to minimize transaction costs. It is well adapted to the targeted field of residential energy consumption, which is a mass market allowing large-scale technological developments. However, it can hardly be applied in the industrial sector (where covered by the scheme, *i.e.* in Italy and France), where measures are more complex and better assessed by specific engineering calculation. Furthermore, *ex ante* calculation avoids prohibitive transaction costs compared to a case-by-case *ex post* verification, but does not ensure effective energy savings. Effective savings might depart from *ex ante* calculation because of uncertainties such as realisation defects or lifestyle changes, and the deviation is likely to increase over time for measures with a long

¹³² Energy Performance of Buildings Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council

¹³³ Uplift factors can be associated to such calculation, for instance for innovative measures such as digital TVs or stand-by savers in Great Britain. Uplifts are deduced from gross calculation by the British evaluator to estimate effective savings (Lees, 2008).

conventional lifetime (even though savings are discounted). To address this issue, random *ex post* verifications are conducted by British and Italian authorities, on measures that were certified on *ex ante* basis. Such process in Great Britain revealed that insulation measures did not achieve their full saving potential during EEC2, due for example to incomplete cavity wall filling (Lees, 2008). Likewise, there is no clear guarantee about the effective installation and use of the CFLs that have been widely distributed for free in Great Britain and Italy (Bertoldi *et al.*, 2010). In France, some *ex post* verifications are planned but have not yet been put in place. However, the scheme has induced a process of professional labelling for equipment installers, which in theory reduces the case for technical defects.

Overall, next to the dominant deemed *ex ante* system, *ex ante* specific calculations account for 2.4% of certified savings in France (DGEC, 2009), while *ex ante* specific calculations account for 5% and pure *ex post* calculations for 10% of certified savings in Italy (AEEG, 2008).

3.2 Effectiveness assessment

3.2.1 Quantification of the energy savings to target

To date, no penalty for compliance shortfall has been enforced and national targets have been over-achieved in every country¹³⁴. In Great Britain, the three-year objectives of EEC1 and ECC2 were overachieved by 30% and 44%, respectively (Lees, 2005, 2008). In France, the first three-year period was over-achieved by 20% (65 TWh against 54TWh required, according to DGEC, 2009). In all cases, the overachieved energy savings were carried over to the next compliance period. In Italy, where targets must be fulfilled annually (but fully assessed in 2012), the first two years led to an over-achievement of more than 90% (Pavan, 2008).

Whereas over-achievements augment policy outcomes, accounting for some actions implemented prior to the schemes may diminish them. It is noteworthy that in Italy, energy savings promoted between the launch of the scheme in 2002 and its effective implementation in 2005 can be used to meet the annual targets, and have actually represented 27% of the savings generated during the first two years (Pavan, 2008). In Great Britain, savings generated under the preceding Energy Efficiency Standard of Performance (EESoP) program¹³⁵ were also eligible (with a limit up to 10% of the target boundary though) and represented less than 5% of the EEC1 target (Lees, 2005). Contentious savings from such “early actions” are thus quantitatively limited and those schemes yielded net over-achievements.

¹³⁴ As stated by Mundaca *et al.* (2008), over-achievements against the national objective do not necessarily imply a fulfilment of all individual targets. Indeed, two obliged parties went out of business during the EEC1 scheme and thus fell short of their target. According to the authors, the overall performance can still be interpreted as effective.

¹³⁵ The EESoP was an obligation placed on energy suppliers to invest in energy efficiency. It was implemented in 1993 and replaced in 2002 by the white certificate schemes, mandating performance rather than means.

In what follows, the effectiveness assessment is limited to energy savings realised against the target. This appears as an imperfect but reasonable indicator of the effectiveness of the schemes, provided that methodological pitfalls lead to an overestimate of unitary savings while neglecting over-achievements leads to underestimating total savings. According to the convergent estimates of Eyre *et al.* (2009) and Mundaca and Neij (2009), savings to target represent 0.6%, 0.3% and 0.14% of the total energy consumption under coverage in Great Britain, Italy and France, respectively.

3.2.2 Nature of effective energy savings

A full assessment of the effectiveness of the schemes requires a close look at the technological nature of the savings. The measures undertaken in the residential sector encompass the bulk of white certificate energy savings, even in countries with a broader coverage¹³⁶ (86% in Italy, according to AEEG, 2008; 87% in France, according to DGEC, 2009). National breakdowns depicted in Figure 72 show important differences among countries: insulation dominates in Great Britain, CFLs dominate in Italy and heating device replacement dominates in France. This difference is striking, since the schemes’ flexibility in theory attracts obliged parties towards lowest cost measures that might be similar across countries. In fact, current mixes are driven by country specific factors.

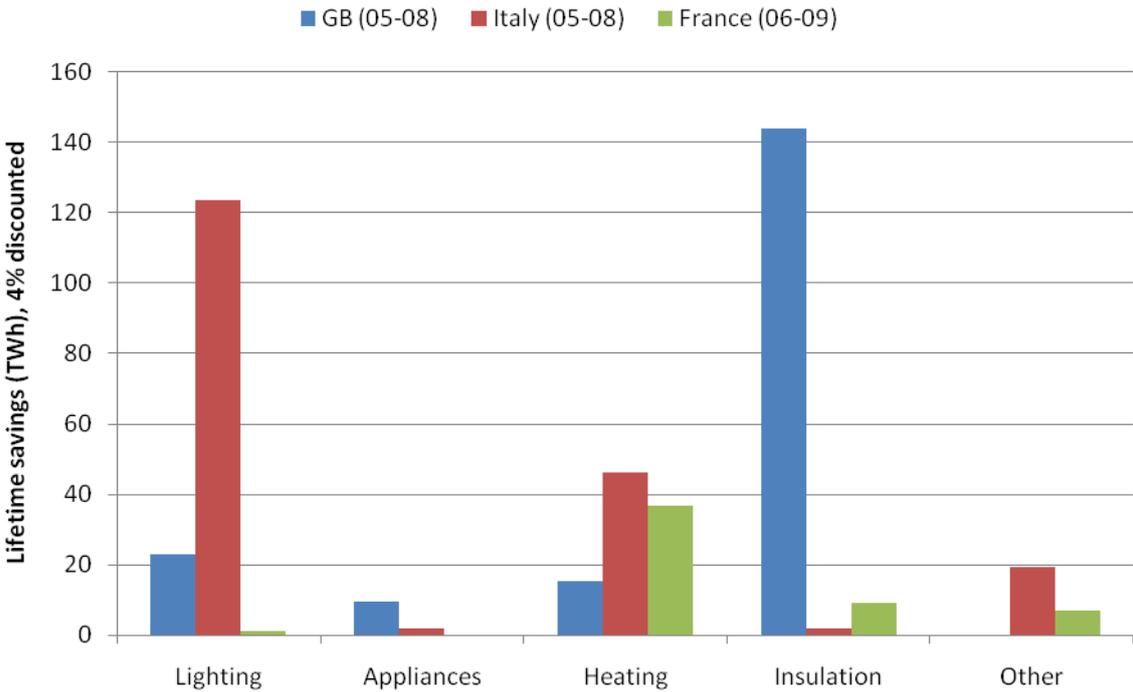


Figure 72: National measures mix (Data: AEEG, 2008; DGEC, 2009; Lees, 2008)

First, there are significant technological differences among countries. Let us consider the case for cavity wall insulation (CWI), that is specific to Great Britain, and solid wall insulation

¹³⁶ In Italy and France, industrial measures cover generally small shares of white certificates energy savings, due to a long-standing rational use of energy in this sector.

(SWI), that is roughly similar in all countries. The former practice consists in injecting insulating material into a cavity between indoor and outdoor brick walls of traditional British houses, and the latter in hanging panels on indoor walls. CWI incurs lower technological costs than SWI because of lower costs of gross material and the possibility to deploy neighbourhood-scale actions, and therefore generate economies of scale. Moreover, hidden costs due to a higher annoyance of indoor works must be added to the cost of SWI. As a result, the average cost per dwelling is €500 for CWI and €6,000 for SWI (Lees, 2008). This explains that altogether, insulation measures account for 75% of the kWh saved in Great Britain, whereas in France they represent less than 10% of the savings, albeit the largest and most cost-effective potential (Baudry and Osso, 2007)¹³⁷.

Moreover, national outcomes are largely driven by country-specific regulatory features. In France, some deemed measures are at the same time eligible to tax credits ranging from 15 to 50% (DGEC, 2009). This means that for many energy efficiency investments, the same invoice can be used by customers to claim for tax credits and by obliged suppliers to claim for white certificates. Therefore, obliged suppliers have intensively advertised for the tax credit scheme while collecting invoices, up to the point that nearly all the measures supported by obliged suppliers in the household sector under the white certificates scheme have also benefited from the tax credit scheme. In turn, 20% of the tax credit amounts (2.7 billion Euros in 2009 granted to 1.3 million people, according to MEEDDM, 2010) have granted white certificates. If the tax credit scheme has clearly driven the white certificates scheme, some observers consider that it would not have had such a success without being advertised by energy suppliers in their customer persuasion task, acting indirectly as an information tool (Bodineau and Bodiguel, 2009). This addresses the sensitive question relating to the balance between free-riders and free-drivers. In Italy, CFLs and hot water economizers dominated until recently in the residential sector. The promotion of these “low hanging fruits” has been boosted by the massive distribution of reduction coupons¹³⁸. Considered as a regulatory pitfall, this has been corrected since then (Pavan, 2008). Furthermore, the 5 years lifespan used to calculate standardized savings does not provide the adequate incentive for long-term savings measures. In the case of insulation, notably absent from the Italian scheme, the theoretical lifetime has been set to eight years, which remains far below the values used in Great Britain and France (40 and 35 years, respectively).

4 Costs borne by obliged parties

The costs underpinning effective energy savings are subsequently estimated, in order to complete a full cost-effectiveness assessment.

¹³⁷ In addition to this reference, ADEME estimates the theoretical saving potential in the household sector to be 6,750 TWh (lifetime cumulated and 4% discounted), in which insulation measures account for 60%.

¹³⁸ Obligated distributors were awarded white certificates for the mere distribution of reduction coupons for CFLs and water economizers, without any guarantee about the effective purchase of those equipments, nor their effective installation once purchased.

4.1 Nature of the costs arising from white certificate schemes

Alike DSM programs, the delimitation of costs builds on three principles (Joskow and Marron, 1992; Eto *et al.*, 1996). First, total costs must reflect *the cost of energy efficiency improvements* compared to a reference situation. For measures affecting the built environment like insulation, the reference situation is the absence of energy efficient solution, so that the full capital and installation costs of the measure must be counted. The case is different for equipments like heating systems, where existing device is generally replaced by a new one, chosen among several options differing in terms of energy efficiency performances. Therefore, only the cost differential with the market standard or stock average technology must be considered. Overall, the total cost of energy efficiency improvements from different types of measures is typically lower than the full cost of the underlying capital.

Second, the cost of energy efficiency improvements involves several contributors, mainly customers and obliged parties. Depending on the way obliged parties promote energy efficiency measures, some additional costs can arise. Financial incentives like subsidies or soft loans are typically based on a share of energy efficiency improvements cost, borne by obliged parties. In contrast, delivering information about energy efficiency programs does not lower the total cost of energy efficiency improvements for customers but generates additional cost for obliged parties. The sum of the total costs of energy efficiency improvements and such additional costs is referred to as the *direct costs* of the scheme.

Third, complying with their obligation might come at a cost for obliged parties, additional to the share of direct costs they already bear. This cost arises from tasks like project development, marketing and reporting (see Annex, Table 36; Lees, 2008, p.88). Whereas direct costs are straightforwardly volume-related, such *indirect costs* may or may not be volume-related. They are very dependent upon the strategies developed by obliged parties to cope with their obligation and cannot be readily derived from the list of achieved measures. Ultimately, the total costs of the scheme are the sum of direct costs plus obliged parties' indirect costs.

4.2 Estimates of the costs borne by obliged parties

Among all the parties bearing costs, obliged parties require a specific treatment. Under white certificate schemes, the tenuous availability of direct and indirect cost data forces the evaluator to make his own assumptions and discuss with energy companies staff members to verify them. This work has been completed by Lees (2005, 2008) for the British scheme and is conducted here for the French scheme. In Italy, it has not yet been done.

In Great Britain, no trading of white certificates occurs¹³⁹ and energy suppliers basically grant subsidies to their customers for energy efficiency investments. Their contribution to direct

¹³⁹ In fact some transactions took place under EEC1, but involved negligible amounts. See Mundaca *et al.*, (2008).

measure costs is a share of either the full capital cost (for insulation and lighting) or the cost differential with the market standard (for heating and appliances), which is calculated using data provided by public authorities¹⁴⁰ about measures costs and stakeholders' respective contributions. Overall, direct costs amount to €1,085 million under EEC2. Indirect costs borne by obliged parties are estimated by Lees from past experiences as 18% of their expenditures on direct measure costs, thus €195 million. A part of those indirect costs has been characterized as "transaction costs" and quantified by Mundaca (2007). The author estimates that under EEC1, efforts dedicated to persuading consumers and negotiating with third parties have borne 8-12% and 24-32% of the total investment cost for lighting and insulation measures, respectively.

In France, trade involves less than 4% of white certificates issued and the strategies of energy suppliers towards customers consist essentially in providing information (diagnosis, advice) and financial incentives (soft loans, rebates), with different weights across the companies investigated. Data are still poorly available and roundtables followed by bilateral interviews with managers from the three main obliged agents¹⁴¹, namely EDF, GDF SUEZ and Ecofioul (professional association representing fuel oil retailers) were organised to get indications about the relevant sources of costs. Together with the expertise of ADEME and the measures repartition provided by DGEC (2009), this allowed to make further assumptions and finally estimate direct costs to amount to €74 million. Subsequently, an inductive inventory of the potential sources of indirect costs was made. Fixed indirect costs are sunk costs paid to develop news activities in response to the white certificates obligation. This covers material investments like information networks and immaterial investments in energy efficiency training. Variable indirect costs arise from tasks related to the volume of energy efficiency measures, like phone centres and marketing. Each source of indirect cost was then quantified by making assumptions about related labour and capital costs. Overall, the calculated indirect costs amount to €136 million, by 57% variable, which is roughly twice as high as direct costs. All calculations are reported in the Annex (Table 36).

In Italy, the bulk (75%) of white certificates issued are traded on spot and over-the-counter markets, which makes the market price a reasonable proxy for the marginal cost of the scheme to energy distributors. According to Pavan (2008) and AEEG (2008), the average exchange price of white certificates is €60/toe over the period of fully operating markets (2006-2008). Integrating this over the 2005-2008 period's primary energy target (as defined in the Annex, Table 35) yields a total obliged parties' cost of €216 million. One might expect the fixed level of cost recovery to maintain the white certificate price artificially high, given

¹⁴⁰ The administrator of the scheme is the Office of Gas and Electricity Markets (Ofgem). The policy regulator was formerly the Department of Food and Rural Affairs (Defra), now the Department of Energy and Climate Change (DECC).

¹⁴¹ They bear respectively 56%, 27% and 10% of the total obligation, altogether 48 TWh. A basic rule of thumb has been used to derive from these results the final values for the national objective of 54 TWh.

the inexpensiveness of underlying dominant measures (CFLs, water economizers)¹⁴². Therefore, this calculation tends to overestimate costs.

4.3 Cost distribution among obliged parties

Table 30 shows that the costs borne by obliged parties in France are around six times lower than in Great Britain, for a target more than three times smaller. As a result, cost-effectiveness to energy suppliers is 0.39 c€/kWh in France and 0.67 c€/kWh in Great Britain. Together with the Italian one, those estimates do not exceed €0.01¹⁴³. A closer look at the cost structure shows that obliged parties' burden is essentially made up of direct costs in Great Britain (85%), whereas the development of energy efficiency allegations in commercial offers has borne sizeable indirect costs in France (64%). The substantial difference between unitary direct costs (0.14 c€/kWh versus 0.57 c€/kWh) suggests that British suppliers have developed more costly strategies towards customers, *i.e.* more and/or larger rebates than in France, where energy suppliers seem to focus more on providing information.

		Great Britain 2005-08	France 2006-09	Italy 2005-08
Energy savings to target	TWh	192	54	193
Obligated parties direct cost	M€	1,085	74	-
Obligated parties indirect cost	M€	195	136	-
Total cost to obliged parties	M€	1,280	210	216
Unitary direct costs	c€ spent per kWh saved	0.57	0.14	-
Unitary indirect costs	c€ spent per kWh saved	0.10	0.25	-
Unitary total cost	c€ spent per kWh saved	0.67	0.39	0.11

Table 30: Comparison of the costs borne by obliged parties

These national aggregate results should not hide cost heterogeneity among obliged parties within countries. In Great Britain, it can be deduced from the transaction costs quantification of Mundaca (2007) that cost differences do not exceed 5% of the weighted average among all obliged electricity and natural gas suppliers. In France, there is a huge discrepancy between close unitary costs for electricity and gas suppliers on the one hand, and roughly double values for fuel oil retailers on the other. This can be explained by the observation that fuel oil retailers are more willing to provide rebates than other dominant suppliers in France. This will be further analysed in Section 6.1.

¹⁴² We thank two of the reviewers for this suggestion.

¹⁴³ Or approximately \$0.013 per kWh saved, to be compared with recent estimates of DSM programs: 0.034 \$/kWh in dollar 2002 according to Gilligham *et al.* (2006); 0.06 \$/kWh in dollar 2006 according to Arimura *et al.* (2009). Regarding the underlying tasks, the emphasis has been progressively shifted from information and loan programs to rebates (Nadel and Geller, 1996).

5 Balancing costs and benefits

Accounting for the costs borne by other parties allows estimating the cost of the “negawatt-hour” (Joskow and Marron, 1992; Gillingham *et al.*, 2006). Subsequently, energy and environmental benefits must be weighted against costs to complete a fully-fledged social efficiency assessment of white certificate schemes.

5.1 Contributions of other parties to total costs¹⁴⁴

Once the contribution of obliged parties to the cost of energy efficiency improvements has been delimited, the remaining part is supposed to be borne by customers. It happens that some other contributors may often be involved. Throughout their action, especially when implementing measures towards low-income households, British suppliers have worked closely with social housing providers and managing agents. Those actors bore on the whole €151 million (Lees, 2008). In France, the pervasive overlap with the tax credit scheme makes the Government (and ultimately tax-payers) a significant contributor. Tax credits have represented on average 34% of capital costs of implemented measures and on the whole €1,305 million, as calculated in the Annex (Table 37). Net from other parties’ direct contributions, the costs finally paid by customers amount to €325 million in Great Britain and €504 million in France.

		Great Britain 2005-08	France 2006-09
Obligated party total cost	M€	1,280	210
Customer direct cost	M€	325	504
Other party direct cost	M€	153	1,305
TOTAL COSTS	M€	1,758	2,019

Table 31: Comparison of total costs

Costs borne by public authorities for administering the scheme may also be a matter of concern. Lees (2008) estimates that costs incurred by the British administrator (Ofgem) is kept under 0.1% of energy supplier costs and those incurred by the regulator (Defra) are even lower. Administrative costs may be similarly negligible in the French and Italian schemes.

¹⁴⁴ Data is not available to perform such an evaluation for the Italian scheme. Note that regarding the operating mode that has prevailed up to now in the residential sector, namely the nearly free distribution of CFLs and water economizers, the cost to consumer might be close to zero. Note also that regulated distributors are granted €100 for every ton oil equivalent they save to recover the cost of the scheme. This is ultimately paid by tax-payers as a contribution to the energy tariff. It can be considered as a transfer within the scheme and hence should not be counted. Lastly, other costs should include, among others, the contribution of public authorities to the investment cost on measures realised on their premises, like public lighting.

Total costs of the British and French schemes are summarized in Table 31. Similar ratios of direct costs over total costs in France (93%) and in Great Britain (89%) indicate that costs come essentially from energy efficiency improvements. In Great Britain, the share of total costs incurred by obliged parties and customers are 73% and 18%, respectively. Conversely in France, obliged parties bear only 10% of total costs and the scheme is primarily financed by end-use consumers, partly as measure beneficiaries and for most of the part as taxpayers. This huge gap raises important equity issues. It again reflects the fact that in Great Britain, energy suppliers contribute more directly to investment costs through large rebates compared to France, where this role is fulfilled by the tax credit scheme. For comparison, consumer costs are around 60% to 70% of costs under utilities' DSM programs (Nadel and Geller, 1996).

5.2 Social benefits

Benefits of the scheme accrue primarily to private customers from the reduction of their energy operating expenditures. Expressed in present monetary terms, for a constant average energy price of €0.08/kWh, the effective energy savings alleviate the French energy bill by €4,320 million. In Great Britain, Lees (2008, Table A5.3) reports present values of €6,720 million to electricity consumers, €5,640 million to gas consumers and €658 million to fuel consumers, thus on the whole €13,020 million. In Italy, Pavan (2008, Figure 3) figures out that avoided energy costs for consumers are around €600/toe for electricity and €750/toe for gas. This yields €7,980 million and €8,925 million of electricity and gas savings, for a total amount of €16,905 million.

From a social standpoint, the avoided CO₂ emissions represent an environmental benefit. Contrarily to energy, CO₂ is removed definitively once saved, so emission cuts are generally undiscounted (Lees, 2008). Their quantification will depend upon national mixes in electricity generation and the repartition of the scheme results by fuel type. This requires specific assumptions for France where fuel breakdowns are not disclosed by public authorities. Moreover, base electricity load is dominated by nuclear power and peak load is mainly supplied by fossil fuels. Therefore, estimates of carbon savings might differ whether one considers the *average* or *marginal* carbon content of electricity. Under these extreme assumptions, carbon dioxide savings are 17.1 MtCO₂ and 22.9 MtCO₂, with 20.0 MtCO₂ as a central value. Based on assumptions from other works, white certificate schemes have saved 72.6 MtCO₂ in Great Britain and 63.6 MtCO₂ in Italy.

The monetary valuation of carbon dioxide savings reflect national assumptions about the social value of carbon, which in turn reflect the carbon content of the energy supply system. In Great Britain and France, public authorities have defined temporal profiles of carbon abatement costs that will need to be incurred to meet national emissions reduction targets. Based on these pre-defined values, white certificate schemes yield environmental benefits of €7,686 million in Great Britain and €921 million in France (all assumptions are reported in the Annex, Table 34). Hence, the high fossil fuel content of the British electricity magnifies

the gap already existing with France regarding private benefits. In Italy, in the absence of an official value of carbon, one default solution is to consider that carbon savings can be traded on the EU-ETS. Accordingly, and assuming a constant average market price of 20 €/tCO₂, the Italian scheme yields 1,290 million. To ease the comparison, CO₂ savings valued at the same European price are also provided for Great Britain and France in Table 32.

		Great Britain 2005-08	France 2006-09	Italy 2005-08
End-use energy savings	TWh	192	54	193
Monetary value of energy savings	M€	13,020	4,320	16,905
CO ₂ savings	MtCO ₂	72.6	20.0	64.5
Monetary value of CO ₂ savings, at European market price	M€	1,452	400	1,290
Monetary value of CO₂ savings, at national social value	M€	7,686	921	-
TOTAL BENEFITS, at CO ₂ European market price	M€	14,472	4,720	17,935
TOTAL BENEFITS, at CO₂ national social value	M€	20,706	5,241	-

Table 32: Comparison of total benefits

Note that the alleviation of fuel poverty in the British scheme also provides social benefit. Yet this benefit is intangible in practice, and cannot be readily taken into account. Likewise, social benefits in terms of employment in the energy efficiency industry require a specific evaluation. Lastly, private benefits might accrue to certain obliged parties from market share gains at the expense of less skilled ones. They can be considered as transfers between energy companies, and as such they do not modify the final cost-benefit balance.

5.3 A social efficiency assessment

Putting total costs against effective energy savings allows estimating the cost-effectiveness of the scheme, otherwise known as the *negawatt-hour cost* (Joskow and Marron, 1992; Nadel and Geller, 1996; Gillingham *et al.*, 2006¹⁴⁵). The comparison to the *kilowatt-hour cost* establishes the social desirability of the scheme. Table 33 exhibits a cost-effectiveness estimate for Great Britain that is far below energy prices¹⁴⁶: 0.91 c€ per kWh saved, against an electricity price of 13.94 c€/kWh and a gas price of 3.7 c€/kWh. In France, the difference is much more tenuous, although still favourable to conservation: 3.74c€ per kWh saved, against 9.4 c€/kWh electricity price and 4.4 c€/kWh gas price. Overall, it is more profitable to

¹⁴⁵ These authors review estimates ranging from \$0.008/kWh to \$0.229/kWh (in dollar 2002) for DSM programs.

¹⁴⁶ The Eurostat 2008 benchmark values are used, in line with Bertoldi *et al.* (2010).

save energy than to produce it, which is an *ex post* justification of the implementation of white certificate schemes from a social perspective. It remains that the policy must prove its efficiency, *i.e.* its ability to generate benefits that exceed costs. The French and British schemes (and very likely the Italian one) have undoubtedly gathered net social benefits. They pay for themselves, whether environmental benefits from carbon dioxide savings are taken into account or not, and cost-efficiency estimates show very attractive paybacks: every euro spent returns €7.41 in Great Britain and €2.14 in France, excluding CO₂ savings (Table 33). Overall, white certificate schemes can thus be considered both cost-effective and socially efficient.

Explanations for the marked difference between French and British outcomes lie essentially in technological considerations. A long learning process, started with EESoP, has enabled British suppliers to identify CWI as a highly cost-effective potential and to develop economies of scale¹⁴⁷. In contrast, French historic suppliers have thus far focused on heating system (heat pumps and condensing boilers), that are directly related to their commercial core business: such devices being essential to convert the energy they sell into a heating service, they have closer and more ancient relationships with heating system installers than with insulation installers. These measures happen to be costlier than in Great Britain because of a more recent market penetration. For instance, the average price of a condensing boiler reaches €2,200 in Great Britain (Lees, 2008) but up to €8,600 in France (OPEN, 2009). Lastly, theoretical lifetimes of insulation measures are typically 35-40 years, whereas they are only 15-20 years for heating systems. As a result, the British mix dominated by inexpensive and long-lasting insulation measures show better properties, in terms of both cost-effectiveness and cost-efficiency, than the French one dominated by expensive and short-lasting heating system replacement.

¹⁴⁷ It is noteworthy that the related cost decrease is apparently countervailed by the progressive shift towards costlier potentials. Indeed, cost-effectiveness estimates of the savings were 1.3 p/kWh for electricity and 0.5 p/kWh for gas during EEC1 and 2.1 p/kWh for electricity and 0.6 p/kWh for gas during EEC2 (Lees, 2005, 2008). Early evidence from the CERT scheme shows much higher cost-effectiveness estimates.

		Great Britain 2005-08	France 2006-09
End-use energy savings	TWh	192	54
Program costs	M€	1,758	2,019
Benefits, excluding CO ₂ savings	M€	7,686	4,320
Benefits, including CO₂ savings	M€	20,706	5,241
Social cost-effectiveness	c€ spent per kWh saved	0.91	3.74
Net social benefits, excluding CO ₂ savings	M€	11,262	2,301
Net social benefits, including CO₂ savings	M€	18,948	3,222
Cost-efficiency, excluding CO ₂ savings	€ gained per € spent	7.41	2.14
Cost-efficiency, including CO₂ savings	€ gained per € spent	11.78	2.60

Table 33: Consolidated costs and benefits and social efficiency analysis

6 Interpreting costs: lessons about obliged parties' strategy

Prior to any *ex post* evaluation, the novelty of white certificate schemes makes them hard to characterize in theoretical terms. Since they promote performance rather than means, no specific delivery route is mandated and there are as many possible strategies as there are obliged parties. Moreover, within a *baseline and credit* framework, the innovative market component has aroused the enthusiasm of stakeholders but casted shadow over the importance of the elementary obligation component. To date, standard microeconomics has tended¹⁴⁸ to favour a stylized representation of white certificate schemes, generally portrayed as a hybrid combination of a subsidy for energy efficient goods with an end-use energy tax allowing cost recovery. This representation implicitly emphasizes transactions between obliged parties and related energy efficiency business, rather than trade among obliged parties.

The present section confronts these *ex ante* theoretical statements with the outcomes highlighted by the *ex post* evaluation that precedes. In particular, it investigates how the nature and amount of costs borne by obliged agents influence their effective compliance strategy compared to the theoretical one, on both the upstream side of the energy efficiency

¹⁴⁸ Albeit growing as schemes scale up, the theoretical literature on white certificate schemes is still scarce. Different approaches have been investigated, namely standard microeconomics (Bye and Bruvoll, 2008; Giraudet and Quirion, 2008; Oikonomou *et al.*, 2008; Peerels, 2008; Sorrell *et al.*, 2009), bottom-up modelling (Farinelli *et al.*, 2005; Oikonomou *et al.*, 2007; Peerels, 2008; Mundaca, 2008) and transaction cost approaches (Langniss and Praetorius, 2006; Mundaca, 2007).

industry and the downstream side of end-use consumers. The following issues are addressed: *What is the extent of cost heterogeneity, which is a necessary condition for trading? How does the cost repartition affect the hybrid stylized representation?*

6.1 Cost heterogeneity and trade implications

The rationale for integrating market mechanisms in white certificate schemes is to equalize obliged parties' marginal costs and thus lower the total cost of the scheme. That is, a necessary condition for the market to be active and generate savings is for private costs to be heterogeneous. Applying the general framework provided by Newell and Stavins (2003) to white certificate schemes, cost heterogeneity might originate from (i) the heterogeneity in the efforts to be made by obliged parties (*i.e.* the difference between their individual obligation and their energy saving potential) and (ii) the heterogeneity in their energy saving cost functions. Regarding the first source, obligations in France and Great Britain are distributed among energy suppliers according to their market share in the residential sector. This is a fair criterion regarding competitiveness, but not necessarily reflecting the potential for energy savings really achievable by each participant. Regarding the second source, from the perspective of supporting the diffusion of goods that they do not produce, energy suppliers' cost function depends directly on their access to other energy efficiency businesses. It has been acknowledged that on dominating insulation measures in Great Britain, a competitive bidding process for dealing with subcontractors led to very similar measure costs to energy suppliers (Mundaca, 2007; Mundaca *et al.*, 2008). This is likely to apply to other measures, in Great Britain as well as in France. Indeed, the second source is insignificant and the overall cost heterogeneity comes primarily from differences in individual targets, *i.e.* in market shares. Those are homogenous in Great Britain, where the market shares of the six obliged energy suppliers range from 11% to 32% (Lees, 2008, p.21), but heterogeneous in France, where EDF and GDF SUEZ bear 83% of the obligation while 2,500 medium or small energy companies bear the remaining part.

As a result, Section 4.3 has shown that estimated costs are quite homogenous in Great Britain. In France, the costs of the two dominant suppliers appeared very close, but the average cost for fuel oil retailers was more than twice higher. Against these estimations, a very low trade activity can be observed in both countries. White certificates exchanges happen to be negligible in Great Britain and cover only 4% of certified energy savings in France. However, one major energy supplier has acknowledged having tested market transactions in order to get a benchmark for his private costs. In this respect, note that the average cost to energy suppliers calculated in Section 5.1 (0.39 c€ per kWh saved) is close to the market average price (0.32 c€ per kWh saved).

Overall, in a context of low cost heterogeneity, the potential cost savings from trade (or opportunity cost of non-trading) are limited and offset by some costs of trading. In their extensive analysis of the market activity, Mundaca *et al.* (2008) refer to 'commercial benefits of non-trading' to introduce the risk of providing information to competitors when trading.

Note also that French fuel oil retailers prefer to provide large rebates and thus bear higher costs than other suppliers to maintain their business, instead of buying white certificates. As a result, such costs of trading create a preference of obliged parties towards 'autarky', a phenomenon that has been observed in U.S. pollution cap and trade programs (Burtraw, 1996).

Lastly, preliminary lessons can be drawn from the incomplete analysis of the Italian scheme. Contrarily to other schemes, it shows a high level of market activity, since 79% of the white certificates issued have been traded on *spot* and *over-the-counter* markets (Pavan, 2008; Oikonomou *et al.*, 2009). However, this cannot be considered as a horizontal equalisation of obliged parties' marginal costs, since most of the transactions involved obliged energy distributors on the demand side and non-obliged energy service providers¹⁴⁹ on the supply side. Whereas obliged energy distributors can hardly promote energy savings to end-users that are not their customers, energy service providers can fill this gap by implementing energy efficiency measures and sell the related white certificates to energy distributors. Cost heterogeneity among energy distributors is likely to be very low, as regards their ability to subcontract with energy service providers. However, the unequal access to end-users between energy distributors and service providers can be interpreted as cost heterogeneity, favouring a vertical form of trade among agents that operate at different levels of the value chain (Radov *et al.*, 2006).

6.2 Nature of the costs and validity of the hybrid mechanism

Let us examine how the hybrid subsidy-tax instrument mechanism established by microeconomic models in partial equilibrium conforms to reality. The magnitude of the subsidy component can be evaluated as the share of obliged parties' direct costs in total direct costs¹⁵⁰. In Great Britain, energy suppliers' direct costs reach 70% of total direct costs, which confirms an intensive use of rebates. In France, aggregate energy suppliers' direct costs are 4% of total direct costs, but the picture is much contrasted between electricity and gas segments on the one hand, the fuel oil segment on the other. The former provide inexpensive services like information, diagnosis and advice, whereas the latter are more willing to grant subsidies.

In parallel to the subsidy component, the tax component should be evaluated through retail energy prices. Their settlement depends upon the regulations prevailing in each country. In Great Britain, energy markets are competitive and energy prices are set freely. There is currently no way to decompose energy suppliers' margin and ascertain whether they fully

¹⁴⁹ Energy service providers are subsidiaries of obliged distributors for 43% of these transactions (Pavan, 2008; Eyre *et al.*, 2009).

¹⁵⁰ Note that this is supplemented by an observation of obliged parties' advertising material, to ensure that large (respectively small) shares of total direct costs correspond effectively to commercial offers essentially based on subsidies (respectively on other energy services).

pass through the compliance cost¹⁵¹ to energy prices. Nevertheless, it is assumed as such by the British Government. Lees (2008) estimates that the expenditures by the energy suppliers represent on average 9.7€ per customer per year, equivalent to 1-2% of the average annual fuel bill. In France, dominant electricity and gas markets are less competitive and the Regulator has so far prohibited cost pass-through in these markets. Conversely on the fuel oil segment, output prices are set freely. As in Great Britain, however, the level of cost pass-through is unobservable, all the more blurred by the price fluctuations that followed the 2008 oil shock.

Although it cannot be asserted that the burden of the scheme is effectively passed-through by obliged parties to their output price, there is a sound correlation between permissive cost recovery rules and energy efficiency subsidisation in Great Britain and on the fuel oil segment in France. Where costs cannot be recovered, as on other segments in France, energy suppliers manage to develop less costly strategies. The theoretical hybrid mechanism is thus valid, but subject to regulatory considerations. In Italy, even in the absence of an in-depth cost analysis, it is known that energy distributors are regulated monopolies and the price of the distribution service includes the expenditures generated by the obligation, as a standard contribution of €100 per ton oil equivalent (toe) saved¹⁵² (Pavan, 2008).

In addition to this mechanism, some other factors can be invoked to explain obliged parties' strategies towards end-use consumers. First, in France the tax credit scheme is a ready form of subsidy that obliged suppliers have just to advertise for. Yet this did not prevent fuel oil retailers to provide larger subsidies than other suppliers for the same type of measures (especially boiler replacement). In addition to their regulatory situation favouring the use of rebates, they actually need to keep incentives high to countervail the marked decline of their business with growing environmental concerns¹⁵³. Second, the high competitiveness of energy markets in Great Britain provides higher incentives to differentiate through aggressive commercial offers, with a more intense use of rebates.

7 Conclusion

This paper was an attempt to cope with the low availability of data to estimate the costs and benefits of white certificate schemes, in order to assess to what extent they are cost-effective and economically efficient, *i.e.* minimizing costs to target and maximizing net benefits. Subsequently, some general insights about the conceptualization of the instrument have been derived from the analysis of the differences in national realisations.

¹⁵¹ The compliance cost is supposed to equal the direct and indirect costs incurred by obliged parties, plus the opportunity cost of forgone energy sales.

¹⁵² This has been changed in 2009 and the level of cost recovery now depends on energy sale price variation. This new regulation yielded an average 2009 cost recovery rate of €88.92 per toe saved (Bertoldi *et al.*, 2009).

¹⁵³ Interestingly, although not obliged at the beginning of the consultation process, fuel oil retailers saw an opportunity to make their business evolve and asked for participating to the scheme.

From a methodological point of view, assessing the effectiveness of white certificates is eased by the use of standardized calculation. Note however that these are *ex ante* data, and its reliability should be reinforced by *ex post* controls (which has occurred in Great Britain and Italy, but not yet in France). Assessing costs that are not disclosed is a much more difficult task. It could be eased by the market price, which turns out to be meaningless for several reasons. The evaluator is forced to make assumptions that obliged parties are reluctant to discuss, by anticipating changes in target sizes that their indications could imply. Overall, the regulatory requirements of white certificate schemes provide more transparency about energy savings than DSM programs, but less transparency about costs. The way costs and benefits are subsequently interpreted raises further methodological issues. Cost-benefit analysis is of partial equilibrium nature and makes no case for macroeconomic retroactions (Goulder and Parry, 2008). Moreover, it is not a welfare assessment and fails short to capture adequately the benefits of the scheme (Gillingham *et al.*, 2006; Braithwait and Caves, 1994). Perhaps more importantly, cost-effectiveness and economic efficiency are essentially static statements, that is to say, holding for the given stages of the scheme. They abstract from powerful organisational and technological dynamics that, along with appropriate regulatory changes, could modify the cost-benefit structure in the long-run. This calls for a broader dynamic efficiency evaluation, factoring market transformation issues and organisational arrangements between stakeholders.

Despite these methodological limitations, this analysis confirms the early conclusion of Mundaca and Neij (2009) that white certificate schemes are a cost-effective and economically efficient policy instrument for energy efficiency. “Negawatt-hour” costs compare favourably to kilowatt-hour costs and white certificate schemes pay for themselves. This is even magnified further when environmental benefits are accounted for. However, this general result is contrasted among countries, notably with a huge efficiency discrepancy between the British scheme and its French counterpart. Discrepancies in total costs are mainly rooted in technological differences that lead to uneven energy saving potentials. Discrepancies in benefits come from different energy supply systems, which impact the retail energy price and the carbon content of electricity. Put another way, the French household sector was probably more energy efficient at the beginning of the scheme, hence incremental energy savings are more expensive. Recent indications that the costs of CERT are rising disproportionately (Purchas, 2009) confirms that Great Britain is moving on to costlier potentials. The same applies for Italy, where energy distributors show increasing difficulty to reach rapidly growing targets (Russolillo, 2008).

From a theoretical point of view, empirical results only partially validate the stylized representation of white certificate schemes depicted in microeconomic models. A positive correlation between energy efficiency subsidisation and permissive cost recovery rules has been identified, as well as a possible link between cost heterogeneity and the level of trade. Provided the relatively low targets and short experience so far with white certificate schemes, the analysis fell short of extricating more salient drivers from a bunch of

contingent, country-specific factors working in different directions. This calls for further evaluation and stresses the need for more data, especially about the Italian scheme. Given its specific architecture and outcomes, a more systematic comparison of the three schemes should allow more robust interpretations.

Lastly, from a policy-making point of view, more attention should be paid to the distributive impacts of white certificate schemes across end-use consumers. With respect to the stylized representation, equity concerns arise if energy efficiency measures benefit to a reduced set of customers while being funded by all end-use consumers (Sorrell *et al.*, 2009). Such a situation apparently occurs in Great Britain, where all end-users probably face a uniform energy price increase. It also applies indirectly to France, where the costs of the scheme, although not passed-through to energy prices, are mostly borne as tax credits by taxpayers. This crucial problem is partially solved in Great Britain by an obligation to realise 50% of energy savings to low-income households. The rationale comes from the idea that energy efficient equipment correspond to high-end products that low-income households can barely afford, contrarily to the situation prevailing in transportation. This makes low-income households a deep and highly cost-effective potential for energy savings, hence justifying targeted support. In other words, focusing measures on low-income households is a way to raise the economic efficiency of the scheme while reducing adverse distributive impacts. Lees (2008, p.95) finds cost-efficiency estimates for measures targeted to low-income households that are twice higher than estimates for all householders. This should be considered for implementation in other schemes.

Acknowledgements

This paper has benefited from discussions with French stakeholders during a workshop convened by CIRED and funded by ADEME. We thank Paul Baudry and Luc Lorge (EDF), Patrice Hennig (GDF SUEZ), Patrice Bourrut-Lacouture (Ecofioul), Vivien Tran-Thien (DGEC) and Aude Bodiguel (ADEME) for their active participation. We are indebted to Eoin Lees for his invaluable comments on our calculations that made the comparison with Great Britain possible. We would also like to thank Paolo Bertoldi, Dallas Burtraw, Céline Guivarch, Charles Hargreaves, Marvin Horowitz, Joe Loper, Steve McBurney, Stéphanie Monjon, Luis Mundaca, Vlasios Oikonomou, Karen Palmer, Marcella Pavan, Alberto Pincherle, Philippe Quirion, Daniele Russolillo and Richard Sykes for informal discussions that fed our thinking. Lastly, we are grateful to the three anonymous reviewers, whose comments and suggestions allowed us to significantly enhance the quality of this paper.

Annex

	Great Britain	Italy	France
Average lifetime measures	34 years (Lees, personal communication) [4% discounted = 19.1]	8 years (own estimation) [4% discounted factor=7.0]	20 years (own estimation) [4% discounted = 14.1]
Fuel shares of energy savings	24% for electricity, 70% for gas and 6% for non gas fossil (Lees, 2008, Table 4.1)	52% for electricity, 48% for gas (see respective targets, Annex A2)	23% for electricity, 56% for gas and 21% for fuel oil (own estimation)
Social value of carbon used to calculate environmental benefits	Central value set by DECC (2010, Table 1), for policies affecting non-ETS sectors: 52 £/tCO ₂ in 2010, 60 £/tCO ₂ in 2020, 70 £/tCO ₂ in 2030.	20€/tCO ₂ (own assumption: in the absence of official value)	Official value set by Quinet <i>et al.</i> (2008): 32€/tCO ₂ in 2010, 56€/tCO ₂ in 2020 and 100€/tCO ₂ in 2030.
Carbon dioxide content of energy	As of Lees (2008, Table A5.6): average of 378gCO ₂ /kWh	As of Eyre <i>et al.</i> (2009, Table 2): average of 330 gCO ₂ /kWh	For electric heating, the <i>average</i> value is 225 gCO ₂ /kWh (ADEME and EDF, 2005; ADEME, 2008b) and the <i>marginal</i> value is 550 gCO ₂ /kWh (ADEME and RTE, 2007). An intermediary value of 388 gCO ₂ /kWh is used. Natural gas and fuel oil values are 206 and 271 gCO ₂ /kWh, respectively (ADEME, 2008a).
Other common assumptions	<ul style="list-style-type: none"> • Discount rate=4% • €/£ exchange rate=1.4 (best guess of the average market exchange rate over the April 2005-March 2008 period) • kWh/toe=11,630 		

Table 34: Numerical values and references of the main assumptions

		Electricity	Gas	TOTAL
2005 primary energy target	Mtoe	0.1	0.1	0.2
2006 primary energy target	Mtoe	0.2	0.2	0.4
2007 primary energy target	Mtoe	0.4	0.4	0.8
2008 primary energy target	Mtoe	1.2	1	2.2
2005-2008 primary energy target	Mtoe	1.9	1.7	3.6
2005-2008 lifetime primary energy target	Mtoe	13.3	11.9	25.2
2005-2008 lifetime end-use energy target	TWh	102	91	193

Table 35: Energy savings expressed in normalized units over the 2005-08 period in Italy

		Annual cost to companies covering 48 TWh				Total 3-year period cost		
		Company A	Company B	Company C	TOTAL	To 48 TWh	To target (54 TWh)	
ANNUAL DIRECT COST		Advice	0.00	0.00	0.00	0	0	0
		Diagnosis	0.00	0.00	0.00	0	0	0
		Assistance for renovation	0.00	0.00	0.00	0	0	0
		Rebates and subsidies	3.00	4.73	10.88	19	56	62
		Soft loans	6.00	3.64	0.00	10	29	32
		Service revenue (1)	-5.80	-0.20	0.00	-6	-18	-20
ANNUAL INDIRECT COST	Variable costs	Call centers	9.90	0.00	0.00	10	30	33
		Technical advice	8.00	0.38	0.00	8	25	28
		Professional partnership	3.10	1.61	0.00	5	14	16
		Marketing	2.75	1.10	3.43	7	22	24
		Aministration	0.60	0.24		1	3	3
	Fixed costs	Training	0.00	0.00	0.00	0	0	0
		Commercial offer development	5.50	2.20	0.00	8	23	26
		Information networks	1.00	0.67	0.00	2	5	6
Total direct costs		3	8	11	22	67	74	
Total indirect costs		31	6	3	40	121	135	
<i>including variable costs</i>		<i>24</i>	<i>3</i>	<i>3</i>	<i>31</i>	<i>93</i>	<i>104</i>	
<i>including fixed costs</i>		<i>7</i>	<i>3</i>	<i>0</i>	<i>9</i>	<i>28</i>	<i>31</i>	
TOTAL COSTS		34	14	14	63	188	210	
Share of total direct costs		9%	57%	76%	35%			
Share of total indirect costs		91%	43%	24%	65%			
<i>including variable</i>		<i>72%</i>	<i>23%</i>	<i>24%</i>	<i>50%</i>			
<i>including fixed</i>		<i>19%</i>	<i>20%</i>	<i>0%</i>	<i>15%</i>			
		100%	100%	100%	100%			

This is the author's own estimation, based on:

- (i) Information made available to the public by obliged parties
- (ii) Bilateral interviews with obliged parties' representatives
- (iii) Own assumptions about material costs and salaries

(1) Companies can get receipts from the sale of services such as diagnosis or advice

nota bene: where cost equals zero, the task is either not realised or realised at no additional cost (as reallocation of a pre-existing services)

Table 36: Estimate of obliged parties' costs in the French scheme

Measures mix as of July 1, 2009	%	TWh cumac*	kWh cumac per unit**	Unit	Unit numbers	Unitary cost (€)***	Gross cost (M€)	Additional cost rate***	Unitary additional cost	Net cost (M€)	Tax credit rate**	Tax credit cost (M€)
Individual condensing boiler	20.8	11.232	110 000		102 109	7 000	714.8	40%	2 000	204.2	30%	214.4
Individual low-temperature boiler	11.5	6.21	55 000		112 909	6 000	677.5	20%	1 000	112.9	15%	101.6
Collective condensing boiler	7.5	4.05	100 000	dwelling	40 500	1 000	40.5	40%	286	11.6	0	0.0
Air-to-air heat pump	5.8	3.132	110 000		28 473	14 000	398.6	67%	5 617	159.9	50%	199.3
Roof and attic insulation	5.5	2.97	1 600	m ²	1 856 250	30	55.7	100%	30	55.7	50%	27.8
Efficient glazing	4.3	2.322	4 400	window	527 727	800	422.2	100%	800	422.2	40%	168.9
Air-to-water heat pump	4.2	2.268	120 000		18 900	14 000	264.6	67%	5 617	106.2	50%	132.3
Collective low-temperature boiler	2.9	1.566	50 000	dwelling	31 320	800	25.1	20%	133	4.2	0%	0.0
Independant wood furnace	2.6	1.404	50 000		28 080	3 500	98.3	100%	3 500	98.3	50%	49.1
Wall insulation	2.4	1.296	2 500	m ²	518 400	120	62.2	100%	120	62.2	40%	24.9
Solar water heating (overseas)	2.2	1.188	25 200	dwelling	22 500	3 750	84.4	100%	3 750	84.4	50%	42.2
LBC (overseas)	1.9	1.026	460		2 230 435	6	13.4	100%	6	13.4	0%	0.0
Individual boiler control	1.3	0.702	22 000		31 909	120	3.8	100%	120	3.8	30%	1.1
Water-to-water heat pump	1	0.54	120 000		4 500	14 000	63.0	67%	5 617	25.3	50%	31.5
District heating	1.1	0.594	125 000	dwelling	4 752	500	2.4	100%	500	2.4	50%	1.2
Condensing boiler, commercial	1.2	0.648	800	m ²	810 000	15	12.2	100%	15	12.2	0%	0.0
TOTAL	76.2	41.148					2 938.5			1 378.7		994.4

Aggregate values	TWh	Gross cost	Net cost	Tax credit cost
To restricted perimeter	41	2 938	1 379	994
To target	54	3 856	1 809	1 305
Average rates			47%	34%

Cumac stands for "cumulé actualisé" (accumulated and discounted)

Gross cost Whole investissement cost for all measures

Additional cost rate Cost differential with the reference situation (see section 4.1)

Net cost Cost of effective energy efficiency improvements

* DGEC data

** Average from DGEC data

*** Author's own assumptions

no * Deduced from primary data (*, **, ***)

Table 37: Estimate of the total costs of energy efficiency improvement in the French scheme

References

- ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie] et EDF, 2005, *Note de cadrage sur le contenu CO2 du kWh par usage en France*
- ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie] et RTE, 2007, *Le contenu en CO2 du kWh électrique : Avantages comparés du contenu marginal et du contenu par usages sur la base de l'historique*
- ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie], 2008, *Les chiffres clés du bâtiment*
- AEEG [Autorità per l'energia elettrica e il gas], 2008, *Terzo rapporto annuale sul meccanismo dei titoli di efficienza energetica*
- Arimura, T., R. Newell, K. Palmer, 2009, "Cost-effectiveness of electricity energy efficiency programs", *Resources for the Future Discussion Paper*, n°09-48
- Auffhammer, M., C. Blumstein, M. Fowlie, 2008, "Demand-side management and energy efficiency revisited", *The Energy Journal*, 29(3):91-104
- Baudry, P., D. Osso, 2007, "Uncertainties in the evaluation of energy savings potential", *Proceedings of the ECEEE summer study*, 583-588
- Bertoldi, P., S. Rezessy, 2008, "Tradable white certificate schemes: fundamental concepts", *Energy Efficiency*, 1(4):237-255
- Blumstein, C., J. Harris, 1993, "The cost of energy efficiency", *Science*, New Series, Vol. 261, n° 5124, p. 970
- Bodineau, L., A. Bodiguel, 2009, "Energy Savings Certificates (ESC) scheme in France: initial results", *Proceedings of the ECEEE summer study*, 669-675
- Boonekamp, P.G.M., 2006, "Evaluation of methods used to determine realized energy savings", *Energy Policy*, 34(18):3977-3992
- Braithwait, S., D. Caves, 1994, "Three biases in cost-efficiency tests of utility energy efficiency programs", *The Energy Journal*, 15(1):95-120
- Burtraw, D., 1996, "The SO₂ emissions trading program: cost savings without allowance trades" *Contemporary Economic Policy*, 14:79-94.
- Bye, T., A. Bruvoll, 2008, "Multiple instruments to change energy behavior: the emperor's new clothes?", *Energy Efficiency*, 1(4):373-386
- DECC [Department of Energy and Climate Change], 2010, *Carbon Appraisal in UK Policy Appraisal: A revised Approach*
- DGEC [Direction Générale de l'Énergie et du Climat], 2009, *Lettre d'information certificats d'économies d'énergie*, juillet
- Eto, J., E. Vine, L. Shown, R. Sonnenblick, C. Payne, 1996, "The total cost and measured performance of utility-sponsored energy efficiency programs", *The Energy Journal*, 17(1): 31-51
- Eyre, N., M. Pavan, L. Bodineau, 2009, "Energy company obligations to save energy in Italy, the UK and France: what have we learnt?" *Proceedings of the ECEEE summer study*, 429-439
- Farinelli, U., T.B. Johansson, K. McCormick, L. Mundaca, V. Oikonomou, M. Ortenvik, M. Patel, F. Santi, 2005, "'White and Green': Comparison of market-based instruments to promote energy efficiency", *Journal of cleaner production*, 13(10-11):1015-1026

- Geller, H., S. Attali, 2005, *The experience with energy efficiency policies and programs in IEA countries: learning from the critics*, IEA, Paris
- Gillingham, K., R. Newell, K. Palmer, 2006, "Energy Efficiency policies: a retrospective examination", *Annual Review of Environment and Resources*, 31:161-192
- Goulder L. H., I.W.H. Parry, 2008, "Instrument choice in environmental policy", *Review of Environmental Economics and Policy*, 2(2):152-174
- Horowitz, M., 2004, "Electricity intensity in the commercial sector: market and public program effects", *The Energy Journal*, 225(2):115-138
- Joskow, P.L., D.B. Marron, 1992, "What does a negawatt really cost? Evidence from utility conservation programs", *The Energy Journal*, 13(4):41-74
- Labanca, N., A. Peerels, 2008, "Editorial: Tradable White Certificates – a promising but tricky policy instrument", *Energy Efficiency*, 1(4):233–236
- Langniss, O., B. Praetorius, 2006, "How much market do market-based instruments create? An analysis for the case of "white" certificates", *Energy Policy*, 34(2):200–211
- Laughran, D.S., J. Kulick, 2004, "Demand-side management and energy efficiency in the United States", *The Energy Journal*, 25(1):19-43
- Lees, E., 2005, *Evaluation of the Energy Efficiency Commitment 2002-05*, Report to DEFRA
- Lees, E., 2008, *Evaluation of the Energy Efficiency Commitment 2005-08*, Report to DECC
- MEEDDM [Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer], 2010, *La fiscalité environnementale prend son essor*
- Mundaca, L., 2007, "Transaction costs of Tradable White Certificate schemes: The Energy Efficiency Commitment as a case study", *Energy Policy*, 35(8):4340-4354
- Mundaca, L., 2008, "Markets for energy efficiency: Exploring the implications of an EU-wide 'Tradable White Certificate' scheme", *Energy Economics*, 30(6):3016-3043
- Mundaca, L., L. Neij, N. Labanca, B. Duplessis, L. Pagliano, 2008, "Market behaviour and the to-trade-or-not-to-trade dilemma in 'tradable white certificate' schemes", *Energy Efficiency*, 1(4):323–347
- Mundaca, L., L. Neij, 2009, "A multi-criteria evaluation framework for tradable white certificate schemes", *Energy Policy*, 37(11): 4457-4573
- Nadel, S., H. Geller, 1996, "Utility DSM : What have we learned ? Where are we going?", *Energy Policy*, 24(4):289-302
- Newell, R.G., R.N. Stavins, 2003, "Cost Heterogeneity and the Potential Savings from Market-Based Policies", *Journal of Regulatory Economics*, 23(1):43-59
- Oikonomou, V., M. Rietbergen, M. Patel, 2007, "An ex-ante evaluation of a White Certificates scheme in The Netherlands: A case study for the household sector", *Energy Policy*, 35(1):1147–1163
- Oikonomou, V., C. Jepma, F. Becchis, D. Russolillo, 2008, "White Certificates for energy efficiency improvement with energy taxes: A theoretical economic model", *Energy Economics*, 30(6):3044–3062
- Oikonomou, V., M. Di Giacomo, D. Russolillo, F. Becchis, 2009, "White certificates in an oligopoly market: closer to reality?", *Proceedings of the ECEEE summer study*, 1071-1080
- OPEN [Observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement], 2009, *Rapport final*

- Pavan, M., 2008, "Tradable energy efficiency certificates: the Italian experience", *Energy Efficiency*, 1(4):257-266
- Perrels, A., 2008, "Market imperfections and economic efficiency of white certificate systems", *Energy Efficiency*, 1(4):349–371
- Purchas, G., 2009, *UK energy supplier obligation*, Presentation at the European Commission Workshop on tradable certificates for energy savings (white certificates) and supplier obligation, Brussels
- 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, Paris: La Documentation française
- Radov, D., P. Klevnas, S. Sorrell, 2006, *Energy Efficiency and Trading. Part I: Options for Increased Trading in the Energy Efficiency Commitment*, Report to Defra
- Russolillo D., 2008, *The White Certificates system in Italy: results and perspectives*, Presentation at the Energy Delta Convention 2008, Groningen
- Sorrell, S., J. Dimitropoulos, 2008, "The rebound effect: microeconomic definitions, limitations and extensions", *Ecological Economics*, 65(3):636-649
- Sorrell, S., D. Harrison, D. Radov, P. Klevnas, A. Foss, 2009, "White certificate schemes: Economic analysis and interactions with the EU ETS", *Energy Policy*, 37(1):29-42
- Thomas, S., 2009, "Measuring and reporting energy savings for the European Services Directive – how it can be done", *Results and recommendations from the EMEEES project*, Wuppertal Institute on behalf
- Vine, E.L., M.G. Kushler, 1995, "The reliability of DSM impact estimates", *Energy*, 20(12):1171-1179
- Vine, E., J. Hamrin, 2008, "Energy savings certificates: A market-based tool for reducing greenhouse gas emissions", *Energy Policy*, 36(1):467-476
- Waide, P., B. Buchner, 2008, "Utility energy efficiency schemes: savings obligations and trading", *Energy Efficiency*, 1(4):349–371

Bibliographie générale

- [1] Abrahamse, W., L. Steg, C. Vlek, T. Rothengatter, 2005, "A review of intervention studies aimed at household energy conservation", *Journal of Environmental Psychology*, 25(3):273–291
- [2] Académie des sciences, 2010, *Le changement climatique*, <http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/pdf/climat_261010.pdf>
- [3] ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie] et EDF, 2005, *Note de cadrage sur le contenu CO2 du kWh par usage en France*
- [4] ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie] et RTE, 2007, *Le contenu en CO2 du kWh électrique : Avantages comparés du contenu marginal et du contenu par usages sur la base de l'historique*
- [5] ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie], 2008, *Les chiffres clés du bâtiment*
- [6] ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie], 2008, *Marchés, emplois et enjeu énergétiques des activités liées à l'efficacité énergétique et aux énergies renouvelables : situation 2006-2007 – perspectives 2012*
- [7] ADEME [Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie], 2008, *Regards sur le Grenelle*
- [8] 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*
- [9] AEEG [Autorità per l'energia elettrica e il gas], 2007, *Secondo rapporto annuale sul meccanismo dei titoli di efficienza energetica. Situazione al 31 maggio 2007*
- [10] AEEG [Autorità per l'energia elettrica e il gas], 2008, *Terzo rapporto annuale sul meccanismo dei titoli di efficienza energetica*
- [11] AIE [Agence internationale de l'énergie], *Energy balances of OECD countries, 2004-2005*, Paris
- [12] AIE [Agence internationale de l'énergie], 2007, *Mind the gap: Quantifying principal-agent problems in energy efficiency*, Paris
- [13] AIE [Agence internationale de l'énergie] et AFD [Agence française pour le développement], 2008, *Promoting energy efficiency investments. Case studies in the residential sector*, Paris
- [14] Alcott, B., 2008, "The sufficiency strategy: Would rich-world frugality lower environmental impact?", *Ecological Economics*, 64(4): 770-786
- [15] 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
- [16] Allcott, H., S. Mullainathan, 2010, "Behavior and energy policy", *Science*, Vol. 327, n°5970, pp. 1204-1205. Version longue:
<<http://web.mit.edu/allcott/www/Allcott%20and%20Mullainathan%202010%20-%20Behavioral%20Science%20and%20Energy%20Policy.pdf>>
- [17] 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.

- [18] ANAH [Agence nationale de l'habitat], 2010, *Les travaux de renovation thermique les plus efficaces*, Guide pratique
- [19] Ansar, J., R. Sparks, 2009, "The experience curve, option value, and the energy paradox", *Energy Policy*, 37(3):1012-1020
- [20] Anselme, B., 1996, *L'énergie dans la cellule*, Paris: Nathan
- [21] Arimura, T., R. Newell, K. Palmer, 2009, "Cost-effectiveness of electricity energy efficiency programs", *Resources for the Future Discussion Paper*, n°09-48
- [22] Arrow, K.J., 1962, "The economic implications of learning by doing", *The Review of Economic Studies* 29(3):155-173
- [23] ATEE [Association Technique Energie Environnement], 2009, *Le dispositif des certificats d'économies d'énergie*, Mémento du club C2E
- [24] Auffhammer, M., C. Blumstein, M. Fowlie, 2008, "Demand-side management and energy efficiency revisited", *The Energy Journal*, 29(3):91-104
- [25] Axsen, J., D. C. Mountain, M. Jaccard, 2009, "Combining stated and revealed choice research to simulate the neighbor effect: The case of hybrid-electric vehicles", *Resource and Energy Economics*, 31(3): 221-238
- [26] Ayres, I., S. Raseman, A. Shih, 2009, "Evidence from two large field experiments that peer comparison feedback can reduce residential energy usage", *NBER Working Paper*, No. 15386
- [27] Banfi, S., M. Farsi, M. Filippini, M. Jakob, 2008, "Willingness to pay for energy-saving measures in residential buildings", *Energy Economics*, 30(2):503-516
- [28] Baudry, P., D. Osso, 2007, "Uncertainties in the evaluation of energy savings potential", *Proceedings of the ECEEE summer study*, 583-588
- [29] Baumol, W.J., W. E. Oates, 1971, "The use of standards and prices for protection of the environment", *The Swedish Journal of Economics*, 73(1):42-54
- [30] BC Hydro [British Columbia Hydro and Power Authority], 2007, *Conservation potential review. The potential for electricity savings, 2006-2026. Residential, commercial and industrial sectors in British Columbia*, Summary report, Submitted by Marbek Resource Consultants Ltd.
- [31] Bennear, L.S., R.N. Stavins, 2007, "Second-best theory and the use of multiple policy instruments", *Environmental and Resource Economics*, 37(1):111-129
- [32] Bertoldi, P., T. Huld, 2006, "Tradable certificates for renewable electricity and energy savings", *Energy Policy*, 34(2):212-222
- [33] Bertoldi, P., S. Rezessy, 2006, *Tradable certificates for energy savings (white certificates) – theory and practice*, Institute for Environment and Sustainability, JRC, European Commission, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. Reference EUR 22196 EN
- [34] Bertoldi, P., S. Rezessy, 2008, "Tradable white certificate schemes: fundamental concepts", *Energy Efficiency*, 1(4):237-255
- [35] Bertoldi, P., S. Rezessy, E. Lees, P. Baudry, A. Jeandel, N. Labanca, 2010, "Energy supplier obligations and white certificate schemes: comparative analysis of experiences in the European Union", *Energy Policy*, 38(3):1455-1469
- [36] Besson, D., 2008, « Consommation d'énergie: autant de dépenses en carburants qu'en énergie domestique », *Note INSEE PREMIERE*, n°1176

- [37] Blumstein, C., J. Harris, 1993, "The cost of energy efficiency", *Science*, New Series, Vol. 261, n° 5124, p. 970
- [38] Boardman, B., 2004, "New directions for household energy efficiency: evidence from the UK", *Energy Policy*, 32(17):1921-1933
- [39] Bodineau, L., A. Bodiguel, 2009, "Energy Savings Certificates (ESC) scheme in France: initial results", *Proceedings of the ECEEE summer study*, 669-675
- [40] Boiteux, M., L. Baumstark, 2001, *Transports : choix des investissements et coûts des nuisances*, Rapport pour le Commissariat général au plan, La Documentation française, 2001
- [41] Boonekamp, P.G.M., 2006, "Actual interaction effects between policy measures for energy efficiency – A qualitative matrix method and quantitative simulation results for households", *Energy*, 31(14):2848-2873
- [42] Boonekamp, P.G.M., 2006, "Evaluation of methods used to determine realized energy savings", *Energy Policy*, 34(18):3977-3992
- [43] Boonekamp, P.G.M., 2007, "Price elasticities, policy measures and actual developments in household energy consumption – A bottom up analysis for the Netherlands", *Energy Economics*, 29(2):133-157
- [44] Braithwait, S., D. Caves, 1994, "Three biases in cost-efficiency tests of utility energy efficiency programs", *The Energy Journal*, 15(1):95-120
- [45] BRE [U.K. Building Research Establishment], 2005, *Costing sustainability: How much does it cost to achieve BREEAM and EcoHomes ratings?*, Information paper
- [46] Burtraw, D., 1996, "The SO₂ emissions trading program: cost savings without allowance trades" *Contemporary Economic Policy*, 14:79-94.
- [47] Bye, T., A. Bruvoll, 2008, "Multiple instruments to change energy behavior: the emperor's new clothes?", *Energy Efficiency*, 1(4):373–386
- [48] Cameron, T.A., 1985, "A Nested Logit Model of Energy Conservation Activity by Owners of Existing Single Family Dwellings", *The Review of Economics and Statistics*, 67(2):205-211
- [49] CAPEB [Confédération de l'Artisanat et des Petites Entreprises du Bâtiment], 2008, *Artisanat du bâtiment. Chiffres clés 2008*
- [50] Carlsson, B., R. Stankiewicz, 1991, "On the nature, function and composition of technological systems", *Journal of Evolutionary Economics*, 1(2):93-118
- [51] Cayla, J.-M., B. Allibe, M.-H. Laurent, 2010, "From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption", *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*
- [52] Cayre, E., B. Allibe, M.-H. Laurent, D. Osso, 2011, "There are people in the house!: How misleading for energy policies are the results of purely technical analysis of residential energy consumption", *Proceedings of the ECEEE Summer Study*, Paper 7-277
- [53] 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
- [54] CGDD [Commissariat général au développement durable], 2009, « Entreprises de construction : résultats de l'EAE 2007 », *Observation et Statistiques*, n°58
- [55] CGDD [Commissariat général au développement durable], 2010, « Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte », Rapport

- [56] Child, R., O. Langniss, J. Klink, D. Gaudioso, 2008, "Interactions of white certificates with other policy instruments in Europe", *Energy Efficiency*, 1(4):283–295
- [57] CITEPA [Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique], 2010, *Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et du Protocole de Kyoto*
- [58] Coase, R.H., 1960, "The problem of social cost", *Journal of Law and Economics*, 3:1-44
- [59] Combet, E., F. Gherzi, J.-C. Hourcade, C. Thubin, 2010, "La fiscalité carbone au risque des enjeux d'équité", *Revue française d'économie*, 25(2):59-91
- [60] Combet, E., B. Perrissin Fabert, P. Quirion, 2010, « La contribution climat-énergie pour sauver les retraites », *Mediapart*, 24 novembre
- [61] Crassous, R., J.-C. Hourcade, O. Sassi, 2006, "Endogenous structural change and climate targets modeling experiments with Imaclim-R", *The Energy Journal*, Special Issue: Endogenous Technological Change and the Economics of Atmospheric Stabilisation, 259-276
- [62] Crassous, R., 2008, « Modéliser le long-terme dans un monde de second rang : application aux politiques climatiques », Thèse de doctorat, AgroParisTech
- [63] Darby, S., 2006, "Social learning and public policy: Lessons from an energy-conscious village", *Energy Policy*, 34(17):2929-2940
- [64] Darby, S., 2006, *The effectiveness of feedback on energy consumption: A review for DEFRA of the literature on metering, billing and direct displays*, Environmental Change Institute, University of Oxford
- [65] DECC [Department of Energy and Climate Change], 2010, *Carbon Appraisal in UK Policy Appraisal: A revised Approach*
- [66] DGEC [Direction Générale de l'Énergie et du Climat], 2009, *Lettre d'information certificats d'économies d'énergie*, juillet
- [67] DGEMP [Direction générale de l'énergie et des matières premières], 2008, *Lettre d'information des Certificats d'économies d'énergie*, mars
- [68] Driesen, D.M., 2003, *The Economic Dynamics of Environmental Law*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- [69] Dubin, J.A., D.L. McFadden, 1984, "An econometric analysis of residential electric appliance holdings and consumption", *Econometrica*, 52(2):345-362
- [70] 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*, Paris : Presses des Mines
- [71] Dupuis, P., 2007, *Les certificats d'économies d'énergie: Le dispositif français*, <<http://www.industrie.gouv.fr/energie/developp/econo/pdf/cee-diaporama.pdf>>
- [72] Ek, K., P. Söderholm, 2010, "The devil is in the details: Household electricity saving behavior and the role of information", *Energy Policy*, 38(3):1578-1587
- [73] EIA [U.S. Energy Information Administration], 2008, *Annual Energy Outlook 2008*
- [74] Ellerman, A.D., J.P. Montero, 2002, "The temporal efficiency of SO₂ emissions trading", *MIT Center for Energy and Environmental Policy Research Working Paper*, No. 02-003
- [75] EMF13 [Energy Modeling Forum 13], 1996, *Markets for energy efficiency*, EMF Report 13, Volume I, Stanford University

- [76] EPA [U.S. Environmental Protection Agency], 2003, *ENERGY STAR: The power to protect the environment through energy efficiency*, EPA 430-R03-008
- [77] Eto, J., E. Vine, L. Shown, R. Sonnenblick, C. Payne, 1996, "The total cost and measured performance of utility-sponsored energy efficiency programs", *The Energy Journal*, 17(1): 31-51
- [78] Eurostat, 2009, *Energystatistics – prices*:
<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/main_tables>
- [79] EuroWhiteCert, 2007, *White Certificates: concept and market experiences*
- [80] Eyre, N., 1997, "Barriers to energy efficiency: more than just a market failure", *Energy & Environment*, 8(1):25-43
- [81] Eyre, N., M. Pavan, L. Bodineau, 2009, "Energy company obligations to save energy in Italy, the UK and France: what have we learnt?" *Proceedings of the ECEEE summer study*, 429-439
- [82] Farinelli, U., T.B. Johansson, K. McCormick, L. Mundaca, V. Oikonomou, M. Ortenvik, M. Patel, F. Santi, 2005, "'White and Green': Comparison of market-based instruments to promote energy efficiency", *Journal of cleaner production*, 13(10-11):1015-1026
- [83] Ferioli, F., K. Schoots, B.C.C. van der Zwaan, 2009, "Use and limitations of learning curves for energy technology policy: a component-learning hypothesis", *Energy Policy*, 37(7):2525-2535
- [84] Finon, D., 2004, « Prospective énergétique et modélisation de long terme: Les voies de progression méthodologique », *Revue de l'énergie*, 553:5-20
- [85] Finon, D., P. Menanteau, 2008, "The static and dynamic efficiency of instruments of promotion of renewable", *Energy Studies Review*, 12(1), Article 3
- [86] Fischer, C., 2005, "On the importance of the supply side in demand-side management", *Energy Economics*, 27:165-180
- [87] Fischer, C., R.G. Newell, 2008, "Environmental and technology policies for climate mitigation", *Journal of Environmental Economics and Management*, 55(2):142-162
- [88] Fischer, C., 2008, "Feedback on household electricity consumption: a tool for saving energy?", *Energy Efficiency*, 1(1):79-104
- [89] Foss, N.J., 2003, "Bounded rationality in the economics of organization: "Much cited and little used"", *Journal of Economic Psychology*, 24(2):245-264
- [90] Gago, A., X. Labandeira, 2000, "Towards a green tax reform model", *Journal of Environmental Policy and Planning*, 2:25-37
- [91] Gately, D., H.G. Huntington, 2002, "The asymmetric effects of changes in price and income on energy and oil demand", *The Energy Journal*, 23(1):19-55
- [92] Geller, H., S. Attali, 2005, *The experience with energy efficiency policies and programs in IEA countries: learning from the critics*, IEA, Paris
- [93] Gerlagh, R., O. Kuik, 2007, "Carbon leakage with international technology spillovers", *FEEM Working Paper*, 33.2007
- [94] 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.

- [95] Gillingham, K., R. Newell, K. Palmer, 2006, "Energy Efficiency policies: a retrospective examination", *Annual Review of Environment and Resources*, 31:161-192
- [96] Gillingham, K., Newell, W.A. Pizer, 2008, "Modeling endogenous technological change for climate policy analysis", *Energy Economics*, 30(6): 2734-2753
- [97] Gillingham, K., R. Newell, K. Palmer, 2009, "Energy Efficiency economics and policy", *Annual Review of Resource Economics*, 1:597-619
- [98] Giraudet, L.-G., 2007, *Comment comprendre les systèmes de « certificats blancs échangeables » ?*, Mémoire de Master Economie du développement durable, de l'énergie et de l'environnement
- [99] Girault, M., 2008, « Baisse des consommations d'énergies de chauffage dans les logements depuis 2001 », *Notes de synthèse du SESP*, n°170, 29-34
- [100] Glachant, M., 2008, « L'effet du lobbying sur les instruments de la politique environnementale », *Revue d'économie politique*, 118(5):663-682
- [101] Godard, O., 2010, « L'organisation internationale de la lutte contre l'effet de serre. Une revue critique des thèses du rapport de Jean Tirole », *L'Economie politique*, 46(2):82-106
- [102] Goulder, L.H., I.W.H. Parry, R.C. Williams III, D. Burtraw, 1999, "The cost-effectiveness of alternative instruments for environmental protection in a second-best setting", *Journal of Public Economics*, 72(3):329-360
- [103] Goulder, L.H., 2007, "Benefit-cost analysis, individual differences, and third parties", *Research in Law and Economics*, 23:67-86
- [104] Goulder L. H., I.W.H. Parry, 2008, "Instrument choice in environmental policy", *Review of Environmental Economics and Policy*, 2(2):152-174
- [105] Greening, L.A., D. L. Greene, C. Difiglio, 2000, "Energy efficiency and consumption – the rebound effect – a survey", *Energy Policy*, 28(6-7):389-401
- [106] Grösche, P., C. Vance, 2009, "Willingness to Pay for Energy Conservation and Free-Ridership on Subsidization: Evidence from Germany", *The Energy Journal*, 30(2):135-154
- [107] Guivarch, C., 2010, « Evaluer le coût des politiques climatiques – De l'importance des mécanismes de second rang », Thèse de doctorat, Université Paris-Est
- [108] Gustafsson, S.-I., 2000, "Optimisation of insulation measures on existing buildings", *Energy and Buildings*, 33(1):49-55
- [109] Haas, R., H. Auer, P. Biermayr, 1998, "The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating", *Energy and Buildings*, 27(2):109-205
- [110] Haas, R., L. Schipper, 1998, "Residential energy demand in OECD-countries and the role of irreversible efficiency improvements", *Energy Economics*, 20(4): 421-442
- [111] Hahn, R.W., R.N. Stavins, 1992, "Economic incentives for environmental protection: integrating theory and practice", *The American Economic Review*, Papers and Proceedings of the Hundred and Fourth Annual Meeting of the American Economic Association, 82(2):464-468
- [112] Hassett, K.A., G.E. Metcalf, 1993, "Energy conservation investment: Do consumers discount the future correctly?", *Energy Policy*, 21(6):710-716
- [113] Hassett, K.A., G.E. Metcalf, 1995, "Energy tax credits and residential conservation investment: Evidence from panel data", *Journal of Public Economics*, 57(2):201-217

- [114] Hausman, J.A., 1979, "Individual discount rates and the purchase and utilization of energy-using durables", *The Bell Journal of Economics*, 10(1):33-54
- [115] Henry, C., 1974, "Option values in the economics of irreplaceable assets", *The Review of Economic Studies*, 41:89-104
- [116] Hepburn, C., 2006, "Regulation by prices, quantities or both: a review of instrument choice", *Oxford Review of Economic Policy*, 22(2):226-247
- [117] Herring, H., S. Sorrell (eds), 2009, *Energy efficiency and sustainable consumption: the rebound effect*, Palgrave MacMillan Ed.
- [118] Herring, H., 2009, "Sufficiency and the rebound effect", pp. 224-239, in Herring, H., S. Sorrell (eds), *Energy efficiency and sustainable consumption: the rebound effect*, Palgrave MacMillan Ed.
- [119] Hinnells, M., 2008, "Building market transformation: transforming markets from the inside", *BIEE 2008 working paper*
- [120] Hirst, E., M. Brown, 1990, "Closing the efficiency gap: barriers to the efficient use of energy", *Resources, Conservation and Recycling*, 3(4):267-281
- [121] Horowitz, M., 2004, "Electricity intensity in the commercial sector: market and public program effects", *The Energy Journal*, 225(2):115-138
- [122] 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
- [123] Howarth, R.B., B.M. Haddad, B. Paton, 2000, "The economics of energy efficiency: insights from voluntary participation programs", *Energy Policy*, 28(6-7):477-486
- [124] Huntington, H.G., L. Schipper, A.H. Sanstad, 1994, "Editor's introduction", *Energy Policy*, 22(10):795-797
- [125] 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
- [126] INSEE [Institut national de la statistique et des études économiques], 2007, Tableau entrées-sorties 2004 niveau 118 base 2000
- [127] 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
- [128] Jaccard, M., M. Dennis, 2006, "Estimating home energy decision parameters for a hybrid energy-economy policy model", *Environmental Modeling and Assessment*, 11(2):91-100
- [129] Jacobsen, H.K., 1998, "Integrating the bottom-up and top-down approach to energy-economy modelling: the case of Denmark", *Energy Economics*, 20(4):443-461
- [130] Jacobsson, S., A. Bergek, 2004, "Transforming the energy sector: the evolution of technological systems in renewable energy technology", *Industrial and Corporate Change*, 13(5):815-849
- [131] Jacobsson, S., A. Johnson, 2000, "The diffusion of renewable energy technology: an analytical framework and key issues for research", *Energy Policy*, 28(9):625-640
- [132] Jacquot, A., 2007, « La demande potentielle de logements: un chiffrage à l'horizon 2020 », *Notes de synthèse du SESP*, n°165, 41-48

- [133] Jaffe, A.B., R.N. Stavins, 1994, "The energy paradox and the diffusion of conservation technology", *Resource and Energy Economics*, 16(2):91-122
- [134] Jaffe, A.B., R.N. Stavins, 1994, "Energy-efficiency investments and public policy", *The Energy Journal*, 15(2):43-65
- [135] Jaffe, A.B., R.N. Stavins, 1994, "The energy-efficiency gap: What does it mean?", *Energy Policy*, 22(10):804-810
- [136] Jaffe, A.B., R.N. Stavins, 1995, "Dynamic incentives of environmental regulations: the effects of alternative policy instruments on technology diffusion", *Journal of Environmental Economics and Management*, 29(3):S43-S63
- [137] Jaffe, A.B., K. Palmer, 1997, "Environmental regulation and innovation: a panel data study", *The Review of Economics and Statistics*, 79(4):610-619
- [138] Jaffe, A.B., R.G. Newell, R.N. Stavins, 2004, "Economics of energy efficiency", 79-90 in Cleveland, C.J. (ed), *Encyclopedia of Energy, Volume 2*, San Diego and Oxford (UK): Elsevier
- [139] Jaffe, A.B., R.G. Newell, R.N. Stavins, 2005, "A tale of two market failures: Technology and environmental policy", *Ecological Economics*, 54(2-3):164-174
- [140] Jakob, M., R. Madlener, 2004, "Riding down the experience curve for energy-efficient building envelopes: the Swiss case for 1970–2020", *International Journal of Energy Technology and Policy*, 2(1-2):153-178
- [141] Johansen, L., 1965, *Public Economics*, Amsterdam: North Holland
- [142] Joskow, P.L., D.B. Marron, 1992, "What does a negawatt really cost? Evidence from utility conservation programs", *The Energy Journal*, 13(4):41-74
- [143] Joskow, P.L., 1994, "More from the guru of energy efficiency: 'There must be a pony!", *The Electricity Journal*, 7(4):50-61
- [144] Kahneman, D., A. Tversky, 1979, "Prospect theory: An analysis of decision under risk", *Econometrica*, 47(2):263-292
- [145] Kavgic, M., A. Mavrogianni, D. Mumovic, A. Summerfield, Z. Stevanovic, M. Djurovic-Petrovic, 2010, "A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector", *Building and Environment*, 45(7):1683-1697
- [146] Kempton, W., L. Montgomery, 1982, "Folk quantification of energy", *Energy*, 7(10): 817-827
- [147] Keohane, N.O., R.L. Revesz, R.N. Stavins, 1998, "The Choice of Regulatory Instruments in Environmental Policy", *Harvard Environmental Law Review*, 22:313-367
- [148] Khazzoom, J.D., 1980, "Economic implications of mandated efficiency in standards for household appliances", *The Energy Journal*, 1(4):21-40
- [149] Knudson, W.A., 2009, "The Environment, Energy, and the Tinbergen Rule", *Bulletin of Science, Technology and Society*, 29(4):308-312
- [150] Koopmans, C.C., D.W. te Welde, 2001, "Bridging the energy efficiency gap: using bottom-up information in a top-down energy demand model", *Energy Economics*, 23(1):57-75
- [151] Labanca, N., A. Peerels, 2008, "Editorial: Tradable White Certificates – a promising but tricky policy instrument", *Energy Efficiency*, 1(4):233–236
- [152] 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

- [153] Lagandré, E., D. Marchio, P. Rivière, M. Jorio, 2010, « Quels niveaux de performance pour la rénovation énergétique ? Un détour conceptuel pour éclairer les débats », *Revue de l'énergie*, 598:392-397
- [154] Laitner, J.A.S., A.H. Sanstad, 2004, "Learning-by-doing on both the demand and the supply sides: implications for electric utility investments in a Heuristic model", *International Journal of Energy Technology and Policy*, 2(1-2):142-152
- [155] Langniss, O., B. Praetorius, 2006, "How much market do market-based instruments create? An analysis for the case of "white" certificates", *Energy Policy*, 34(2):200–211
- [156] 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
- [157] Lascoumes, P., P. Le Galès, 2005, « L'action publique saisie par ses instruments », pp. 11-44 in Lascoumes, P., P. Le Galès (eds), *Gouverner par les instruments*, Paris: Presses de Sciences Po
- [158] Laughran, D.S., J. Kulick, 2004, "Demand-side management and energy efficiency in the United States", *The Energy Journal*, 25(1):19-43
- [159] 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
- [160] Lees, E., 2005, *Evaluation of the Energy Efficiency Commitment 2002-05*, Report to DEFRA
- [161] Lees, E., 2008, *Evaluation of the Energy Efficiency Commitment 2005-08*, Report to DECC
- [162] Leray, T., B. de la Roncière, 2002, *30 ans de maîtrise de l'énergie*, Association technique énergie environnement, Arcueil
- [163] Leth-Petersen, S., M. Togeby, 2001, "Demand for space heating in apartment blocks: measuring effects of policy measures aiming at reducing energy consumption", *Energy Economics*, 23(4):387-403
- [164] Levine, M., D. Ürge-Vorsatz, K. Blok, L. Geng, D. Harvey, S. Lang, G. Levermore, A. Mongameli Mehlwana, S. Mirasgedis, A. Novikova, J. Rilling, H. Yoshino, 2007: Residential and commercial buildings. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [165] Levinson, A., S. Niemann, 2004, "Energy use by apartment tenants when landlords pay for utilities", *Resource and Energy Economics*, 26(1):51-75
- [166] Linares, P., X. Labandeira, 2010, "Energy efficiency: Economics and policy", *Journal of Economic Surveys*, 24(3):573-592
- [167] Lipsey, R.G., K. Lancaster, 1956, "The general theory of second best", *The Review of Economic Studies*, 24(1):11-32
- [168] List, J.A., 2004, "Neoclassical theory versus prospect theory: Evidence from the marketplace", *Econometrica*, 72(2):615-625
- [169] Loper, J., S. Capanna, R. Sobin, T. Simchak, 2010, *Energy Savings Credits: Are Potential Benefits Being Realized?*, Alliance to save energy
- [170] Lovins, A.B., 1994, "Apples, oranges and horned toads: Is the Joskow & Marron critique of electric efficiency costs valid?", *The Electricity Journal*, 7(4):29-49
- [171] Lovins, A.B., 2004, "Energy Efficiency, Taxonomic Overview", pp. 383-401, in Cleveland, C.J. (ed), *Encyclopedia of Energy, Volume 2*, San Diego and Oxford (UK): Elsevier

- [172] Lutzenhiser, L., 1994, "Innovation and organizational networks Barriers to energy efficiency in the US housing industry", *Energy Policy*, 22(10):867-876
- [173] Mahapatra, K., L. Gustavsson, 2008, "An adopter-centric approach to analyze the diffusion patterns of innovative residential heating systems in Sweden", *Energy Policy*, 36(2):577-590
- [174] Marchal, J., 2008, *Modélisation des performances thermiques du parc de logements*, Rapport de l'ANAH, <http://www.anah.fr/nos-publications/etudes/pdf/rapport_performances_energetiques.pdf>
- [175] Marchand, C., M.-H. Laurent, R. Rezakhanlou, Y. Bamberger, 2008, « Le bâtiment sans énergies fossiles ? », *Futuribles*, n°343, pp.79-100
- [176] 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
- [177] Martin, Y., Y. Carsalade, J.-P. Leteurtris, F. Moisan, 1998, *La maîtrise de l'énergie : rapport d'évaluation*, Paris: La Documentation française
- [178] 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
- [179] MEEDDAT [Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire], 2008, *Le diagnostic de performance énergétique*
- [180] MEEDDM [Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer], 2010, « Jean-Louis BORLOO et Benoist APPARU présentent la Réglementation Thermique « Grenelle Environnement 2012 ». Une avancée majeure du Grenelle Environnement, sans équivalent en Europe : la généralisation des Bâtiments Basse Consommation (BBC), un saut énergétique plus important que celui réalisé ces 30 dernières années », Dossier de Presse
- [181] MEEDDM [Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer], 2010, *La fiscalité environnementale prend son essor*
- [182] Metcalf, G.E., K.A. Hassett, 1999, "Measuring the Energy Savings from Home Improvement Investments: Evidence from Monthly Billing Data", *The Review of Economics and Statistics*, 81(3):516-528
- [183] Meyers, S., J.E. McMahon, M. McNeil, X. Liu, 2003, "Impacts of US federal energy efficiency standards for residential appliances", *Energy*, 28(8):755-767
- [184] McGilligan, C., M. Sunikka-Blank, S. Natarajan, 2010, "Subsidy as an agent to enhance the effectiveness of the energy performance certificate", *Energy Policy*, 38(3):1272-1287
- [185] McInerney, E.J., V. Anderson, 1997, "Appliance manufacturers' perspective on energy standards", *Energy and Buildings*, 26(1):17-21
- [186] McKinsey & Company, 2009, *Pathways to a Low-Carbon Economy, Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve*
- [187] Milliman, S.R, R. Prince, 1989, "Firm incentives to promote technological change in pollution control", *Journal of Environmental Economics and Management*, 17(3):247-265
- [188] Moezzi, M., M. Iyer, L. Lutzenhiser, J. Woods, 2009, *Behavioral assumptions in energy efficiency potential studies*, Report prepared for CIEE Behavior and Energy Program, Oakland, California
- [189] Moisan, F., 2004, « Les certificats blancs : un nouvel instrument de marché pour la maîtrise de l'énergie », *Revue de l'énergie*, 553:21-28

- [190] Monjon, S., 2006, "Interactions between tradable white certificates and tax credits—the French case". EuroWhiteCert Project, Work Package 5, Annex 7 Report.
- [191] Mundaca, L., 2007, "Transaction costs of Tradable White Certificate schemes: The Energy Efficiency Commitment as a case study", *Energy Policy*, 35(8):4340-4354
- [192] Mundaca, L., 2008, "Markets for energy efficiency: Exploring the implications of an EU-wide 'Tradable White Certificate' scheme", *Energy Economics*, 30(6):3016-3043
- [193] Mundaca, L., L. Neij, N. Labanca, B. Duplessis, L. Pagliano, 2008, "Market behaviour and the to-trade-or-not-to-trade dilemma in 'tradable white certificate' schemes", *Energy Efficiency*, 1(4):323–347
- [194] Mundaca, L., L. Neij, 2009, "A multi-criteria evaluation framework for tradable white certificate schemes", *Energy Policy*, 37(11): 4457-4573
- [195] Murtishaw, S., J. Sathaye, 2006, "Quantifying the effect of the principal-agent problem on US residential use", *Working paper LBNL-59773*, Lawrence Berkeley National Laboratory
- [196] Nadel, S., H. Geller, 1996, "Utility DSM : What have we learned ? Where are we going?", *Energy Policy*, 24(4):289-302
- [197] Nadel, S., 2002, "Appliance and equipment efficiency standards", *Annual Review of Energy and Environment*, 27:159-192
- [198] Nelson, R.N., S.G. Winter, 2002, "Evolutionary theorizing in economics", *The Journal of Economic Perspectives*, 16(2):23-46
- [199] Nesbakken, R., 2002, "Energy consumption for space heating: A discrete-continuous Approach", *The Scandinavian Journal of Economics*, 103(1):165-184
- [200] Newell, R.G., A.B. Jaffe, R.N. Stavins, 1999, "The induced innovation hypothesis and energy-saving technological change", *The Quarterly Journal of Economics*, 114(3):941-975
- [201] Newell, R.G., R.N. Stavins, 2003, "Cost Heterogeneity and the Potential Savings from Market-Based Policies", *Journal of Regulatory Economics*, 23(1):43-59
- [202] OCDE [Organisation de coopération et de développement économiques], 2007, *Instrument Mixes for Environmental Policy*, Paris
- [203] OFGEM [U.K. Office and Gas and Electricity Markets], 2005, *A review of Energy Efficiency Commitment 2002-2005, A report for the Secretary of State for Environment, Food and Rural Affairs*
- [204] OFGEM [U.K. Office and Gas and Electricity Markets], 2007, *A review of the second year of the Energy Efficiency Commitment 2005-2008*
- [205] OFGEM [U.K. Office and Gas and Electricity Markets], 2008, *EEC update*, 23, February
- [206] Oikonomou, V., M. Rietbergen, M. Patel, 2007, "An ex-ante evaluation of a White Certificates scheme in The Netherlands: A case study for the household sector", *Energy Policy*, 35(1):1147–1163
- [207] Oikonomou, V., C. Jepma, F. Becchis, D. Russolillo, 2008, "White Certificates for energy efficiency improvement with energy taxes: A theoretical economic model", *Energy Economics*, 30(6):3044–3062
- [208] Oikonomou, V., M. Di Giacomo, D. Russolillo, F. Becchis, 2009, "White certificates in an oligopoly market: closer to reality?", *Proceedings of the ECEEE summer study*, 1071-1080
- [209] Oikonomou, V., F. Becchis, L. Steg, D. Russolillo, 2009, "Energy saving and energy efficiency concepts for policy making", *Energy Policy*, 37(11):4787-4796
- [210] OPEN [Observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement], 2009, *Rapport final*

- [211] Ostertag, K., 2003, *No-regret potentials in energy conservation : An analysis of their relevance, size and determinants*, Heidelberg: Physica
- [212] Palmer, K., W.E. Oates, P.R. Portney, 1995, "Tightening environmental standards: The benefit-cost or the no-cost Paradigm?", *The Journal of Economic Perspectives*, 9(4):119-132
- [213] Parag, Y., S. Darby, 2009, "Consumer-supplier-government triangular relations: Rethinking the UK policy path for carbon emissions reduction from the UK residential sector", *Energy Policy*, 37(10):3984-3992
- [214] Pavan, M., 2008, "Tradable energy efficiency certificates: the Italian experience", *Energy Efficiency*, 1(4):257-266
- [215] Pavan, M., 2011, *Distributor obligations and white certificates in Italy: developments and future plans*, Presentation at the European Workshop on experiences and policies on energy saving obligations and white certificates, Varese, January 27th
- [216] 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 »
- [217] Perrels, A., 2008, "Market imperfections and economic efficiency of white certificate systems", *Energy Efficiency*, 1(4):349-371
- [218] Phillips, C., 2011, *The Carbon Emission Reduction Target and the Community Energy Savings target: latest results and developments with supplier obligations in the UK*, Presentation at the European Workshop on experiences and policies on energy saving obligations and white certificates, Varese, January 27th
- [219] Poiroux, R., 2008, Interview in Modèles d'organisation des services en réseaux et développement (urbain) durable, *Flux*, n°74, pp.77-82
- [220] Porter, M.E., 1991, "America's green strategy", *Scientific American*, 264(4):96
- [221] Porter, M.E., C. van der Linde, 1995, "Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship", *The Journal of Economic Perspectives*, 9(4):97-118
- [222] 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
- [223] Purchas, G., 2009, *UK energy supplier obligation*, Presentation at the European Commission Workshop on tradable certificates for energy savings (white certificates) and supplier obligation, Brussels
- [224] 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, Paris: La Documentation française
- [225] Quirion, P., 2000, « Enjeux économiques des règles internationales et de la conception des systèmes nationaux » in Oïka, *Les enjeux économiques et institutionnels du changement climatique. Négociations internationales : les déterminants des accords et de leur mise en œuvre*, Rapport final pour le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement
- [226] 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
- [227] Quirion, P., 2006, "Distributional impacts of energy-efficiency certificates vs. taxes and standards", *FEEM working paper*, 18.2006

- [228] Quirion, P., 2007, « Comment faut-il distribuer les quotas échangeables de gaz à effet de serre ? », *Revue française d'économie*, 13(2):129-164
- [229] Radov, D., P. Klewnas, S. Sorrell, 2006, *Energy Efficiency and Trading. Part I: Options for Increased Trading in the Energy Efficiency Commitment*, Report to Defra
- [230] Rehdanz, K., 2007, "Determinants of residential space heating expenditures in Germany", *Energy Economics*, 29(2):167-182
- [231] Rivers, N., M. Jaccard, 2005, "Combining top-down and bottom-up approaches to energy-economy modeling using discrete choice methods", *The Energy Journal*, 26(1):83-106
- [232] Russolillo D., 2008, *The White Certificates system in Italy: results and perspectives*, Presentation at the Energy Delta Convention 2008, Groningen
- [233] Salomon, T., C. Couturier, M. Jedliczka, T. Letz, B. Lebot, 2005, "A negawatt scenario for 2005–2050", *Proceedings of the ECEEE Summer Study*
- [234] Sanders, C., M. Phillipson, 2006, *Review of differences between measured and theoretical energy savings for insulation measures*, Report for the Energy Saving Trust, Centre for Research on Indoor Climate and Health, Glasgow Caledonian University
- [235] Sanstad, A.H., R.B. Howarth, 1994, "'Normal' markets, market imperfections and energy efficiency", *Energy Policy*, 22(10):811-818
- [236] Sanstad, A.H., C. Blumstein, S.E. Stoff, 1995, "How high are option values in energy-efficiency investments?", *Energy Policy*, 23(9):739-743
- [237] Sartori, I., B.J. Wachenfeldt, A.G. Hestnes, 2009, "Energy demand in the Norwegian building stock: Scenarios on potential reduction", *Energy Policy*, 37(5):1614–1627
- [238] Sassi, O., 2008, « L'impact du changement technique endogène sur les politiques climatiques », Thèse de doctorat, Université Paris-Est
- [239] 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
- [240] Scott, S., 1997, "Household energy efficiency in Ireland: A replication study of ownership of energy saving items", *Energy Economics*, 19(2):187-208
- [241] SGFGAS [Société de gestion du fonds de garantie de l'accès social à la propriété], 2010, *Bilan statistique des éco-prêts à taux zéro émis en 2009*
- [242] Shogren, J.F., L.O. Taylor, 2008, "On behavioral-environmental economics", *Review of Environmental Economics and Policy*, 2(1):26-44
- [243] Shove, E., 1998, "Gaps, barriers and conceptual chasm: theories of technology transfer and energy in buildings", *Energy Policy*, 26(15):1105-1112
- [244] Sijm, J., K. Neuhoff, Y. Chen, 2006, "CO₂ cost pass-through and windfall profits in the power sector", *Climate Policy*, 6: 49–72
- [245] Siller, T., M. Kost, D. Imboden, 2007, "Long-term energy savings and greenhouse gas emissions reductions in the Swiss residential sector", *Energy Policy*, 35(1):529-539
- [246] Simon, H.A., 1959, "Theories of decision-making in economics and behavioural science", *American Economic Review*, 49(3):253-283

- [247] Sorrell S., E. O'Malley, J. Schleich, S. Scott, 2004, *The economics of energy efficiency: barriers to cost-effective investment*, Cheltenham: Edward Elgar
- [248] Sorrell, S., 2004, "Understanding barriers to energy efficiency", pp.25-93 in Sorrell S., E. O'Malley, J. Schleich, S. Scott (eds), *The economics of energy efficiency: barriers to cost-effective investment*, Cheltenham: Edward Elgar
- [249] Sorrell, S., J. Dimitropoulos, 2008, "The rebound effect: microeconomic definitions, limitations and extensions", *Ecological Economics*, 65(3):636-649
- [250] Sorrell, S., D. Harrison, D. Radov, P. Klevnas, A. Foss, 2009, "White certificate schemes: Economic analysis and interactions with the EU ETS", *Energy Policy*, 37(1):29-42
- [251] Sorrell, S., J. Dimitropoulos, M. Sommerville, 2009, "Empirical estimates of the direct rebound effect: A review", *Energy Policy*, 37(4):1356-1371
- [252] 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
- [253] Sutherland, R.J., 1996, "The economics of energy conservation policy", *Energy Policy*, 24(4):361-370
- [254] Sykes, R., 2005, *Ten Years of Energy Efficiency in the UK Residential Market*, Conférence "Les certificats d'économies d'énergie: un nouvel instrument pour l'efficacité énergétique", Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, ADEME, Paris, 8 Novembre
- [255] Taylor, M.R., E.S. Rubin, D.A. Hounshell, 2005, "Regulation as the mother of innovation: the case of SO2 control", *Law and Policy*, 27(2):348-378
- [256] 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
- [257] Tessier, L., 2008, « La structure et les métiers de la construction guident son innovation », Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, *SESP en bref*, n°24
- [258] Thomas, S., 2009, "Measuring and reporting energy savings for the European Services Directive – how it can be done", *Results and recommendations from the EMEEES project*, Wuppertal Institute on behalf of the EMEEES Consortium, Wuppertal
- [259] Tinbergen, J., 1952, *On the theory of economic policy*, Amsterdam: North Holland.
- [260] Tirole, J., 2009, *Politique climatique, une nouvelle architecture internationale*, Rapport au Conseil d'Analyse Economique, Paris: La documentation française
- [261] TNS Sofres, 2006, *Maîtrise de l'énergie, 2e phase, Attitudes et comportements des particuliers*, Note de synthèse
- [262] Train, K., 1985, "Discount rates in consumer's energy-related decisions: a review of the literature", *Energy*, 10(12):1243-1253
- [263] Traisnel, J.-P., 2001, *Habitat et développement durable. Bilan rétrospectif et prospectif*, Les cahiers du CLIP, n°13
- [264] Traisnel, J.-P., D. Joliton, M.-H. Laurent, S. Caffiaux, A. Mazzenga, 2010, *Habitat Facteur 4. Etude d'une réduction des émissions de CO₂ liées au confort thermique dans l'habitat à l'horizon 2050*, Les cahiers du CLIP, n°20
- [265] Ürge-Vorsatz, D., A. Novikova, 2008, "Potentials and costs of carbon dioxide mitigation in the world's buildings", *Energy Policy*, 36(2):642-661

- [266] Ürge-Vorsatz, D., A. Novikova, S. Köppel, B. Boza-Kiss, 2009, "Bottom-up assessment of potentials and costs of CO₂ emission mitigation in the buildings sector: insights into the missing elements", *Energy Efficiency*, 2(4):293-316
- [267] van den Bergh, J.C.J.M., 2008, "Environmental regulation of households: An empirical review of economic and psychological factors", *Ecological Economics*, 66(4):559-574
- [268] Varian, H.R., 2003, *Introduction à la microéconomie*, Bruxelles: De Boeck
- [269] Vine, E.L., M.G. Kushler, 1995, "The reliability of DSM impact estimates", *Energy*, 20(12):1171-1179
- [270] Vine, E., J. Hamrin, N. Eyre, D. Crossley, M. Maloney, G. Watt, 2003, "Public policy analysis of energy efficiency and load management in changing electricity businesses", *Energy Policy*, 31(5):405-430
- [271] Vine, E., J. Hamrin, 2008, "Energy savings certificates: A market-based tool for reducing greenhouse gas emissions", *Energy Policy*, 36(1):467-476
- [272] Waide, P., B. Buchner, 2008, "Utility energy efficiency schemes: savings obligations and trading", *Energy Efficiency*, 1(4):349-371
- [273] Weiss, M.M. Junginger, M.K. Patel, K. Blok, 2010, "A review of experience curve analyses for energy demand technologies", *Technological Forecasting & Social Change*, 77(3):411-428
- [274] Wilhite, H., H. Nakagami, T. Masuda, Y. Yamaga, H. Haneda, 1996, "A cross-cultural analysis of household energy use behaviour in Japan and Norway", *Energy Policy*, 24(9):795-803
- [275] Williamson, O.E., 1981, "The economics of organization: The transaction cost approach", *The American Journal of Sociology*, 87(3):548-577
- [276] Wilson, C., H. Dowlatabadi, 2007, "Models of decision making and residential energy use", *Annual Review of Environment and Resources*, 32:169-203
- [277] Wing, I.S., 2006, "Representing induced technological change in models for climate policy analysis", *Energy Economics*, 28(5-6):539-562
- [278] Wirl, F., 1989, "Analytics of demand-side conservation programs", *Energy Systems and Policy*, 13:285-300
- [279] Wirl, F., 1997, *The economics of conservation programs*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers
- [280] Wirl, F., 2000, "Lessons from utility conservation programs", *The Energy Journal*, 21(1):87-108
- [281] Zélem, M.-C., 2010, *Politique de maîtrise de la demande d'énergie et résistances au changement : Une approche socio-anthropologique*, Paris: L'Harmattan