



HAL
open science

Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel français à long terme - Amélioration du réalisme comportemental et scénarios volontaristes

Benoit Allibe

► **To cite this version:**

Benoit Allibe. Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel français à long terme - Amélioration du réalisme comportemental et scénarios volontaristes. Economies et finances. Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS), 2012. Français. NNT : 9675768 . tel-00872403

HAL Id: tel-00872403

<https://theses.hal.science/tel-00872403v1>

Submitted on 16 Oct 2013

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

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



Ecole doctorale n°286 : Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales
CIRED

Thèse

pour obtenir le grade de docteur délivré par

L'École des Hautes Etudes en Sciences Sociales

Spécialité « Economie de l'environnement et des ressources naturelles »

présentée et soutenue publiquement par

Benoit Allibe

le 26 novembre 2012

**Modélisation des consommations d'énergie
du secteur résidentiel français à long terme**

Amélioration du réalisme comportemental et scénarios volontaristes

Directeur de thèse : Jean-Charles HOURCADE

Jury

Mark JACCARD, Professeur, Simon Fraser University.....Président
Patrick CRIQUI, Directeur de recherche CNRS, LEPII.....Rapporteur
Jérôme ADNOT, Professeur, Mines Paristech.....Rapporteur
Gaël CALLONNEC, Service Economie et Prospective, ADEME.....Examineur
Marie-Hélène LAURENT, Chercheur, groupe Résidentiel, EDF R&D.....Examineur
Jean-Charles HOURCADE, Directeur de recherche CNRS, Directeur d'études EHESS.....Directeur de thèse

A la mémoire de Jean Chopin

Résumé

Cette thèse a pour objectif d'intégrer une représentation économique des comportements des ménages dans un cadre de modélisation technologique de la dynamique des consommations énergétiques du secteur résidentiel français, et d'en analyser les implications dans le cadre d'exercices prospectifs de long terme (2030-2050).

Les travaux réalisés ont permis de mettre en relief des écarts importants entre les consommations réelles de chauffage résidentiel et l'estimation qui en est faite par des modèles dits d'ingénieur (thermique du bâtiment). Ces écarts sont en grande partie dus à l'élasticité de la demande de confort thermique au prix de celui-ci, dont la modélisation permet d'intégrer à la fois les concepts d'élasticité au prix des énergies et d'effet rebond (augmentation du niveau de service après une amélioration de la performance énergétique de l'équipement fournissant celui-ci). Concernant le chauffage individuel, les conséquences de cette adaptation, couplée à certaines malfaçons techniques, sont à la fois une réduction importante du gisement technique d'économie d'énergie et le constat que le gisement d'économies d'énergie associé à la diffusion de pratiques quotidiennes de sobriété énergétique est déjà largement exploité. Ceci implique que l'atteinte d'une division par 4 des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'horizon 2050 dans le secteur résidentiel français ne peut être réalisée uniquement au travers de la diffusion de technologies efficaces et de gestes de sobriété énergétique mais nécessite aussi une baisse significative du contenu carbone moyen du chauffage par une forte pénétration du bois énergie.

Le deuxième volet abordé est celui de la représentation de l'hétérogénéité des variables manipulées dans un modèle technico-économique, et de ses implications à la fois sur l'estimation d'une consommation énergétique à un instant donné et sur sa dynamique. Il apparaît que la présence d'hétérogénéités biaise l'estimation de la consommation énergétique des usages thermiques sans que la magnitude totale de ce biais puisse être estimée à partir des données disponibles. D'autre part, l'analyse des variables utilisées pour représenter le marché de la rénovation thermique des logements dans les modèles technico-économiques montre que plusieurs sources d'hétérogénéité de ce marché sont généralement omises. Les conséquences de l'ajout d'hétérogénéité dans ces modèles sont une moindre réduction des consommations énergétiques et émissions de GES dans un contexte favorable à la pénétration de technologies énergétiquement efficaces et peu émettrices de GES.

Enfin, le modèle de dynamique des consommations énergétiques du parc résidentiel français développé au cours de la thèse (BEUS) a été appliqué à différents exercices prospectifs. Ces exercices ont été choisis pour illustrer l'impact sur les résultats de simulation d'une représentation plus réaliste des comportements des ménages. Les deux scénarios choisis sont de natures sensiblement différentes, le premier consistant en une diffusion des meilleures technologies et le deuxième en l'application d'une forte taxe carbone accompagnée de mesures d'aides à l'investissement dans les technologies énergétiquement efficaces. Les résultats des simulations révèlent l'importance d'une modélisation fine des comportements d'usage et d'achat des technologies pour évaluer des politiques énergétiques aussi bien réglementaires (e.g. réglementations) qu'économiques (e.g. taxe carbone, crédit d'impôts)

Abstract

This thesis aims to integrate components of an economic model of the behaviors of households in a technological model of French residential sector energy consumption dynamics and to analyze the consequences of this integration on the results of long-term residential energy consumption simulations (2030-2050).

The results of this work highlight significant differences between the actual household space heating energy consumptions and those estimated by engineering models. These differences are largely due to the elasticity of thermal comfort demand to thermal comfort price. Our improved model makes it possible to conjointly integrate the concepts of price elasticity and rebound effect (the increase in energy service level following an improvement in energy performance of the equipment providing the service) in a daily behavior model. Regarding space heating consumption, the consequences of this behavioral adaptation - combined with some technical defects - are a significant reduction of the technical and behavioral energy saving potentials (while effective daily use of energy is generally lower than predicted by engineering models) at a national level. This implies that mid and long-term national energy policy targets (a 38% drop in primary energy consumption by 2020 and a reduction in greenhouse gas emissions by a factor of 4 by 2050 compared to the 1990 level) will be harder to reach than previously expected for the residential sector. These results also imply that a strong reduction in carbon emissions cannot be achieved solely through the diffusion of efficient technologies and energy conservation behavior but also requires to significantly lowering the average carbon content of residential space heating energy through the generalized use of wood energy.

The second issue addressed in this thesis is the influence of the resolution of a techno-economic model (i.e. its ability to represent the various values that a variable can have within the modeled system) on its results. Simulation results show that the modeling of the distributions instead of the average values of variables changes both the estimations of total energy consumption of dwelling stock and the dynamics of this consumption. The comparison of refurbishment market modeling in engineering and econometric models shows that a part of the heterogeneity of the market is not accounted for in engineering models. If the economic context encourages the diffusion of energy efficient or low-carbon technologies (for instance in the case of a significant carbon tax) then adding market heterogeneity in engineering models implies more pessimistic simulation results regarding energy consumption reduction and GHG abatements.

A model of residential energy consumption dynamics (called "BEUS", for Buildings Energy Use Simulation) has been developed and applied to two main scenarios with a range of variants. The first scenario consists in the diffusion of best available technologies (BAT) and the second one consists in the application of a significant carbon tax. The variants of each scenario have been chosen to highlight the impact of a more realistic modeling of households' behaviours on simulation results. Simulations results reveal that a lack of realism in the households' behaviours modeling may conduct to misleading ex ante energy policy (regulations and economic measures) evaluations by overestimating both the magnitude of future energy consumption reduction and the speed of energy efficient technologies diffusion in the dwelling stock.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Jérôme Adnot et Patrick Criqui d'avoir accepté d'être les rapporteurs de mon travail de thèse, Gaël Callonnec pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux en acceptant d'être membre du jury, et Mark Jaccard pour avoir répondu positivement à la proposition de présider ce jury.

Je remercie naturellement Jean-Charles Hourcade, mon directeur de thèse, pour m'avoir encouragé et conforté dans la voie de recherche choisie, entre les sciences de l'ingénieur et les sciences économiques. Je remercie aussi chaleureusement Marie-Hélène Laurent, mon encadrante au sein d'EDF R&D, pour les échanges aussi nombreux qu'enrichissants que nous avons eus, ainsi que pour son soutien quotidien durant les travaux effectués.

Mes années de thèse n'auraient pas été aussi plaisantes sans les équipes parmi lesquelles j'ai eu la chance d'évoluer au sein d'EDF R&D et du CIREC. C'est pourquoi je remercie l'ensemble des personnes que j'y ai côtoyées, en particulier Guillaume Binet, Diane de Cacqueray, Emmanuelle Cayre, Fabrice Decellas, Aurélie Estève, Charlotte Fourcroy, Elie Ghanassia, Arnaud Grandjean, Pierre Lestienne, Dominique Osso et Maxime Raynaud à EDF R&D, ainsi que Paolo Avner, Ruben Bibas, Emmanuel Combet, Céline Guivarch, Elsa Mosseri, Philippe Quirion, Camille Thubin, Adrien Vogt-Schilb et Vincent Viguié au CIREC. J'ai ainsi pu continuer d'apprendre à penser et à rire à leur contact. Une pensée spéciale va aux doctorants, à qui je souhaite bon courage.

Je tiens à remercier particulièrement Jean-Michel Cayla et Gaëtan Giraudet, dont les thèses à EDF R&D et au CIREC ont précédé la mienne d'un an, sur des sujets proches. Les collaborations que nous avons eues ont été très enrichissantes et je leur dois beaucoup.

Le travail réalisé a été enrichi par plusieurs collaborations à l'extérieur du CIREC et d'EDF R&D. Je tiens ainsi à remercier François Ménard et Joël Maurice, organisateurs du groupe socio-économie du PREBAT dans lequel j'ai pu échanger avec de nombreux chercheurs. Les échanges avec Régine Trotignon ainsi qu'avec les membres du bureau d'étude BIIS m'ont ainsi permis de disposer de données précieuses. Par ailleurs, François Lecouvey (CEREN) m'a lui aussi donné un accès privilégié aux données détaillées du CEREN et m'en a expliqué les subtilités à de nombreuses reprises.

Je remercie mes parents pour ce qu'ils m'ont apporté, ainsi que le reste de ma famille et mes amis pour leurs bonnes ondes. Enfin, je remercie Éléonore pour sa présence et son soutien inestimables.

Sommaire

Résumé.....	5
Abstract	6
Remerciements	7
Sommaire	9
Liste des figures.....	14
Liste de tableaux.....	18
Liste des abréviations.....	19
Introduction générale.....	20
Partie I	26
Contexte énergétique.....	26
et cadres de modélisation	26
Chapitre 1 : Les consommations d'énergie dans le secteur résidentiel en France : définitions, unités d'analyse et histoire récente.....	28
Introduction	28
1. Les usages de l'énergie dans le secteur résidentiel français.....	28
1.1. Définition des périmètres d'étude et des unités de mesure	28
1.2. Consommations énergétiques et émissions de GES associées	33
2. Histoire récente des consommations d'énergie du secteur résidentiel français.....	42
2.1. Données disponibles et classification des déterminants	42
2.2. Observations passées : consommations et émissions, déterminants directs et indirects.....	45
3. Premiers enseignements pour une modélisation prospective technico-économique à l'horizon 2030-2050	68
3.1. Quels usages représenter en priorité.....	68
3.2. Quels éléments de dynamique du parc bâti prendre en compte ?.....	72
3.3. Quels mécanismes représenter liant déterminants directs et indirects?	73
Conclusion.....	73
Bibliographie.....	74

Chapitre 2 : Modélisation des consommations énergétiques du secteur résidentiel et de leur dynamique.....	78
Résumé.....	78
Introduction	78
1. Modèles existants de la consommation d'énergie, de sa dynamique et de celle de ses déterminants.....	80
1.1. Tour d'horizon des types de modèles existants.....	80
1.2. Usage et achat des technologies par les ménages dans les modèles de demande : éléments de modélisation et formalisation du paradoxe de l'efficacité énergétique	87
1.3. Taxonomie synthétique adaptée à la modélisation de la consommation d'énergie du secteur résidentiel et sa dynamique	100
2. Application des modèles à l'étude prospective de la demande d'énergie du secteur résidentiel à l'échelle nationale	104
2.1. Des caractéristiques des exercices prospectifs au choix du modèle.....	104
2.2. Exercices français à horizon temporel de 20 à 40 ans concernant le secteur résidentiel	107
3. Voies d'amélioration pour la modélisation dynamique de la demande énergétique résidentielle	119
3.1. De la capacité d'un modèle à être interprétable par des acteurs divers.....	119
3.2. Flexibilité du formalisme sous lequel le secteur résidentiel est représenté.....	121
3.3. Flexibilité dans la nature des scénarios pouvant être produits	122
3.4. Amélioration de l'intégration des comportements des ménages dans les modèles technologiquement explicites	123
Conclusion.....	126
Bibliographie	127
Partie II	138
Améliorations de l'estimation des consommations d'énergie et de leur dynamique dans un modèle technologiquement explicite, entre ingénieurs et économistes	138
Chapitre 1	140
Chauffage résidentiel : un gap entre consommations théoriques et consommations observées	140
Résumé.....	140
Introduction	141
1. Modèles prospectifs pour l'évaluation et l'orientation des politiques énergétiques relatives au chauffage résidentiel	143

1.1.	Quels modèles prospectifs sont concernés par le réalisme des modèles thermiques ?	143
1.2.	De quoi se prive-t-on en se limitant à une représentation technique à comportement normé ?	144
2.	Méthodes et données	146
2.1.	Calcul des consommations de chauffage à partir de modèles thermiques normés	146
2.2.	Données de consommations et indicateur utilisé pour la comparaison avec les calculs théoriques	149
3.	Résultats	151
3.1.	Observations par segment du parc résidentiel	151
3.2.	Analyse de l'échantillon 2009	155
3.3.	Discussion sur la forme fonctionnelle d'une modélisation du facteur d'intensité/correctif	162
4.	Impact du facteur correctif sur l'estimation des gisements d'économie d'énergie par calcul thermique normé	165
4.1.	Décomposition de l'impact énergétique de l'intégration du facteur correctif sur l'estimation des gains énergétiques liés à la rénovation thermique de logements	165
4.2.	Application numérique à l'estimation d'un gisement technique d'économie d'énergie de chauffage à l'échelle nationale	166
4.3.	Application au calcul de rentabilité des investissements en efficacité énergétique	169
	Conclusion	170
	Bibliographie	171

Chapitre 2 : Impact de l'hétérogénéité des variables manipulées sur l'estimation de la consommation d'énergie et de sa dynamique	176
--	-----

Résumé	176
Introduction	177
1. Analyse statique : influence de l'hétérogénéité des inputs des modèles <i>bottom-up</i> de consommation énergétique	178
1.1. Sources d'hétérogénéité des consommations d'énergie dans le secteur résidentiel	178
1.2. Biais introduit par l'utilisation de valeurs moyennes pour décrire les segments de consommation	183
1.3. Conséquences sur le choix de l'échelle d'observation adaptée à l'estimation de la consommation d'un groupe de logements	185
2. Analyse dynamique : influence de l'hétérogénéité du marché sur la diffusion des technologies	188
2.1. Modélisation des choix technologiques des ménages	189
2.2. Hétérogénéité du prix des équipements (à performance donnée) : étude du cas particulier du chauffage résidentiel	194
Conclusion	202

Bibliographie	203
Partie III	208
Modèles développés et applications prospectives	208
Chapitre 1 : Modèles développés.....	210
Introduction	210
1. Analyse rétrospective des comportements de chauffage par segment du parc résidentiel ..	211
1.1. Objectifs.....	211
1.2. Reconstitution des consommations théoriques de chauffage.....	212
1.3. Sources de données.....	213
1.4. Modèle thermique utilisé.....	215
1.5. Etude de sensibilité au taux de respect de la réglementation thermique.....	215
2. BEUS (Buildings Energy Use Simulation) : un modèle de simulation prospective sur échantillon riche	218
2.1. Objectifs et architecture.....	218
2.2. Modélisation du système {ménages-environnement} et de sa dynamique	221
2.3. Instruments exploratoires d'efficacité énergétique modélisés	239
2.4. Calibration	240
Conclusion : éléments non traités et perspectives d'amélioration	244
Bibliographie	246
Chapitre 2 : Application du modèle développé (BEUS) à quelques exercices prospectifs.....	251
Résumé.....	251
Avertissement	252
Introduction	252
1. Hypothèses communes aux simulations	253
2. Application de BEUS à la simulation de scénarios prospectifs volontaristes	255
2.1. Scénario volontariste sur les déterminants directs des consommations de chauffage..	255
2.2. Scénario volontariste d'instruments économiques : effet de l'intégration des hétérogénéités du marché de la rénovation	259
Conclusion.....	263
Bibliographie	263

Conclusion générale et perspectives.....	266
Les enseignements de la modélisation des comportements quotidiens de chauffage.....	266
Les enseignements de l'étude des hétérogénéités au sein des variables manipulées.....	267
Les enseignements des exercices prospectifs.....	269
Limites du travail réalisé et perspectives de travaux futurs	269
Annexes	272
Annexe I : Preuve de l'Equation 21	273
Annexe II : Communications écrites au cours de cette thèse.....	275

Liste des figures

Figure 1 : Modèles récemment développés de consommation énergétique du secteur résidentiel et positionnement de l'objectif de modélisation.	22
Figure 2 : Bilan énergétique de la France, étapes de transformation des ressources énergétiques à l'énergie utile [Radanne, 2000]	31
Figures 3a et 3b: Consommation d'énergie finale en 2010 (Figure 3a, à gauche) et émissions de CO ₂ en 2009 (Figure 3b, à droite) par secteur de demande en France (2010) [SOeS, 2011].	33
Figure 4 : Consommation d'énergie primaire par secteur de demande en France en 2010 [SOeS, 2011]. Consommation d'énergie totale : 3091 TWh.....	33
Figures 5a et 5b : Consommation d'énergie primaire par secteur de demande en France en 2010 (5a, à gauche) et émissions de CO ₂ par secteur de demande en France en 2009 (5b, à droite), avec le secteur « transformation d'énergie » ventilé dans les autres secteurs de demande (calculs personnels).....	34
Figure 6 : Mix énergétique français en énergie primaire, à climat normal [SOeS, 2011] (à gauche) et mix électrique de la France comparé aux mix électriques des autres pays d'Europe [Eurostat, 2008] (à droite).....	35
Figures 7a et 7b : Mix énergétique du secteur résidentiel français en 2008 [CEREN, 2011] (7a, à gauche) et européen en 2009 [ODYSSEE, 2012] (7b, à droite)	36
Figure 8 : Comparaison du mix énergétique du secteur résidentiel de pays européens en 2009, par proportion décroissante de la consommation directe d'énergie finale réalisée sans combustibles fossiles [ODYSSEE, 2012] (illustration personnelle)	36
Figures 9a et 9b : Consommation d'énergie finale (9a, à gauche) et d'énergie primaire (9b) par usage dans le secteur résidentiel français en 2008 [CEREN, 2011].	38
Figure 10 : Emissions de CO ₂ par usage dans le secteur résidentiel français en 2009 [CEREN, 2011]. ..	39
Figure 11 : Contenu carbone de l'électricité par usage résidentiel en France, en gramme de CO ₂ par kWh [EDF – ADEME, 2005]	39
Figure 12 : Décomposition des consommations nationales d'électricité spécifique [EDF R&D, 2008]	40
Figure 13 : Décomposition par énergie des usages résidentiels principaux, en énergie finale [CEREN, 2007].	40
Figure 14 : Répartition, pour les logements équipés de chauffage individuel, des logements, de la surface habitable, de l'ensemble de l'énergie consommée et de l'énergie de chauffage consommée selon le type de logement et le statut d'occupation. Données EDF R&D à partir de données CEREN.	42
Figure 15 : Déterminants de la demande énergétique du secteur résidentiel (bleu : besoin de service, rouge : consommation d'énergie, vert : déterminants indirects des autres variables).....	44
Figure 16 : Consommation d'énergie finale du secteur résidentiel français par énergie [CEREN, 2011]	45
Figure 17 : Consommation d'énergie finale du secteur résidentiel français par usage depuis 1975, à climat normal, hors chauffage d'appoint [CEREN, 2011]	45
Figure 18 : Emissions de CO ₂ du secteur résidentiel français par usage, à climat normal, hors chauffage d'appoint [CEREN, 2011]	46
Figure 19 : Consommation d'énergie de l'usage chauffage à climat normal [CEREN, 2007].....	47
Figure 20 : Consommation d'énergie de l'usage eau chaude sanitaire (ECS) [CEREN, 2007]	47
Figure 21 : Consommation d'énergie de l'usage cuisson [CEREN, 2007].....	47
Figure 22 : Evolution du nombre de personnes de la population français (en milliers) entre 1975 et 2009 (les estimations postérieures à 2008 sont provisoires) [INSEE, 2012]	48
Figure 23 : Evolution de la consommation d'énergie finale par personne et par usage en France [CEREN, 2011].	48
Figure 24 : Consommation d'énergie finale par personne et par usage, corrigée du climat, comparaison internationale entre les années 1973 et 1998 [Unander et al., 2004]	49

Figures 25a et 25b : Nombre moyen d'occupants par résidence principale (25a, à gauche) et évolution du parc résidentiel de maisons individuelles et appartements (25b, à droite) [INSEE, 2012]	49
Figures 26a et 26b : Evolution du nombre de logements par période de construction (26a, à gauche) [CEREN, 2011], entrées et sorties du parc résidentiel en millions de m ² par an (26b, à droite) [CLIP, 2001].....	50
Figure 27 : Evolution de la surface moyenne des logements par énergie de chauffage et type de logement [CEREN, 2011]	50
Figures 28a et 28b : Evolution des surfaces construites par période de construction (28a, à gauche) et évolution de la surface moyenne par personne (28b, à droite) [CEREN, 2011]	50
Figure 29 : Evolution de la consommation d'énergie finale des usages résidentiels en kWh/m ² [CEREN, 2011].....	51
Figure 30 : Evolution de la rigueur climatique sur la période 1975-2005 [CEREN, 2007b].....	52
Figure 31 : Résidences principales selon l'énergie de chauffage de base [CEREN, 2011].....	53
Figure 32 : Energie de chauffage de base des maisons selon les périodes de construction (« avant 1949 » et « 1982-1989 ») [CEREN, 2007]	53
Figure 33 : Résidences principales selon l'énergie utilisée pour la cuisson (à gauche) et l'eau chaude sanitaire (à droite) [CEREN, 2007].....	54
Figure 34 : Evolution du pourcentage de logements équipés de baignoire ou douche [CAS 2011], réalisée à partir des données des enquêtes « Recensement Général de la Population » et « Logement » de l'INSEE.....	54
Figure 35 : Evolution de l'épaisseur d'isolant utilisé pour l'isolation des murs (estimation à partir d'un échantillon EDF R&D de maisons rurales, non représentatif de la population nationale)	55
Figure 36 : Pénétration dans le marché du Royaume-Uni d'équipements énergétiquement performance [BRE, 2003]	56
Figure 37 : Température habituelle dans les logements français (moyennes triennales) [CEREN, 2008b]	57
Figure 38 : Part des ménages réduisant la température la nuit [CEREN, 2008b]	58
Figure 39 : Part des ménages modifiant l'aération de leur logement en fonction de la température extérieure [CEREN, 2008b].....	58
Figure 40 : Température intérieure calculée à partir des consommations de chauffage observée (en bleu) et température moyennes extérieure en hiver (en rose), Royaume-Uni [BRE, 2008]	58
Figure 41 : Evolution des principaux indicateurs relatifs aux réfrigérateurs en Europe depuis 1975 : nombre d'unités vendues, volume des unités, efficacité, consommation énergétique des unités vendues en un an [Calwell, 2011]	59
Figure 42 : Pénétration dans le marché d'une sélection de technologie depuis 1900 aux États-Unis [Lushetsky, 2008].....	60
Figure 43a et 43b : Evolution du PIB par habitant en France entre 1960 et 2009 [Banque Mondiale, 2011] (43a, à gauche) et évolution de l'indice de Gini en France entre 1970 et 2010 [Berruyer, 2012] (43b, à droite).....	61
Figure 44 : Ratios prix des logements et des loyers sur revenu disponible moyen [CAS, 2011].....	62
Figure 45a et 45b : Evolution du prix du pétrole importé aux Etats-Unis depuis 1968 [EIA, 2012] (45a, à gauche), et évolution comparée du prix du gaz importé en Europe, du Brent et du Brent à 6 mois [IFP, 2006] (45b, à droite).....	62
Figure 46 : Evolution de la production électrique totale et du mix électrique en France depuis 1970 [SOeS, 2011]	63
Figure 47 : Prix aux particuliers des énergies de chauffage, par kWh PCI d'énergie finale, abonnement compris [CEREN, 2011].....	64
Figure 48 : Consommation finale d'électricité par secteur, corrigée du climat [SOeS, 2011]	64
Figure 49 : Contenu carbone de l'électricité (en gCO ₂ /kWh), source : [CEREN, 2011]	65
Figure 50 : Evolution de la contrainte réglementaire concernant les déperditions thermiques des logements, exprimés par le coefficient G, en W/m ³ .°C [CLIP, 2001]	66

Figure 51 : Pyramides des âges en 1975, 2010 et projections 2060 [INSEE 2012]	67
Figure 52 : priorité de représentation des usages dans un modèle prospectif technico-économique des consommations énergétiques du secteur résidentiel français à l’horizon 2050.....	69
Figure 53 - Disciplines et concepts pertinents pour l’étude des relations homme-environnement et homme-technologies liées aux consommations d’énergie dans le secteur résidentiel [Lutzenhiser, 1992].....	79
Figure 54 : Taxonomie des modèles d’estimation de la consommation énergétique par usage du secteur résidentiel [Swan et Ugursal, 2009]	81
Figure 55 : Taxonomie des modèles économie-énergie-environnement [Crassous, 2008]	85
Figure 56 : Représentation simplifiée de la diffusion d’une technologie par sa part de marché cumulée (fonction logistique, en jaune) et le nombre de nouveaux adopteurs (fonction gaussienne, en bleu). [Rogers, 2003]	94
Figure 57 : Les différentes notions de situation optimale en termes d’efficacité énergétique permettant de quantifier les gisements d’économie d’énergie correspondants [Giraudet, 2011]....	100
Figure 58 : Modèles permettant d’estimer les consommations d’énergie du secteur résidentiel à l’instant t	101
Figure 59 : Modèles de l’évolution temporelle des déterminants directs et indirects des consommations énergétiques du secteur résidentiel.....	103
Figure 60 : Typologie des scénarios [Börjeson et al., 2006]	105
Figure 61 : Consommations primaires de pétrole en France : historique et projections [Laurent et al., 2011].....	106
Figure 62 : Représentation des comportements des ménages et de leurs déterminants dans la chaîne de transformation de l’énergie finale en service	125
Figure 63 : Influence des comportements quotidiens de chauffage sur la consommation [Allibe, 2009]	146
Figure 64 : Représentation de l’intensité d’utilisation en fonction de la part budgétaire théorique de chauffage et indication de la frontière de la précarité énergétique en fonction de la définition retenue (ligne pleine : originelle, en pointillés : courante (utilisant les consommations réelles)).....	153
Figure 65 : Evolution de l’intensité d’utilisation des segments du parc résidentiel français entre 1998 et 2005, SFH : maison individuelle, MFH : immeuble collectif.....	154
Figure 66 : Intensité d’utilisation de chacun des 913 logements de l’enquête EDF R&D 2009. Les limites de la précarité énergétique sont représentées en ligne pleine pour la définition originale et en pointillés pour celle utilisant les consommations réelles	155
Figure 67 : Intensité d’utilisation, calculée par décile de PBT sur l’échantillon 2009 avec le DPE (bleu) et sur les segments techniques du parc 2005 avec le modèle thermique simplifié (rouge)	156
Figures 68a et b : Comparaison intensité déclarée vs révélée dans l’échantillon 2009 (a, à gauche) et dans la rétrospective 1998-2005 (b, à droite).....	161
Figure 69 : Représentation graphique des formes fonctionnelles de l’intensité d’utilisation en fonction du coût du service normé (CSN) en €/m ² .an.....	163
Figure 70 : Forme fonctionnelle retenue pour estimer l’intensité d’utilisation en fonction du CSN. Régression faite sur l’échantillon EDF R&D 2009 en regroupant les logements par déciles de CSN..	164
Figures 71a et 71b : Calcul du gain énergétique par le mode de calcul 3CL sans correction (71a, à gauche) et avec correction (71b, à droite).....	166
Figure 72 : Illustration de l’effet des différents biais sur l’estimation de la consommation de chauffage du parc [Allibe, 2012]	168
Figure 73 : Influence du mode de représentation de l’intensité d’utilisation sur les choix d’investissement des ménages.	170
Figure 74 : Distribution des déterminants physiques directs observés ou calculés sur un échantillon de 704 maisons individuelles (illustration personnelle)	179
Figure 75 : Distribution des consommations de chauffage en fonction de la façon dont l’hétérogénéité des déterminants directs est répartie sur l’échantillon de maisons individuelles de l’enquête EDF R&D 2009.	180

Figure 76 : Volume quotidien d'eau chaude à 60°C puisé par personne en fonction de la taille du ménage. Source : EDF R&D.....	182
Figure 77 : Nombre moyen de sources lumineuses par m ² (à gauche), et courbe de fréquence cumulée des durées de fonctionnement des téléviseurs principaux (à droite).....	183
Figure 78 : Illustration du biais introduit par l'utilisation de valeurs moyennes de déterminants selon la forme de la fonction qui les lie à la consommation	184
Figure 79 : Estimation de la consommation moyenne d'un groupe hétérogène de logement selon le modèle utilisé et le nombre de logements constitutifs du groupe (intervalles de confiance à 95%, indiqué par ses valeurs « haut » et « bas » pour chaque modèle) [Allibe et al., 2010].....	187
Figure 80 : Intervalle de confiance à 98% des estimations de consommation moyenne d'un groupe de logement en fonction du nombre de logements constitutifs du groupe [Allibe et al., 2010]	187
Figure 81 : Histogramme des coûts de rénovation observés [Laurent et al., 2011]	195
Figure 82 : Distribution de probabilité des prix correspondant à trois niveaux de performance pour un même type de rénovation [Laurent et al., 2011]	198
Figure 83 : Parts de marché simulées des différents niveaux de performance énergétique des rénovations selon l'hétérogénéité des prix. A gauche : cas général, tirage aléatoire du prix dans sa distribution. A droite : tirage aléatoire sous contrainte, un ménage du i-ème quartile de revenu réalise un tirage dans le i-ème quartile de prix.....	199
Figure 84 : Effet de l'hétérogénéité sur l'estimation, par l'Equation 23, des parts de marché de deux biens (A et B) caractérisés par leur coût global actualisé (LCC en anglais) [Rivers et Jaccard, 2005] .	200
Figure 85 : Quartiles de la distribution de prix.....	201
Figure 86 : Rapport entre le coût de subventionner les 25% d'équipements les plus chers et les 25% les moins chers, en fonction de l'hétérogénéité des prix des équipements concernés (avec le prix moyen et σ l'écart-type).....	202
Figure 87 : Structure du modèle pour la comparaison statique des données 2005 (<i>illustration personnelle</i>).....	213
Figures 88a et 88b : <i>Intensité d'utilisation</i> des segments du parc résidentiel français sur la période 1998-2005.	217
Figure 89 : Entités représentées à l'année N et calcul des consommations énergétiques.....	220
Figure 90 : Evolution du système {ménages-environnement} entre deux pas de temps.....	220
Figure 91 : Représentation de l' <i>intensité d'utilisation</i> en fonction de la part budgétaire théorique de chauffage.....	231
Figure 92 : Distribution de probabilité des prix correspondant à trois niveaux de performance pour un même type de rénovation [Laurent et al., 2011]	233
Figure 93 : Quartiles de la distribution de prix.....	240
Figure 95 : Trajectoires des consommations de chauffage en énergie finale, calculées pour un scénario technique volontariste, en fonction de la représentation des comportements d'usage des technologies.	257
Figure 96 : Trajectoires des émissions de CO ₂ dues au chauffage, calculées pour un scénario technique volontariste, en fonction de la représentation des comportements d'usage des technologies.	258
Figure 97 : Trajectoires des consommations de chauffage en énergie finale, calculées pour un scénario économique volontariste, en fonction de la représentation des hétérogénéités du marché de la rénovation.	261
.....	Erreur ! Signet non défini.

Liste de tableaux

Tableau 1 : Correspondances entre un découpage des services résidentiels par aires fonctionnelles et par les catégories du CEREN : chauffage, ECS, cuisson, électricité spécifique. (<i>illustration personnelle</i>)	37
Tableau 2 : Evolution du nombre moyen d'équipements en Suède [Linden, 2009].....	60
Tableau 3 : Projections tendanciennes de consommation énergétique par usage en 2050 (calculs personnels).....	69
Tableau 4 : Estimation en ordre de grandeur des valeurs déterminant la vitesse des évolutions des consommations d'énergie par usage (estimations personnelles)	70
Tableau 5 : Comparaison des approches disciplinaires de la décision dans le contexte de la consommation énergétique des ménages (d'après [Wilson et Dowlatabadi, 2007]).....	84
Tableau 6 : intensités d'utilisation observées par segment du parc résidentiel français en 2005	151
Tableau 7 : Prix des énergies de chauffage en 2005 [PEGASE, 2012]	152
Tableau 8 : Revenu total des ménages par segment d'après l'Enquête Logement 2002 [EL, 2002] ..	152
Tableau 9 : Résultats de l'estimation des coefficients de l'Equation 13	158
Tableau 10 : Résultats des régressions utilisant les formes fonctionnelles possibles de l'intensité d'utilisation en fonction du coût du service normal (CSN).	163
Tableau 11 : Impact de la prise en compte de l'effet RMB sur le facteur de réduction des émissions de CO ₂ dans les scénarios du CLIP, effectués par Traisnel et ses collaborateurs en 2010 [Allibe, 2012].	169
Tableau 12 : Matrice de corrélations entre déterminants directs des consommations de chauffage. Issu des résultats de la régression de l'Equation 15 du chapitre précédent.....	179
Tableau 13 : Importance des différents types de variables dans l'explication des consommations de chauffage (en pourcentage de la variance expliquée) [Cayla et al., 2010]	181
Tableau 14 : Influence des hypothèses concernant la cible des démolitions de logements sur la période 2010-2050 et le mode de calcul des consommations de chauffage sur l'estimation de la réduction de consommation de chauffage que l'on peut attendre de ces démolitions	224
Tableau 15 : Description des options technologiques de rénovation étant proposées aux ménages d'après la typologie de l'Observatoire Permanent de l'amélioration ENergétique du logement (OPEN) [Laurent et al., 2011]	225
Tableau 16 : Durées de vie révélées des équipements pouvant être rénovés [Laurent et al., 2011].	226
Tableau 17 : Description des options technologiques de rénovation étant proposées aux ménages dans le modèle BEUS (technologie « représentative », performance, durée de vie).	227
Tableau 18 : Coûts (en euros par m ² de surface habitable) associés au changement d'énergie de chauffage.....	228
Tableau 19 : Notation des systèmes de chauffage vis-à-vis de caractéristiques non énergétiques de l'efficacité énergétique	235
Tableau 20 : Augmentation de la valeur patrimoniale d'un logement (en pourcentage) consécutive à des rénovations du bâti, d'après [Banfi et al., 2006]	237
Tableau 21 : Taux d'apprentissage des technologies représentées dans le modèle	239
Tableau 22 : Coûts intangibles déterminés par la procédure de calibration	243
Tableau 23 : Récapitulatif des hypothèses simplificatrices de prix des énergies sur la période 2010-2050.....	254

Liste des abréviations

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie
AIE : Agence Internationale de l'Energie
BEUS : Buildings Energy Use Simulation
BU : Bottom-up
CAS : Centre d'Analyse Stratégique
CEREN : Centre d'Etudes et de Recherches Economiques sur l'Energie
CGA : Coût Global Actualisé
CGDD : Commissariat Général au Développement Durable
CIDD : Crédit d'impôts développement durable
CIRED : Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement
CLIP : Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement
CSN : Coût du service normal
DPE : Diagnostic de performance énergétique
ECS : Eau chaude sanitaire
EDF : Electricité de France
F4 : Facteur 4
GES : Gaz à Effet de Serre
GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GPL : Gaz de pétrole liquéfié
ITE : Isolation thermique par l'extérieur
ITI : Isolation thermique par l'intérieur
LC : Logement Collectif
MDE : Maitrise de la demande d'énergie
MI : Maison Individuelle
OPEN : Observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement
PAC : Pompe à chaleur
PBT : Part budgétaire théorique
PCI : pouvoir calorifique inférieur
PTZ : prêt à taux zéro
RMB : combinaison de l'effet rebond, de la malfaçon et du biais de modèle thermique
RML : Régression multilinéaire
RT : Réglementation thermique
SI: Surestimation initiale
TD : Top-down
VAN : Valeur Actuelle Nette

Introduction générale

Comment rendre compatibles à l'échelle nationale et internationale l'augmentation de la demande de services énergétiques, caractéristique d'une population mondiale en augmentation et dont la richesse s'accroît, avec les contraintes (dont les externalités négatives) liées à l'exploitation des sources d'énergie existantes ? Si cette problématique est initialement celle des énergéticiens, contraints d'adapter leurs infrastructures à la demande d'énergie, elle concerne maintenant autant les pouvoirs publics que la société civile. Cette prise de conscience s'est effectuée au cours des dernières décennies de manière progressive : premiers chocs pétroliers dans les années 1970 révélant la dépendance nationale aux importations de pétrole, premières manifestations contre le nucléaire civil pendant cette même décennie, pluies acides liées à la production d'électricité à base de charbon aux Etats-Unis, menant à la promulgation du Clean Air Act¹ en 1990, travaux du GIEC dans les années 1990 soulignant la forte probabilité de l'origine anthropique du réchauffement climatique et ses conséquences possibles sur la biosphère et l'économie mondiale à long terme, ou encore la controverse sur la contribution de la culture d'agro-carburants à la hausse de prix des denrées alimentaires à la fin des années 2000.

Le problème des externalités négatives de la production d'énergie appelle deux types de solutions complémentaires : l'amélioration (énergétique et environnementale) des processus de production d'énergie et la réduction de la demande d'énergie. Si la connaissance des processus de production était déjà bien établie avant les premiers chocs pétroliers, force est de constater que celle de la demande d'énergie et des gisements d'économie d'énergie qu'elle abrite l'était sensiblement moins avant ces événements. On peut par exemple observer que les différents secteurs de demande d'énergie n'étaient que très peu distingués les uns des autres dans les statistiques nationales en France avant la création du CEREN² en 1973. C'est à cette même période qu'apparaissent les premières politiques énergétiques orientées spécifiquement sur la maîtrise de la demande d'énergie en France : réglementations thermiques pour la construction de bâtiments, campagnes de communication autour de la chasse aux gaspillages d'énergie ou encore subventions aux équipements performants.

Parmi les secteurs de la demande d'énergie, celui des bâtiments présente un gisement d'économie d'énergie et de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) qui apparaît à la fois conséquent, plus accessible et plus rentable que dans les autres secteurs [Levine, 2007 ; Marchand, 2008 ; Mc Kinsey 2009]. Ceci a justifié la fixation d'objectifs nationaux très ambitieux de réduction des consommations dans ce secteur à l'horizon 2020 dans le cadre du Grenelle de l'environnement³. D'autre part, le secteur des bâtiments est vu comme un contributeur important à l'atteinte de l'objectif national de réduction par un facteur 4 des émissions de gaz à effet de serre (GES) en 2050 par rapport à 1990⁴. L'atteinte de ces objectifs demande de procéder à une rupture forte dans l'évolution des consommations et des émissions de GES du secteur résidentiel français, celles-ci étant relativement constantes depuis plusieurs décennies.

¹ Qui impose des quotas d'émissions de dioxyde de soufre et de monoxyde d'azote.

² Centre d'Etudes et de Recherches Economiques sur l'Energie.

³ Réduction de 38% de la consommation d'énergie primaire des logements existant actuellement, d'après la 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.

⁴ Loi de Programme fixant les Orientations de la Politique Énergétique (dite « loi POPE »), loi n°2005-781 du 13 juillet 2005.

Cette rupture de trajectoire nécessite une compréhension approfondie des déterminants de la dynamique des consommations de ce secteur pour permettre une intervention efficace. Les connaissances relatives à l'analyse quantitative de la dynamique de ces consommations sont aujourd'hui capitalisées au sein de modèles prospectifs dont la construction a été principalement assurée par deux communautés de chercheurs : les ingénieurs et les économistes. Les modèles des premiers se basent sur les origines techniques de la demande, décrivant les futurs possibles à partir de la diffusion de technologies variées, alors que ceux des seconds décrivent la demande comme une résultante d'actions humaines en interaction avec le contexte économique, réagissant ainsi principalement aux prix des énergies et à la richesse de l'entité représentée. Le manque de réalisme comportemental et macroéconomique des modèles ingénieur et le manque de caractère explicite vis-à-vis des technologies dans les modèles économiques ont poussé durant la dernière décennie au développement de modèles hybrides tentant d'allier les avantages respectifs de ces deux approches [Hourcade et al., 2006].

C'est dans ce contexte de rapprochement entre modèles de type ingénieur et économique que cette thèse CIFRE a été souhaitée par EDF R&D et le CIRE⁵. Son objectif opérationnel est double : l'introduction de modules économiques dans le modèle de type ingénieur utilisé au sein de l'équipe « prospective du secteur résidentiel »⁶ d'EDF R&D [Laurent et al., 2006] et l'apport de l'expertise « ingénieur » au développement du module technologique représentant le secteur résidentiel dans le modèle Imaclim-R [Waisman et al., 2012] du CIRE⁵. Cette thèse a été réalisée en parallèle⁷ de deux autres : celles de Gaëtan Giraudet (CIRE⁵) [Giraudet, 2011], qui a développé le module résidentiel (RES-IRF) dans Imaclim-R, et de Jean-Michel Cayla (EDF R&D et CMA⁸) [Cayla, 2011] qui a développé un modèle technico-économique de consommation énergétique des ménages (résidentiel et transport) basé sur l'architecture du modèle TIMES-MARKAL. Comme indiqué sur la Figure 1, l'objectif des travaux présentés dans cette thèse est la réalisation d'un modèle alliant au maximum les avantages de ces deux approches de modélisation, c'est-à-dire le réalisme technique et microéconomique (via la représentation des comportements d'usage quotidien et d'investissement dans les technologies fournissant les services énergétiques).

La première partie de cette thèse (partie I) a pour objectif de présenter l'état actuel de la modélisation de la demande d'énergie du secteur résidentiel et de fournir les données existantes permettant de porter un regard historique sur la dynamique des consommations ainsi modélisées. Le chapitre 1 présente l'objet d'étude – la dynamique des consommations énergétiques du secteur résidentiel français – en retraçant son évolution durant les quatre dernières décennies ainsi que celle des variables la déterminant. Son objectif est à la fois de révéler les ordres de grandeur concernant les différents usages de l'énergie dans le secteur résidentiel mais aussi les inerties caractéristiques de leurs dynamiques. L'observation de ces éléments permet de justifier certains choix de modélisation réalisés par la suite, aussi bien concernant les usages énergétiques représentés que les mécanismes implémentés dans le modèle développé. Le deuxième chapitre présente quant à lui les principaux types de modèles utilisés aujourd'hui pour décrire la dynamique des consommations énergétiques et réaliser des études prospectives quantitatives concernant le secteur résidentiel, et plus spécifiquement celui de la France. Ce panorama permet de mettre en relief certaines voies d'amélioration des modèles prospectifs existants en France et souligne le besoin de poursuivre les efforts de dialogue entre les deux principales communautés de modélisation. En particulier, la modélisation de type « ingénieur », bâtie à partir de compétences issues de sciences exactes (thermique et thermodynamique), souffre d'un déficit de représentation de la dimension humaine

⁵ Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement.

⁶ Equipe appartenant au groupe Résidentiel (E12) du département « Energie dans les Bâtiments et Territoires » (EnerBaT) d'EDF R&D.

⁷ Cette thèse a débuté environ un an après celles de Gaëtan Giraudet et Jean-Michel Cayla.

⁸ Centre de Mathématiques Appliquées de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

des consommations énergétiques et de leurs dynamiques, dimension au sujet de laquelle les apports de l'économie, et plus généralement des sciences humaines, sont nombreux. C'est à partir de cette analyse que s'est forgé l'objectif de la thèse : tenter d'introduire au sein d'un modèle ingénieur conventionnel des mécanismes permettant de rendre compte des comportements des ménages ayant le plus d'impact d'un point de vue énergétique.

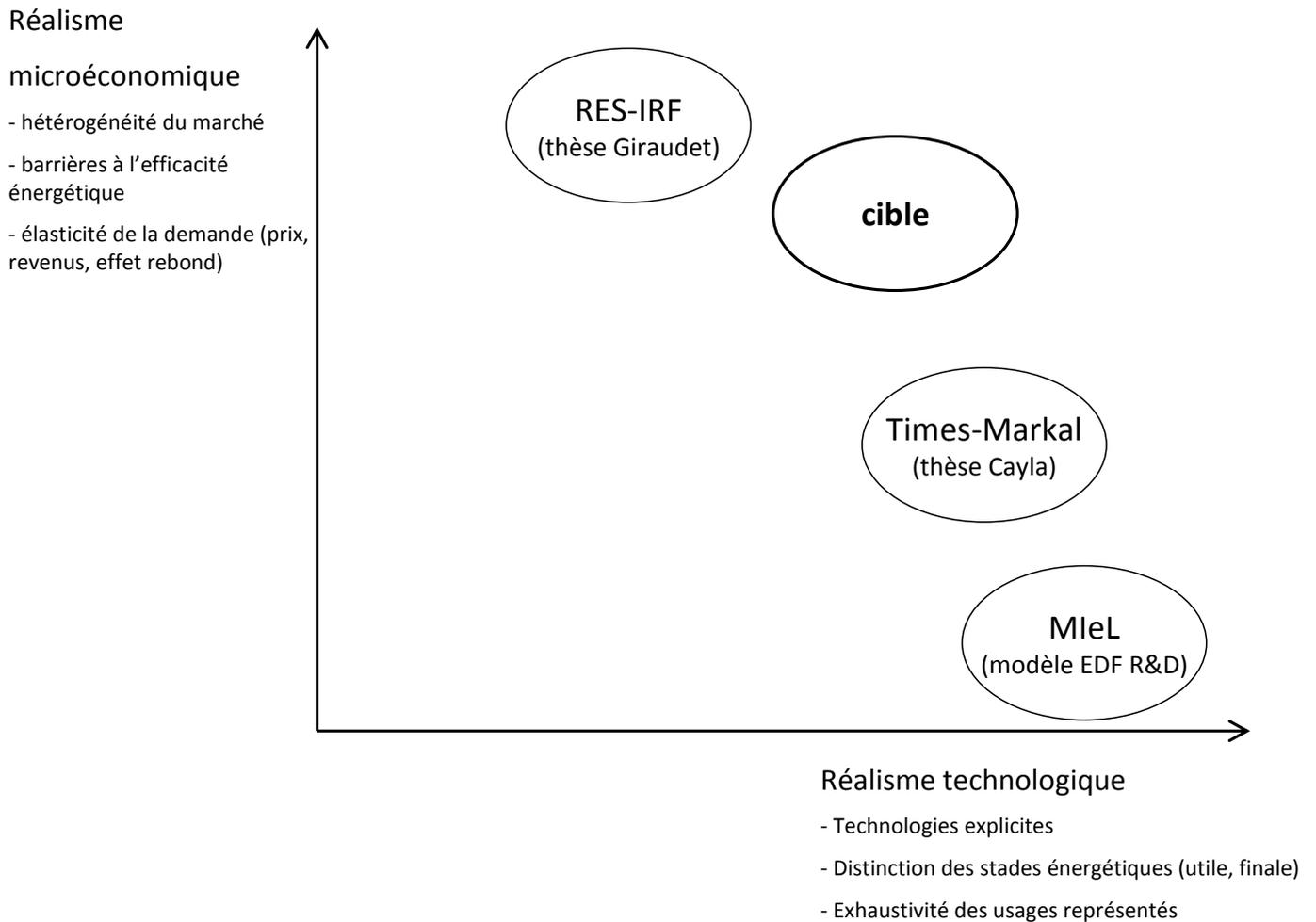


Figure 1 : Modèles récemment développés de consommation énergétique du secteur résidentiel et positionnement de l'objectif de modélisation.

Les travaux réalisés pour atteindre cet objectif sont présentés dans la partie II, dont les deux chapitres traitent respectivement des comportements quotidiens de chauffage et des comportements d'investissement des ménages en matière de rénovation thermique de leurs logements. Le premier chapitre étudie les différences entre les calculs de modèles physiques (thermique du bâtiment), et les consommations d'énergie réellement observées. Celles-ci mettent en relief l'élasticité de la demande de confort thermique au prix de ce service, dont la modélisation permet ainsi de faire intervenir les concepts d'effet rebond et d'élasticité de la demande au prix des énergies, issus respectivement des modèles d'ingénieurs et d'économistes. Le second chapitre traite quant à lui de l'impact de la présence d'hétérogénéités dans les variables représentées dans les modèles techniques et technico-économiques. Il met plus particulièrement en relief des différences entre le marché des équipements consommateurs d'énergie tel qu'il est décrit dans les modèles ingénieur et sa description dans des modèles microéconomiques. L'observation de ces différences met en relief des composantes de ce marché « oubliées » dans les modèles ingénieur, en particulier

celles permettant d'expliquer l'hétérogénéité des choix technologiques des ménages. Les travaux présentés dans cette partie apportent des éléments d'explication du caractère optimiste des modèles ingénieur par rapport aux modèles économiques vis-à-vis des coûts de transition du système énergétique actuel vers un état compatible avec les objectifs de réduction des émissions de GES.

La partie III décrit le modèle développé au cours de la thèse et propose plusieurs applications de celui-ci à des exercices prospectifs. Ce modèle, *Buildings Energy Use Simulation* (BEUS), présenté dans le premier chapitre de cette partie, est basé sur une représentation technique du système de demande énergétique du secteur résidentiel français, au sein de laquelle sont intégrés les éléments développés dans la partie II. Il permet ainsi de rendre compte de la sensibilité de la dynamique des consommations énergétiques à certaines variables économiques comme le prix des énergies et celui des équipements. Les premières applications de BEUS proposées dans le second chapitre permettent d'illustrer l'influence de la prise en compte de l'ensemble des comportements modélisés des ménages sur les trajectoires énergétiques du secteur résidentiel français.

Cayla, J.-M., 2011, *Les ménages sous la contrainte carbone. Exercice de modélisation des secteurs résidentiel et transports avec TIMES*, sous la direction de Nadia MAIZI, MINES ParisTech / CMA, mars 2011

Crassous, R., 2008, *Modéliser le long terme dans un monde de second rang : application aux politiques climatiques*, thèse de doctorat, 21 novembre 2008

Giraudet L.-G., 2011, *Les instruments économiques de maîtrise de l'énergie : Une évaluation multidimensionnelle*, Thèse de doctorat soutenue le 28 mars 2011, 283 p

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

Laurent M.-H., D. Osso, P. Mandrou, H. Bouia, 2006, "Scénarios de rénovation du parc résidentiel à 2030 en France dans un contexte « MDE »", IBPSA France 2006 à La Réunion – 2 et 3 novembre 2006

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

Marchand C., M.-H. Laurent, R. Rezakhanlou, Y. Bamberger, 2008, « Le bâtiment sans énergies fossiles ? Les bâtiments pourront-ils se passer des énergies fossiles en France à l'horizon 2050? », *Futuribles*, 343, 79-100

McKinsey & Company, 2009, *Pathways to a Low-Carbon Economy*, Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve

Waisman H., C. Guivarch, F. Grazi, J.-C. Hourcade, 2012, "The Imaclim-R model: infrastructures, technical inertia and the costs of low carbon futures under imperfect foresight", *Climatic Change*, special issue Climate Policy, 114, 101-120

Partie I

Contexte énergétique et cadres de modélisation

*"If you can not measure it, you can not improve it."
Lord Kelvin*

Chapitre 1 : Les consommations d'énergie dans le secteur résidentiel en France : définitions, unités d'analyse et histoire récente

Introduction

Ce premier chapitre vise à donner une vue d'ensemble de l'objet d'étude dont une modélisation sera proposée dans les parties II et III. On s'attachera pour cela à définir ses éléments constitutifs et à en observer les évolutions passées. Tout d'abord, les termes caractéristiques de l'étude des consommations d'énergie du secteur résidentiel seront définis, ainsi que les unités de mesure usuelles permettant son analyse. Sera ensuite proposée une vision rétrospective des consommations et de leurs déterminants, de façon à révéler les principaux éléments caractéristiques de leurs dynamiques temporelles. S'il est difficile d'affirmer qu'ils resteront inchangés dans un futur plus ou moins lointain, leur connaissance est cependant une composante essentielle à l'évaluation de résultats de modèles prospectifs énergétiques. Enfin, l'analyse des deux premières sections de ce chapitre permettra de proposer une hiérarchie des entités du secteur résidentiel pouvant être intégrées dans un exercice de modélisation, et sur lesquelles le cœur du travail de thèse a été réalisé.

Dans le but de rendre le plus visibles possible les ordres de grandeur propres au sujet étudié, ce chapitre est volontairement très dense en représentations graphiques de l'information disponible. Il est par ailleurs dépourvu de référence théorique dans l'analyse des phénomènes présentés. Cette particularité a pour but de montrer qu'il est déjà possible de tirer des enseignements des données rétrospectives brutes et de leurs corrélations observées pour initier une démarche de modélisation prospective.

1. Les usages de l'énergie dans le secteur résidentiel français

1.1. Définition des périmètres d'étude et des unités de mesure

Le secteur résidentiel se définit par rapport aux autres secteurs d'activité en France faisant l'objet d'analyses énergétiques dites sectorielles. Ces analyses distinguent usuellement quatre secteurs d'activité au sein desquels de l'énergie est consommée de manière sensiblement différente: l'agriculture, le transport, l'industrie et les bâtiments. Cette dernière contient les

bâtiments à usage tertiaire (commerces, bureaux, écoles, hôpitaux...) et les bâtiments à usage résidentiel (ou logements).

Cette définition implique cependant qu'une partie des bâtiments dans lesquels des personnes habitent peut appartenir à la catégorie des bâtiments tertiaires. La définition même du secteur tertiaire étant généralement négative (toute activité économique n'étant pas agricole ou industrielle), aucune définition positive n'est appliquée par l'ensemble des organismes statistiques quant à l'appartenance d'un lieu de vie à la catégorie tertiaire. On pourra cependant établir une liste de types de locaux à vocation de logement usuellement rattachés au secteur tertiaire : résidences étudiantes ou pour personnes âgées, foyers de travailleurs, hôtels, centres d'hébergement (foyers sociaux, accueil de sans domicile fixe...), campings, prisons et locaux permettant l'hébergement dans certains lieux de cultes. Le secteur résidentiel peut alors se définir comme l'ensemble des locaux à vocation de logement qui n'appartiennent pas au secteur tertiaire. On peut ensuite le diviser en trois catégories qui se distinguent par le type d'occupation du logement : résidence principale, résidence secondaire et logements vacants⁹, catégories au sein desquelles on distingue usuellement les maisons individuelles et les immeubles collectifs¹⁰. Enfin, on rappellera qu'il est fondamental de distinguer les consommations d'énergie du secteur résidentiel de celles des ménages. En effet, si la seconde intègre bien le secteur résidentiel, elle intègre aussi le transport individuel.

Le périmètre du secteur résidentiel ainsi défini, se pose ensuite la question de celui des consommations énergétique des ménages à associer au secteur résidentiel. En effet, l'énergie nécessaire aux activités des ménages peut être consommée directement au sein des logements ou en dehors, soit directement par les ménages soit indirectement par les entités produisant les biens et services consommés par ces ménages. Les consommations d'énergie sont dites « directes » quand elles sont consommées par le ménage et « indirectes » quand elles le sont en amont de la chaîne de production de biens et de services (le périmètre même de cette chaîne est variable et relève de normes propres à l'analyse du cycle de vie des produits et services). On notera que la consommation d'énergie indirecte concernant les biens est usuellement appelée « énergie grise ». Par ailleurs, il est important de relever que la consommation d'électricité peut être rattachée aux consommations directes et indirectes suivant l'objet d'étude. En effet, celle-ci est principalement issue de la transformation d'énergies primaires (gaz, pétrole, charbon, uranium enrichi, bois) en une énergie transportable et commercialisable. Ainsi, l'électricité est un vecteur d'énergie pour lequel il est

⁹ Au sens de l'INSEE : « Une résidence principale est un logement occupé de façon habituelle et à titre principal par une ou plusieurs personnes qui constituent un ménage. [...] Depuis 2005, une résidence principale peut comporter plusieurs ménages si ceux-ci ont des budgets séparés ». « Une résidence secondaire est un logement utilisé pour les week-ends, les loisirs ou les vacances. Les logements meublés loués (ou à louer) pour des séjours touristiques sont également classés en résidences secondaires. La distinction entre logements occasionnels et résidences secondaires est parfois difficile à établir, c'est pourquoi, les deux catégories sont souvent regroupées ». « Un logement vacant est un logement inoccupé se trouvant dans l'un des cas suivants : proposé à la vente, à la location; déjà attribué à un acheteur ou un locataire et en attente d'occupation; en attente de règlement de succession; conservé par un employeur pour un usage futur au profit d'un de ses employés; gardé vacant et sans affectation précise par le propriétaire (exemple un logement très vétuste...) ». [INSEE, 2012]

¹⁰ Au sens de l'INSEE : « On distingue une construction selon son caractère individuel (maison) ou collectif. La maison correspond à un bâtiment ne comportant qu'un seul logement et disposant d'une entrée particulière. On distingue deux types de maisons: individuel pur (maison individuelle résultant d'une opération de construction ne comportant qu'un seul logement) et individuel groupé (maison individuelle résultant d'une opération de construction comportant plusieurs logements individuels ou un seul logement individuel avec des locaux). Le terme « collectif » est défini par l'exclusion des deux premiers concepts. Il s'agit de logements faisant partie d'un bâtiment de deux logements ou plus ». [INSEE, 2012]

possible de comptabiliser soit l'énergie consommée à son origine¹¹, auquel cas cette consommation est en dehors du secteur résidentiel et peut être considérée comme indirecte, soit l'électricité à son stade final, c'est-à-dire celle mesurée aux compteurs des particuliers, auquel cas cette consommation est à l'intérieur du secteur résidentiel et peut donc être considérée comme directe.

Bien que les consommations d'énergie indirectes du secteur résidentiel soient du même ordre de grandeur que les consommations directes [Hartner et Haas, 2011], celles-ci sortent par définition d'une analyse sectorielle et ne seront pas traitées dans cette thèse. Cette limitation propre à l'approche sectorielle n'est pas sans inconvénient pour une analyse dynamique des consommations. Par exemple, l'analyse strictement résidentielle d'options technologiques fournissant le service « information » aux ménages indiquerait que le format papier ne consomme pas d'énergie, que les smartphones, tablettes ou liseuses électroniques consomment moins qu'un ordinateur portable, lui-même consommant moins qu'une télévision ou un ordinateur fixe. Or cette hiérarchie peut être remise en question si sont prises en compte les consommations liées à la production de papier, celles des infrastructures de télécommunication permettant l'accès à l'information par internet ou encore l'énergie grise des appareils électroniques utilisés. La prise en compte de ces éléments nécessite d'analyser les interactions entre les consommations de biens et services du secteur étudié (résidentiel) et celles des secteurs lui fournissant ces biens et services (par exemple l'industrie), ce qui peut par exemple être réalisé à l'aide des tableaux entrée-sortie de la comptabilité nationale. Il apparaît donc important de garder à l'esprit cette limitation propre aux analyses strictement sectorielles pour évaluer la portée de leurs résultats.

Un autre concept est nécessaire à l'analyse des consommations d'énergie : le stade énergétique auquel elles sont exprimées. Trois stades sont usuellement distingués entre l'énergie sous forme de ressource naturelle et sous forme de service reçu par le consommateur final, illustrés sur la Figure 2 présentant le bilan énergétique de la France : l'énergie primaire, l'énergie finale et l'énergie utile. Si cette distinction est élémentaire depuis plusieurs décennies parmi les ingénieurs et énergéticiens (e.g. [Lovins, 1977 ; Leach, 1979]), elle est le plus souvent absente des analyses économiques exprimées purement en valeur monétaire, ce qui justifie le rappel proposé dans les paragraphes suivants.

Le premier stade énergétique utilisé est l'énergie primaire. Celle-ci est, d'après la définition de l'INSEE, l'ensemble des produits énergétiques non transformés, exploités directement ou importés. Ces produits sont principalement le pétrole brut, les schistes bitumineux, le gaz naturel, les combustibles minéraux solides, la biomasse, le rayonnement solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie du vent, la géothermie et l'énergie tirée de la fission de l'uranium. Du fait de la prédominance, à l'échelle mondiale, des combustibles fossiles dans le mix¹² d'énergies primaires, l'unité la plus utilisée pour en quantifier les quantités est la tep (tonnes équivalent pétrole, souvent utilisée en millions (Mtep) ou milliards (Gtep)). La comptabilité en énergie primaire est couramment utilisée pour les politiques énergétiques nationales et internationales. Elle est ainsi utilisée pour le calcul de l'indépendance énergétique d'un pays (ratio entre l'énergie produite sur son territoire et celle importée).

¹¹ On peut alors choisir de comptabiliser toute la consommation d'énergie primaire des centrales ou alors seulement la quantité d'énergie perdue dans ces centrales.

¹² On appelle mix énergétique la répartition des différentes énergies constituant une consommation globale d'énergie. Un cas particulièrement utilisé est celui du mix électrique, indiquant la part de différentes énergies primaires utilisées par un pays pour sa production d'électricité. Le mix électrique est ainsi une sous-partie du mix énergétique d'un pays.

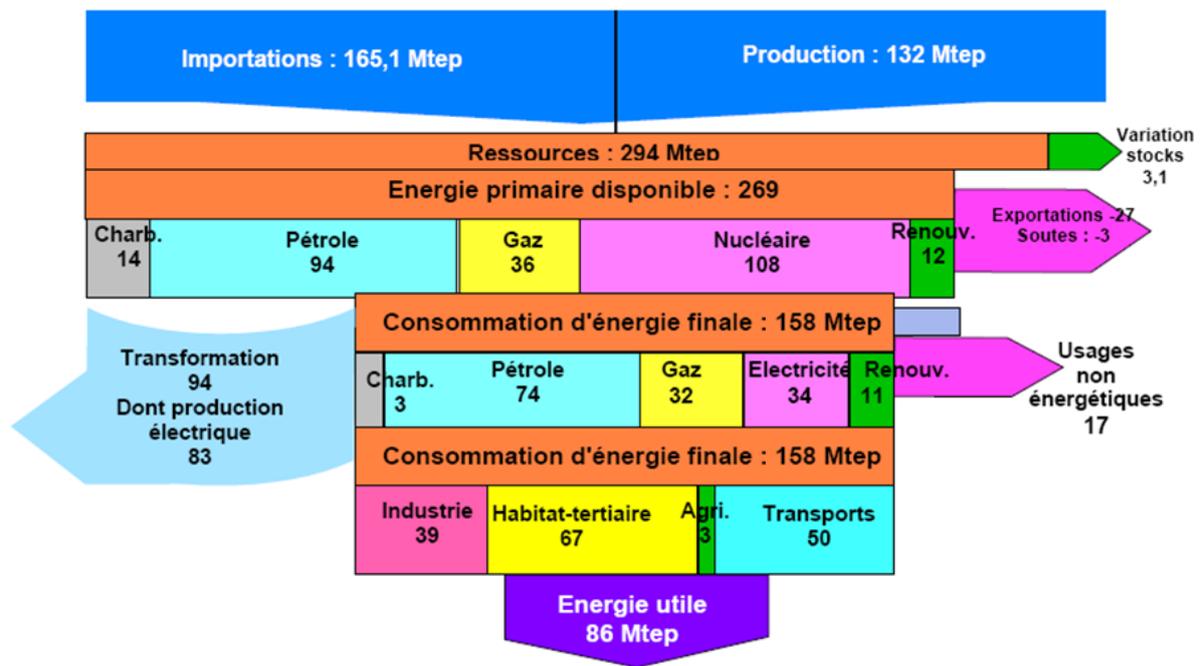


Figure 2 : Bilan énergétique de la France, étapes de transformation des ressources énergétiques à l'énergie utile [Radanne, 2000]

Le deuxième stade énergétique utilisé est l'énergie finale. C'est celle qui est livrée au consommateur, comptabilisée et inscrite sur sa facture (où est généralement indiqué le prix au kWh d'énergie finale). D'autres unités que le kWh peuvent être utilisées selon la nature de l'énergie : la stère pour le bois, le m³ pour le gaz, ou encore le litre pour le fuel domestique. Une conversion est alors nécessaire pour permettre la comparaison entre énergies dans la même unité, qui est usuellement le kWh ou la tep pour le secteur résidentiel, du moins en France.

Lorsque le service consommé par l'utilisateur final est lui-même une forme d'énergie, un autre stade énergétique peut être distingué : l'énergie utile¹³. Seuls trois types de services rentrent dans cette catégorie : la force motrice, le conditionnement d'un volume à une température donnée (différente de la température ambiante) et la production de lumière. En ce qui concerne le secteur résidentiel, l'énergie utile est principalement utilisée pour les services relatifs au confort thermique (chauffage, climatisation et production d'eau chaude sanitaire) mais pourrait aussi l'être pour quantifier le besoin de production de froid alimentaire (réfrigérateurs et congélateurs), de cuisson et de production de lumière. Ces services seront appelés « services énergétiques » dans la suite de cette thèse, posant ainsi une définition positive de ce terme qui est d'usage assez vague dans la littérature¹⁴. Le fait que cette unité de mesure ne soit pas applicable à tous les services résidentiels explique pourquoi elle n'est pas utilisée dans les analyses des consommations énergétiques du secteur dans son ensemble, et encore moins dans les analyses multisectorielles.

Il convient de noter que l'énergie utile est le stade énergétique qui se rapproche le plus du service rendu aux consommateurs pour les services mentionnés ci-dessus. Cependant, on pourra

¹³ L'utilisation de cette unité semblerait remonter aux années 1970 (e.g. [Leach, 1979]).

¹⁴ En effet, on retrouve dans la littérature l'appellation « service énergétique » pour tout service pouvant consommer de l'énergie. Or cette définition inclut finalement presque tous les services du secteur résidentiel. En définissant l'appellation par la nature (énergétique) du service rendu, les services énergétiques sont définis de manière positive et claire, excluant de l'appellation les services pour lesquels l'énergie n'est pas absolument nécessaire (information, divertissement, hygiène des biens et personnes).

noter qu'il n'y a pas correspondance entre les deux. En effet, l'énergie utile peut par exemple n'être produite que dans seulement une partie du logement ou à un moment où aucun membre du ménage n'en retire de service : une lampe laissée allumée dans une pièce inutilisée à ce moment, le chauffage fonctionnant lors de longues périodes d'absence... On pourrait donc encore distinguer l'énergie utile de l'énergie réellement utilisée, dont la définition correspondrait mieux au service rendu. Cependant, en raison de la difficulté de mesurer ce service effectivement rendu, ce stade énergétique n'apparaît pas en tant que tel dans la littérature. Enfin, on notera qu'on se réfère généralement à un *besoin* d'énergie utile (constituant le besoin de service, pouvant être défini à l'aide de normes¹⁵, et pouvant ne pas être satisfait) et à une *consommation* d'énergie finale (énergie effectivement consommée pour satisfaire le besoin d'énergie utile). Les chapitres suivants, et en particulier le premier chapitre de la partie II, montreront d'ailleurs les écueils issus de la confusion possible entre une consommation effective et une consommation calculée à partir d'un besoin de service défini par une norme.

Si l'énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont les unités énergétiques usuelles pour évaluer une politique énergétique nationale sur le plan climatique et sur celui de la sécurité d'approvisionnement, le choix de l'unité énergétique adaptée est moins clair pour évaluer une politique énergétique sur le plan de l'efficacité énergétique de la demande. Par exemple, pour un logement donné, il est possible de calculer le besoin de chaleur (en énergie utile) nécessaire au maintien d'une température intérieure donnée, définissant ainsi l'efficacité du bâti et de la ventilation. Ce besoin de chaleur peut alors être satisfait à l'aide de systèmes de chauffage. Les systèmes fonctionnant à l'électricité ayant des rendements généralement plus élevés que les systèmes fonctionnant aux combustibles, la consommation d'énergie finale permettant de satisfaire le besoin de chaleur sera par conséquent plus élevée pour les systèmes à combustibles que pour les systèmes électriques. Cependant, si on convertit ces consommations d'énergie finale en énergie primaire à l'aide des coefficients conventionnels¹⁶ alors la consommation d'énergie primaire sera plus élevée pour les systèmes électriques que pour les systèmes à combustibles. On observe ainsi que pour une efficacité donnée du bâti du logement, le choix de l'unité utilisée (énergie utile, finale, primaire) pour estimer la performance du logement, de son système de chauffage et de l'énergie utilisée, introduit un biais car les différentes options technologiques ne sont pas classées dans le même ordre.

On peut par ailleurs faire observer qu'à l'échelle d'un logement, seule la consommation d'énergie finale est réellement mesurée (au compteur ou lors de transactions marchandes), ce qui implique le recours à des hypothèses pour convertir cette consommation d'énergie finale en énergie utile (hypothèses sur le rendement des équipements) ou primaire (hypothèses sur les pertes énergétiques en amont de la consommation finale et sur la méthode la plus appropriée pour comptabiliser l'énergie primaire¹⁷). La mesure de consommation en énergie finale semble la plus adaptée pour la mesure de la stricte performance du logement et de ses équipements alors que sa conversion en énergie primaire prend en compte la performance de la chaîne énergétique en amont de l'énergie finale. Cette distinction des stades énergétiques, si elle apporte une meilleure compréhension de la transformation des ressources énergétiques en services pour les consommateurs, révèle aussi l'existence de la diversité des sens pouvant être donnés à la notion d'efficacité énergétique de la demande.

¹⁵ Par exemple la norme ISO 7730, relative aux conditions de confort thermique, ou la norme ISO 8995 relative à l'éclairage des systèmes de travail intérieurs.

¹⁶ Par exemple égaux à 1 pour les principaux combustibles et 2,58 pour l'électricité, prenant en compte les pertes énergétiques dans les centrales électriques, dans la norme adoptée dans le Diagnostic de Performance Énergétique [MECSL, 2008].

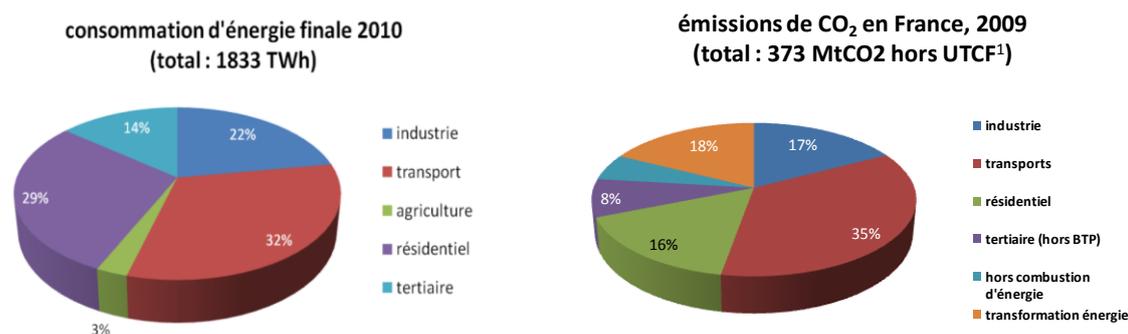
¹⁷ Ce qui peut faire l'objet de débats, en particulier concernant l'énergie solaire, éolienne et nucléaire.

On notera enfin que l'unité temporelle usuelle de l'analyse des consommations énergétiques est l'année. Par abus de langage, cette unité peut ne pas être indiquée. Il est ainsi fréquent d'observer dans la littérature des consommations énergétiques en kWh/m² alors qu'il s'agit en fait de kWh/m² par an (kWh/m².an).

1.2. Consommations énergétiques et émissions de GES associées

1.2.1. Comparaisons entre secteurs de consommation d'énergie à l'échelle nationale

Cette partie propose un aperçu des quantités d'énergie consommées (et émissions de GES associées) au sein des différents périmètres évoqués précédemment. Tout d'abord, le secteur résidentiel est mis en regard avec les autres secteurs de consommation d'énergie à l'échelle nationale (Figures 3a, 3b et 4). Le secteur résidentiel apparaît comme le deuxième secteur de consommation d'énergie finale derrière le transport, le troisième secteur de consommation d'énergie primaire derrière la transformation d'énergie et le transport, et le quatrième secteur vis-à-vis des émissions de CO₂, derrière le transport, la transformation d'énergie et l'industrie.



Figures 3a et 3b : Consommation d'énergie finale en 2010 (Figure 3a, à gauche) et émissions de CO₂ en 2009 (Figure 3b, à droite) par secteur de demande en France (2010) [SOeS, 2011]. ¹ : utilisation des terres, leur changement et la forêt

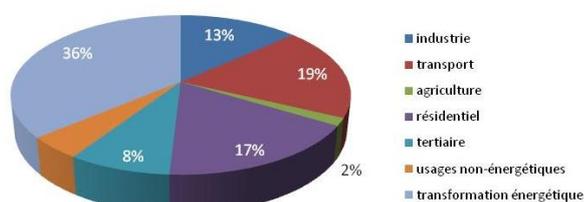
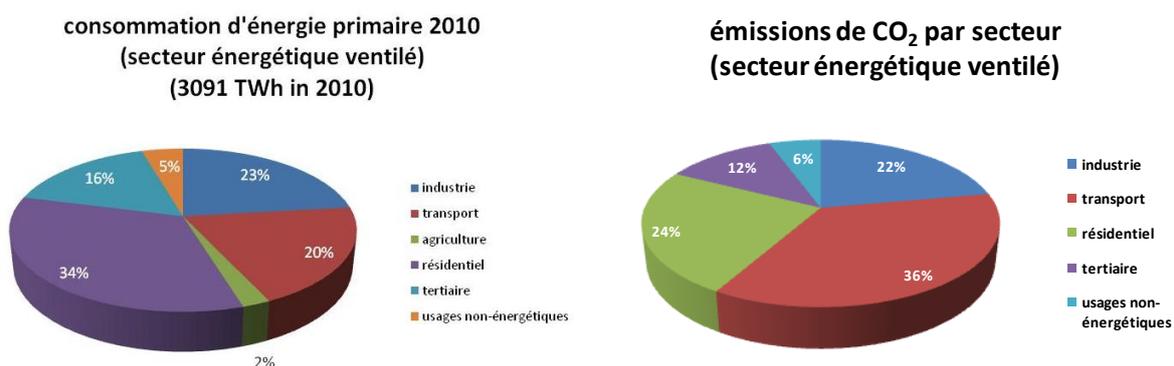


Figure 4 : Consommation d'énergie primaire par secteur de demande en France en 2010 [SOeS, 2011] ¹⁸.
Consommation d'énergie totale : 3091 TWh.

¹⁸ Dans les données officielles, les secteurs résidentiel et tertiaire sont regroupés dans la catégorie « bâtiments ». Nous avons procédé à une séparation entre les deux pour pouvoir distinguer le secteur résidentiel. Celle-ci a été effectuée à partir des données du CEREN sur les consommations d'énergie finale, donnant la répartition suivante des consommations des bâtiments en les deux secteurs : résidentiel (67%) et tertiaire (33%).

On remarquera que la décomposition de la consommation d'énergie finale nationale ne fait pas apparaître le secteur « transformation énergétique », contrairement à celles des consommations d'énergie primaire et des émissions de CO₂. Ceci s'explique par le fait que ce secteur n'est pas un consommateur final d'énergie mais bien un intermédiaire permettant de transformer certaines formes d'énergie primaire de telle sorte à ce qu'elles soient consommables par les autres secteurs. C'est donc bien dans ce secteur qu'une partie de l'énergie primaire est consommée (par pertes lors de la transformation en énergie finale) et qu'une partie des émissions nationales de GES ont lieu (par exemple lors de la combustion de combustibles fossiles pour produire de l'électricité).

Si l'on veut analyser la demande d'énergie des autres secteurs en termes d'énergie primaire, une partie des consommations dues aux besoins de ces secteurs n'apparaît pas dans le découpage proposé car étant associés à la « transformation d'énergie », ce qui biaise l'analyse. Pour contourner ce biais, les Figures 5a et 5b proposent une décomposition des consommations d'énergie primaire et des émissions de CO₂ par secteur dans laquelle les consommations du secteur « transformation énergétique » ont été ventilées au sein des autres secteurs de consommation¹⁹. Après cette ventilation, le secteur résidentiel devient le premier secteur de consommation d'énergie primaire en France, loin devant l'industrie et le transport, et le deuxième secteur émetteur de CO₂. La différence de classement s'explique d'une part par l'absence du secteur « transformation d'énergie » mais aussi par le fait que ce secteur produit de l'énergie principalement à destination des secteurs résidentiel et tertiaire. Après ventilation du secteur « transformation d'énergie », le secteur résidentiel apparaît comme le premier ou le deuxième secteur de demande français, quelle que soit l'unité utilisée pour le classement (énergie finale, primaire ou émissions de CO₂).



Figures 5a et 5b : Consommation d'énergie primaire par secteur de demande en France en 2010 (5a, à gauche) et émissions de CO₂ par secteur de demande en France en 2009 (5b, à droite), avec le secteur « transformation d'énergie » ventilé dans les autres secteurs de demande (calculs personnels)

La décomposition des énergies utilisées pour la production électrique (ou mix électrique) en France est présentée dans la Figure 6 et comparée à celle des autres pays européens. Le mix français présente le taux de nucléaire le plus élevé d'Europe (trois fois plus élevé que le taux moyenne des 27 pays Européens) ainsi qu'une part d'électricité d'origine hydraulique proche de la moyenne européenne. Ces deux éléments ont pour conséquence le fait que la France est un des pays d'Europe ayant la plus faible part de combustible fossile dans sa production d'électricité (environ 10% contre plus de 50% pour la moyenne européenne), d'où un contenu carbone de l'électricité parmi les plus faibles. Le secteur résidentiel utilisant sensiblement plus d'électricité que le secteur des transports,

¹⁹ Les consommations non destinées à la production électrique dans le secteur « transformation énergétique » ont été négligées (elles en représentent moins de 10%). Cette hypothèse simplificatrice implique une marge d'erreur de l'ordre du pourcent.

ceci explique pourquoi les émissions de GES du secteur résidentiel sont moins importantes que celles du transport, malgré une consommation d'énergie primaire plus élevée de ce dernier.

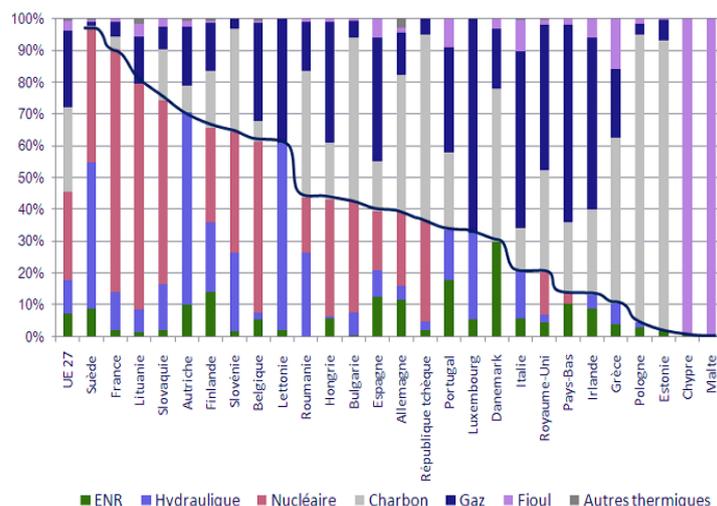


Figure 6 : Mix électrique de la France comparé aux mix électriques des autres pays d'Europe [Eurostat, 2008]

Les consommations énergétiques et les émissions de GES nationales sont généralement exprimées « à climat normal », par opposition au « climat réel ». Cette distinction vient du fait qu'une partie des consommations d'énergie est dite thermosensible, c'est-à-dire qu'elle dépend de la température extérieure. C'est principalement le cas du chauffage et de la climatisation dans les secteurs résidentiel et tertiaire. Or, les températures moyennes peuvent varier sensiblement d'une année à l'autre, ce qui entraîne des variations annuelles sensibles de consommation d'énergie. C'est pourquoi les consommations sont généralement corrigées pour prendre en compte les écarts à un climat de référence, dit « normal », exprimé en degrés-jours²⁰ de chauffage ou de climatisation. Différentes méthodes de correction coexistent, se différenciant par leur climat de référence, la façon dont est mesurée la température (moyenne des extremums de la journée, moyenne pondérée sur plusieurs jours...), la façon dont les degrés-jours sont calculés (différence entre la température extérieure et une température fixe, pouvant dans certains cas n'être prise en compte que si elle est supérieure à une valeur seuil²¹) et la forme fonctionnelle de la correction (correction proportionnelle ou utilisant une fonction affine)²². Le climat de référence d'un organisme peut lui-même évoluer, celui du Centre d'Etudes et de Recherches sur l'Energie (CEREN) ayant par exemple changé en 2005. Pour une même consommation d'énergie à climat réel on peut donc avoir plusieurs consommations à climat normal selon la méthode de correction utilisée. Les différences entre les résultats de ces méthodes sont d'autant plus grandes que le climat réel est éloigné du climat normal mais ne dépassent généralement pas quelques pourcents [Allibe, 2008].

²⁰ Un degré-jour correspond à une différence de 1°C pendant 1 jour, entre la température extérieure moyenne et une température intérieure de référence.

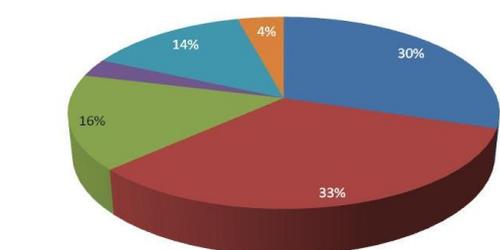
²¹ Par exemple, la méthode de calcul d'EuroStat ne compte les degrés-jours que quand la température moyenne extérieure est inférieure de 3°C à la température intérieure de référence.

²² Pour plus de détails, se référer à la note du CEREN décrivant leur méthode de correction climatique des consommations de chauffage résidentiel [CEREN, 2007b]

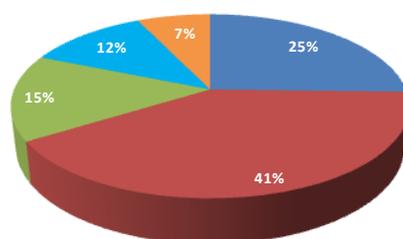
1.2.2. Nature et volume des consommations d'énergie du secteur résidentiel français

Maintenant que la taille relative des consommations énergétiques du secteur résidentiel parmi celles des autres secteurs d'activité a été rappelée, nous allons analyser l'objet d'étude plus en détail. Tout d'abord, l'observation du mix énergétique du secteur résidentiel, en énergie finale (Figures 7a), montre la prédominance actuelle du gaz naturel et de l'électricité (respectivement 33% et 30% des consommations) par rapport au fuel domestique et au bois (respectivement 16% et 14% des consommations). Les autres formes d'énergie, dont le chauffage urbain et le gaz de pétrole liquéfié (GPL), sont minoritaires (moins de 5% des consommations). Quand on le compare au mix énergétique moyen du secteur résidentiel européen (Figures 7b), le mix français se distingue essentiellement par une plus grande utilisation de l'électricité, au détriment du gaz. On remarquera aussi une utilisation des réseaux de chaleur environ deux fois moins importante que la moyenne européenne. Enfin, la Figure 8 nous montre que la France est au centre du classement des pays européens en ce qui concerne la proportion de la consommation directe d'énergie finale de son secteur résidentiel réalisée sans combustible fossile.

Mix énergétique du secteur résidentiel français (2008)



Mix énergétique du secteur résidentiel européen (2009)



■ électricité ■ gaz naturel ■ fuel ■ GPL ■ bois ■ urbain ■ électricité ■ gaz naturel ■ pétrole ■ bois ■ urbain

Figures 7a et 7b : Mix énergétique du secteur résidentiel français en 2008 [CEREN, 2011] (7a, à gauche) et européen en 2009 [ODYSSEE, 2012] (7b, à droite)

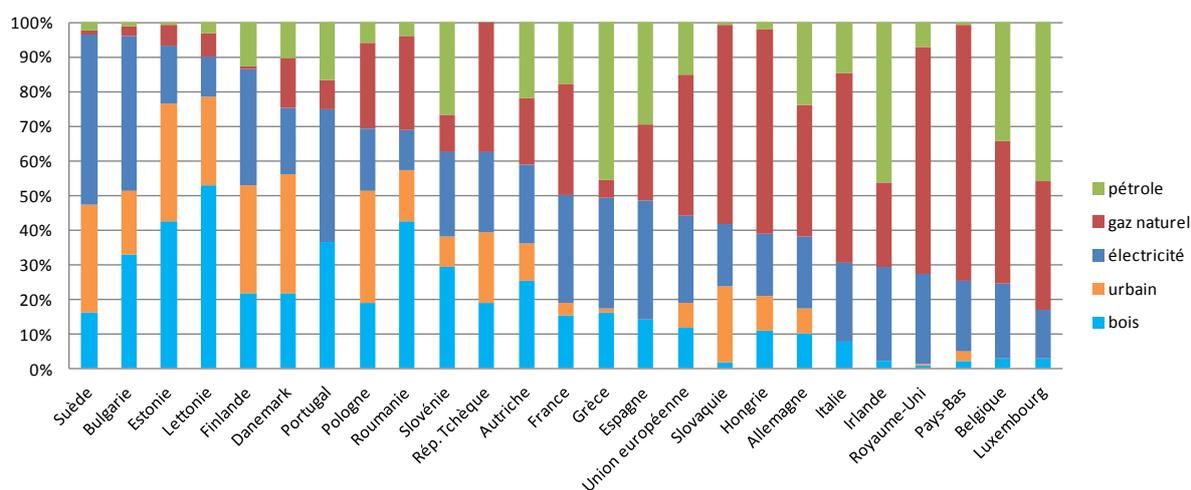


Figure 8 : Comparaison du mix énergétique du secteur résidentiel de pays européens en 2009, par proportion décroissante de la consommation directe d'énergie finale réalisée sans combustibles fossiles [ODYSSEE, 2012] (illustration personnelle)

Après l'observation des énergies consommées, le deuxième niveau d'analyse est la décomposition des consommations dite « par usage », pour laquelle on indique la consommation d'énergie finale associée à divers services consommés par les ménages dans leurs logements. La

littérature propose plusieurs niveaux de détail dans la décomposition de ces usages. Le découpage dominant en France, car celui choisi par la source principale de données (le CEREN²³), consiste à distinguer le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire (ECS), la cuisson et l'« électricité spécifique ». Si les trois premiers usages peuvent être réalisés avec différentes énergies²⁴, la dernière catégorie devrait regrouper à la fois les équipements pour lesquels l'électricité est la seule énergie permettant de fournir les services désirés et l'ensemble des services qui ne font pas partie des trois premières catégories. On observera que si ces deux définitions sont proches, elles ne sont cependant pas équivalentes car certains des usages de cette catégorie pouvant être parfois fournis grâce à une autre énergie que l'électricité²⁵. Nous retiendrons la deuxième définition, c'est-à-dire le complémentaire des trois premiers usages, tout en gardant le terme « électricité spécifique ».

Le Tableau 1 propose un croisement entre les différents services pouvant être rendus dans les logements et les usages mentionnés précédemment. Il permet à la fois d'observer la distinction entre les services énergétiques et non énergétique (n'ayant pas de substitut dans la colonne « pas de consommation directe d'énergie ») et les services regroupés dans chaque usage de l'énergie de la classification du CEREN.

Aires fonctionnelles du logement		Postes de consommation directe d'énergie (classification CEREN)				Pas de consommation directe d'énergie
		Chauffage	ECS	Cuisson	électricité spécifique	
Confort thermique	Réchauffement	équipement de chauffage				
	Refroidissement				climatisation	
	Renouvellement d'air				ventilation mécanique	aération naturelle
Luminosité					éclairage artificiel	éclairage naturel en journée
Alimentation	Cuisson			fours et cuisinières	bouilloires électriques, four à micro-ondes	
	Conservation				réfrigérateur, congélateur	placard, cave
	Préparation				robots ménagers	manuelle
Hygiène	des biens		lavage manuel avec eau chaude		lave-linge, sèche-linge, lave-vaisselle	balai, lavage à l'eau froide, séchage naturel
	des personnes		bains, douches			pratiques d'hygiène à l'eau froide
Communication	Information				TV, internet, radio	papier imprimé
	Communication interpersonnelle				téléphone, internet, fax	courrier
Divertissement					audiovisuel, consoles, ordinateurs, jeux électrotechniques	jeux matériels, livres
Force motrice	Déplacement des personnes				ascenseurs, fauteuil pour personnes âgées	effort physique
	Déplacement des biens				volets roulants, portails automatiques	

Tableau 1 : Correspondances entre un découpage des services résidentiels par aires fonctionnelles et par les catégories du CEREN : chauffage, ECS, cuisson, électricité spécifique. (illustration personnelle)

Ce niveau de détail dans l'analyse des consommations du secteur résidentiel est le plus précis des données publiques, représentatives à l'échelle nationale, et faisant l'objet d'un suivi régulier. La décomposition par usages est effectuée par le CEREN, dans des documents détaillés non publics,

²³ Centre d'Etudes et de Recherches Economiques sur l'Energie

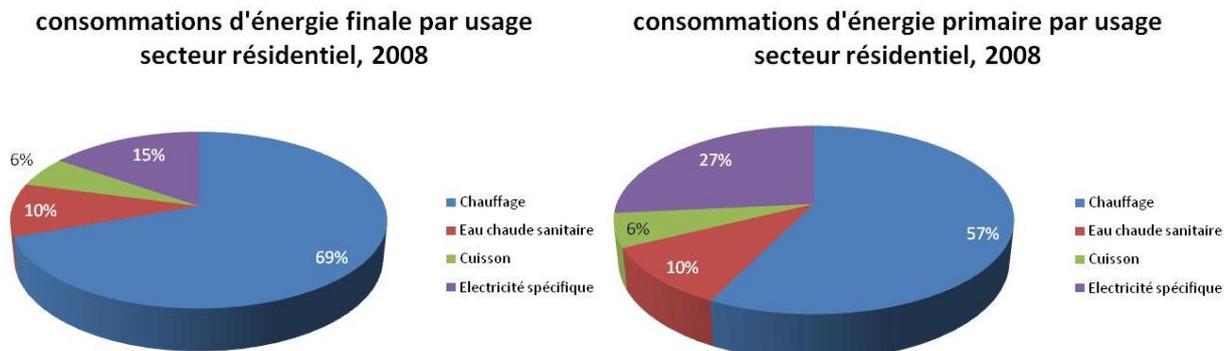
²⁴ Usages dits « concurrentiels » (e.g. [Raiman, 1984])

²⁵ Il existe par exemple des réfrigérateurs fonctionnant au gaz ou des lampes à pétrole. De même, les piscines peuvent être aussi chauffées avec une énergie quelconque.

mais dont une partie est reprise par certains de ses membres (ADEME, EDF, RTE, ErDF, GDF-Suez, GRTgaz, GrDF) ou le Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (MEDDTL)²⁶. On notera que la décomposition réalisée par le CEREN est une estimation statistique et non une réelle mesure de la consommation énergétique de chaque équipement. Ceci est dû au fait qu'une même énergie peut être utilisée par plusieurs équipements. Il est alors nécessaire d'utiliser des méthodes statistiques pour déterminer la part de chaque usage dans la consommation totale de l'énergie [CEREN, 2007a].

Des décompositions plus précises, basées sur des mesures de consommation par équipement, sont produites par d'autres organismes mais leurs résultats n'ont généralement pas la même validité²⁷ que ceux du CEREN. Comme ce niveau d'analyse fait coexister des services énergétiques (chauffage, ECS, cuisson) et d'autres services, l'unité usuellement utilisée pour la comparaison est l'énergie finale (Figures 9a). On peut cependant aussi traduire cette décomposition en énergie primaire à l'aide de coefficients de conversion conventionnels²⁸ (Figures 9b). Cette représentation donne une part plus importante aux consommations d'électricité spécifique, passant de 15% à 27% de la consommation du secteur résidentiel. On retiendra que, quel que soit le stade énergétique dans lequel on exprime le bilan, le chauffage est de loin le premier poste de consommation d'énergie dans les logements.

Par ailleurs, le CEREN produit des données intégrant ou non les résidences secondaires et les logements vacants. La consommation énergétique de ces derniers étant négligeable devant celle des résidences principales (environ 4% pour l'électricité et le fuel, et 1% pour le gaz), leur prise en compte n'affecte que très marginalement les résultats d'ensemble. C'est pourquoi leur prise en compte ne sera pas précisée dans les données présentées dans la suite de ce document.



Figures 9a et 9b : Consommation d'énergie finale (9a, à gauche) et d'énergie primaire (9b) par usage dans le secteur résidentiel français en 2008 [CEREN, 2011]

²⁶ On retrouve par exemple ce niveau de décomposition dans la publication annuelle de l'ADEME « Les chiffres clés du bâtiment » (e.g. [ADEME, 2010])

²⁷ Elles ne sont généralement pas redressées pour être représentatives de la population française, et sont généralement mesurées sur des échantillons de taille limitée par le coût de l'équipement lié à la mesure sur site par usage. Elles servent cependant de référence, faute de mieux.

²⁸ En prenant la norme de calcul suivante, issue du Diagnostic de Performance Énergétique, concernant le coefficient de conversion de l'énergie finale en énergie primaire : pour les énergies fossiles ce coefficient vaut 1 alors qu'il vaut 2,58 pour l'électricité (reflétant les pertes d'énergies liées au rendement des centrales électriques). Le pourcentage de l'électricité dans la consommation de chaque service provient du document « Analyse rétrospective du par cet des flux de logements entre 1973 et 2005 » du CEREN, et sera présentée plus en détail dans la suite de ce chapitre.

Enfin, il est possible de convertir ces données de consommations en émissions de dioxyde de carbone (CO₂) (Figure 11) ou de GES. Pour ce faire, il est nécessaire d'attribuer un contenu en GES à l'énergie consommée. Si la difficulté de cette conversion pour les combustibles fossiles et le bois réside essentiellement dans la définition du périmètre d'analyse (profondeur de l'analyse en cycle de vie), le cas de l'électricité est autrement plus complexe. En effet, le contenu carbone (et autres GES) de l'électricité dépend des moyens de production mobilisés au moment de la demande d'électricité. En effet, les usages énergétiques du secteur résidentiel ne présentent pas les mêmes profils temporels de demande, aussi bien à l'échelle d'une journée que d'une année, et le mix électrique dépend fortement de l'instant observé dans la journée et de l'année.

Du fait de ces difficultés d'attribution d'émissions de CO₂ pour les différents usages de l'électricité, une méthode de calcul a été déterminée par consensus entre Electricité de France (EDF) et l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) [ADEME, 2005], et est présentée dans la Figure 10. Même si celle-ci a été le sujet de controverses, elle permet cependant d'assurer que les émissions calculées par usage soient cohérentes avec les volumes de CO₂ effectivement émis par la filière électrique française. D'autre part, le contenu en CO₂ des différentes énergies utilisées peut différer selon la méthode de calcul utilisée. On retiendra en particulier que le périmètre du calcul peut varier d'une méthode à l'autre, par exemple vis-à-vis de la prise en compte des émissions lors des phases d'extraction et de transport de l'énergie. La prise en compte de l'ensemble du cycle de vie des énergies augmente d'environ 15% les émissions des combustibles fossiles et rend les émissions du bois non nulles par rapport à un calcul des émissions directes [Bouchereau, 2009]. En utilisant les contenus carbone indiqués dans le Diagnostic de Performance Energétique [MECSL, 2008] (réalisés avec une analyse de cycle de vie) pour calculer les émissions de CO₂ des usages principaux de l'énergie dans le secteur résidentiel français, le chauffage est largement majoritaire avec 76% des émissions (Figure 11), devant les trois autres usages dont les émissions sont sensiblement équivalentes.

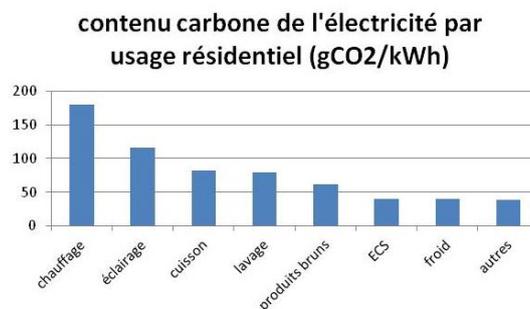


Figure 10 : Contenu carbone de l'électricité par usage résidentiel en France, en gramme de CO₂ par kWh [EDF – ADEME, 2005]

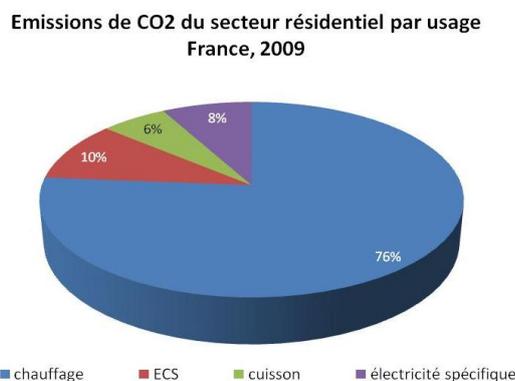


Figure 11 : Emissions de CO₂ par usage dans le secteur résidentiel français en 2009 [CEREN, 2011]

Comme cela a été indiqué précédemment, les usages regroupés sous le terme d'« électricité spécifique » sont très divers car ils regroupent l'ensemble des services qui ne sont ni du chauffage, ni de l'eau chaude sanitaire (ECS), ni de la cuisson. Les services pris en compte dans la catégorie « électricité spécifique » sont décrits dans la Figure 12. On observe que deux des postes de consommation les plus importants sont des services énergétiques : le froid alimentaire (réfrigérateurs et congélateurs) et l'éclairage. Les deux autres services énergétiques de la Figure 12 (la climatisation et le chauffage des piscines) sont au contraire presque invisibles à l'échelle nationale du fait du très faible taux d'équipement de la population. Concernant les services non énergétiques, on observe que l'informatique et l'audiovisuel sont deux postes majeurs de consommation. Ils sont historiquement séparés bien que la distinction devienne de moins en moins pertinente vis-à-vis des services qu'ils proposent (information et divertissement). Combinés, ils représentent une consommation équivalente à celle de l'usage « froid », soit le plus gros poste de consommation d'électricité.

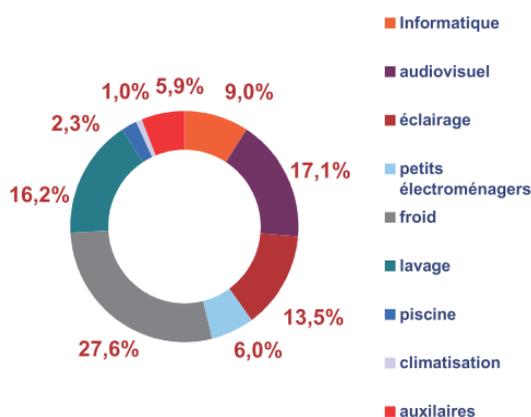


Figure 12 : Décomposition des consommations nationales d'électricité spécifique [EDF R&D, 2008]

1.2.3. Décomposition par énergie au sein de chaque usage

Différentes énergies peuvent être utilisées pour répondre aux besoins des ménages concernant le chauffage des logements, la production d'ECS ou la cuisson des aliments. Ainsi, chacun de ces usages présente un mix énergétique qui lui est propre (Figure 13). On remarquera que l'électricité représente actuellement plus d'un tiers du mix énergétique de la production d'eau chaude sanitaire et de la cuisson alors qu'elle est sensiblement plus faible pour le chauffage (moins de 15%). Le GPL représente quant à lui une part importante du mix énergétique de la cuisson alors qu'il est presque absent au sein des autres usages. Enfin, le gaz est l'énergie principale au sein des trois usages.



Figure 13 : Décomposition par énergie des usages résidentiels principaux, en énergie finale [CEREN, 2007c]

Concernant le chauffage, il est possible de différencier la consommation dite « de base » de celle « d'appoint »²⁹ (régulier ou exceptionnel). Cependant, d'après les données du CEREN, le chauffage d'appoint ne représente une quantité non négligeable que pour les consommations de bois (environ 30% des consommations, contre environ 2% pour le chauffage électrique). La distinction entre le chauffage de base et d'appoint ne sera donc pas faite dans la suite de ce document. D'autre part, on notera qu'un ménage peut consommer plusieurs énergies pour le même usage. Ainsi, 5% des ménages³⁰ déclarent utiliser deux énergies pour le chauffage de base, la deuxième étant alors majoritairement le bois (72% des cas) [CEREN, 2008a]. De même, 30% des ménages utilisent deux énergies de cuisson (en général électricité et GPL ou électricité et gaz).

1.2.4. Autres variables usuelles d'observation et de segmentation

Les observations présentées jusqu'ici se réfèrent à la répartition de l'ensemble des consommations du parc résidentiel français. Pour les traduire à l'échelle des constituants élémentaires de ce parc (c'est-à-dire les personnes, leurs logements et leurs équipements) elles sont converties en consommation énergétiques par personne, par ménage, par logement ou encore par m². On doit alors distinguer ces consommations moyennes par usage des consommations moyennes d'un usage, calculées en ne prenant que des logements dans lesquels l'équipement est présent. Si les deux quantités sont semblables dans le cas des services pour lesquels le taux d'équipement est proche de 100% (chauffage, éclairage, froid alimentaire...) la différence entre les deux est plus significative pour les services restreints à une partie de la population. Par exemple, le chauffage d'une piscine peut être un poste de consommation important dans les logements équipés alors qu'il est négligeable dans la décomposition moyenne du fait que moins de 2% des ménages possèdent une piscine.

Certaines variables sont utilisées non pas pour transformer l'unité d'observation mais pour segmenter l'ensemble des logements, équipements et ménages dans des catégories adéquates à des types spécifiques d'analyse. L'objectif de ces segmentations est généralement d'obtenir des groupes les plus différents les uns des autres et les plus homogènes en leur sein vis-à-vis d'une ou plusieurs caractéristiques propres à l'analyse désirée. Par exemple, la segmentation du parc résidentiel par les variables « type de logement » (maison individuelle ou logement collectif) et « statut d'occupation » (propriétaire ou locataire) est fréquemment utilisée pour des analyses de politique énergétique car ces variables permettent de distinguer des types sensiblement différents de processus de décision dans la réalisation de travaux de rénovation d'un logement (unicité du décideur, distinction entre le financeur et le bénéficiaire d'investissements, solutions techniques disponibles...).

Une conséquence de la variété d'unités de mesure et de segmentations possibles est la variabilité des jugements que l'on peut porter sur un même objet d'étude. Par exemple, la segmentation du parc de logements mentionnée dans le paragraphe précédent est représentée dans la Figure 14 (ne traitant que du chauffage individuel). On observe que l'importance relative des appartements par rapport aux maisons individuelles varie significativement selon l'unité observée. Si

²⁹ L'appartenance des moyens de chauffage à la catégorie « base », « appoint régulier » ou « appoint exceptionnel » est laissée à l'appréciation des ménages dans les enquêtes du CEREN, sans définition précisée dans leurs questionnaires. Cependant, ne peuvent être déclarés en chauffage d'appoint que les équipements dits indépendants au sens du CEREN (par opposition au chauffage central), c'est-à-dire les convecteurs électriques mobiles, cheminées, poêles (essentiellement au bois et au pétrole lampant) et cuisinières chauffantes. Ainsi le chauffage par convecteurs électriques fixes, pompes à chaleur ou chaudières ne peut pas être déclaré comme d'appoint mais seulement première ou deuxième base.

³⁰ Seuls les ménages chauffés principalement à l'électricité emploient une deuxième énergie de base de manière conséquente (10% d'entre eux) [CEREN, 2008a]

ces logements sont certes nombreux (43%), ils sont cependant plus petits (31% des surfaces construites) et apparemment plus efficaces que les maisons individuelles (20% de la consommation toutes énergies) en particulier concernant le chauffage (seulement 15% des consommations nationales).

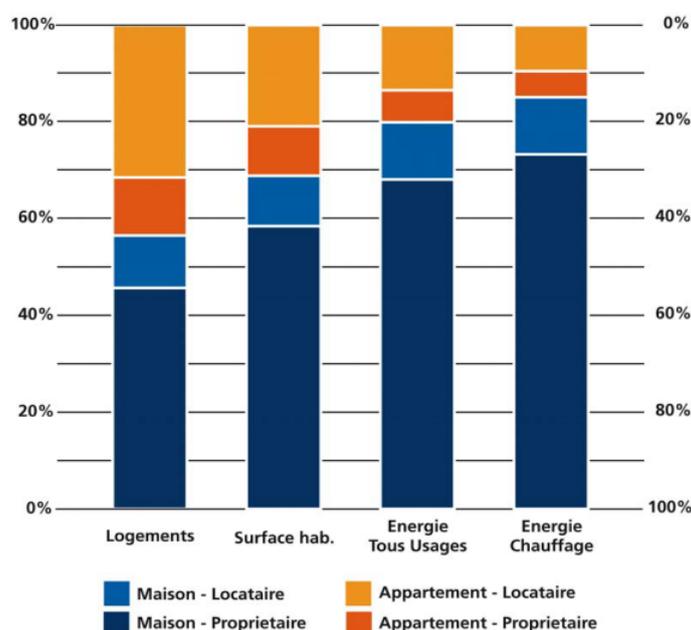


Figure 14 : Répartition, pour les logements équipés de chauffage individuel, des logements, de la surface habitable, de l'ensemble de l'énergie consommée et de l'énergie de chauffage consommée selon le type de logement et le statut d'occupation. Données EDF R&D à partir de données CEREN

2. Histoire récente des consommations d'énergie du secteur résidentiel français

2.1. Données disponibles et classification des déterminants

Cette deuxième partie propose un aperçu de la dynamique passée des consommations énergétiques et des éléments qui ont pu l'influencer au cours des quatre dernières décennies. Cet horizon rétrospectif est limité par la disponibilité des données sous une forme à la fois stable et détaillée. En effet, les premières données fournies par le CEREN datent de 1973, en écho au premier choc pétrolier. Celles-ci concernent alors essentiellement les consommations de fuel domestique (les logements chauffés au fuel constituent historiquement le premier panel du CEREN). Avant cette date, aucune donnée détaillée sur le secteur résidentiel ne semble disponible (une enquête « Logement » de l'INSEE a été menée en 1970 mais les consommations d'énergie du logement n'y sont pas demandées³¹). D'autre part, les données mises à disposition par le MEDDTL ne remontent qu'à 1981 [PEGASE, 2012]. Enfin, on notera qu'une partie des données du CEREN ne sont fournies

³¹ La première enquête Logement de l'INSEE dans laquelle les factures énergétiques sont demandées est celle réalisée en 1992.

qu'à partir de 1975, date à laquelle les données sont considérées comme suffisamment exhaustives et fiables.

L'analyse rétrospective des consommations nécessite l'introduction de quelques concepts qui permettent de comprendre le choix des variables dont seront présentées les évolutions passées. Une consommation d'énergie résulte de l'usage d'un équipement qui vise à rendre un service. La fourniture de ce service par un équipement requiert la consommation d'une certaine quantité d'énergie. Enfin, le contexte physique dans lequel la demande de service est exercée sur l'équipement peut influencer le besoin d'énergie de celui-ci pour répondre à un même service. Par exemple, concernant le chauffage, si le service consiste à maintenir l'intérieur du logement à 19°C alors le besoin d'énergie utile correspondant à ce service va dépendre principalement de trois éléments : la taille du logement, la performance de l'isolation de l'enveloppe du logement³² et les conditions climatiques à l'extérieur du logement³³. La consommation d'énergie finale dépendra, en plus des éléments mentionnés précédemment, du rendement de l'équipement de chauffage (et naturellement de son existence) ainsi que de l'énergie utilisée par cet équipement. Les besoins d'énergie utile dépendent directement du service demandé, service que l'on peut caractériser par son intensité (par exemple la température de confort) et son volume spatio-temporel (le lieu et la durée pendant laquelle le service est demandé à l'intensité désirée).

L'ensemble des facteurs ci-dessus déterminent entièrement les consommations d'énergie d'un usage au sein d'un logement, c'est pourquoi ils peuvent être qualifiés de déterminants « directs » (cercles bleu et rouge de la Figure 15). On notera que lorsque l'échelle d'observation est celle d'un ensemble de logements, alors le nombre de logements est lui aussi un déterminant direct de la consommation du groupe de logement. Ces déterminants directs sont de nature physique, ils regroupent l'ensemble des variables qu'il est nécessaire de connaître pour pouvoir déterminer exactement la consommation d'un usage à l'échelle d'un logement (ou d'un groupe de logements) d'après un ensemble de lois physiques³⁴. Si un de ces déterminants évolue, toutes choses égales par ailleurs, alors il est certain que la consommation énergétique évoluera conjointement et il est possible de calculer exactement la variation de consommation qui résultera de cette évolution. Une partie de ces déterminants permet de quantifier le service demandé en termes énergétiques (cercle intérieur de la Figure 15) et l'autre de déterminer la quantité d'énergie finale qu'il est nécessaire de fournir aux équipements (cercle intermédiaire de la Figure 15) pour qu'ils la transforment en service dans la forme duquel elle est demandée par les ménages. L'observation de l'évolution de ces déterminants directs des consommations d'énergie apporte donc des éléments de compréhension de la dynamique temporelle de ces dernières.

Si ces déterminants directs (physiques) ont évolué au cours du temps, ils ne l'ont pas fait indépendamment les uns des autres et ont aussi dépendu du contexte non physique. En particulier, le contexte économique, politique ou socioculturel (modes de vie, attitudes, ou encore conscience environnementale des ménages) a pu les influencer sensiblement. L'étude de ces influences constitue le champ de recherche privilégié des sciences humaines appliquées à la demande d'énergie, ce qui a donné lieu à une littérature abondante qui sera décrite en partie dans les chapitres suivants. Les facteurs non physiques ayant une influence sur les déterminants physiques (directs) peuvent être appelés déterminants « indirects » (cercle extérieur de la Figure 15).

³² L'enveloppe d'un logement est l'ensemble des parois (opaques ou non) constituant l'interface entre le volume intérieur et l'environnement physique extérieur (sol, air, logement mitoyen).

³³ Principalement la température extérieure, mais aussi dans une moindre mesure la vitesse du vent, l'ensoleillement, l'albédo, la présence de masques (éléments physiques environnant pouvant masquer une partie des rayons du soleil).

³⁴ Principalement liées à la thermodynamique, au transport de chaleur et au rayonnement électromagnétique (les trois découlant des conséquences de l'interaction électromagnétique).

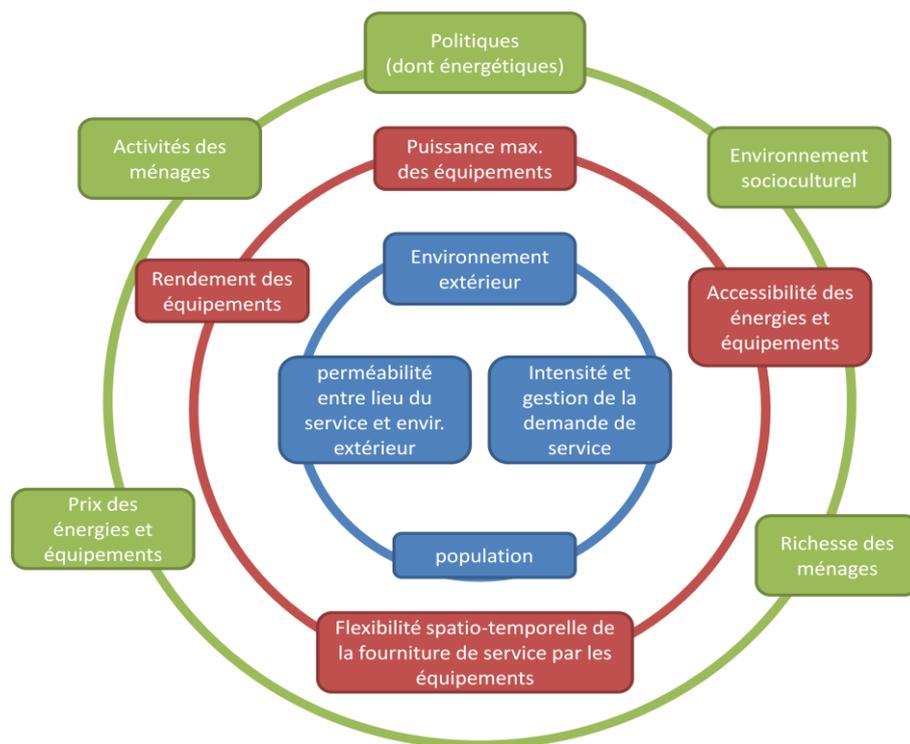


Figure 15 : Déterminants de la demande énergétique du secteur résidentiel. *Déterminants directs du besoin de service (en bleu) et de la consommation d'énergie (en rouge), et déterminants indirects de cette consommation (en vert). Illustration personnelle*

A l'inverse des déterminants directs qui ont un lien physique avec la consommation d'énergie, si un déterminant indirect évolue « toutes choses égales par ailleurs », alors la consommation énergétique peut ne pas changer. La caractérisation du lien entre les deux n'est pas physique mais relève de l'analyse des observations du passé ou d'une théorie spécifique à une discipline de sciences humaines. Les relations causales et les corrélations proposées par les sciences humaines, si elles ne permettent que rarement de prévoir des évolutions de consommation à l'échelle individuelle, présentent cependant des résultats plus convaincants à des échelles auxquelles la variété des réactions individuelles est moyennée. Cela est un facteur explicatif de l'approche généralement descendante³⁵ en modélisation économique de la demande énergétique, où les corrélations entre consommations et déterminants économiques sont observées à l'échelle de grands ensembles (secteur d'activité, pays, continent).

³⁵ Une approche descendante (ou *top-down*) consiste à représenter un ensemble de consommateurs sous la forme d'un groupe dont on connaît des caractéristiques moyennes (indicateurs) et la consommation totale. Cette approche s'oppose à celle dite ascendante (ou *bottom-up*) où la consommation d'un groupe est calculée à partir de la connaissance de chacun de ses éléments. Les différences entre les deux approches sont traitées en détail dans le chapitre suivant, traitant des modèles existants.

2.2. Observations passées : consommations et émissions, déterminants directs et indirects

2.2.1. Consommations énergétiques et émissions de GES depuis 1975

Il importe de présenter l'évolution des consommations d'énergie et des émissions de GES du secteur résidentiel français avant de présenter celle de ses déterminants. L'évolution du mix énergétique du secteur résidentiel est indiquée dans la Figure 16, celle de la décomposition par usage (hors bois) dans la Figure 17 et celle des émissions de GES dans la Figure 18.

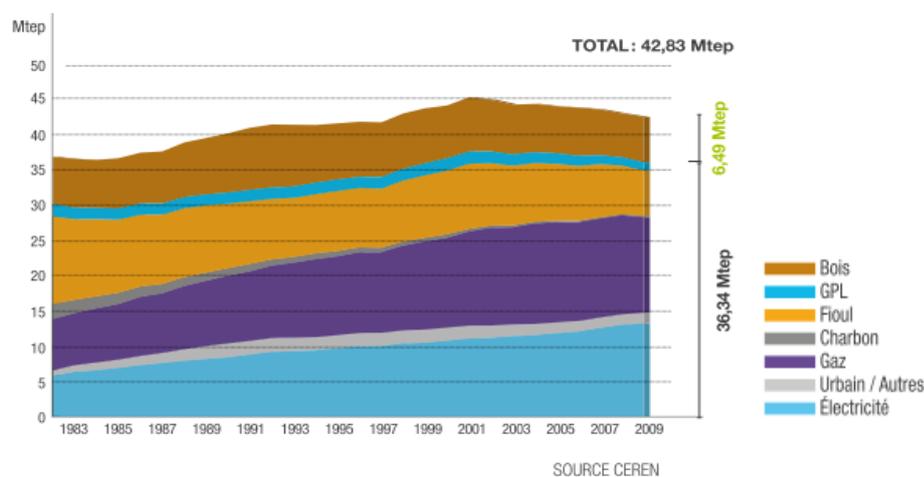


Figure 16 : Consommation d'énergie finale du secteur résidentiel français par énergie [CEREN, 2011]

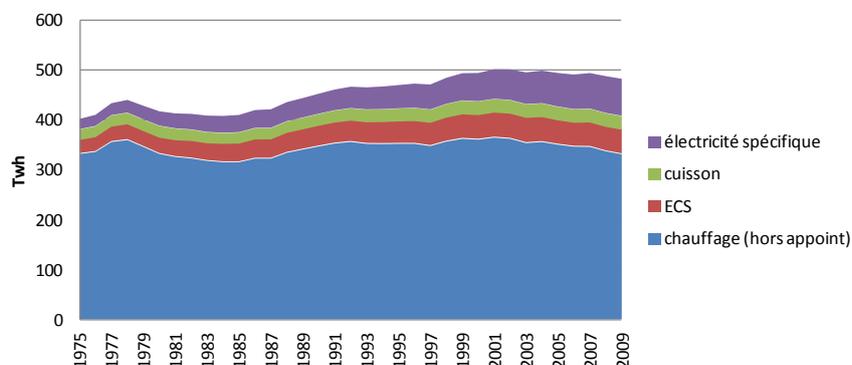


Figure 17 : Consommation d'énergie finale du secteur résidentiel français par usage depuis 1975, à climat normal, hors chauffage d'appoint [CEREN, 2011]

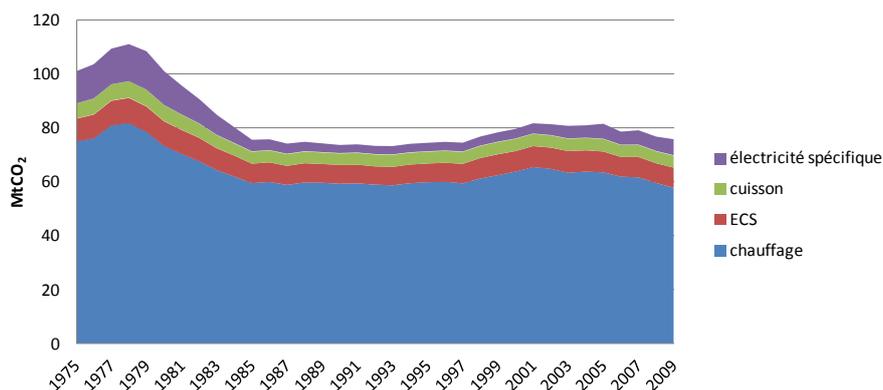


Figure 18 : Emissions de CO₂ du secteur résidentiel français par usage, à climat normal, hors chauffage d'appoint [CEREN, 2011]

Parmi les grandes tendances qui peuvent être observées depuis 1975 vis-à-vis des énergies consommées, la première est que la consommation totale du secteur résidentiel n'a évolué de manière rapide qu'à la fin des années 1970, autour du deuxième choc pétrolier. Deux maximums locaux de consommation sont observables (en 1978 et en 2002), dates entre lesquelles des plateaux sont observés. On remarque par ailleurs une augmentation très progressive de la part d'électricité et de gaz au détriment du fuel domestique dans le mix énergétique du secteur résidentiel (Figure 16). Les consommations de bois sont restées relativement constantes pendant 40 ans, ce qui les porte à une part équivalente à celle du fuel dans le mix énergétique résidentiel actuel. Les trois dernières énergies, très minoritaires, sont le GPL, le chauffage urbain (et autres formes d'énergie) et le charbon. Si l'arrivée du chauffage urbain a compensé quantitativement la disparition de l'usage du charbon dans le secteur résidentiel, les consommations de GPL sont restées stables sur la période. L'observation de l'évolution des consommations d'énergie finale par usage (Figure 17, sur laquelle le bois n'est pas comptabilisé dans les consommations de chauffage) montre que les consommations de la France sont restées sensiblement les mêmes depuis la fin des années 1970 en ce qui concerne le chauffage, la cuisson et l'ECS (qui a cependant légèrement augmenté). La catégorie « électricité spécifique » est par contre passée d'un niveau équivalent à celui de la cuisson en 1975 au deuxième poste de consommation derrière le chauffage. L'augmentation de la consommation nationale par rapport à 1975 est donc surtout due à celle de l'électricité spécifique.

Les Figures 19 à 21 mettent en lumière l'évolution de la répartition des consommations de chaque énergie au sein des principaux usages thermiques. Concernant les consommations de chauffage, on observe la quasi disparition de l'usage du charbon, alors qu'il représentait en 1975 une part des consommations de chauffage (en énergie finale) plus importante que l'électricité aujourd'hui. On peut aussi observer le développement des réseaux de chaleur dans les années 1980³⁶. La période observée marque aussi une réduction par deux de la part du fuel domestique dans les consommations entre 1975 et 1990, au profit de l'électricité mais surtout du gaz de réseau. On remarquera que le chauffage électrique représentait en 2005 moins de 15% des consommations nationales de chauffage hors bois. Cependant, la hiérarchie serait modifiée si les observations étaient converties en énergie primaire : l'électricité serait alors la deuxième énergie avec 30% des consommations, contre 40% pour le gaz et 25% pour le fuel domestique (tous les pourcentages étant exprimés hors bois).

³⁶ De manière cependant bien moindre que d'autres pays comme le Danemark où ils fournissent aujourd'hui plus de 30% de l'énergie consommée dans le secteur résidentiel (Figure 8)

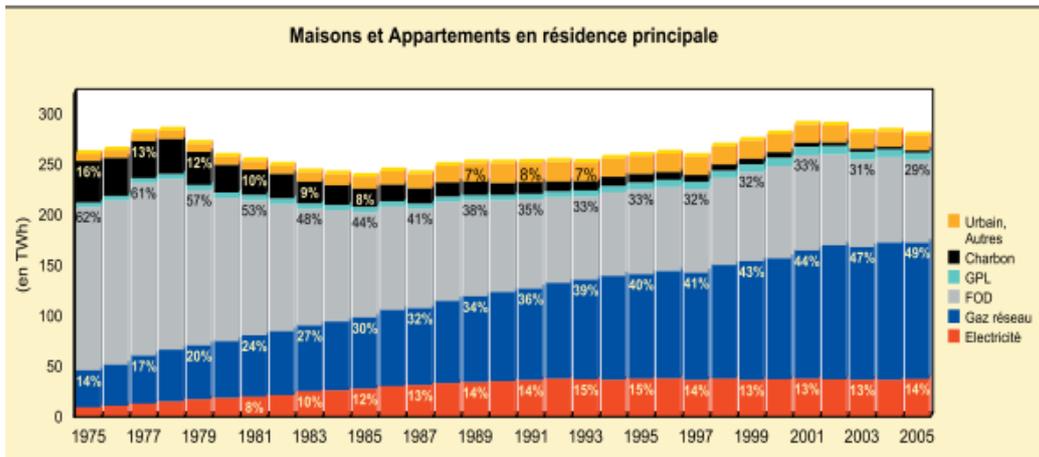


Figure 19 : Consommation d'énergie de l'usage chauffage à climat normal [CEREN, 2007c]

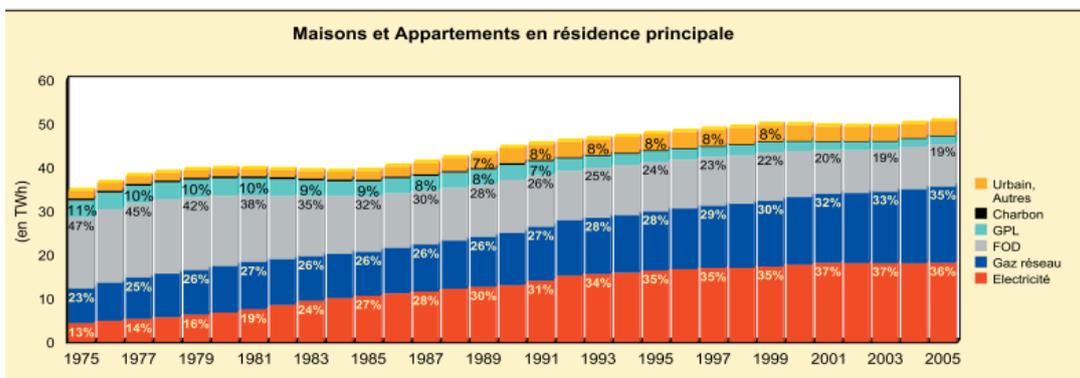


Figure 20 : Consommation d'énergie de l'usage eau chaude sanitaire (ECS) [CEREN, 2007c]

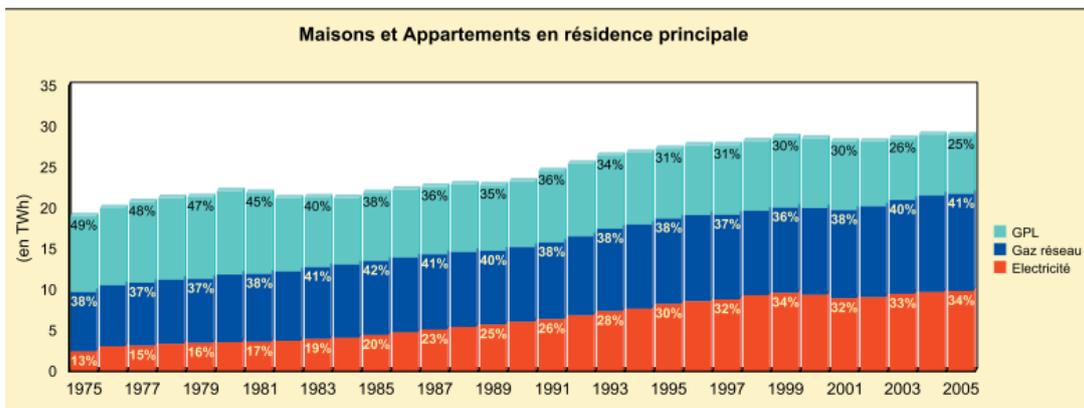


Figure 21 : Consommation d'énergie de l'usage cuisson [CEREN, 2007c]

2.2.2. Évolution des déterminants directs (physiques)

Les données concernant l'évolution passée des déterminants directs n'ont pas toutes fait l'objet d'un suivi méthodique à l'échelle de la France. Ainsi, on distinguera la présentation des variables dont les valeurs proviennent d'enquêtes nationales ou des panels du CEREN de celles dont les valeurs proviennent d'estimations dont la validité à l'échelle nationale est de moindre qualité.

a) Déterminants directs mesurés au travers d'enquêtes de l'INSEE ou du CEREN

Déterminants du volume de service demandé à l'échelle nationale

Le premier déterminant du volume national de service demandé est la population nationale. L'estimation de celle-ci a été permise par cinq recensements³⁷ sur la période d'étude (Figure 22). La connaissance de la population permet de réaliser des comparaisons moins biaisées entre les consommations à plusieurs moments dans le temps (Figure 23 pour la France) ou entre pays de populations différentes (Figure 24). Ces figures indiquent que la consommation d'énergie finale par personne est sensiblement la même en 2009 qu'en 1975 mais que sa répartition par usage a changé. La consommation d'électricité spécifique par personne a triplé, celle d'ECS a augmenté de presque 50% tandis que celle de chauffage a chuté de 16%. Enfin, les consommations de cuisson par personne sont restées stables (variation inférieure à 10%).

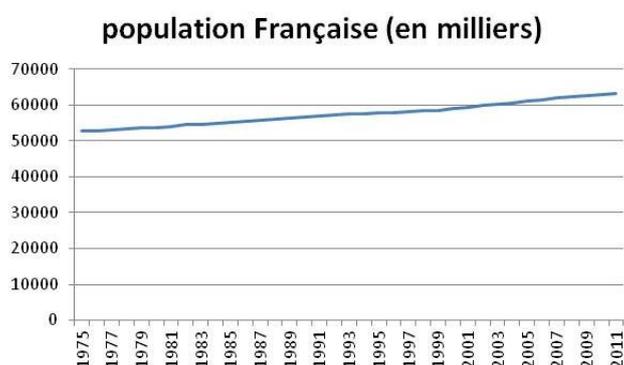


Figure 22 : Evolution du nombre de personnes de la population française (en milliers) entre 1975 et 2009 (les estimations postérieures à 2008 sont provisoires) [INSEE, 2012]

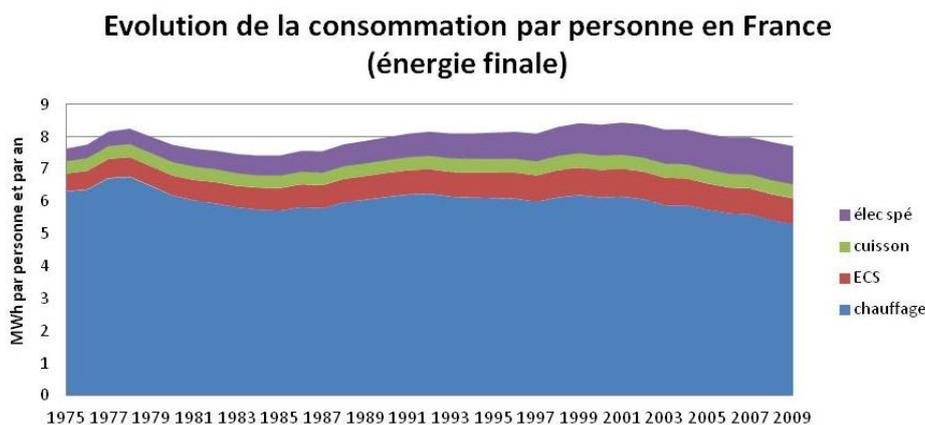


Figure 23 : Evolution de la consommation d'énergie finale par personne et par usage en France [CEREN, 2011]

³⁷ Cette enquête régulière est plus précisément appelée « recensement général de la population » (RGP). Elle a été réalisée en 1975, 1982, 1990, 1999 et 2009 [INSEE, 2012].

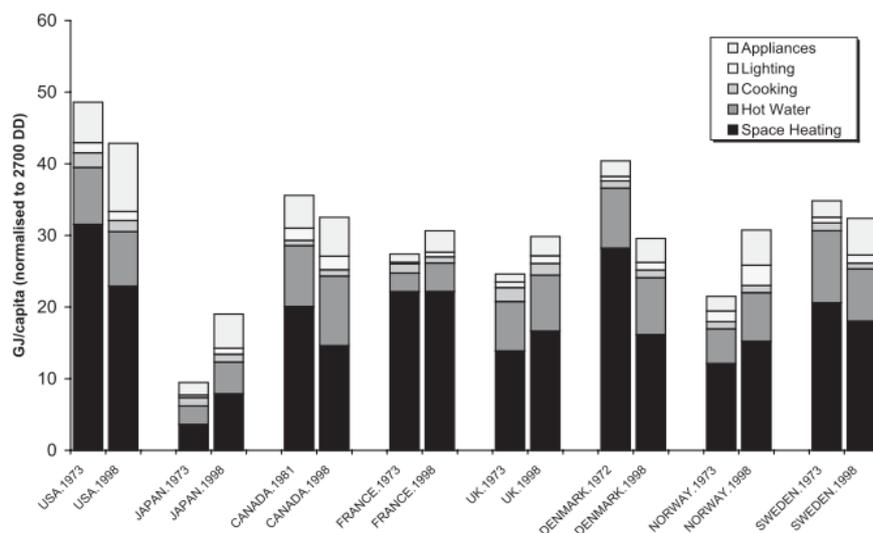
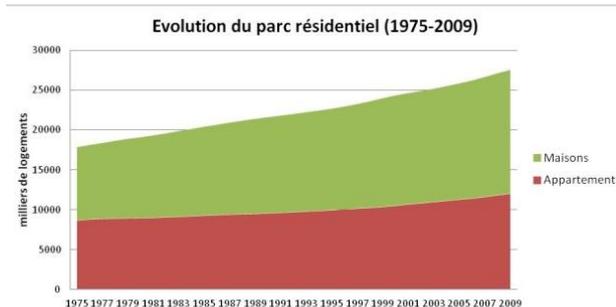
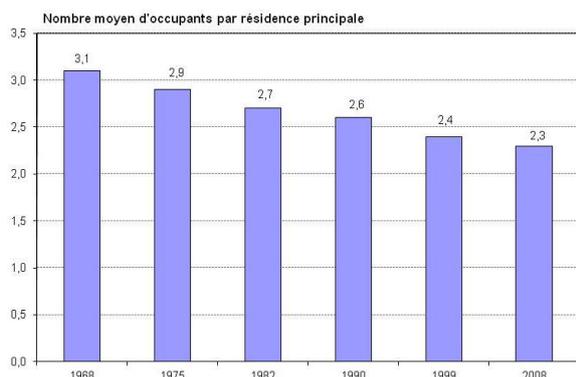


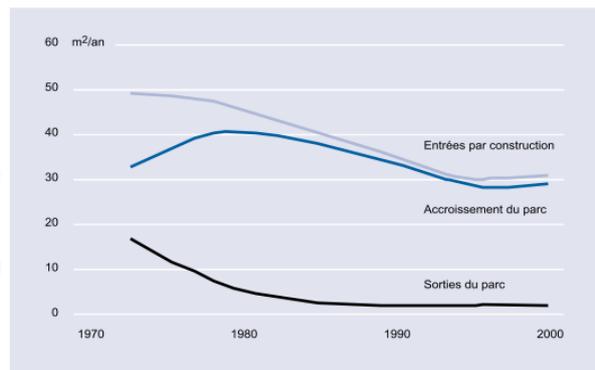
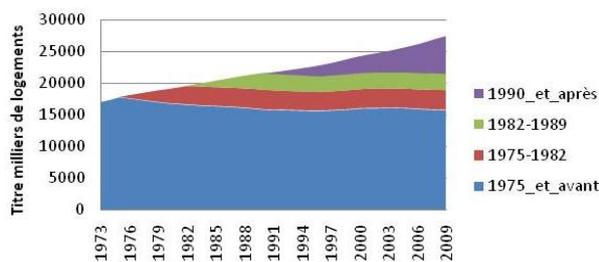
Figure 24 : Consommation d'énergie finale par personne et par usage, corrigée du climat, comparaison internationale entre les années 1973 et 1998 [Unander et al., 2004]

L'augmentation de la population a eu un impact sur le besoin de construire de nouveaux logements. Cependant, la relation entre les deux n'est pas strictement proportionnelle. En effet, un logement correspond à un ménage et le nombre de ménages pour une population donnée dépend du nombre moyen de personnes par ménage. Or ce nombre a sensiblement évolué entre 1975 et 2009 (Figure 25a). C'est pourquoi on peut observer une augmentation plus forte du nombre de logements (Figure 25b) que du nombre de personnes (Figure 22) sur la période étudiée. On remarquera par ailleurs que, si de nombreux logements ont été construits depuis 1975, ceux qui étaient déjà construits à cette date sont encore très majoritaires dans le parc actuel (Figure 26a). Ce constat met en relief la différence fondamentale entre le taux de croissance moyen du parc (environ 1% par an) et son taux de renouvellement moyen, environ dix fois moins important depuis les années 1980 (Figure 26b). Or, c'est le taux de renouvellement du parc de logements qui permet de quantifier son inertie, qui apparaît ainsi particulièrement importante.



Figures 25a et 25b : Nombre moyen d'occupants par résidence principale (25a, à gauche) et évolution du parc résidentiel de maisons individuelles et appartements (25b, à droite) [INSEE, 2012]

Evolution du nombre de logements par période de construction



Figures 26a et 26b : Evolution du nombre de logements par période de construction (26a, à gauche) [CEREN, 2011], entrées et sorties du parc résidentiel en millions de m² par an (26b, à droite) [Traisnel et al., 2001]

Enfin, si l'augmentation du nombre de logements a été plus importante que celle de la population sur la période étudiée (54% contre 19%), l'augmentation de la surface totale de ces logements a été encore plus marquée (84%). En effet, la surface totale est le produit du nombre de logements par leur surface moyenne, et cette surface moyenne a augmenté entre 1975 et 2009³⁸ (Figure 27). On pourra d'autre part remarquer que la diminution du nombre de personnes par ménage (Figure 28b) entraîne mécaniquement une augmentation de la surface par personne, à taille de logement constante.

Evolution de la surface moyenne des logements

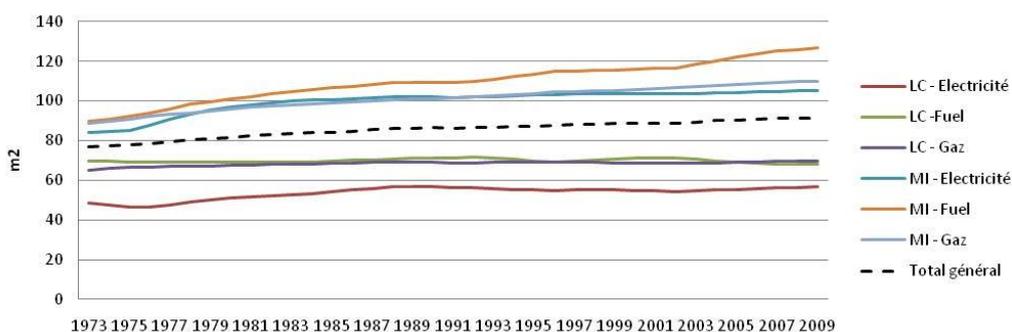
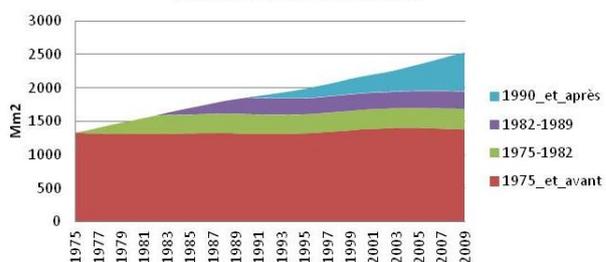
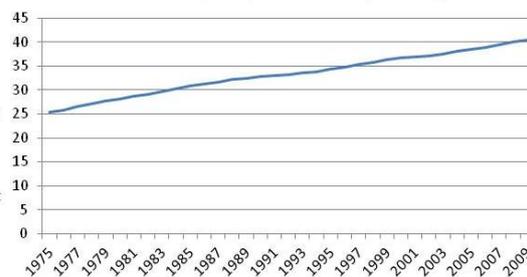


Figure 27 : Evolution de la surface moyenne des logements par énergie de chauffage et type de logement [CEREN, 2011]

Evolution des surfaces construites par période de construction



surface par personne (en m²)



Figures 28a et 28b : Evolution des surfaces construites par période de construction (28a, à gauche) et évolution de la surface moyenne par personne (28b, à droite) [CEREN, 2011]

³⁸ L'augmentation de la surface moyenne des logements est principalement due à celle des maisons individuelles, celle des logements collectifs n'ayant presque pas évolué depuis 1975.

L'évaluation des surfaces construites (Figure 28a) permet de retracer l'évolution de la consommation d'énergie et les émissions de GES par m² et par an, indicateur très utilisé dans la littérature traitant de l'efficacité énergétique. Si cette unité est souvent assimilée à un indicateur de la performance énergétique de l'infrastructure physique, il est important de noter qu'elle n'est pas seulement influencée par cette performance mais aussi par les autres déterminants directs (demande de service, environnement physique...). En comparant l'évolution de la consommation par m² de chauffage (Figure 29) et la consommation totale de chauffage en France (Figure 17) on peut observer que l'amélioration de la performance a été en partie compensée par l'augmentation du volume de service demandé (augmentation de la surface totale à chauffer, augmentation des températures de confort ou moins de gestion de la consommation).

Les diverses politiques d'efficacité énergétique, bien qu'ayant réussi à augmenter la performance individuelle des équipements (consommation énergétique par unité de service fourni), n'ont pas suffi à réduire sensiblement les consommations énergétiques totales du secteur résidentiel en France du fait de l'augmentation du volume de service demandé à l'échelle nationale.

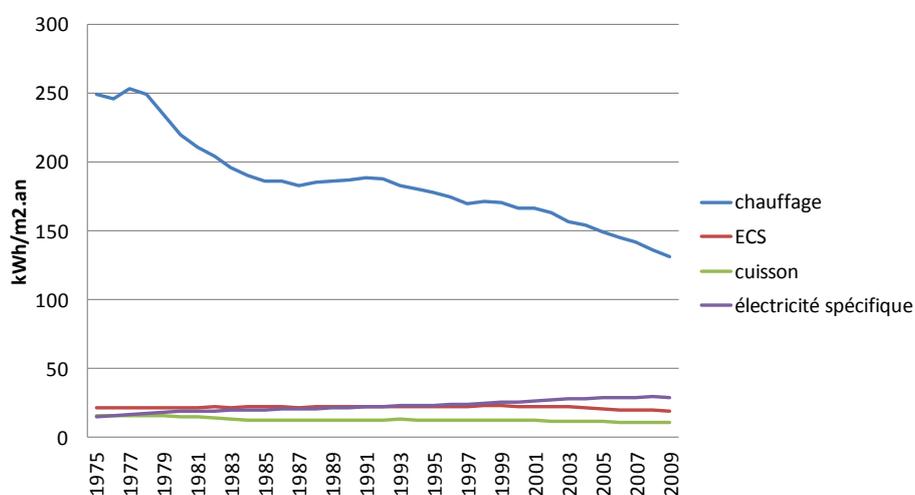


Figure 29 : Evolution de la consommation d'énergie finale des usages résidentiels en kWh/m² [CEREN, 2011]

Environnement physique

La Figure 30 représente l'évolution des degrés-jours réels ainsi que des degrés-jours « normaux » du CEREN. On peut ainsi observer que le climat a été sensiblement plus doux sur la période 1985-2005 que pendant les 30 années précédentes. L'écart moyen de température entre ces deux périodes a été suffisant pour justifier la définition d'un nouveau climat « normal » par le CEREN, inférieur de 200 degrés-jours au précédent (représentant grossièrement une augmentation de température d'1°C). Cette figure ne permet malheureusement pas d'interpréter l'évolution des consommations énergétiques présentées précédemment car il est d'usage de présenter ces consommations corrigées des variations climatiques (dites à « climat normal »). Elle peut cependant permettre d'interpréter certaines évolutions de comportement des ménages, dont les rares estimations ne sont pas corrigées du climat.

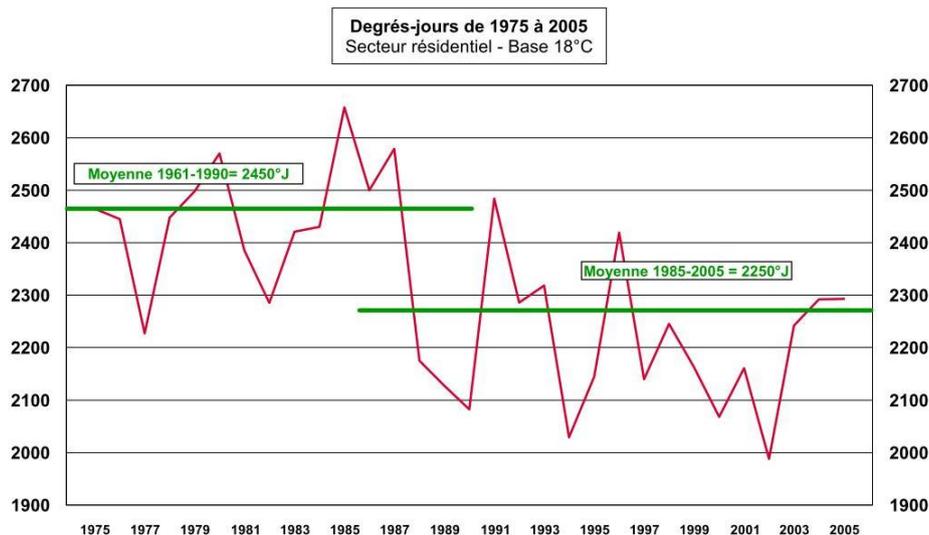


Figure 30 : Evolution de la rigueur climatique sur la période 1975-2005 [CEREN, 2007b]

Diffusion des équipements au sein des logements

Le niveau de détail le plus précis des données du CEREN par usage indique le pourcentage de logements utilisant chaque énergie³⁹. Cela indique donc la part de marché en nombre d'installations pour chaque énergie, qu'il convient de distinguer du mix énergétique des consommations, qui indique les parts de marché en quantité d'énergie consommée. L'observation des évolutions concernant les équipements de chauffage (Figure 31) révèle un profil semblable à celui du mix énergétique (Figure 19) mais qui en diffère par les valeurs absolues. Par exemple, le chauffage électrique était en 2005 le deuxième mode de chauffage en termes de logements équipés (28%) mais ne représente qu'une faible partie des consommations (14%), ce qui s'explique principalement par la petite taille des logements chauffés à l'électricité (Figure 27). A l'inverse, le fioul domestique équipait en 2005 moins de 20% des logements mais représente environ 30% de l'énergie de chauffage consommée.

Les logements construits à une certaine période conservent leur énergie de chauffage pendant au moins 15 ans. La Figure 31 montre par exemple l'évolution des parts de marché des logements construits sur la période 1982-1989, pour lesquels la part de marché des énergies de chauffage n'évolue qu'à partir 1997, de manière peu importante et principalement dans les maisons individuelles. Pour les logements plus anciens, des changements d'énergie de chauffage sensiblement plus importants ont été observés entre 1975 et 2005, aussi bien dans les appartements que les maisons individuelles (Figure 32). Cependant, il a fallu environ 30 ans pour que le chauffage électrique ou au gaz (énergies très minoritaires en 1973) soit diffusé au sein de plus de la moitié des logements, alors que les systèmes de chauffage associés à ces énergies présentaient des avantages compétitifs concrets sur les technologies existantes (respectivement vis-à-vis du prix d'achat de l'installation du chauffage et du prix de l'énergie utilisée).

³⁹ Les dernières valeurs mises en forme disponibles à ce niveau de détail datent de 2005.

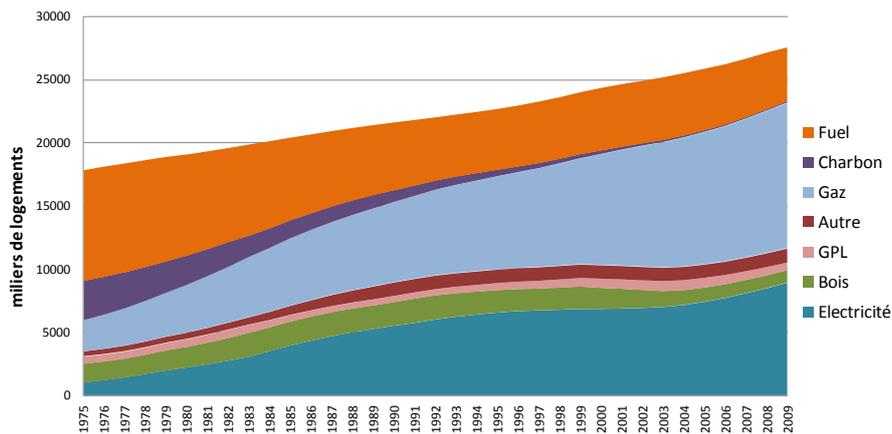


Figure 31 : Résidences principales selon l'énergie de chauffage de base [CEREN, 2011]

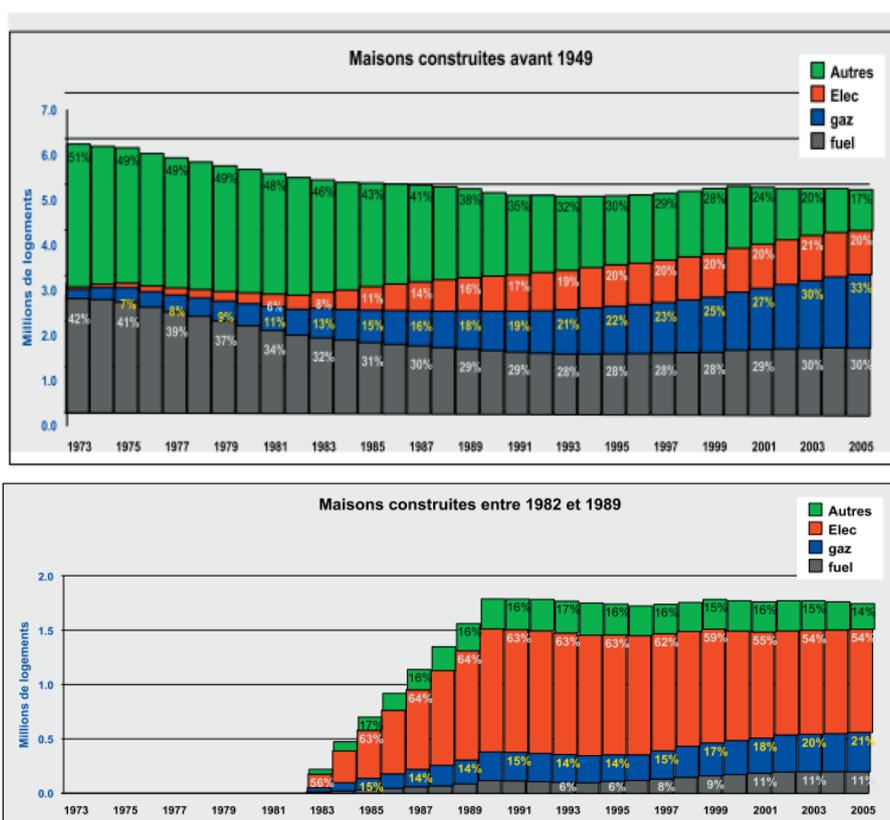


Figure 32 : Energie de chauffage de base des maisons selon les périodes de construction (« avant 1949 » et « 1982-1989 ») [CEREN, 2007c]

La Figure 33 présente quant à elle les données relatives aux parts de marché en nombre de logements équipés des différentes énergies pour la fourniture d'eau chaude sanitaire et de cuisson. Concernant la cuisson, on observe une lente augmentation des parts de marché de l'électricité, surtout en maisons individuelles, au détriment essentiellement du GPL (butane ou propane en bouteilles). On retiendra que l'évolution des parts de marché des énergies de cuisson est particulièrement lente, le transfert du GPL vers l'électricité n'ayant touché que 15% du marché en 30 ans. Pour la production d'ECS, on observe une augmentation sensible de la part de marché de l'électricité jusqu'au début des années 1990, ce qui correspond à la diffusion des ballons électrique d'eau chaude. On observe par ailleurs la disparition progressive de l'utilisation de fuel domestique et de GPL pour la production d'ECS (au profit du gaz et de l'électricité), alors que ces énergies étaient

utilisées par plus de 40% des foyers en 1975 pour cet usage. Depuis 1990, seul le gaz présente une augmentation de ses parts de marché pour l'ECS. On retiendra que les usages cuisson et ECS présentent des dynamiques de diffusion de nouveaux équipements (et énergies) semblables à celles des équipements de chauffage.

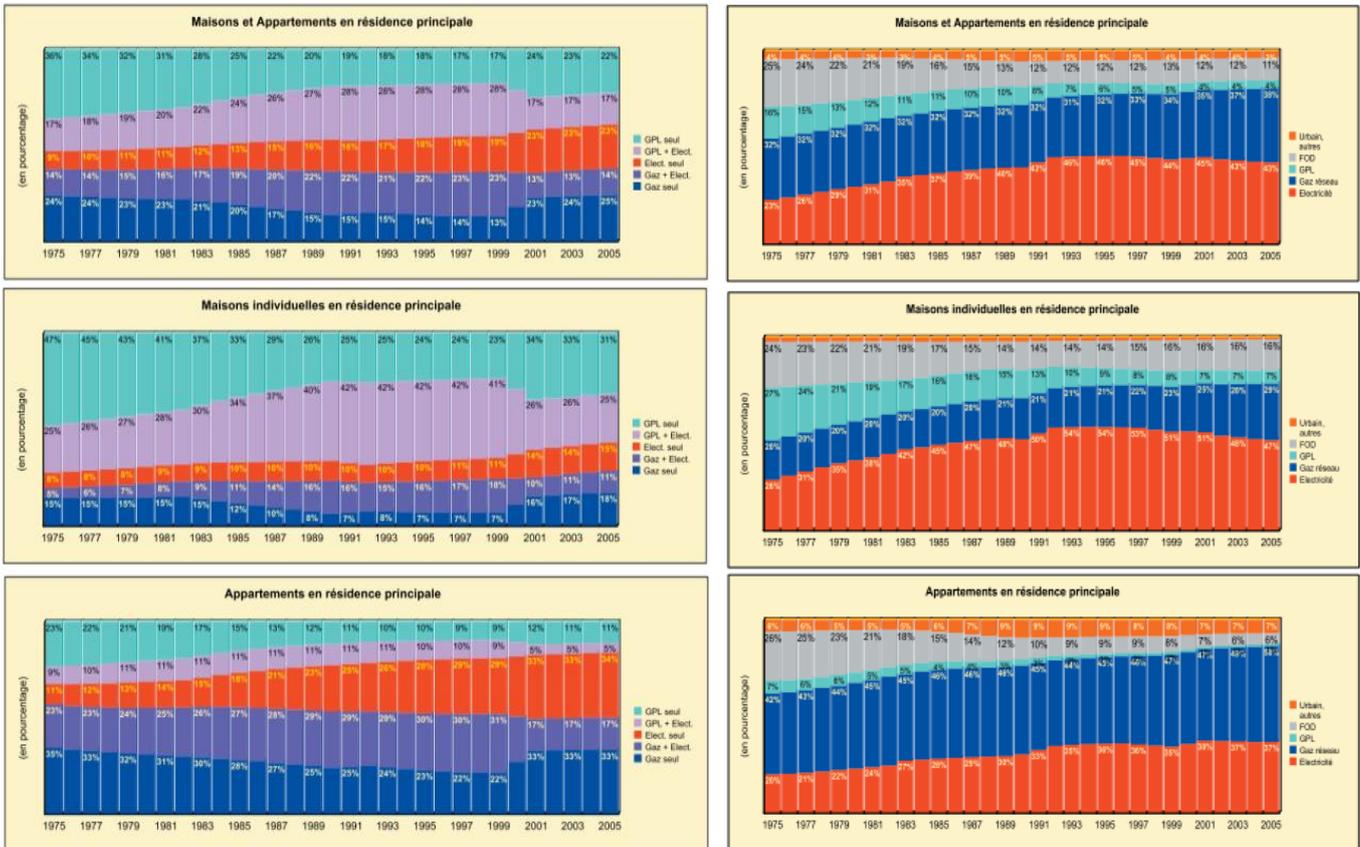


Figure 33 : Résidences principales selon l'énergie utilisée pour la cuisson (à gauche) et l'eau chaude sanitaire (à droite) [CEREN, 2007c]

Enfin, il est important de noter que le taux d'équipement en ECS a évolué fortement durant les dernières décennies : seulement deux tiers des logements étaient équipés d'une installation d'eau chaude sanitaire en 1975 contre près de 100% actuellement (Figure 34). Ceci explique en partie l'augmentation des consommations d'ECS à l'échelle nationale sur cette période.

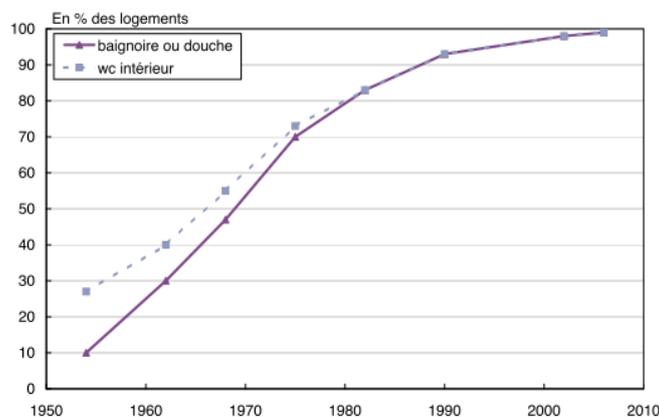


Figure 34 : Evolution du pourcentage de logements équipés de baignoire ou douche [CAS 2011], réalisée à partir des données des enquêtes « Recensement Général de la Population » et « Logement » de l'INSEE

b) *Déterminants directs non mesurés de manière précise dans les enquêtes de l'INSEE ou dans les panels du CEREN*

L'évolution des différents déterminants directs qui va être présentée est issue d'une revue bibliographique de sources que l'on peut considérer comme moins fiables que celles présentées précédemment. Les données relatives à la gestion de température intérieure des logements, bien qu'émanant du CEREN, sont présentées dans cette partie car elles souffrent d'un biais de déclaration important, une partie importante des ménages n'étant pas équipés de thermomètres. Ceci justifie le choix de présenter ces valeurs comme d'une qualité inférieure aux autres données du CEREN. Certaines données provenant d'autres pays proposent un niveau de détail que l'on ne peut trouver pour la France, ces données seront alors présentées à titre indicatif dans des encarts.

Diffusion des équipements liés aux usages thermiques

Concernant le chauffage, les quatre dernières décennies ont permis d'observer des évolutions sensibles de performance des équipements. La diffusion d'équipements performants n'a pas été linéaire, elle a connu deux pics : durant les années 1980 et la dernière décennie. Cette diffusion localisée dans le temps est documentée pour les pompes à chaleur [CLIP, 2007 ; ADEME, 2011] et les chaudières à condensation [David, 2006] ou encore pour les appareils de chauffage au bois (plus performants que les cheminées) [ADEME, 2010]. Concernant l'évolution technologique depuis 2006, des données très détaillées ont été récoltées et publiées dans le cadre de la mise en place de l'Observatoire Permanent de l'amélioration Energétique du logement (OPEN) par l'ADEME [OPEN, 2010]. En ce qui concerne l'isolation des logements, la seule donnée rétrospective documentée concerne le flux de rénovation de logements [Traisnel et al., 2001]. Cependant, dans cette étude, le nombre de rénovation est estimé à partir de la baisse des consommations par unité de surface, l'estimation peut alors être biaisée par une possible évolution des comportements d'usage. On en retiendra donc seulement le profil temporel et non les valeurs absolues, ce qui permet cependant de localiser un pic du flux d'isolation des logements au début des années 1980.

Parallèlement au nombre de logements isolés, il est intéressant d'observer la performance de l'isolation installée. On peut l'estimer en partie grâce à l'épaisseur d'isolant utilisée lors des rénovations. Aucune donnée rétrospective n'existe mais une analyse d'un échantillon EDF R&D permet d'obtenir quelques informations sur l'épaisseur d'isolation des murs en fonction de la date de rénovation (Figure 35). L'analyse de cet échantillon non représentatif (maisons individuelles rurales) et biaisé (épaisseur indiquée de mémoire) montre un gain moyen de seulement 2 cm d'épaisseur d'isolant entre les rénovations de 1975 et de 2010.

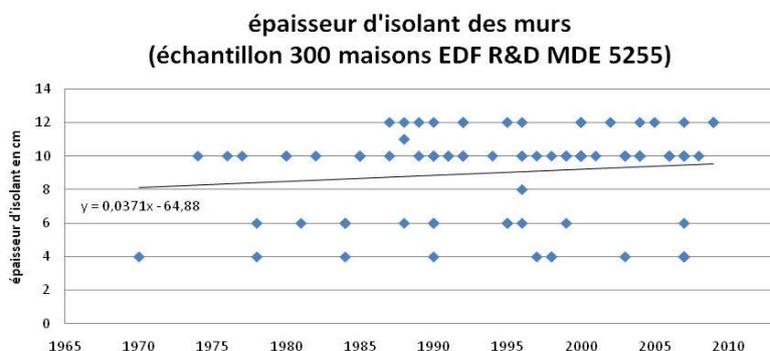


Figure 35 : Evolution de l'épaisseur d'isolant utilisé pour l'isolation des murs (estimation à partir d'un échantillon EDF R&D de maisons rurales, non représentatif de la population nationale)

Diffusion d'équipements améliorant la performance thermique des logements depuis 1950 (Royaume-Uni)

Concernant la diffusion d'autres équipements performants, si aucune donnée rétrospective structurée et publique ne semble disponible en France, une étude approfondie des principales technologies du secteur résidentiel a été menée au Royaume-Uni (Figure 36). Celle-ci montre qu'il a généralement fallu entre 20 et 50 ans aux technologies liées à l'amélioration de la performance thermique des logements pour atteindre la saturation du marché. On observe que la vitesse de diffusion la plus lente est celle liée à l'isolation des murs creux, touchant à la structure du bâti, suivie des technologies liées aux menuiseries (double vitrage, calfeutrage), dont la vitesse de diffusion est sensiblement la même que celle du chauffage central, et que les technologies pénétrant le plus rapidement le marché sont celles pouvant être réalisées sans changer en profondeur la structure existante (isolation des combles) ou intervenant lors du renouvellement d'équipements à faible durée de vie (isolation des chauffe eau).

Même si les logements et le marché de la rénovation de ceux-ci présentent de nombreuses différences entre la France et le Royaume-Uni, on peut cependant supposer que les résultats de l'étude présentée reflètent des ordres de grandeur applicables au cas français. Ainsi, on peut estimer l'ordre de grandeur de la durée nécessaire à la saturation de la pénétration des technologies énergétiquement efficaces concernant les équipements suivants :

- murs : 80 ans (par extrapolation de la courbe de pénétration actuelle)
- menuiseries (fenêtres, portes) : 50 ans
- réseau de distribution de chaleur du système de chauffage : 50 ans
- chauffe-eau : 25 ans
- combles : 20 ans

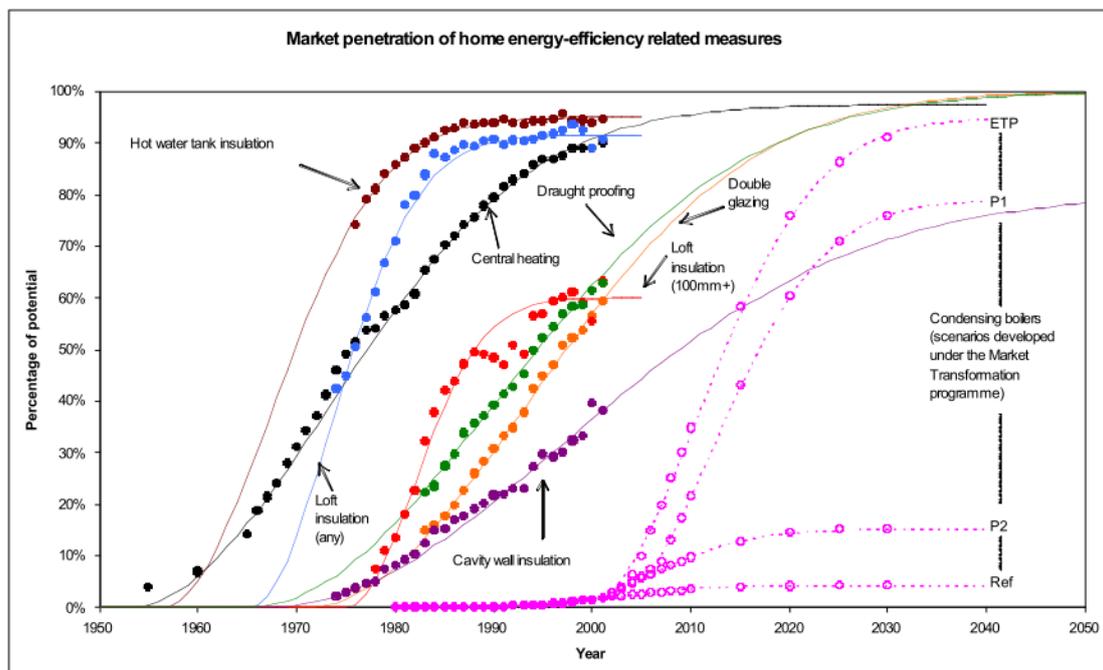


Figure 36 : Pénétration dans le marché du Royaume-Uni d'équipements énergétiquement performants [BRE, 2003]

Evolution des pratiques quotidiennes de chauffage

En ce qui concerne l'utilisation des équipements de chauffage et de la ventilation par les ménages, les données rétrospectives disponibles en France concernent la température intérieure moyenne (Figure 37), la réduction de la température de nuit (Figure 38) et l'adaptation de l'aération à la température extérieure (Figure 39). Ces données ne sont récoltées par le CEREN que depuis 1990, sur la base de déclarations par les ménages de leurs panels. Aucune donnée antérieure concernant la France n'ayant été trouvée, une estimation des évolutions plus anciennes peut être faite à partir de données du Royaume-Uni (Figure 40). Ces dernières n'ont pas été mesurées ou déclarées mais calculées à partir de la consommation de chauffage des ménages britanniques. La température indiquée sur la figure est celle qui, si elle était répartie de manière homogène au sein de chaque logement et au cours de toute l'année, permettrait d'obtenir à l'aide d'un modèle de calcul thermique la consommation de chauffage observée réellement à l'échelle nationale. Elle ne reflète donc pas la température dans les pièces les mieux chauffées des logements mais cette température couplée aux pratiques de gestion spatio-temporelle de la température et de l'aération. En plus de faire apparaître une augmentation progressive mais importante du confort thermique moyen au sein des logements, cette figure met en relief la corrélation entre les comportements de chauffage et la rigueur du climat, la température extérieure moyenne étant aussi indiquée sur la figure. Il est important de savoir que les mesures de températures, lorsqu'elles existent, sont très généralement réalisées uniquement dans la pièce principale du logement. Elles indiquent alors non pas la température moyenne du logement mais celle de la pièce présentant a priori le plus haut niveau de confort thermique. Elle ne donne donc pas d'information sur la façon dont les ménages gèrent la température entre les différentes pièces du logement.

On retiendra des valeurs présentées que, si les températures moyennes de confort (mesurées, déclarées ou calculées) évoluent généralement de manière lente (augmentation de 0,5 à 1°C par décennie), elles peuvent localement évoluer plus rapidement⁴⁰. Concernant la gestion spatio-temporelle de la température et de l'aération, les pratiques semblent plus dynamiques, avec des variations d'occurrence d'un geste d'économie d'énergie au sein de la population pouvant atteindre 10% par an. Ceci porte à croire que l'adaptation de la consommation de chauffage à des évolutions rapides de contexte (climat, prix des énergies) est plus réalisé à l'aide des pratiques de gestion (adaptation de la température la nuit ou dans les pièces les moins utilisées, adaptation de l'aération) qu'à l'aide d'une adaptation de la température de confort dans la pièce principale de vie.

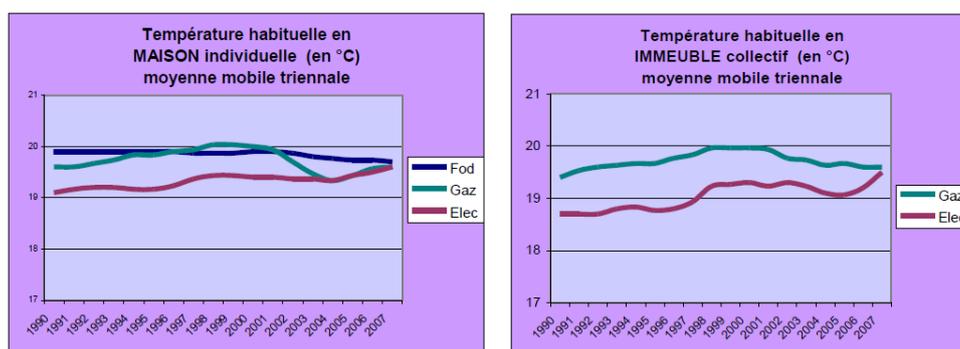


Figure 37 : Température habituelle dans les logements français (moyennes triennales) [CEREN, 2008b]

⁴⁰ Par exemple : augmentation de 2°C entre 1985 et 1990 en Angleterre, baisse de plus de 0,5°C entre 2001 et 2004 dans les maisons chauffées au gaz en France

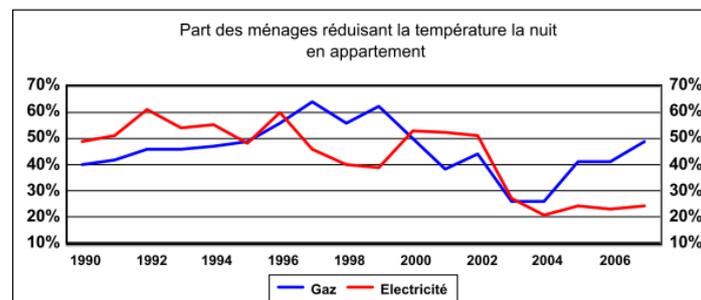
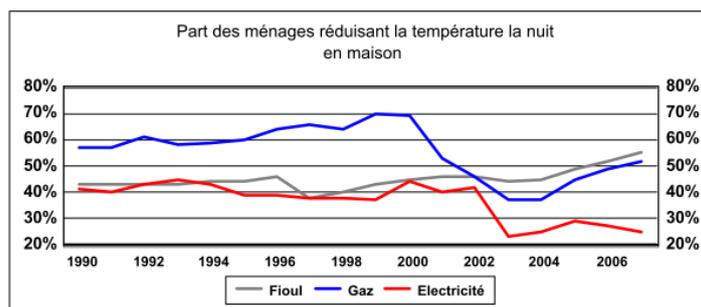


Figure 38 : Part des ménages réduisant la température la nuit [CEREN, 2008b]

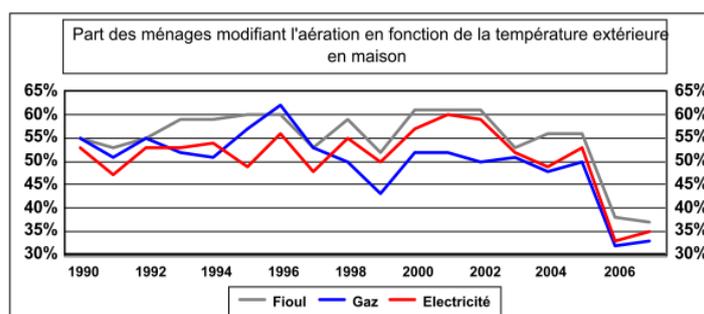


Figure 39 : Part des ménages modifiant l'aération de leur logement en fonction de la température extérieure [CEREN, 2008b]

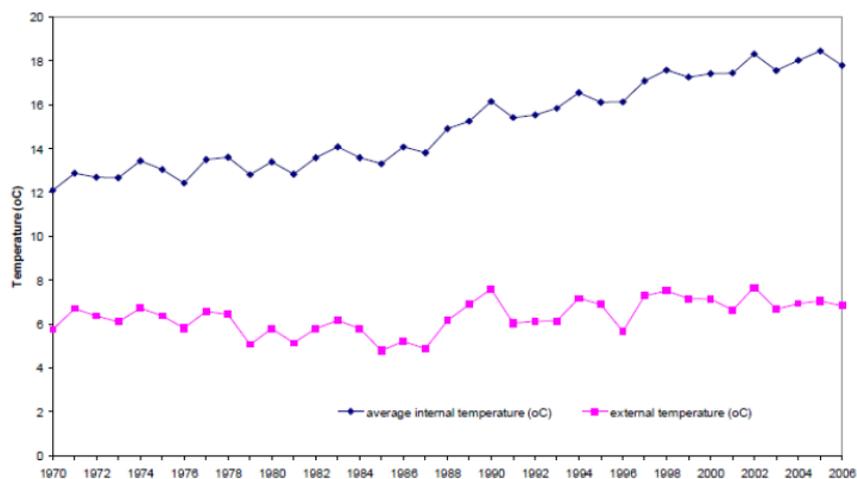


Figure 40 : Température intérieure calculée à partir des consommations de chauffage observée (en bleu) et température moyennes extérieures en hiver (en rose), Royaume-Uni [BRE, 2008]

Diffusion des équipements non thermiques

Concernant les usages qui constituent le poste « électricité spécifique », peu de données publiques retracent de façon homogène et régulière les évolutions de taux d'équipement ou de performance sur les dernières décennies à l'échelle de la France. Pour y remédier, il est nécessaire de recouper les mesures réalisées par des entités différentes, sur des échantillons dont les caractéristiques ne sont pas constantes d'une étude à l'autre. Enfin, les données disponibles ne remontent que rarement avant 1990 ce qui limite la portée de l'analyse rétrospective. Des données plus anciennes, à l'échelle de l'Europe, de la Suède et des États-Unis sont présentées dans le prochain encart et permettent une estimation en ordre de grandeur de ce qui aurait pu être observé en France avant 1990.

En France, en ce qui concerne l'usage éclairage, le nombre moyen de sources lumineuses par logement a plus que doublé entre 1992 (13 par logement) et 2004 (28,3 par logement), alors que la taille des logements n'augmentait que de 25%. On peut remarquer la variété des sources nécessaires pour retracer l'évolution de cette variable entre ces deux dates : celles de 1992 peuvent être trouvées dans [CLIP, 1997], celles de 1995 dans [Enertech, 1998], celles de 1999 dans [ADEME, 1999] et celles de 2004 dans [EDF-ADEME-Enertech, 2004]. L'évolution des parts de marché par technologie d'éclairage (ampoules à incandescence, lampes fluo-compactes, halogènes...) est peu documentée avant 2000 et semble ne présenter que des variations de moins de 1% par an (surtout au profit des halogènes sur la période 1999-2004).

Pour certains autres usages de la catégorie « électricité spécifique », des données homogènes, détaillées et recouvrant une longue période peuvent être trouvées à l'échelle de l'Europe dans une synthèse de la littérature internationale réalisée par Calwell (2010). Ainsi, pour le « froid alimentaire », on peut observer sur la Figure 41 que le taux d'équipement a évolué lentement et de manière continue (augmentation d'un peu moins de 20% tous les 10 ans), alors que la performance des équipements et leur volume évoluent plutôt par palier, alternant de courtes périodes de forte variation (20% en 5 ans) et de longues périodes de quasi stagnation (moins de 5% en 10 ans). On notera cependant que l'évolution des ventes ne résulte pas uniquement de l'achat des premiers équipements dans les logements mais aussi du remplacement des équipements existants.

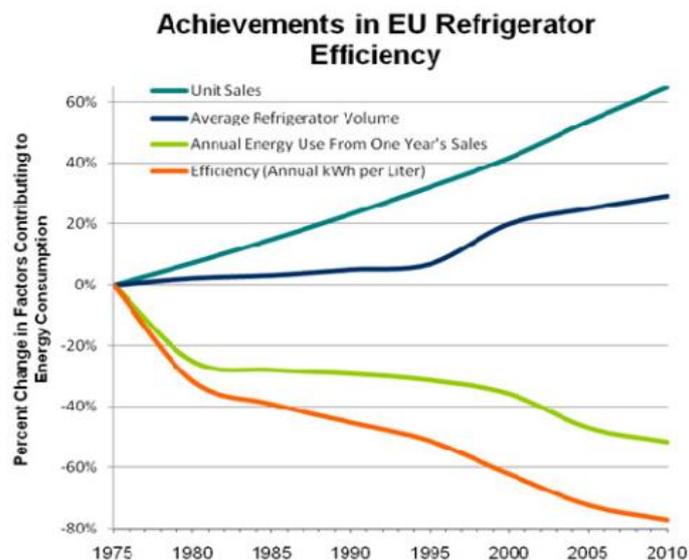


Figure 41 : Evolution des principaux indicateurs relatifs aux réfrigérateurs en Europe depuis 1975 : nombre d'unités vendues, volume des unités, efficacité, consommation énergétique des unités vendues en un an [Calwell, 2010]

Diffusion d'une sélection d'équipements domestiques depuis 1900 (Etats-Unis) et depuis 1950 (Suède)

A défaut de données anciennes en France ou en Europe, on peut trouver aux États-Unis des mesures de taux de pénétration de technologies, dont certaines appartiennent à la catégorie « électricité spécifique », remontant au début du XX^e siècle (Figure 42), ainsi qu'une estimation de l'évolution du nombre d'équipements dédiés au lavage, à la cuisson, à l'information et au divertissement entre 1950 et 2000 (Tableau 2). Ces données ne correspondent pas exactement à celles de la France concernant les dates d'arrivée des équipements sur le marché mais l'ordre de grandeur relatif à la vitesse de diffusion de ces équipements peut être supposé semblable entre la France et les États-Unis. Si les données liées à la taille, l'efficacité et l'usage des équipements ne sont pas répertoriées, on peut cependant retenir que toutes les technologies apparues dans les 40 dernières années ont eu des vitesses de pénétration (mais aussi de disparition dans le cas des magnétoscopes) dans le marché très élevées, de l'ordre de plusieurs dizaines de pourcent en cinq ans. L'introduction de nouveaux usages de l'électricité semble ainsi présenter, de manière générale, des dynamiques beaucoup plus rapides que celles observées pour le chauffage, l'ECS ou la cuisson.

Market Penetration of Selected Technologies 1900 - 2008

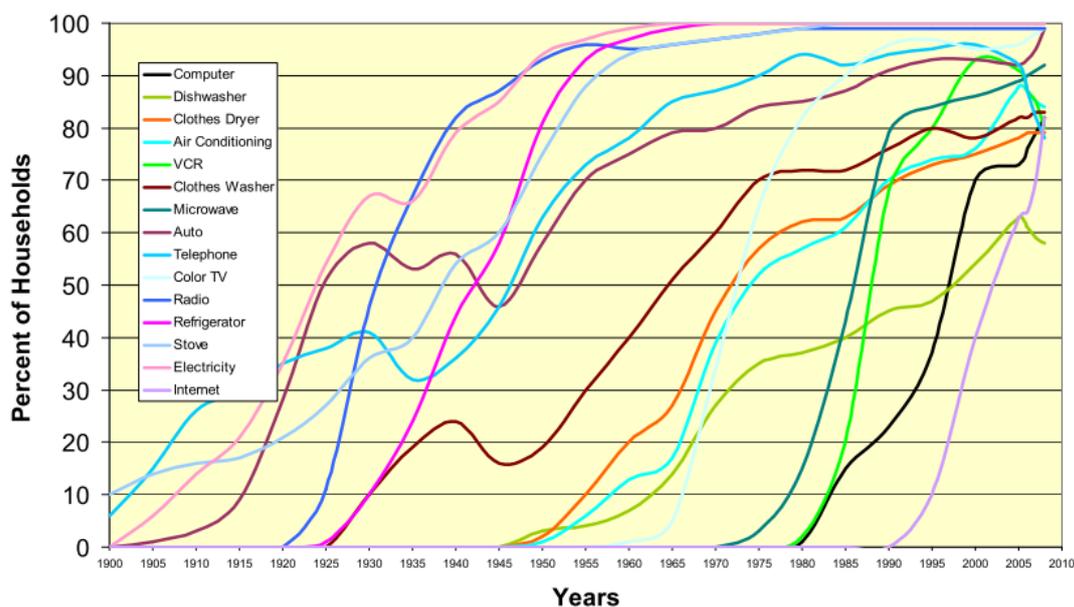


Figure 42 : Pénétration dans le marché d'une sélection de technologie depuis 1900 aux États-Unis [Lushetsky, 2008]

Service	1950	2000
Lavage et séchage des vêtements	1	3
Cuisson et alimentation	2	10,3
Information et divertissement	2	18

Tableau 2 : Evolution du nombre moyen d'équipements en Suède [Linden, 2009]

2.2.3. Évolution des déterminants indirects

Les déterminants indirects influencent l'évolution des consommations d'énergie par le biais de leurs effets sur les déterminants directs. C'est pourquoi l'observation de leurs évolutions passées ne peut permettre que de révéler des corrélations avec celle des consommations d'énergie. Ces corrélations observées par le passé peuvent avoir, au mieux, le statut de loi empirique dont il est permis de questionner la validité future. En effet, un problème inhérent aux sciences sociales est la difficulté de répliquer les phénomènes étudiés, ce qui est en particulier dû au processus d'apprentissage lorsque l'on veut étudier la même population, et aux différences de contexte, difficilement mesurables, lorsque l'on souhaite répliquer une mesure sur une autre population. Le chapitre suivant montrera d'ailleurs que les valeurs numériques de ces lois empiriques varient sensiblement d'un pays à un autre, et d'une période à une autre au sein d'un même pays. D'autre part, l'observabilité des corrélations passées est par nature limitée aux données disponibles et de nombreuses variables de contexte n'ont pas été mesurées (de manière quantitative ou qualitative) de manière aussi régulière et rigoureuse que l'ont été les consommations d'énergie et les variables économiques telles que le prix des énergies ou la richesse de la population. Il est donc essentiel de garder en tête que les corrélations qui pourront être révélées entre l'évolution des déterminants indirects (présentée dans cette section) et celle des consommations d'énergie ne présentent pas le caractère intemporel des liens entre déterminants directs et consommations, issus des lois physiques.

Revenu des ménages

Sur la période 1975-2010, la richesse moyenne des français (produit intérieur brut par habitant) a augmenté d'environ 70%, de manière très régulière (Figure 43a) jusqu'à une légère inflexion en 2008 et 2009. On peut observer que cette augmentation est sensiblement la même sur cette période que celle de la surface par personne, ce qui peut expliquer pourquoi le rapport entre l'indice des loyers et le revenu disponible moyen est resté relativement stable depuis 35 ans (Figure 44). Sur la même période, l'indice de Gini, quantifiant l'inégalité de la répartition des richesses, diminue de manière régulière entre 1970 et 1990 puis oscille autour de la valeur de 1990 (Figure 43b). On peut en déduire que l'augmentation moyenne de la richesse n'a pas été seulement due à l'augmentation de la richesse des classes les plus aisées mais que l'on a assisté à une augmentation assez généralisée du niveau de vie de la population jusqu'en 2000. Ceci s'est traduit, entre autres, par une augmentation de la surface des logements et par l'augmentation du taux d'équipements domestiques (nécessitant de l'énergie pour la plupart d'entre eux).

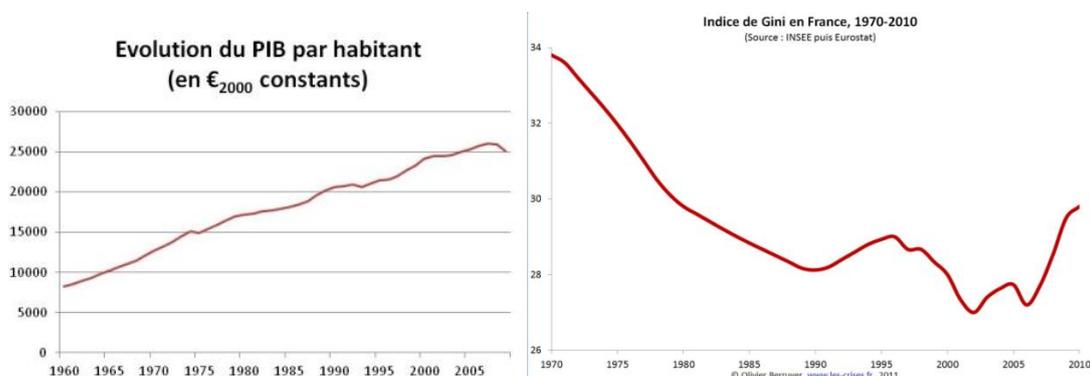


Figure 43a et 43b : Evolution du PIB par habitant en France entre 1960 et 2009 [Banque Mondiale, 2011] (43a, à gauche) et évolution de l'indice de Gini en France entre 1970 et 2010 [Berruyer, 2012] (43b, à droite)

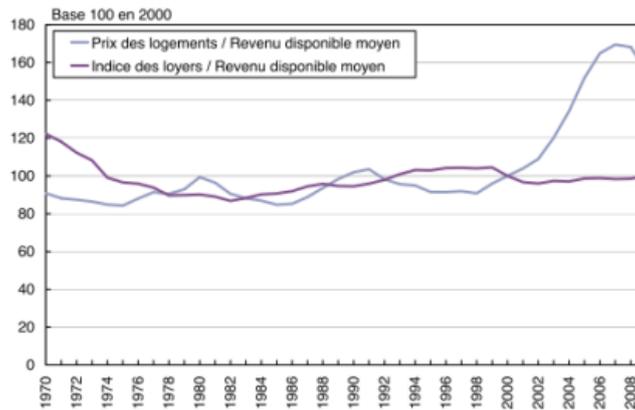
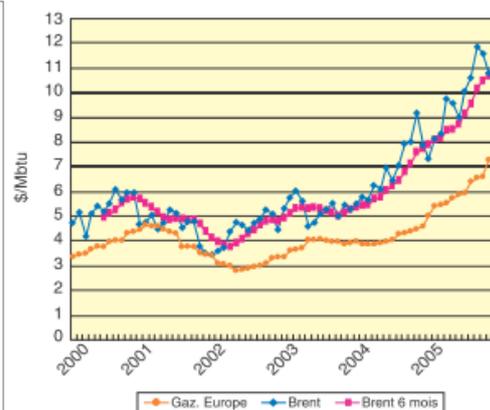
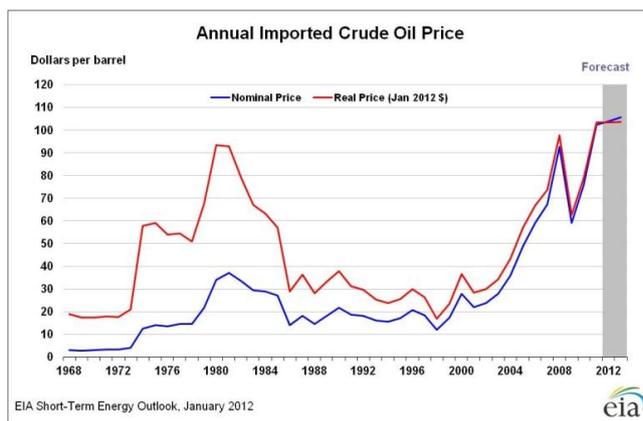


Figure 44 : Ratios prix des logements et des loyers sur revenu disponible moyen [CAS, 2011]

Prix des énergies sur le marché international

Le prix des énergies sur le marché international est un déterminant indirect sur lequel les ménages et l'État ont relativement peu d'influence. En effet, la consommation de la France n'est pas suffisamment importante à l'échelle mondiale pour que ses variations puissent influencer sensiblement la formation des prix. Une rétrospective des prix du pétrole⁴¹, présentée dans la Figure 45a, permet d'observer trois périodes d'augmentation brusque (plusieurs dizaines de pourcents par an), définissant la notion de choc pétrolier, en 1973, 1979 et 2008. Si on observe bien la corrélation entre les deux derniers chocs pétroliers et la diffusion d'équipements performants dans le secteur résidentiel français (années 1980 et fin des années 2000), l'absence de données semblables empêche cette observation en ce qui concerne premier choc pétrolier. Le prix du gaz sur les marchés internationaux, quant à lui, est fortement corrélé à celui du pétrole (Figure 45b), ce qui s'explique par le mode de calcul⁴² dominant du prix des contrats d'approvisionnement à long terme, prenant explicitement le prix du pétrole en compte pour définir un prix compétitif pour le gaz. On observe ainsi sur cette figure que le prix du gaz suit celui du pétrole avec un léger décalage temporel, tout en lui restant sensiblement inférieur.



Figures 45a et 45b : Evolution du prix du pétrole importé aux Etats-Unis depuis 1968 [EIA, 2012] (45a, à gauche), et évolution comparée du prix du gaz importé en Europe, du Brent et du Brent à 6 mois [IFP, 2006] (45b, à droite)

⁴¹ La rétrospective des prix du pétrole importé par la France n'ayant été trouvée, le prix utilisé pour cette rétrospective est celui du pétrole importé par les Etats-Unis.

⁴² Méthode dite « net back » ou « netback ». Pour plus de détails, voir par exemple [Maurice, 2001] ou [IFP, 2006].

Prix des énergies vendues aux ménages

Si le prix du pétrole et celui du gaz pour les particuliers dépendent essentiellement de leur prix sur le marché international, des taxes nationales qui y sont appliquées et du coût du transport et de la distribution, le prix de l'électricité pour les particuliers dépend quant à lui aussi du mix électrique du pays considéré. En effet, si l'électricité à l'échelle mondiale est essentiellement produite à partir de charbon, de pétrole et de gaz (auquel cas son prix de vente dépendra de celui de ces trois énergies) il est aussi possible de produire de l'électricité à partir d'énergie nucléaire ou de ressources locales (auquel cas le coût de production de l'électricité est sensiblement plus indépendant des prix des énergies fossiles). Or, entre 1970 et 2010, le mix énergétique français a très fortement évolué, comme l'illustre la Figure 46. En effet, les années 1970 ont été le témoin d'un choix fort de politique énergétique, consistant en une orientation massive du mix français de production électrique vers le nucléaire, solution visant (entre autres) à limiter la dépendance énergétique nationale aux produits pétroliers et gaziers. Ce choix politique a mené à un fort développement de la filière nucléaire au cours des années 1980, puis de manière plus modérée au cours des 20 années suivantes.

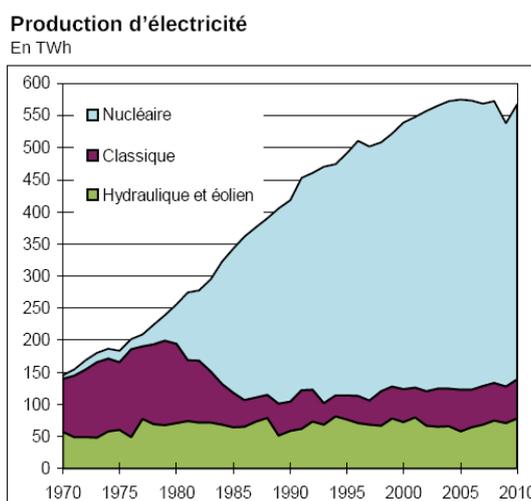


Figure 46 : Evolution de la production électrique totale et du mix électrique en France depuis 1970 [SOeS, 2011]

Cette évolution forte et rapide du mix électrique français a eu deux conséquences majeures sur le secteur résidentiel : une forte baisse du prix de l'électricité et une substitution de l'électricité aux énergies fossiles dans de nombreux usages. On peut ainsi observer dans la Figure 47 que le prix de l'électricité pour les ménages a présenté une baisse assez constante sur la période de déploiement de la capacité nucléaire (1980-2000). D'autre part, ce prix est devenu progressivement assez indépendant de celui des énergies fossiles. Ainsi, on peut observer sur la Figure 47 que le prix de l'électricité est resté relativement stable (en euros constants) depuis le début de la dernière décennie alors que celui du gaz et du fuel domestique ont augmenté d'environ 50%. Concernant le prix aux particuliers des combustibles fossiles (gaz, fuel domestique), on peut observer que leurs variations sont moins fortes que celles observées sur les marchés internationaux. Ceci s'explique par le fait qu'une partie du prix de vente ne dépend pas du prix du pétrole (coûts de transport et distribution) et que la taxe intérieure sur les produits pétroliers (TIPP) est calculée par rapport au volume de vente et non au prix de vente.

Prix des énergies de chauffage (énergie finale en kWh PCI, euros courants 2010, abonnement compris)

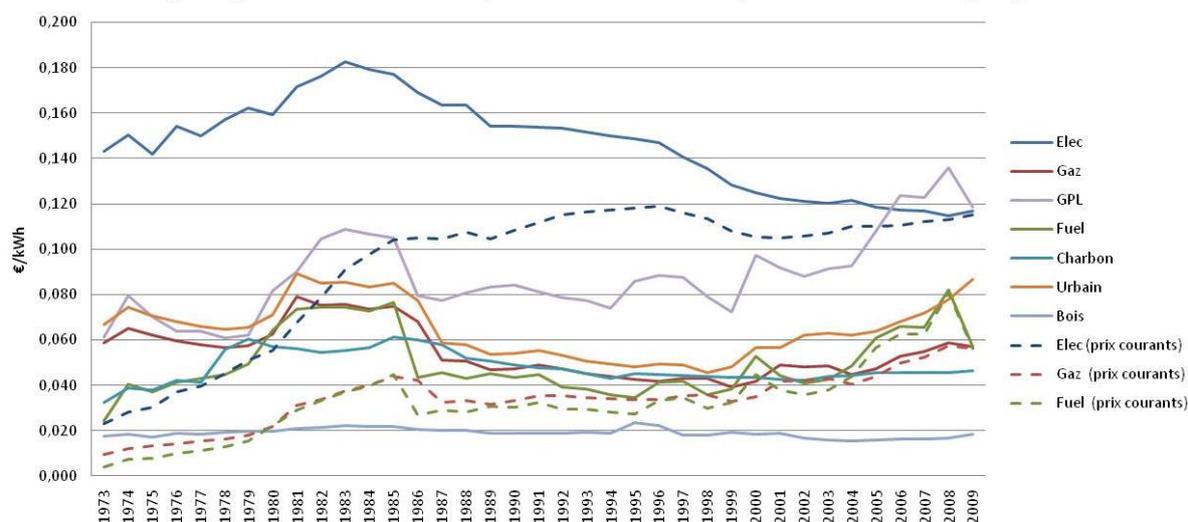


Figure 47 : Prix aux particuliers des énergies de chauffage, par kWh PCI d'énergie finale, abonnement compris [CEREN, 2011]

Le développement de la filière nucléaire a aussi mené au développement industriel d'équipements consommant de l'électricité pour des usages très majoritairement délivrés à partir d'énergie fossile avant les années 1970, donc en particulier les usages thermiques. Cette substitution d'énergie s'est plus principalement produite dans les services fournis dans les bâtiments, comme on peut le voir dans la Figure 48. Dans le secteur résidentiel, c'est en particulier le cas de l'eau chaude sanitaire et du chauffage, services pour lesquels les développements industriels ont permis l'apparition sur le marché d'équipements fonctionnant à l'électricité, à des prix favorisant la substitution d'énergie.

Consommation finale d'électricité par secteur (corrigée du climat)

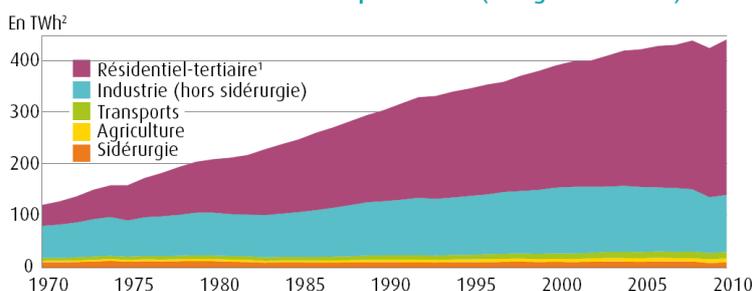


Figure 48 : Consommation finale d'électricité par secteur, corrigée du climat [SOeS, 2011]

Enfin, l'introduction massive d'énergie d'origine nucléaire dans le mix électrique français a aussi eu pour conséquence une diminution d'un facteur 9 du contenu carbone de l'électricité entre 1973 et 1993 (Figure 49).

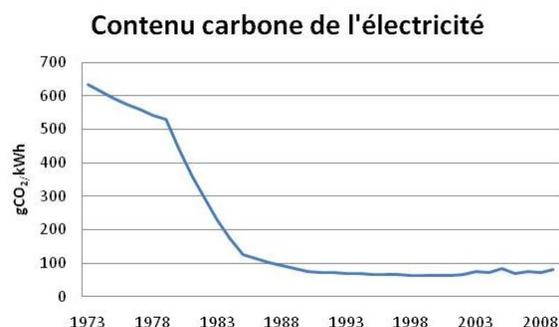


Figure 49 : Evolution du contenu carbone de l'électricité en France (en gCO₂/kWh), source : [CEREN, 2011]

Prix des équipements

Un autre déterminant indirect de nature économique est celui du prix des équipements, critère fondamental des choix technologiques des ménages. Malheureusement, l'information concernant le prix des équipements est particulièrement hétérogène. Ainsi, même pour des équipements actuels, l'estimation de leur prix peut varier d'un facteur trois selon la source d'information [Laurent et al., 2007]. Aucune étude rétrospective de l'évolution du prix des équipements résidentiels détaillé par technologie ne semble faire référence en France, ce qui représente un manque bibliographique important pour l'analyse rétrospective des choix technologiques des ménages.

Subventions aux équipements énergétiquement performants

Les chocs pétroliers des années 1970 ont eu pour conséquence la mise en place d'une politique énergétique dans le secteur résidentiel favorisant l'installation d'équipements de chauffage performants. Ainsi, des incitations substantielles ont été proposées au cours des années 1980 [Futuribles], ce qui peut expliquer le pic d'installation d'équipements performants observés sur cette période (voir section précédente). L'augmentation des prix du pétrole ainsi que la prise de conscience des enjeux climatiques ont également mené à la mise en place du Crédit d'Impôts Développement Durable (CIDD) en 2005, proposant un remboursement de 15% à 50% sur les équipements répondant à un ensemble de critères de performance. Cette politique récente de subventions peut expliquer le deuxième pic d'installation d'équipements performants. Un autre pan de la politique énergétique nationale pour la limitation des consommations d'énergie dans le secteur résidentiel est celui de l'information et de la sensibilisation. Ainsi, des campagnes d'information sur la limitation de la consommation inutile d'énergie (« chasse au gaspi ») ont été menées de manière assez soutenues au cours des années 1980 pour s'atténuer pendant le contre-choc pétrolier des années 1990 et reprendre en intensité au cours de la dernière décennie [Futuribles].

Par ailleurs, depuis 2006, les vendeurs d'énergie sont incités à promouvoir des actions d'efficacité énergétique chez leurs clients par le dispositif des certificats d'économie d'énergie⁴³. Cette promotion a été réalisée en partie en offrant aux ménages des subventions, sous différentes formes, pour l'achat d'équipements énergétiquement performants. Cet instrument a donc venu s'ajouter au CIDD pour réduire le surcoût associé aux équipements énergétiquement performants.

⁴³ Défini par les articles 14 à 17 de la loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique (loi POPE)

Réglementations thermiques

Le premier choc pétrolier a eu pour conséquence la mise en place, en 1974, de la première réglementation thermique (RT) appliquée à la construction de logements. Celle-ci a imposé des niveaux de performance minimum concernant l'isolation des logements. En 1977, ces exigences ont été renforcées de 20% pour le chauffage électrique, puis la RT de 1982 a été marquée par une augmentation des exigences pour toutes les énergies de chauffage ainsi que la prise en compte des apports énergétiques (apports solaires et internes⁴⁴) et des déperditions par la ventilation (ce qui a permis le calcul d'un besoin de chaleur en énergie utile). Ensuite, la RT de 1988 a vu l'introduction des consommations d'ECS et des auxiliaires (pompes de circulation d'eau, ventilateurs...) ainsi que la fixation d'exigences exprimée en unités énergétiques équivalentes (UEE). Cette unité était calculée à partir d'une exigence en énergie finale pondérée par un coefficient dépendant du prix de l'énergie de chauffage utilisée. En 2000, la réglementation thermique évolue de nouveau en renforçant les exigences de consommation maximale des logements, cette fois exprimées en énergie primaire mais fixant un seuil différent pour les logements chauffés à l'électricité par rapport à ceux chauffés à l'aide de combustibles. La RT 2005 a quant à elle élargi le périmètre des usages pris en compte à l'éclairage et à la climatisation, tout en durcissant encore les exigences vis-à-vis des consommations maximales, cette fois exprimées en énergie primaire par m² par an (avec des exigences moins élevées pour l'électricité que pour les énergies fossiles). Enfin, la réglementation thermique 2012 fixe une exigence de 50 kWh/m².an pour l'ensemble des usages pris en compte dans la RT 2005, quelle que soit l'énergie de chauffage.

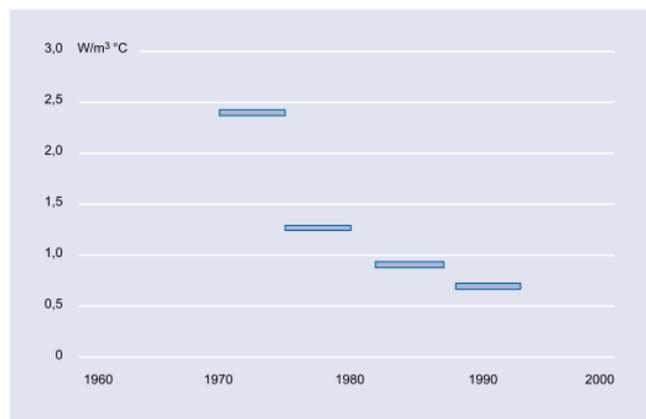


Figure 50 : Evolution de la contrainte réglementaire concernant les déperditions thermiques des logements, exprimés par le coefficient G, en W/m³.°C [Traisnel et al., 2001]

Si les réglementations thermiques ont surtout ciblé les logements neufs en France, la directive européenne sur la performance des bâtiments [EPBD, 2002] a imposé aux États Membres la mise en place d'une réglementation thermique concernant la rénovation des logements existants. L'application de cette directive s'est traduite en France en 2007 par une réglementation thermique ciblant les logements existants [JO, 2007]. Celle-ci fixe, selon la taille des bâtiments et le montant des travaux, un seuil minimum de performance par élément rénové ou un seuil de consommation maximale (en énergie primaire) sensiblement équivalent à celui de la RT 2005 appliquée aux logements neufs. On notera que la contrainte de performance sur les éléments d'isolation ne s'applique que dans le cas où de l'isolation est installée, il est donc encore possible de rénover une toiture ou un mur sans installer d'isolation.

⁴⁴ Sont appelés apports internes de chaleur la production de chaleur dans le logement par des sources qui ne sont pas le système de chauffage, comme par exemple la chaleur dégagée par les occupants ou les équipements.

Pyramide des âges

Un déterminant indirect souvent mentionné pour expliquer certaines différences dans l'usage des équipements est celui de l'âge. En effet, l'âge est fortement corrélé à l'activité professionnelle exercée par les personnes et donc à la présence de celles-ci au sein de leur logement. Les personnes retraitées n'étant plus contraintes par des déplacements professionnels, le temps passé dans le logement augmente, ce qui pousse à la hausse la demande moyenne de services à l'intérieur du logement. Par ailleurs, les personnes âgées ayant généralement une activité physique relativement réduite, leur besoin de température intérieure pour maintenir un confort satisfaisant est généralement plus élevé⁴⁵. D'autre part, l'âge est fortement corrélé au taux de mortalité. Ainsi, il est plus fréquent de trouver des ménages à une seule personne chez les personnes âgées. Or, une partie des services fournis à l'intérieur d'un logement peuvent être consommés de manière indépendante du nombre de personnes. Pour un même logement, la consommation par personne est donc généralement plus élevée lorsqu'il n'y a qu'une personne au sein du logement que lorsqu'il y en a plusieurs. Sur la période de rétrospective choisie, la distribution des âges a changé de manière significative, comme le montre la Figure 51. On peut ainsi observer que la part de la population âgée de plus de 60 ans a augmenté sensiblement, ce qui peut être l'un des facteurs explicatifs de l'augmentation progressive de la température moyenne des logements et de l'augmentation de la surface moyenne par personne sur la période 1975-2010.

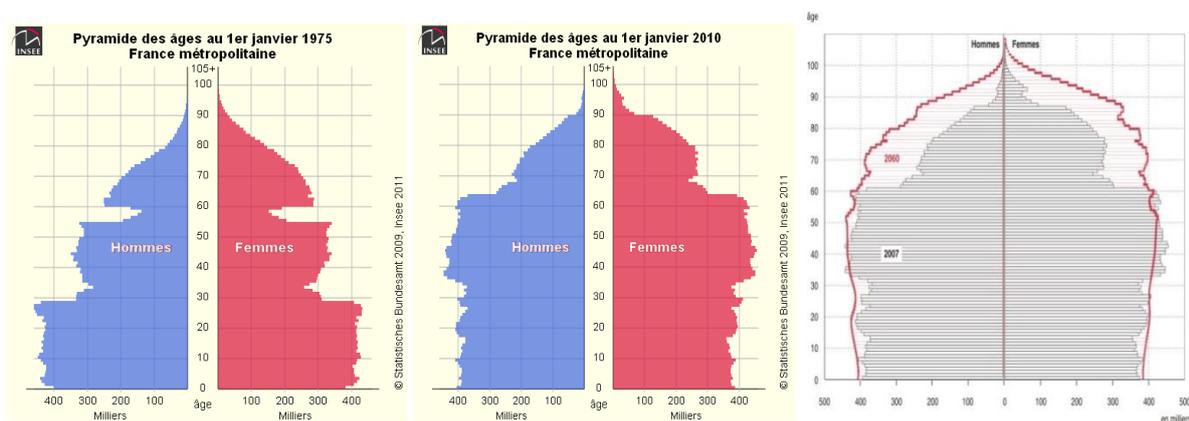


Figure 51 : Pyramides des âges en 1975, 2010 et projections 2060 [INSEE 2012]

Environnement socio-culturel

Le dernier déterminant indirect majeur des consommations énergétiques dans le secteur résidentiel est l'environnement socioculturel. La période 1970-2010 a été marquée par l'image d'une société de consommation dont une résultante a été l'augmentation des normes de confort, de commodité et de propreté [Shove, 2003]. D'autre part, l'évolution du mode de consommation a aussi pu avoir un impact sur les déterminants directs. Par exemple, l'essor des hypermarchés (croissance continue entre 1970 et 2000) a impliqué des déplacements alimentaires moins fréquents et de plus gros volume, nécessitant alors un volume de conservation de ces aliments plus important, ce qui pourrait être l'un des facteurs explicatifs de l'augmentation de la taille des réfrigérateurs.

⁴⁵ En effet, la sensation de confort thermique ne dépend pas uniquement de la température de l'air intérieur mais aussi de l'activité physique de la personne. Ainsi, pour avoir la même sensation de confort thermique, une personne ayant une activité moyenne (par exemple travaux ménagers) dans un logement a besoin d'une température d'air de 4 à 5°C inférieure par rapport à une personne au repos assis [ISO, 2005].

3. Premiers enseignements pour une modélisation prospective technico-économique à l'horizon 2030-2050

Les deux premières sections de ce chapitre ont permis de s'imprégner des ordres de grandeur caractéristiques du volume des usages de l'énergie dans le secteur résidentiel et de leur dynamique passée. Cette section propose d'utiliser ces éléments pour déterminer une hiérarchie vis-à-vis de la nécessité d'intégrer les différents usages de l'énergie et les mécanismes les liant aux déterminants indirects dans un modèle technico-économique de la dynamique de demande d'énergie du secteur résidentiel. Ces premiers enseignements ont servi de base au développement, durant celle la thèse, des modèles présentés dans le premier chapitre de la partie III.

3.1. Quels usages représenter en priorité

La simplification de la réalité observée étant une composante de la construction d'un modèle, il est envisageable de ne pas représenter tous les usages de l'énergie dans le secteur résidentiel. Une hiérarchie des usages à représenter dans un modèle technico-économique prospectif de consommation énergétique peut être effectuée à partir des éléments suivants :

- le volume « tendanciel » de consommation énergétique de ces usages à l'horizon temporel étudié : le volume de consommation actuel de l'usage est insuffisant pour estimer son importance dans le futur, il est nécessaire de prendre en compte la croissance de cet usage, d'où le recours à la projection tendancielle comme première approximation du volume futur.
- l'inertie des déterminants directs : plus un usage est inerte plus la description de ses déterminants directs dans le futur peut être réalisée à partir de l'information actuellement disponible, et donc plus il est pertinent d'utiliser des descriptions explicites des technologies.
- la sensibilité aux stimuli économiques : plus un usage semble avoir été sensible par le passé aux variations des déterminants indirects de nature économique (par exemple le revenu des ménages ou les prix des énergies et des équipements) plus il est justifié d'utiliser des mécanismes économiques pour simuler son évolution future.

La Figure 52 propose une représentation des usages principaux de l'énergie dans le secteur résidentiel selon ces trois axes, permettant ainsi de hiérarchiser la nécessité de leur intégration dans un modèle technico-économique. La justification de la position de chaque usage est détaillée dans les paragraphes suivants.

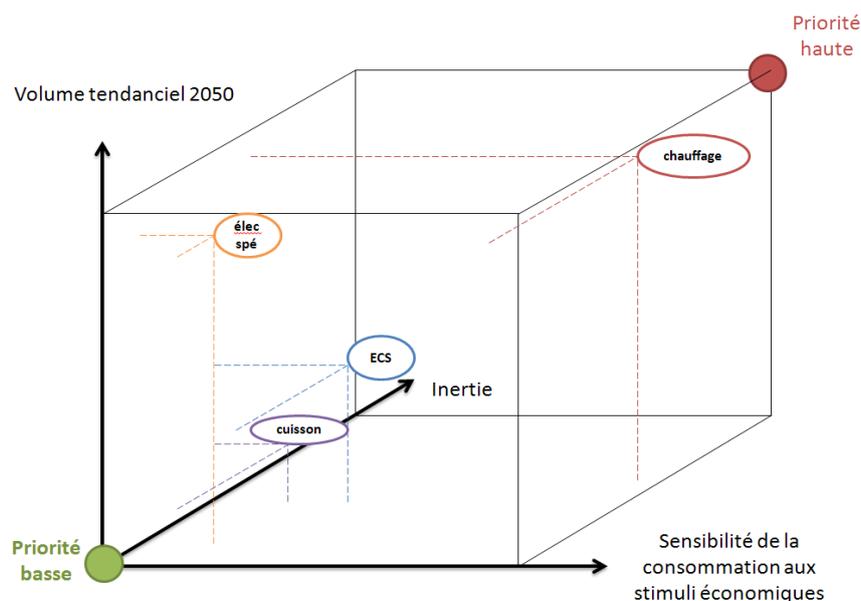


Figure 52 : priorité de représentation des usages dans un modèle prospectif technico-économique des consommations énergétiques du secteur résidentiel français à l’horizon 2050

Le premier axe est le volume des consommations énergétiques que représenterait l’usage considéré si celles-ci évoluaient pendant les 40 prochaines années de la même manière qu’elles ont évolué dans le passé, d’où le nom de l’axe vertical : « volume tendanciel 2050 ». Comme les variations de consommation par usage lors de la dernière décennie ont été sensiblement différentes des variations moyennes depuis 1975, deux projections sont proposées : une basée sur le taux de croissance annuel moyen (TCAM) calculé sur la période 1975-2009 et une sur le TCAM de la période 1999-2009. Le Tableau 3 présente les résultats de ces projections tendanciennes, et l’on peut observer que, quelle que soit la période de calcul du TCAM, le poste électricité spécifique et le poste chauffage atteignent des niveaux similaires en 2050, alors que l’ECS et la cuisson ont des niveaux sensiblement plus faibles. La représentation du chauffage et de l’électricité spécifique apparaît donc prioritaire dans l’optique de la construction d’un modèle prospectif à l’horizon 2050 vis-à-vis de leur potentiel volume futur.

Usage	Consommation 2009 (en TWh d’énergie finale)	TCAM 1975-2009	TCAM 1999-2009	Consommation « tendancielle 2050 » (en TWh d’énergie finale) basée sur le TCAM de 1975-2009	Consommation « tendancielle 2050 » (en TWh d’énergie finale) basée sur le TCAM 1999-2009
Chauffage (de base)	332	0,00%	-0,89%	332	232
Electricité spécifique	74	3,88%	3,13%	340	255
ECS	50	1,64%	0,06%	95	51
Cuisson	27	0,78%	-0,04%	37	27

Tableau 3 : Projections tendanciennes de consommation énergétique par usage en 2050 (calculs personnels)

Le deuxième axe choisi est l’inertie des déterminants physiques directs associés aux usages étudiés. Plus cette inertie est importante moins il existe d’incertitude vis-à-vis de la description technologique future du système étudié et donc plus une simulation déterministe apparaît pertinente. A l’inverse, moins l’évolution des équipements et de l’usage étudié est inerte, plus l’incertitude sur sa description technologique future est grande, et plus son étude prospective tend à être exploratoire et à décrire des futurs technologiquement contrastés, justifiant de faire appel à des

modèles purement techniques. Le Tableau 4 permet d'estimer en ordre de grandeur l'inertie des différents usages de l'énergie dans le secteur résidentiel, celle-ci étant décomposée en deux : celle des équipements et celle des comportements d'usage. Les valeurs sont tirées de l'interprétation des données présentées dans les sections précédentes de ce chapitre. Le chauffage apparaît comme l'usage le plus inerte si l'on moyenne les durées de vies des ses trois déterminants directs les plus importants : la taille du logement (supérieure à 100 ans), l'isolation (supérieure à 30 ans) et les équipements de chauffage (environ 20 ans)⁴⁶. Puis viennent, en ordre décroissant d'inertie, la cuisson, l'ECS et l'« électricité spécifique ». Ce sont ces valeurs qui ont été retenues pour la construction de la Figure 52.

Usage	Déterminant direct des consommations	Persistance des déterminants directs (années)	Durée de vie « globale »
Chauffage	Forme du bâtiment	>100	40
	Eléments du bâti	30-60	
	Equipement	15-25	
	Comportements	20	
ECS	Equipements	15-20	25
	Comportements	30	
Cuisson	Equipements	15-30	25
	Comportements	30*	
Électricité spécifique	Equipements	5-15	10
	Comportements	5-20	

Tableau 4 : Estimation en ordre de grandeur des valeurs déterminant la vitesse des évolutions des consommations d'énergie par usage (estimations personnelles). *: aucune information rétrospective n'a été trouvée concernant les comportements de cuisson, la valeur précisée reflète donc une hypothèse.

Enfin, on notera que l'usage « électricité spécifique » est constitué de nombreux équipements dont la durée de vie est inférieure à 10 ans et dont une partie produit des services non énergétiques pour lesquels la consommation énergétique par unité de service peut changer radicalement d'une solution technologique à une autre⁴⁷. D'autre part, le périmètre de cet usage, défini comme le complémentaire du chauffage, de l'ECS et de la cuisson, va inclure tous les futurs « nouveaux usages » de l'énergie (par exemple des imprimantes 3D ou des robots domestiques), dont la connaissance actuellement limitée rend très hasardeuse la projection de pénétration future dans le secteur résidentiel. Ces éléments justifient pourquoi l'inertie de l'usage « électricité spécifique » est très faible sur la Figure 52.

⁴⁶ Si la durée de vie moyenne des chaudières est généralement considérée comme inférieure à 20 ans (par exemple dans les fiches techniques des Certificats d'Economie d'Energie proposent une durée de vie « normale » de 16 ans pour les équipements de chauffage contre 35 ans pour les matériaux d'isolation [MEDDTL, 2011]), certains équipements présentent des durées de vie techniques sensiblement supérieures, comme les convecteurs électriques, les poêles ou les cheminées. Cependant, ces équipements peuvent être remplacés de manière anticipée s'ils ne sont plus considérés satisfaisants (par exemple pour des questions esthétiques ou économiques).

⁴⁷ Par exemple, les services « information » et « divertissement » peuvent être fournis avec un contenu énergétique radicalement différent selon la solution technologique (télévision, ordinateur, smart-phone, support papier). De même, le lavage (vaisselle, linge) est techniquement possible sans eau chaude, ce qui diminue très fortement les besoins énergétiques de cet usage. Les logiques sous-jacentes aux choix des ménages pour le lavage à froid sont aujourd'hui mal connues et sembleraient faire plus appel aux sciences sociales qu'à une logique technico-économique ou à une réponse à un signal prix du marché de l'énergie.

Le troisième axe illustre la corrélation entre les variations des stimuli économiques principaux (prix des énergies, prix des équipements, revenus des ménages) et celles des déterminants directs de la consommation énergétique des usages étudiés. Cet axe essaie de représenter, pour chaque usage, la pertinence d'utiliser des variables « économiques » pour déterminer l'évolution future des consommations énergétiques. A partir des données présentées dans les premières sections de ce chapitre, il apparaît que les fortes variations de prix des énergies, observables en particulier lors du deuxième choc pétrolier, ont eu un impact fort sur les consommations de chauffage, plus faible sur l'ECS et presque nul sur la cuisson et l'électricité spécifique. L'influence du revenu des ménages sur les différents usages des énergies est quant à elle plus difficile à estimer à partir des données présentées (sans recours à une modélisation spécifique) car le revenu des ménages a augmenté de manière presque constante durant les dernières décennies. D'autres variables ont augmenté de manière similaire durant cette période comme la surface par personne (directement liée au besoin de chauffage), la consommation d'électricité spécifique ou le pourcentage de logements équipés d'ECS (jusqu'à sa saturation), mais il semble difficile d'attribuer entièrement ces évolutions à celle du revenu. Enfin, le manque de données rétrospectives sur l'évolution du prix des équipements rend difficile l'observation de l'impact de variations de ces prix (par des subventions ou des évolutions de marché) sur les consommations par usage. D'autre part, les subventions ont été le plus souvent allouées pendant des périodes pendant lesquelles les prix des énergies étaient élevés (début des années 1980, fin des années 2000), ce qui rend difficile l'attribution de la diffusion d'équipements de chauffage énergétiquement performants à ces subventions ou à la montée du prix des énergies. On retiendra donc que l'utilisation de variables économiques pour modéliser l'évolution des consommations futures d'énergie par usage apparaît la plus pertinente concernant le chauffage (corrélée au prix des énergies, au revenu et au prix des équipements), devant l'ECS (corrélée au revenu), l'électricité spécifique (corrélée au revenu) et la cuisson (pas de corrélation visible).

Les éléments précédents, synthétisés sur la Figure 52, font apparaître le chauffage comme incontournable pour la modélisation de la dynamique des consommations d'énergie du secteur résidentiel français à l'horizon 2050. On peut estimer que la majorité des systèmes de chauffage sera renouvelée en 2030, que la majorité des éléments du bâti (murs, fenêtres, toiture) aura fait l'objet d'une rénovation à l'horizon 2050, qu'une partie a priori non négligeable des rénovations sera effectuée avec des technologies connues aujourd'hui et que la performance énergétique de celles-ci dépendra en partie du prix des énergies et de celui des équipements (avec subventions éventuelles). D'autre part, les consommations de chauffage ont fait l'objet de nombreuses études (détaillées dans le chapitre suivant), aussi bien dans les disciplines liées à la physique qu'au sein des sciences humaines, ce qui en fait l'usage dont on connaît le mieux les déterminants de la dynamique. Ces éléments ont justifié la place centrale attribuée à la modélisation du chauffage dans cette thèse.

La production d'eau chaude sanitaire, même si elle ne représente pas un volume de consommation très important, présente une dynamique pour laquelle une étude à l'horizon 2030-2050 permettrait de modéliser un à deux renouvellements d'équipement. Si cet usage est moins incontournable que le chauffage, il lui est cependant lié par le fait qu'une proportion importante des chaudières destinées au chauffage sert aussi à la production d'ECS (chaudières double-usage). Sa représentation peut donc s'appuyer en partie sur la modélisation de l'usage chauffage. La cuisson apparaît quant à elle comme un usage très inerte, mal connu et dont les consommations ne sont pas particulièrement conséquentes. Ainsi, cet usage ne semble pas prioritaire dans la modélisation des dynamiques de consommations du secteur résidentiel.

L'électricité spécifique présente un profil qui se distingue sensiblement de celui des autres usages. En effet, les différents usages regroupés dans cette catégorie présentent des dynamiques rapides, tant dans la diffusion des nouveaux équipements (Figure 42), que dans leur renouvellement (avec des durées de vie de l'ordre de la dizaine d'année). Si la résultante des évolutions techniques

en termes de consommation d'énergie semble relativement prévisible pour l'éclairage et le froid alimentaire, usages pour lesquels le service rendu est lui-même une forme d'énergie, il apparaît particulièrement difficile de prévoir les évolutions de la consommation par unité de service des usages non énergétiques. On peut déduire des précédents éléments d'une part que la dynamique des consommations d'énergie du poste « électricité spécifique » ne peut se modéliser de manière uniforme sans forte perte de réalisme et que l'humilité pousserait à n'introduire que très peu de déterminisme dans une modélisation de la dynamique des consommations directes d'énergie des services dont la nature n'est pas de l'énergie. Le cas de cet usage est donc particulièrement problématique car il présente à la fois un volume tendanciel important et une forte hétérogénéité, aussi bien dans l'inertie associée aux différents usages qu'à leur nature énergétique, rendant hasardeuse toute modélisation déterministe de son évolution future, en particulier avec de seuls signaux économiques, auxquels l'usage dans son ensemble semble ne pas être particulièrement sensible.

3.2. Quels éléments de dynamique du parc bâti prendre en compte ?

La Figure 28a montre que la surface totale des résidences principales construites avant 1975 est aujourd'hui sensiblement la même qu'en 1975. Comme une partie des logements construits avant 1975 a été détruite, la stagnation de la surface construite totale n'est possible que par le changement de statut de certaines résidences secondaires ou logements vacants en résidence principale, ou alors par l'agrandissement des logements existants après leur construction. La comparaison de cette figure et de la Figure 26a (en nombre de logements) permet de déduire que la surface totale de logements détruits est compensée par l'entrée de nouveaux logements et l'agrandissement des logements existants. Le constat de stabilité des surfaces construites permet de considérer la représentation de la destruction de logements comme non prioritaire dans la construction d'un modèle de dynamique des consommations.

En ce qui concerne les logements neufs, on peut observer que les réglementations thermiques les plus récentes imposent un niveau de performance très élevé aux usages chauffage, climatisation, ECS, ventilation et éclairage, avec une consommation théorique maximale d'énergie primaire de 50 kWh/m².an pour l'ensemble de ces usages, à comparer à la consommation moyenne actuelle d'énergie finale des ménages pour le chauffage et ECS, de plus de 150 kWh/m².an. D'autre part, le contexte réglementaire prévu dans le cadre du Grenelle de l'environnement prévoit d'imposer les logements à énergie positive en 2020⁴⁸. Si le rythme de construction de logements neufs reste au niveau actuel durant les prochaines décennies et que les logements construits consomment les quantités d'énergie décrites par les réglementations thermiques de 2012 et 2020, alors seuls les logements construits entre 2010 et 2020 auront un bilan énergétique négatif. En 2050, ces derniers représenteront moins de 10% des logements mais consommeront sensiblement moins d'énergie que la moyenne en ce qui concerne le chauffage et l'ECS, ce qui porterait leur part dans la consommation énergétique du secteur résidentiel à moins de 5%. Cet ordre de grandeur permet de considérer la représentation de la construction neuve comme non prioritaire par rapport à celle des logements existants.

⁴⁸ LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, article 4

3.3. Quels mécanismes représenter liant déterminants directs et indirects?

Les données du Royaume-Uni montrent que la gestion de la température intérieure (et de la ventilation) peut évoluer sensiblement sur une grande période de temps (Figure 40). D'autre part, on peut estimer que le comportement d'usage des systèmes de chauffage par les ménages est un des principaux facteurs explicatifs des baisses de consommation de chauffage observées lors des périodes de forte augmentation du prix des énergies (1979-1981 et 2000-2008). En effet, cette baisse est à la fois très importante et rapide, en particulier entre 1979 et 1981, ce qui est difficilement réalisable à l'aide de seules améliorations technologique, le nombre annuel de rénovations étant contraint par les capacités des différentes filières (artisans et producteurs d'équipements). La représentation des comportements quotidiens de chauffage à l'aide d'un mécanisme les reliant au prix des énergies (et aux variations climatiques dans une moindre mesure) apparaît donc comme une priorité dans la modélisation prospective des consommations d'énergie du secteur résidentiel français.

Comme cela a été indiqué dans la section 2.2.2.b, le nombre d'équipements énergétiquement performants installés en France a connu des pics, au début des années 1980 et durant la dernière décennie. On peut observer que sur ces périodes, les prix des énergies étaient élevés et l'Etat subventionnait l'achat d'équipements énergétiquement performants. La résultante de ces installations, ainsi que celles ayant eu lieu entre les pics mentionnés, a eu pour effet de compenser l'augmentation importante de la surface totale chauffée et l'augmentation globale du confort thermique dans les logements, permettant ainsi à la consommation nationale de chauffage d'être relativement stable entre les chocs pétroliers. Il apparaît donc important, dans le développement du modèle prospectif de représenter explicitement la performance des équipements installés par les ménages ainsi qu'un mécanisme liant le choix de performance des ménages au prix des énergies et aux subventions existantes.

Conclusion

Ce premier chapitre a présenté en détail la composition des consommations énergétiques du secteur résidentiel français, ainsi que, dans la mesure des données disponibles, l'évolution passée des principales composantes de cette consommation. Pour chaque usage présenté, une rétrospective a été proposée vis-à-vis des déterminants physiques directs de ces consommations. Les évolutions passées des déterminants indirects des consommations énergétiques (contexte politique, économique et socio-culturel) ont aussi été présentées. Ces éléments ont permis de déterminer une certaine hiérarchie dans les entités et mécanismes à intégrer dans un modèle prospectif technico-économique des consommations énergétiques du secteur résidentiel français à l'horizon 2050.

Il apparaît ainsi nécessaire de faire intervenir la performance énergétique des technologies et les comportements d'usage de ces technologies par les ménages pour permettre d'expliquer les évolutions observées par le passé et par conséquent anticiper au mieux les évolutions futures. Parmi les usages des énergies, le chauffage apparaît incontournable par son volume, son inertie et sa sensibilité à plusieurs signaux économiques. L'usage « électricité spécifique » présente un profil particulier, à la fois important quantitativement et peu réactifs aux signaux économiques pouvant

pousser aux économies d'énergie, ce qui semble le rendre plus adapté à une modélisation purement technique, explorant les futurs possibles de manière technologiquement explicite, qu'à une modélisation technico-économique déterministe. Les usages ECS et cuisson apparaissent comme peu prioritaires. Enfin, une analyse en ordre de grandeur fait apparaître que la destruction et la construction de logements peuvent être considérées en première approximation et sous certaines conditions comme des éléments non prioritaires dans la construction du modèle prospectif dont fait l'objet cette thèse.

Bibliographie

[ADEME, 1999] : *L'éclairage dans votre logement*, note de synthèse, ADEME, novembre 1999

[ADEME, 2005] : Note de cadrage sur le contenu CO₂ du kWh par usage en France, ADEME, 14 janvier 2005

[ADEME, 2010] : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), *Les chiffres clés du bâtiment*, 2010

Allibe, B., 2008, Comparaison entre consommations de chauffage théoriques et estimées du secteur résidentiel français - Cas des maisons individuelles, Travail de fin d'études, EDF R&D, juillet 2008

[Banque Mondiale, 2011] : Données de la Banque Mondiale, disponibles sur le site « perspective monde » de l'université de Sherbrooke (consulté en janvier 2012) : <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/tend/FRA/fr/NY.GDP.PCAP.KD.html>

[Berruyer, 2012] : <http://www.les-crises.fr/inegalites-revenus-france-1/>

Bouchereau, J-M., 2009, Contenus en CO₂ des différentes énergies, présentation orale, GT10 RT2012, réunion du 29 avril 2009

[BRE, 2003] : L.Shorrock et J.Utley, *Domestic energy fact file 2003*, Building Research Establishment (BRE) Housing Centre, rapport 457, 2003

[BRE, 2008] : J.Utley et L.Shorrock, *Domestic energy fact file 2008*, Building Research Establishment (BRE) Housing Centre, 2008

Calwell, C., 2010, Is efficient Sufficient ? The case for shifting our emphasis in energy specifications to progressive efficiency and sufficiency, pour European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE), mars 2010

[CAS, 2011] : L'évolution des prix du logement en France depuis 25 ans, Conseil d'Analyse Stratégique, 2011

[CEREN, 2007a] : Ré-estimation en 2005 de la consommation d'électricité par usage final, CEREN, Ref FL/07.074, étude 6104, octobre 2007

[CEREN, 2007b] : Modèle de correction climatique des consommations de chauffage du secteur résidentiel, CEREN, étude 6106, juin 2007

[CEREN, 2007c] : Analyse rétrospective du parc et des flux de logements de 1973 à 2005, CEREN, Ref DRT. SN/JMD/07.023, février 2007

[CEREN, 2008a] : Equipements énergétiques des résidences principales – enquête logement 2006, CEREN, étude 7124, mars 2008

[CEREN, 2008b] Suivi annuel du comportement des ménages en matière de chauffage, Résultats sur la période 1990-2007, CEREN, étude 8108, octobre 2008

[CEREN, 2011] : Analyse rétrospective du parc et des flux de logements de 1973 à 2009, CEREN, référence : RES/11.001, étude 0102, janvier 2011

[CLIP, 1997] : MDE – L'éclairage en France – Diffusion des technologies efficaces de maîtrise de la demande d'électricité dans le secteur de l'éclairage en France, Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement (CLIP), Les cahiers du CLIP, n°7, janvier 1997, 80 pages

[CLIP, 2007] : Pompes à chaleur et habitat, prospective des consommations d'énergie et des émissions de CO₂ dans l'habitat : les gisements offerts par les pompes à chaleur, Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement (CLIP), Les cahiers du CLIP, n°18, 48 pages

David, O., A. Fabre, 2006, Les économies d'énergie dans l'habitat existant – Une opportunité étonnamment difficile à saisir, Mémoire du Corps des Mines, 252 pages, 2006

[EDF-ADEME-Enertech, 2004] : *Campagne de mesures de l'éclairage dans 100 logements en France*, rapport final, EDF, ADEME, Enertech, mars 2004

[EIA, 2012] : Short term energy outlook, annual imported crude oil price for USA, Energy Information Administration, 2012

[Enerdata, 2011] : Quantitative evaluation of explanatory factors of the lower energy efficiency performance of France for space heating compared to European benchmarks, rapport préparé par Enerdata pour l'ADEME, août 2011

[Enertech, 1998] : Etude expérimentale des appareils électroménagers à haute efficacité énergétique placés en situation réelle, projet ECODROME, programme SAVE, contrat n° 4.1031/S/94-093

[EPBD, 2002] : Directive 2002/91/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments

[Futuribles] : "Radioscopie de la France en mutation, 1950-2030", chapitre 8 : L'accroissement des besoins en énergie, Futuribles, pas d'auteur, non daté, <http://portail.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/CETTEXST005344/CETTEXST005344.htm> (consultée en janvier 2012)

Hartner M., R. Haas, 2011, An Input-Output Analysis Of The Indirect Energy Demand For And The Value Of Goods And Services Of Austrian Households, 34th IAEE Conference, Stockholm, 2011

[IFP, 2006] : *Les liens entre les prix du gaz naturel et du pétrole*, Le point sur, Panorama 2006, Institut Français du Pétrole, 2006

[INSEE, 2012] : Bases de données de l'Institut national de la statistique et des études économiques, accessibles sur www.insee.fr (consulté le 20 janvier 2012)

[ISO, 2005] : Norme internationale ISO 7730, Ergonomie des ambiances thermiques – détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local, 3ème édition, 15 décembre 2005

[JO, 2007] : arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants, publié au Journal Officiel le 17 mai 2007

Laurent M.-H., D. Osso, E. Cayre, 2007, "Energy savings and costs of energy efficiency measures : a gap from policy to reality ?", ECEEE 2007 summer study, La Colle sur Loup, France, juin 2007

Leach, G., 1979, "A Low Energy Strategy for the UK", International Institute for Environment and Development, London

Linden, A.-L., 2009, "Energy Efficiency in every-day household life - Three scenarios", First European Conference Energy Efficiency and Behaviour, 18-20 octobre 2009, Maastricht, Pays-Bas

Lovins, A.B., 1977, *Soft Energy Paths: Toward a Durable Peace*, Penguin Books

Lushetsky J., 2008, "Accelerating Innovation in Solar technologies - Overview of the DOE Solar Energy Technology Program", US Department of Energy (DoE), SPIE Photonics Innovation Summit, 6 novembre 2008

Marchand C., M.-H. Laurent, R. Rezakhanlou, Y. Bamberger, 2008, « Le bâtiment sans énergies fossiles? Les bâtiments pourront-ils se passer des énergies fossiles en France à l'horizon 2050? », *Futuribles* (343) 79-100 (2008), DOI: 10.1051/futur:200834379

Maurice J., 2001, Rapport « Prix du pétrole », pour le Conseil d'Analyse Economique, 2001

[MECSL, 2008] Ministère de l'Emploi, de la Cohésion Sociale et du Logement, Arrêté du 6 mai 2008 portant confirmation de l'approbation de diverses méthodes de calcul pour le diagnostic de performance énergétique en France métropolitaine, NOR DEVU0810970A, JORF n°0114 du 17 mai 2008, page 8063, 96p

[MEDDTL, 2011] : Fiches techniques descriptives des Certificats d'Economie d'Energie consultables sur le site internet du Ministère de l'Environnement, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL), <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Secteur-du-batiment-residentiel.html>

[ODYSSEE, 2012] : Base de données ODYSSEE sur les indicateurs d'efficacité énergétique, gérée par Enerdata, consultation le 15 juin 2012

[OPEN, 2010] : OPEN – Observatoire Permanent de l'amélioration ENergétique du logement, campagne 2009 – résultats 2006/2008, ADEME, ISBN 978-2-35838-122-2, avril 2010

[PEGASE, 2012] : consultation de la base de données en ligne PEGASE du MEDDTL en janvier 2012

Radanne P., 2000, présentation orale dans le cadre d'une réunion Futuribles, 2000

Ramain, P., 1984, « Les perspectives de consommations électriques à l'horizon 1990 : pari réaliste ou risqué ? », *Revue d'économie industrielle*, 28, 98-119

Shove E., 2003, *Comfort, Cleanliness and Convenience: the Social Organization of Normality*, Berg. ISBN 951-698-120-8

Socolow R.H., 1978, *Saving Energy in the Home: Princeton's Experiments at Twin Rivers*, editor. Ballinger Press, 1978.

[SOeS, 2011] *Chiffres-clés de l'énergie 2011*, Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) du Ministère de l'Environnement, du Développement Durable, des Transports et des Logements.

Traisnel J-P., B. Peuportier, A. Bornarel, 2001, *Habitat et développement durable – bilan rétrospectif et prospectif*, Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement (CLIP), Les cahiers du CLIP, n°13, avril 2001, 104 p.

Unander, F., I. Etestøl, M. Ting, L. Schipper, 2004, "Residential energy use: an international perspective on long-term trends in Denmark, Norway and Sweden", *Energy Policy*, 32, 1395-1404

Chapitre 2 : Modélisation des consommations énergétiques du secteur résidentiel et de leur dynamique

Modèles théoriques, applications aux exercices prospectifs et voies d'amélioration dans le cas du secteur résidentiel français

Résumé

Ce chapitre propose tout d'abord un tour d'horizon des modèles liés à la demande énergétique et à sa dynamique. Les taxonomies principales de la littérature sont présentées ainsi que les modèles principaux concernant l'usage et l'achat des technologies par les ménages. Ceci permet de proposer une taxonomie synthétique des modèles existants, adaptée aux objectifs du sujet de thèse et traitant distinctement l'évaluation de la consommation énergétique des ménages à un instant t et celle de la dynamique des déterminants de cette consommation au cours du temps.

Dans un deuxième temps, les principaux modèles utilisés pour la prospective énergétique du secteur résidentiel français sont présentés et leurs résultats majeurs rappelés. Cette revue de la littérature permet d'entrevoir les voies d'amélioration des modèles existants actuellement, qui ont servi de base à l'orientation des travaux proposés dans les parties II et III de cette thèse. Il apparaît que la majorité des modèles actuels sont relativement limités dans leur représentation des comportements des ménages et que l'intégration d'une représentation de ces comportements dans les modèles *bottom-up* ingénieur permettrait d'étendre le spectre des scénarios prospectifs qu'ils pourraient produire.

Introduction

Pour expliquer les consommations énergétiques du secteur résidentiel et leur dynamique, telles que présentées dans le chapitre 1, de nombreux travaux ont été réalisés et ont donné lieu à la construction de modèles. Ces modèles constituent « une représentation simplifiée d'un système, élaborée en vue d'un certain objectif : prévision, compréhension, manipulation, etc. Il existe de nombreuses formes de représentation : graphique (une carte routière, un diagramme), analogique (une maquette), linguistique, mathématique » [Boulanger et Bréchet, 2003]. L'étude des interactions

complexes entre les ménages et leur environnement, dont résultent les consommations énergétiques du secteur résidentiel, a mobilisé de nombreuses disciplines (Figure 53). Les études réalisées ont ciblé en proportion sensiblement égales des problématiques liées spécifiquement à une discipline (principalement les sciences de l'ingénieur, l'économie ainsi qu'un ensemble d'autres sciences humaines constitué de la psychologie, la sociologie et l'anthropologie), et des problématiques plus larges nécessitant des approches interdisciplinaires, comme la compréhension des comportements des ménages ou l'évaluation de politiques publiques [Keirstead, 2006]. Cette variété de points de vue implique que les ménages, leur environnement et les consommations d'énergie puissent être décrits de manières très diverses. L'environnement peut ainsi être qualifié par ses seuls aspects économiques ou physiques, les ménages par leurs actions ou leurs caractéristiques sociodémographiques et les consommations à l'échelle d'un secteur dans son intégralité comme à celle d'un usage très spécifique.

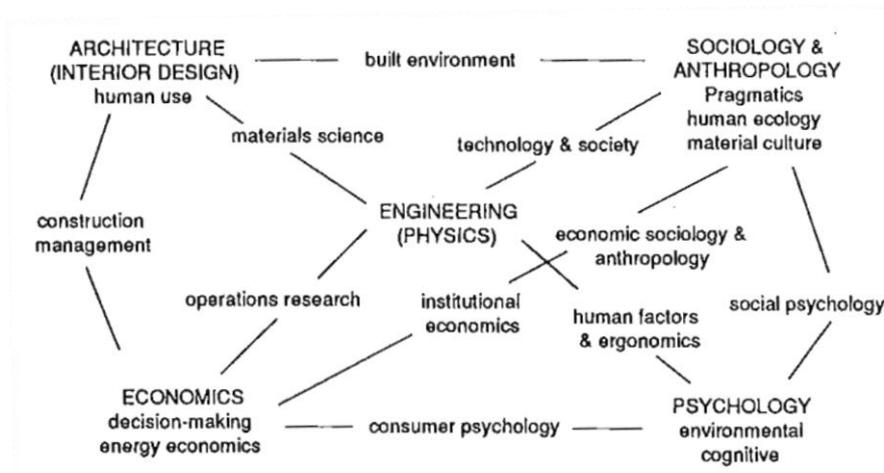


Figure 53 - Disciplines et concepts pertinents pour l'étude des relations homme-environnement et homme-technologies liées aux consommations d'énergie dans le secteur résidentiel [Lutzenhiser, 1992]

Les modèles élaborés par les différentes disciplines évoquées sont présentés dans la section 1 de ce chapitre à travers l'étude des principales taxonomies de modèles existant dans la littérature. Cette présentation permet de distinguer les grandes familles de modèles et d'indiquer leurs usages principaux. En fin de section est proposée une synthèse de ces taxonomies adaptée au formalisme des déterminants directs et indirects des consommations énergétiques et de leur dynamique, qui a été introduit dans le chapitre précédent. Cette synthèse est originale dans le sens où elle s'attache à répertorier les « briques fonctionnelles élémentaires » (permettant de modéliser la dynamique du système étudié) plutôt que des modèles dans leur intégralité. La deuxième section de ce chapitre présente les applications de ces modèles au cas particulier de la prospective énergétique du secteur résidentiel français. Cette présentation est élaborée à partir d'une réflexion sur la nature des scénarios prospectifs, qui conditionne le choix du type de modèle le plus adapté et celui du niveau de détail nécessaire concernant chaque brique élémentaire. Les résultats des modèles prospectifs étudiés sont ensuite analysés et leurs différences appréciées à l'aune des choix de modélisation effectués. Enfin, la troisième section de ce chapitre propose des pistes d'amélioration pour les modèles prospectifs du secteur résidentiel français. C'est autour de cette réflexion que se sont articulés les travaux de modélisation effectués au cours de cette thèse, présentés dans les parties II et III.

1. Modèles existants de la consommation d'énergie, de sa dynamique et de celle de ses déterminants

1.1. Tour d'horizon des types de modèles existants

1.1.1. Des taxonomies spécifiques aux objectifs des modèles

L'ensemble des modèles décrivant les consommations énergétiques du système {ménages-environnement} étant particulièrement hétérogène, celui-ci et a fait l'objet de plusieurs tentatives de classification. Ces classifications, ou taxonomies, apparaissent nécessaires lorsque l'étude d'une problématique est réalisée à l'aide d'un nombre conséquent de modèles complexes présentant des différences conceptuelles importantes. En effet, dans une telle situation, les résultats des modèles existants peuvent diverger sensiblement et il devient alors nécessaire, pour l'observateur des résultats, de comprendre les origines de ces écarts. L'objectif est alors de déterminer quelles sont les différences les plus fondamentales entre les modèles qui permettent de répondre à une question donnée, celles qui influencent le plus la façon dont il faut interpréter les résultats. Une taxonomie définit par conséquent des familles de modèles dont la compréhension, plus aisée que celle des détails de chacun des modèles, permet de faciliter l'interprétation de la nature et la variété des résultats présentés.

Les taxonomies existantes ont généralement été réalisées en comparant des modèles permettant de répondre à une même question, condition nécessaire à la possibilité de hiérarchiser les caractéristiques différenciant les modèles entre eux. En ce qui concerne la dynamique des consommations énergétiques, les modèles ont été développés principalement pour alimenter les réflexions autour des questionnements suivants :

- l'évaluation des politiques environnementales, dont climatiques, nécessitant la compréhension des interactions entre consommation d'énergie, économie et environnement,
- l'évaluation des politiques énergétiques, liées à l'efficacité énergétique, à la fourniture de services énergétiques compétitifs et à la sécurité énergétique ou l'indépendance énergétique d'un pays,
- la planification énergétique, pour alimenter les réflexions stratégiques des entités traitant de la chaîne énergétique en amont des consommateurs finaux.

Le besoin d'éléments de réponse quantifiés à ces problématiques a poussé à d'importants travaux visant la compréhension des déterminants de la demande d'énergie et de sa dynamique. Si l'étude de ces problématiques remonte au milieu du XIX^e siècle avec les travaux de Jevons concernant les besoins de charbon en Angleterre [Jevons, 1865], leur nombre augmente sensiblement à partir de la deuxième moitié du XX^e siècle. Cette augmentation s'explique par un besoin croissant d'alimenter les débats sur des sujets émergents d'importance mondiale : la possibilité de production électrique à partir de l'énergie nucléaire (Conférence internationale sur l'énergie atomique à des fins pacifiques, Genève, 1956), la prise de conscience de la finitude des ressources naturelles et environnementales (rapport du club de Rome « Limits to Growth » en 1972, rapport « Our Common Future » de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement, posant les bases de la notion de développement durable, dit rapport Brundtland, en

1987), celle de la vulnérabilité des pays non producteurs aux aléas de prix des hydrocarbures (chocs pétroliers en 1973, 1979 et 2008), et enfin celle des conséquences possibles du changement climatique sur l'économie mondiale avec la création du groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) en 1988. Les besoins de modélisation permettant d'apporter des éléments quantifiés d'aide à la décision ont mené au développement d'une large communauté scientifique internationale de modélisation des besoins énergétiques et de leurs implications pour les problématiques mentionnées précédemment, avec par exemple la création de l'Energy Modeling Forum en 1978.

1.1.2. Dans la jungle des modèles

La littérature portant sur les modèles de la consommation énergétique et de sa dynamique étant particulièrement vaste, il a été choisi de la présenter au travers de quatre taxonomies recouvrant un large ensemble de modèles. On remarquera que ces taxonomies ne recouvrent chacune qu'une partie des « briques élémentaires » permettant de représenter les consommations énergétiques et leur dynamique, d'où la proposition d'une taxonomie synthétique dans la section suivante.

a) Estimation de la consommation d'énergie par usage, à un instant t

Les données existantes permettant de qualifier les ménages et leur environnement, ainsi que les théories et concepts pouvant être utilisés pour décrire leurs interactions, sont particulièrement nombreux. Ceci explique en partie pourquoi les modèles permettant d'estimer la consommation d'énergie du secteur résidentiel ou de certains de ses usages sont de nature particulièrement diverses et pourquoi ceux-ci ont fait l'objet de plusieurs tentatives de classification. Parmi celles-ci, celle de de Swan et Ugursal est une des plus récentes et parmi les plus connues⁴⁹ [Swan et Ugursal, 2009] (Figure 54).

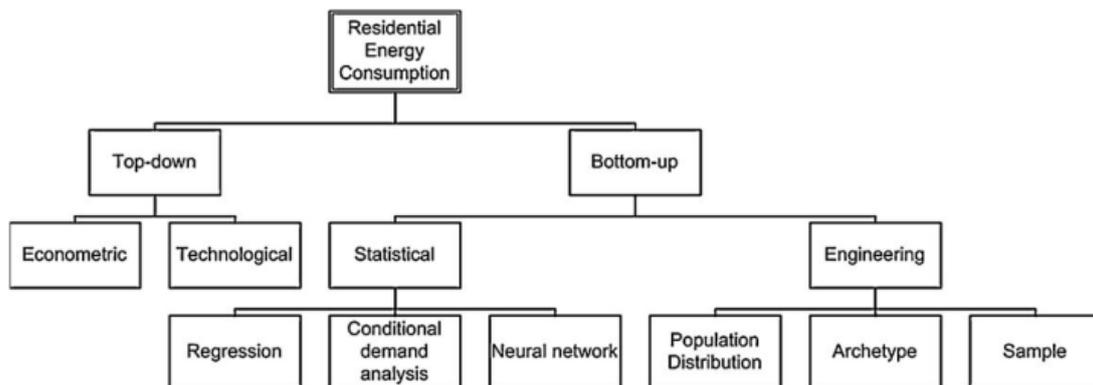


Figure 54 : Taxonomie des modèles d'estimation de la consommation énergétique par usage du secteur résidentiel [Swan et Ugursal, 2009]

Le premier niveau de distinction entre les modèles concerne l'échelle à laquelle les ménages et leur environnement sont représentés. Les modèles « *top-down* » (TD) sont définis dans cette classification par le fait qu'ils traitent l'ensemble des ménages comme un seul élément, pouvant être par exemple qualifié par sa population totale et sa richesse (salaires ou PIB du pays). De même l'environnement est qualifié d'une manière agrégée, pouvant inclure plus ou moins de détails

⁴⁹ Citée 74 fois entre janvier 2009 et mars 2012 dans les publications référencées par Google et 44 fois dans les revues référencées par Scopus.

technologiques : il peut être qualifié uniquement par les prix de l'énergie, mais aussi intégrer certaines variables techniques comme la rigueur climatique (pour estimer les consommations d'énergie thermosensibles comme le chauffage). Les auteurs distinguent deux sous-familles : les modèles « économétriques » ne prenant pas en compte les éléments technologiques (par exemple des taux d'équipement), et les modèles « technologiques » qui en intègrent. Cette distinction entre les deux sous-familles « *top-down* » ne présente donc pas de différence conceptuelle fondamentale entre les modèles mais seulement une différence de données d'entrée.

L'autre famille, celles des modèles « *bottom-up* » (BU), est sensiblement plus détaillée dans cette taxonomie qui, cette fois, propose une distinction conceptuelle : celle de la théorie utilisée pour estimer les consommations d'un logement ou d'un groupe homogène de logements à partir de leur description. D'une part, les modèles dits « ingénieur » sont basés sur une représentation simplifiée des lois physiques liant la performance des technologies, leur usage et leur environnement physique aux consommations d'énergie. Ceci implique que les données descriptives utilisées en entrée de ces modèles soient de nature physique⁵⁰. Les ménages sont alors qualifiés par la façon dont ils utilisent les technologies, tandis que l'environnement est qualifié par la description de l'infrastructure technique (performance des équipements présents) et de l'environnement physique (température extérieure, ensoleillement...).

Quant à eux, les modèles statistiques ne sont pas basés sur une connaissance des lois régissant physiquement les liens entre les consommations d'énergie et certaines caractéristiques des ménages et de leur environnement. Ils se « contentent » de corrélérer les consommations énergétiques observées (à l'aide des factures énergétiques des ménages ou plus rarement de mesures *in situ*) à une description des ménages et de leur environnement. Cette description ne présente pas de contrainte sur la manière dont ces éléments sont qualifiés, ce qui permet par exemple à ces modèles de représenter la corrélation entre le revenu des ménages et leur consommation énergétique, ce qui est impossible dans un modèle ingénieur. Les modèles statistiques se distinguent entre eux par le formalisme des corrélations pouvant être représentées par les modèles. Les auteurs différencient la demande d'analyse conditionnelle des méthodes de régressions et des réseaux de neurones. Cependant, la pertinence du choix de ces trois catégories par les auteurs peut être questionnée. En effet, l'analyse de demande conditionnelle est elle-même une technique de régression [Tiedemann, 2007], et les réseaux de neurones ne sont pas la seule méthode statistique d'estimation n'utilisant pas de régression (des algorithmes génétiques ont par exemple déjà été utilisés pour estimer des consommations d'électricité [Azadeh et Tarverdian, 2007]).

L'angle d'analyse des modèles proposé dans cette taxonomie, c'est-à-dire l'estimation de la consommation du système {ménages-environnement} à partir de sa description, est central pour l'étude du sujet de cette thèse mais n'en recoupe qu'une partie. En effet, la dynamique des consommations n'est pas explicitement traitée. Un calcul des consommations est certes possible à partir des données descriptives du système {ménages-environnement} à un instant donné mais rien n'indique dans cette taxonomie comment ces données descriptives évoluent dans le temps. C'est pourquoi il apparaît nécessaire de compléter cette taxonomie par d'autres angles d'analyse, plus centrés sur la dynamique des variables utilisées. En particulier, la dynamique de nombreux déterminants des consommations dépend des comportements des ménages, ce qui justifie le choix de la prochaine taxonomie présentée, portant sur les comportements des ménages qui affectent leur consommation d'énergie.

⁵⁰ Celles-ci peuvent éventuellement être la résultante d'une interprétation de données qualitatives non physiques. Par exemple, les modèles de consommation de chauffage ont besoin de connaître la température extérieure et celle-ci peut être estimée à partir de la donnée non-physique « zone climatique ».

b) *Modélisation des comportements des ménages ayant une influence sur leurs consommations d'énergie*

Si les modèles cités précédemment sont principalement focalisés sur les aspects techniques et économiques de la demande d'énergie du secteur résidentiel, il est cependant nécessaire de rappeler que les comportements des ménages jouent un rôle essentiel à la fois sur la consommation à un instant donné et sur sa dynamique. En effet, la consommation d'énergie dépend du volume et de l'intensité du service demandé par les ménages, tandis que l'efficacité des technologies peut dépendre des comportements d'entretien de l'infrastructure technique, et que l'évolution de l'infrastructure technique est en grande partie déterminée par les choix technologiques des ménages⁵¹.

On peut par ailleurs observer que les deux grands types de modèles mentionnés précédemment (*top-down* et *bottom-up*) représentent chacun les comportements des ménages d'une façon qui leur est propre. Dans les modèles BU, les comportements quotidiens des ménages peuvent être explicites mais sont rarement variables dans le temps⁵² et les choix technologiques, lorsqu'ils ne sont pas intégralement fixés par le modélisateur, sont le plus souvent très rationnels et ne prennent en compte que les coûts et bénéfices énergétiques des technologies (ce qui peut s'éloigner sensiblement de la réalité). A l'inverse, dans les modèles TD, les comportements des ménages ne sont pas explicites. Ils peuvent s'exprimer au travers des élasticités⁵³ de court terme et long terme de la demande d'énergie à plusieurs variables dont les plus courantes sont le prix des énergies et le revenu des ménages. Ces élasticités peuvent être interprétées respectivement comme la sensibilité des comportements quotidiens d'usage des technologies et celle des comportements de choix technologies aux variables mentionnées. Les modèles TD étant construits à partir de données de consommation réelles mais agrégées, ils présentent donc une modélisation des comportements moins détaillée que celle des modèles BU, mais souvent plus réaliste.

On remarquera cependant que les deux grands paradigmes de modélisation représentent généralement les comportements de manière très élémentaire, à l'aide d'un nombre très limité de variables explicatives. Or, les études de sciences humaines visant la compréhension et la modélisation des comportements humains proposent un ensemble de modèles permettant d'expliquer les décisions personnelles à l'aide de variables non utilisées par les modèles classiques BU et TD. C'est pourquoi il apparaît important de présenter une taxonomie des modèles de décision des ménages pouvant avoir un impact sur leur consommation énergétique. La plus récente et la plus spécifique à ce sujet est celle de Wilson et Dowlatabadi [Wilson et Dowlatabadi, 2007].

Présentée dans le Tableau 5, celle-ci distingue les modèles de décision en cinq familles de modèles, différenciés par les disciplines dont ils sont issus : économie conventionnelle, économie comportementale, diffusion des technologies, psychologie sociale et environnementale, sociologie.

⁵¹ L'évolution technologique est aussi déterminée par les choix technologiques de propriétaires de logements, pouvant être des personnes morales (office HLM, société immobilière).

⁵² A l'exception de quelques récents scénarios comportementaux (e.g. [BC Hydro, 2007 ; Gardner et Stern, 2008 ; Dietz et al., 2009]).

⁵³ Le concept d'élasticité et ses différentes variantes sont présentés dans la section 1.2.1.

	Economie classique	Economie comportementale	Diffusion technologique	Psychologie sociale et environnementale	Sociologie
Modèle de décision	Maximisation de l'utilité	Heuristiques et préférences (dépendant du contexte) très diverses	Evaluation des technologies et des conséquences de l'adoption basée sur les attitudes	Interaction de variables psychologiques et contextuelles	Construction sociotechnique de la demande
Echelle de la décision	Individuelle	Individuelle	Individuelle ou sociale	Individuelle ou sociale	Sociale
Principales méthodes de recherche	Quantitative (comportements observés)	Quantitative (expériences contrôlées)	Quantitatives et qualitatives (enquêtes, interviews, comportements observés)	Quantitatives et qualitatives (enquêtes, comportements observés)	Qualitatives (interviews, observations)
Principales variables dépendantes	Préférences entre les options de la décision	Préférences entre les options de la décision	Taux de diffusion	Comportements et/ou consommations énergétiques déclarés	Comportements observés ou déclarés
Principales variables indépendantes	Coûts et bénéfices des options et leurs pondérations respectives	Aspects du cadre de la décision, contexte et options de la décision	Rôle de l'adopteur dans les réseaux sociaux, canaux de communication, attributs des technologies	Valeurs, attitudes, normes, caractéristiques sociodémographiques, incitations économiques, compétences, ressources	Déterminants sociaux, culturels et techniques de la demande d'énergie intégrée dans les routines de comportement
Base empirique concernant la consommation énergétique	Large	Très faible	Non négligeable	Large	Non négligeable

Tableau 5 : Comparaison des approches disciplinaires de la décision dans le contexte de la consommation énergétique des ménages (d'après [Wilson et Dowlatabadi, 2007])

Il est important de noter que certains des modèles présentés sont uniquement qualitatifs, en particulier au sein des deux dernières familles. Si cela rend difficile leur intégration au sein de modèles quantitatifs de consommation d'énergie, ils apportent néanmoins des éléments de réflexion sur les limites des modèles quantitatifs de décision les plus communément utilisés pour étudier la dynamique des consommations ainsi que sur leur possibles améliorations.

c) Impacts économiques du changement climatique

Un des champs d'application les plus importants de la modélisation des consommations d'énergie est actuellement l'étude des impacts économiques du changement climatique. L'étude de cette problématique a mené au développement de modèles de prospective à long terme (de l'ordre de la centaine d'année), dits « économie-énergie-environnement », dont plusieurs taxonomies ont été proposées dans le cadre des travaux du groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Les travaux de Renaud Crassous en proposent une synthèse par une nouvelle taxonomie [Crassous, 2008] (Figure 55). Les familles de modèles qui y sont définies se distinguent essentiellement par la façon dont l'économie, le système énergétique et leurs interactions y sont représentés.

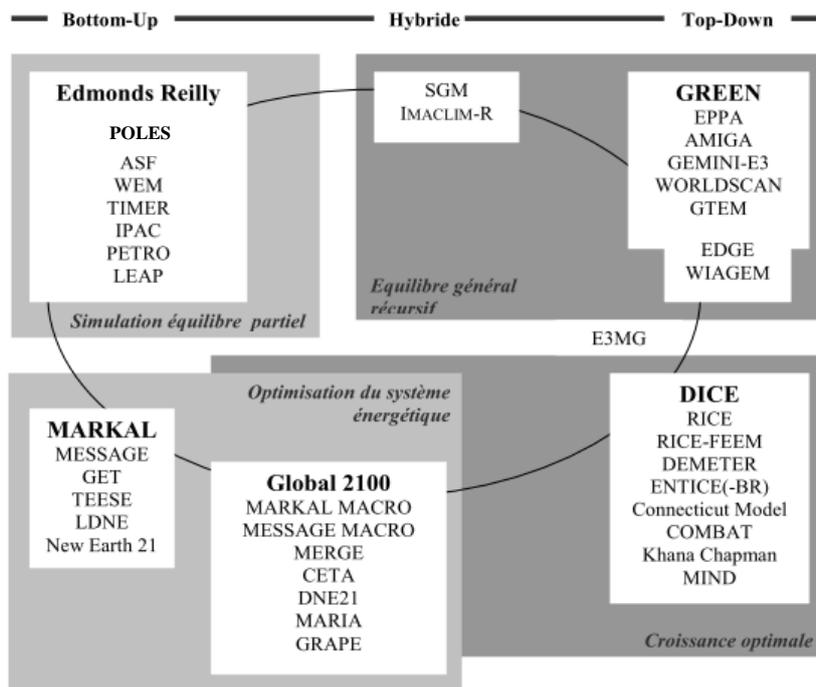


Figure 55 : Taxonomie des modèles économie-énergie-environnement (adapté de [Crassous, 2008])

Sont ainsi distingués les modèles d'optimisation du système énergétique, conçus pour aider à la planification et à la gestion optimale de systèmes complexes et dont les modèles emblématiques sont MARKAL [Fishbones et al., 1983] en ce qui concerne les modèles à dominante technologique et Global 2100 [Manne et Richels, 1990] lorsque ceux-ci sont couplés à un modèle macroéconomique compact permettant d'optimiser non seulement les coûts techniques mais aussi macroéconomiques.

Une deuxième famille est composée de modèles de simulation en équilibre partiel du système énergétique et des marchés de l'énergie, pouvant, pour certains modèles, définir le prix des énergies de manière endogène. L'équilibre est dit partiel car un seul marché est représenté (celui de l'énergie), par opposition aux modèles d'équilibre général dans lesquels l'équilibre entre l'offre et la demande est réalisé sur l'ensemble de l'économie.

Ces deux premières familles de modèles, basées sur une représentation détaillée du système énergétique, sont regroupées dans la famille plus vaste des modèles *bottom-up*. On remarquera que, par rapport à la taxonomie de Swan et de ses collaborateurs, les modèles BU ne recouvrent pas uniquement le calcul des consommations énergétiques mais aussi la représentation de leur dynamique. L'utilisation de critères économiques pour déterminer la dynamique de certains de ces modèles explique pourquoi ils sont parfois appelés « technico-économiques ».

La problématique du contrôle économiquement optimal des émissions de gaz à effet de serre (e.g. [Nordhaus, 1980]) a mené au développement de modèles macroéconomiques compacts d'optimisation intertemporelle avec croissance optimale, constituant une troisième famille de modèles, dont le modèle représentatif est DICE [Nordhaus, 1993].

La dernière famille comprend les modèles d'équilibre général multisectoriel, basés sur une optimisation intertemporelle avec anticipations rationnelles des agents représentés, dont la résolution est effectuée pas à pas, d'où le nom d'« équilibre général récursif ». Ces deux dernières familles peuvent être catégorisées comme *top-down* du fait de leur représentation agrégée de l'économie et du système énergétique.

Enfin, des modèles dits hybrides ont été développés depuis les années 1990 pour essayer de tirer partie des avantages respectifs de différentes familles de modèles. Ces hybridations peuvent être de natures sensiblement différentes, allant de la représentation d'une des composantes BU ou TD par un module élémentaire à l'intégration poussée de ces deux composantes dans la conception même du modèle. Les modèles CIMS [Bataille et al., 2006] et IMACLIM-R [Crassous, 2008] sont deux exemples récents de modèles présentant une forte hybridation BU-TD.

Cette taxonomie, si elle constitue une synthèse claire des modèles dédiés à l'analyse de l'impact économique du changement climatique, présente le défaut (dans le contexte de cette thèse) d'être plus centrée sur la représentation des équilibres économiques et de la croissance que sur la façon dont la demande énergétique est représentée.

d) *Evaluation ex ante de politiques d'efficacité énergétique*

L'évaluation *ex ante* des politiques énergétiques liées à l'efficacité énergétique se réfère à l'étude des effets futurs de celle-ci, sans qu'elle ne soit encore mise en œuvre (par opposition à l'évaluation *ex post* qui évalue l'efficacité qu'a eue une politique par le passé et qui est d'un intérêt plus limité pour la modélisation prospective).

Les modèles permettant l'évaluation *ex ante* de politiques liées à l'efficacité énergétique pourraient être classifiés de la même manière que les modèles économie-énergie-environnement mentionnés précédemment. Cependant les modèles dédiés à l'efficacité énergétique (énergie-économie) diffèrent des modèles économie-énergie-environnement par l'échelle à laquelle ils sont utilisés, aussi bien géographique (le plus souvent un pays ou petit groupe de pays, en système ouvert) que sectorielle (le plus souvent un seul secteur de l'économie y est représenté). Ceci implique une influence moindre du système énergétique modélisé sur l'économie locale et mondiale. Par exemple, une variation, même sensible, de la demande énergétique résidentielle française a peu de chance d'influencer les prix mondiaux du pétrole et une amélioration, même sensible, de la performance énergétique de l'infrastructure technique de ce secteur n'aura que des effets limités sur la richesse des ménages français, ne représentant qu'une partie de leurs dépenses énergétiques. Ceci explique pourquoi les modèles d'évaluation *ex ante* de politiques présentent généralement une focalisation plus poussée sur les aspects énergétiques qu'économiques d'où la dénomination « énergie-économie », comme on peut l'observer dans celle proposée par Luis Mundaca et ses collaborateurs, ciblant spécifiquement le secteur résidentiel [Mundaca et al., 2010].

Ces auteurs distinguent les modèles énergie-économie en quatre familles : simulation, optimisation, comptabilité et hybrides. Les modèles de *simulation* sont définis dans cette taxonomie comme développés dans un souci de mimétisme des choix technologiques des ménages et ne reposant pas forcément sur des hypothèses de rationalité ou d'optimalité. Les modèles principaux de cette catégorie sont le module de demande résidentielle du National Energy Modeling System (NEMS-RSDM) [DOE, 2000], le Residential End-use Energy Planning System (REEPS) [Hwang et al., 1994 ; Johnson et al., 1994 ; Koomey et al., 1994] ainsi que le Canadian Integrated Modeling System (CIMS) [Bataille et al., 2006].

La deuxième famille discernée est celle des modèles d'*optimisation*, dans lesquels les ménages choisissent la solution technologique à moindre coût, supposant de fait une hypothèse de forte rationalité économique des ménages. Cette famille est très proche de la sous-famille des modèles d'optimisation du système énergétique centrés sur l'optimisation des coûts techniques dans la taxonomie de Renaud Crassous, présentée dans la section suivante, et en propose donc les mêmes modèles emblématiques.

Enfin, la troisième famille est constituée de modèles de *comptabilité*, qui permettent de calculer une consommation d'énergie à partir d'une description donnée de l'infrastructure technique. Dans ces modèles, les trajectoires technologiques ne sont pas calculées par simulation ou optimisation mais déterminées de manière exogène par les modélisateurs. Si cet exercice semble hasardeux pour estimer l'évolution technique consécutive à des politiques agissant sur les prix (des énergies ou des technologies), il est la façon la plus simple de représenter l'effet de réglementations (concernant par exemple la performance minimum des logements ou des équipements) et de quantifier des scénarios simulant une forte pénétration des meilleures technologies disponibles (MTD). Ces modèles permettant l'introduction aisée de jugements d'experts techniques de la demande d'énergie, ils sont par ailleurs utilisés pour la planification énergétique des énergéticiens. Parmi les représentants les plus connus de cette famille se trouvent MEDEE [Lapillonne et Château, 1981], Long-Range Energy Alternatives Planning (LEAP) [SEI, 1993a et 1993b] et Mesures d'Utilisation Rationnelle de l'Energie (MURE) [MURE, 1999]. Enfin, la dernière famille est constituée des modèles hybrides, composés d'éléments pouvant appartenir à plusieurs des trois familles évoquées précédemment. On notera que la notion de modèle hybride est ici sensiblement plus vague que dans la taxonomie de Crassous, qui définit de manière précise trois sous-catégories de modèles hybrides dans le texte accompagnant la Figure 55 dans ses travaux [Crassous, 2008].

Cette taxonomie décompose bien les choix qui peuvent être effectués pour modéliser la dynamique des déterminants des consommations, dont la pertinence dépend du type de question auquel un modèle de demande énergétique doit répondre.

1.2. Usage et achat des technologies par les ménages dans les modèles de demande : éléments de modélisation et formalisation du paradoxe de l'efficacité énergétique

On se place maintenant dans le seul contexte des modèles de demande d'énergie pour un secteur. Si le calcul de la demande d'énergie à partir d'une description de l'infrastructure technique et de son environnement physique et économique a été présenté dans la taxonomie de Swan et Ugursal, la dynamique des variables au cours du temps n'y est que peu traitée. A l'inverse, les taxonomies de Mundaca et de Crassous traitent bien des grandes orientations possibles concernant la dynamique des variables mais ne présentent pas de manière détaillée quels en sont les mécanismes sous-jacents (ou briques élémentaires). Cette section a donc pour objectif de présenter les formalismes de modélisation existants au sein des deux principales communautés de recherche (économistes et ingénieurs) concernant deux aspects essentiels de la dynamique des consommations : l'usage des technologies et la diffusion des technologies énergétiquement efficaces (traités distinctement dans les deux premières sous-sections de cette section). La confrontation des points de vue de ces deux communautés a mis en relief le paradoxe de l'efficacité énergétique, c'est-à-dire un sous-investissement des ménages en équipements énergétiquement efficaces par rapport aux choix technologiques qui apparaissent les plus rentables au regard de l'analyse économique. La description de ce paradoxe, ainsi que sa formalisation théorique, est proposée dans la section 1.2.3.

Les catégories de modèles présentées précédemment n'ont pas toutes pour objectif premier de déterminer avec précision la dynamique de la demande d'énergie d'un secteur particulier, tel que le secteur résidentiel, à l'échelle nationale. En effet, les modèles présentés peuvent être dédiés à des échelles géographiques différentes (individuelle ou internationale), à des périmètres différents

(multi-sectoriels ou mono-sectoriels), à des objets d'étude différents (technologies de la production énergétique, comportements humains, estimation de la consommation énergétique plutôt que de sa dynamique). C'est pourquoi l'objectif de cette partie est de proposer un rappel de la littérature spécifique à l'analyse de la dynamique de la demande énergétique à l'échelle d'un secteur. Ce rappel est organisé autour de trois points essentiels ayant alimenté de longs débats entre communautés de chercheurs et ayant mobilisé une partie importante des efforts de modélisation : l'usage des technologies par les utilisateurs finaux, l'évolution de l'efficacité énergétique de l'infrastructure technologique d'un secteur et enfin la notion d' « energy efficiency gap », qui regroupe les origines possibles de la sous-optimalité des choix technologiques des agents (par rapport aux choix que l'analyse technico-économique considère comme optimaux).

1.2.1. Utilisation quotidienne de l'infrastructure technique par les ménages : élasticité de court terme et effet rebond direct

a) Traitement du comportement quotidien des ménages dans les modèles de demande énergétique

Notion d'élasticité de la demande d'énergie dans les modèles économiques

La notion d'élasticité est développée en analyse économique pour quantifier le lien entre la dynamique de deux variables. Si par exemple l'élasticité de la demande d'énergie au prix des énergies est de -0,3, cela indique qu'une augmentation du prix des énergies de 1% implique une réduction de 0,3% de la demande énergétique. Le concept d'élasticité est décliné en plusieurs variantes, parmi lesquelles on peut tout d'abord distinguer les élasticité de court terme de celles de long terme, reflétant le fait que les conséquences de l'évolution d'une variable sur une autre peuvent être échelonnées dans le temps. Ainsi, dans le cas de l'élasticité de la demande d'énergie à d'autres variables, en particulier le prix des énergies, on peut assimiler l'élasticité de court terme à une adaptation du comportement quotidien des agents (réduisant par exemple l'intensité avec laquelle ils utilisent leurs équipements énergétiques lors d'une hausse des prix), alors que l'élasticité de long terme peut être le fruit de changements techniques, nécessitant un temps plus long pour être mis en place. Dans les modèles économiques, c'est donc l'élasticité de court terme qui peut être assimilée à une représentation du comportement quotidien des ménages en termes d'utilisation des technologies énergétiques.

Par ailleurs, certains modèles, détaillés par la suite, permettent le calcul d'élasticités dites « de substitution ». Le consommateur pouvant utiliser plusieurs biens pour maximiser son utilité, si le prix de l'un d'entre eux augmente alors il diminuera sa consommation de ce bien et augmentera celles des autres, d'autant plus que ces biens sont substituables. Les cas extrêmes sont ceux où l'élasticité de substitution est nulle, c'est-à-dire que les biens ne sont pas substituables (ils sont alors dits complémentaires), et où elle est infinie, c'est-à-dire que les biens pris en compte sont de parfaits substituts. Dans le cas d'un ménage, il peut par exemple substituer un achat d'efficacité énergétique à une consommation d'énergie pour obtenir un même niveau de service énergétique.

Si les élasticités mesurées concernent souvent celles de la demande d'une énergie au prix de cette énergie, il est aussi possible de mesurer cette élasticité par rapport au prix d'une autre énergie. On parle alors d'élasticités croisées. Le signe de ces élasticités croisées permet ainsi de définir si des biens sont substituables ou complémentaires.

On notera que si l'estimation de l'élasticité de la demande d'énergie au prix des énergies sur une période de temps mène à une valeur unique, cette élasticité n'est cependant pas constante au cours du temps. Il a ainsi été observé que les élasticités de la demande d'énergie à la hausse et à la baisse du prix des énergies peuvent être sensiblement différentes [Haas et Schipper, 1998] et que l'élasticité est dépend de l'ampleur de la variation des prix [Boonekamp, 2007]. Par ailleurs, avec un même modèle et un même jeu de données, le nombre de variables de contrôle utilisées pour réaliser l'estimation d'une élasticité peut influencer le résultat de cette estimation de manière très sensible (e.g. [Wiesmann et al., 2011]).

Principaux modèles utilisés pour le calcul d'élasticité de la demande d'énergie

Le modèle le plus simple pour estimer la demande d'énergie en fonction de variables par rapport auxquelles on souhaite déterminer l'élasticité de la demande est la forme fonctionnelle dite « log-linéaire » (Equation 1). Celle-ci, développée initialement par Houthakker (1951) pour estimer les consommations d'électricité du Royaume-Uni, présente l'avantage de permettre aisément l'estimation de l'élasticité de la demande d'énergie aux différentes variables utilisées et de calculer facilement les élasticités de court terme et de long terme (e.g. [Haas et Schipper, 1998]). Les paramètres de l'équation utilisée sont égaux à l'élasticité de la demande d'énergie par rapport aux variables auxquelles ces paramètres se rapportent.

Equation 1

$$\log(E) = \beta_0 + \sum_{i \in I} \beta_i \cdot \log(X_i) \quad \text{avec } E \text{ la demande d'énergie, } \beta_k \text{ les paramètres à estimer et } X_i \text{ les variables explicatives}$$

La simplicité de la formulation de ce modèle et l'aisance avec laquelle on peut en déduire l'élasticité de la demande d'énergie par rapport aux autres variables utilisées le rendent particulièrement attrayant. Cependant, celui-ci n'est pas basé sur la notion d'utilité propre à la théorie du consommateur. C'est pour cela que lui sont préférés par les économistes des modèles plus évolués, permettant de formaliser et résoudre la problématique d'allocation des dépenses à des biens en maximisant l'utilité sous contrainte des revenus disponibles. Les modèles de ce type les plus utilisés sont les modèles à élasticité de substitution constante⁵⁴ (fonction d'utilité de même forme que la fonction de production proposée par Solow en 1956), ainsi que les modèles translog⁵⁵ [Christensen et al., 1975] et AIDS [Deaton et Muellbauer, 1980]. Des modèles plus évolués ont été développés (par exemple ceux mentionnés par Bernard (2010)) mais sont moins utilisés dans la littérature liée à la demande énergétique. Les modèles économétriques de demande n'étant pas utilisés directement dans le cadre de cette thèse, il a été choisi de n'en présenter que les éléments les plus emblématiques sans en expliquer les détails théoriques. Les revues de la littérature réalisées par Madlener (1996) et Saunders (2008) présentent un ensemble plus complet et plus détaillé des modèles économétriques appliqués à la demande énergétique du secteur résidentiel, auxquelles le lecteur intéressé pourra se rapporter.

Les modèles présentés précédemment sont le plus souvent estimés à partir de données agrégées, par exemple à l'échelle nationale. L'analyse des données à l'échelle individuelle, grâce à des enquêtes, permet cependant à la fois de disposer de données plus détaillées concernant les ménages, et en particulier de distinguer explicitement leurs équipements et leurs consommations

⁵⁴ Dont les modèles de Léontief et de Cobb-Douglas sont des cas particuliers, avec respectivement des élasticités de substitution nulles ou égales à l'unité.

⁵⁵ Dont une utilisation de référence dans le domaine énergétique est l'article de Pindyck en 1980.

énergétiques. Ceci a mené au développement de modèles économétriques intégrant ces deux éléments dans leurs formes fonctionnelles. Ainsi, Parti et Parti (1980) ont développé le modèle d'analyse de demande conditionnelle (*conditional demand analysis*), mentionné dans la taxonomie de Swan et Ugursal présentée précédemment, permettant d'estimer la consommation d'énergie conditionnellement aux équipements d'un ménage. La disposition de ces données a aussi poussé le développement de modèles économétriques reposant sur la notion d'utilité, dans lesquels l'agent maximise conjointement l'utilité qu'il peut retirer de l'achat d'un équipement et de l'usage qu'il en fera. La situation décrite est une combinaison d'un choix discret (choix de l'équipement) et d'un choix continu (quantité d'énergie consommée pour obtenir le service énergétique fourni par cet équipement). Les modèles traitant cette problématique sont donc appelés *discrets-continus*, et tirent leur origine du modèle développé par Dubin et McFadden (1984) pour l'analyse de la consommation d'électricité des ménages aux Etats-Unis. Des développements complémentaires, permettant par exemple l'extension à l'ensemble des consommations énergétiques du secteur résidentiel et à l'utilisation conjointe de plusieurs énergies pour le chauffage, ont été réalisés par la suite (e.g. [Nesbakken, 2001]). Ces modèles permettent aussi l'estimation d'élasticités de court et long terme de la demande d'énergie et représentent donc distinctement les comportements quotidiens de consommation énergétique des ménages.

Les estimations de l'élasticité de court terme de la demande d'énergie au revenu des ménages et au prix des énergies, à l'aide des modèles évoqués précédemment, recouvrent un large spectre de valeurs. Celles-ci dépendent à la fois du modèle utilisé, de la méthode statistique d'estimation, mais aussi du type de données utilisées (échantillon, séries temporelles, panels), du pays étudié et de la date des mesures [Espey et Espey, 2004]. En moyenne, la demande d'énergie apparaît relativement peu élastique à court terme au prix de l'énergie et au revenu, avec des valeurs moyennes d'élasticité respectivement autour de -0,4 et 0,2 (e.g. [Espey et Espey, 2004 ; Dahl, 1993 ; Haas et Schipper, 1998 ; Vielle, 2007]).

Comportements quotidiens dans les modèles *bottom-up* ingénieur

En ce qui concerne les modèles BU basés sur une description physique des phénomènes impliquant une consommation d'énergie, la représentation du comportement des ménages est généralement très frustrante. Ceux-ci sont le plus souvent représentés par un seul et unique comportement, défini généralement par une norme (par exemple dans le cas des modèles de calcul issus de réglementations) ou par une procédure de calibration permettant de rendre égales la consommation d'énergie calculée par le modèle et la quantité d'énergie réellement consommée par les ménages. Dans certains modèles de prospective, les comportements quotidiens peuvent évoluer au cours du temps mais ceci n'est généralement le fait que d'hypothèses exogènes faites par les modélisateurs, dont l'appui sur des observations de terrain est variable d'une étude à l'autre (e.g. [négaWatt, 2011; BC Hydro, 2007; Dietz et al., 2009]).

b) Effet rebond

Si les modélisations des comportements quotidiens de chauffage dans les modèles de demande de type économétrique et ingénieur, même si elles apparaissent éloignées, se rapprochent autour du concept d'effet rebond. Cet effet se réfère à l'observation que les gains énergétiques consécutifs à une amélioration de la performance énergétique d'un équipement sont généralement moins importants que ceux calculés par les modèles ingénieur, pourtant adossés sur une analyse physique des déterminants de la consommation énergétique. Les premières observations de ce phénomène remontent à Jevons (1865), qui a relevé le paradoxe suivant : "the reduction of the

consumption of coal, per ton of iron, to less than one third of its former amount, was followed, in Scotland, by a tenfold increase in total consumption, between the years 1830 and 1863, not to speak of the indirect effect of cheap iron in accelerating other coal-consuming branches of industry". Les termes sous lesquels il énonça le paradoxe qui porte aujourd'hui son nom ont été les suivants : "It is wholly a confusion of ideas to suppose that the economical use of fuel is equivalent to a diminished consumption. The very contrary is the truth". Le constat est donc que l'amélioration de la performance énergétique des équipements, si elle peut permettre une réduction de la consommation à l'échelle individuelle, mène à long terme et à grande échelle à l'augmentation de la consommation énergétique.

La problématique de l'effet rebond été reprise par la suite par les articles de Khazoom (1980) et Brookes (1979), publiés indépendamment et mentionnant explicitement les travaux originaux de Jevons. Ces travaux ont été repris par Saunders (1992), qui forgea le terme de « postulat de Khazoom-Brookes » pour décrire le paradoxe évoqué, le formalisa sous une approche mathématique, et argumenta sa cohérence avec la théorie économique néoclassique. D'après son analyse, le paradoxe n'en est donc finalement pas un. Ces travaux sont au centre d'un long débat entre les économistes de l'énergie et les partisans de l'efficacité énergétique, essentiellement au cours des années 1990, dans lequel les premiers reprochant aux seconds de ne pas prendre en compte les effets macroéconomiques induits par l'amélioration de la performance énergétique, notamment au travers du changement implicite du prix de l'énergie pour les consommateurs. Cependant, ces effets macroéconomiques semblent être sensiblement différents selon la maturité de la technologie et de l'économie étudiées [Schipper et Grubb, 1998]. Il apparaît donc que la situation doit être étudiée au cas par cas pour évaluer a priori l'ampleur de l'effet rebond pour une technologie et une économie en particulier. On notera d'ailleurs qu'aucune quantification de l'effet rebond global ne semble avoir été réalisée pour la France.

Plus récemment, on peut noter la synthèse des études empiriques sur ce phénomène, réalisée par Greening et Greene (1998) ainsi que les travaux récents de Sorrell et de ses collaborateurs à la fin des années 2000. Ces derniers ont formalisé les différentes conceptions⁵⁶ de l'effet rebond au sein de la littérature énergétique [Sorrell et Dimitropoulos, 2008], réalisé une revue de la littérature des mesures empiriques de l'effet rebond [Sorrell, 2007 ; Sorrell et al., 2009], et proposé une synthèse des éléments obtenus [Sorrell, 2007]. Enfin, la revue de la littérature la plus récente est celle de Jenkins et de ses collaborateurs (2011), qui complète celle de Sorrell par les travaux les plus récents sur le sujet, en particulier ceux de Barker et de ses collaborateurs (e.g. [Barker et al., 2007 et 2009]).

Si les gains énergétiques à l'échelle d'un équipement sont observables suite à l'amélioration de sa performance énergétique, l'observation des conséquences globales de l'amélioration d'un type d'équipement semble indiquer le contraire dans certains cas. Il apparaît donc nécessaire de décomposer l'effet rebond en plusieurs éléments, décomposition qui est généralement proposée dans la littérature sous la forme suivante :

- **Effet rebond direct** : lorsque la performance énergétique d'un équipement est améliorée, ceci diminue le coût de ce service pour le consommateur, ce qui l'incite à consommer une quantité plus importante de ce service. Ainsi, il ne prend qu'une partie des gains énergétiques apportés par l'amélioration de la performance en gains financiers et convertit l'autre partie en augmentation de service demandé. Si cette augmentation de la demande de

⁵⁶ Et en particulier les élasticités auquel l'effet rebond est assimilé dans les études mentionnées : élasticité de la demande d'énergie ou de la demande de service, élasticité à la performance énergétique ou au prix du service, pris en compte d'autres éléments que la seule facture énergétique pour calculer le prix du service (temps, coût d'investissement...)

service est supérieure à 100% du gain énergétique apporté par l'amélioration de la performance, on parle alors de « backfire », c'est-à-dire que la quantité d'énergie est plus importante après l'amélioration qu'avant celle-ci, situation qui est cependant rare (e.g. [Sorrell et al., 2009]). A l'inverse, si cette part est inférieure à 100% alors l'amélioration de la performance entraîne bien une diminution de la consommation. Suivant les usages énergétiques, dans le secteur résidentiel, cette part varie entre 0% et 60%, avec une majorité d'estimations autour de 20%. Cet effet rebond direct est observable à l'échelle microéconomique et c'est essentiellement celui-ci qu'il importe de prendre en compte dans un modèle de demande mono-sectoriel, par exemple pour étudier uniquement le secteur résidentiel d'un pays, comme dans cette thèse.

- **Effet rebond indirect** : les économies d'énergies générées par l'amélioration de l'efficacité énergétique, même si elles sont en partie converties en service (si l'effet rebond direct est inférieur à 100%), mènent à des économies financières. Cet argent disponible, assimilable à une augmentation du revenu, est par la suite réinvesti dans d'autres biens et services, dont la consommation d'énergie (directe ou indirecte) est non nulle. Par ailleurs, l'amélioration de l'efficacité énergétique d'une technologie (par exemple l'isolation d'un logement) nécessite la production de biens (par exemple les matériaux isolants) et cette production nécessite une consommation d'énergie dans le secteur industriel. Cette consommation d'énergie étant indirecte, elle n'apparaît pas dans les modèles mono-sectoriels mais est visible dans les modèles multi-sectoriels où les dépenses d'un secteur affectent l'activité (et les consommations énergétiques) des autres secteurs de l'économie.
- **Effets macroéconomiques** : une large diffusion d'une amélioration de la performance énergétique peut conduire à une baisse de la consommation énergétique globale. Ceci entraînerait alors un relâchement de la demande sur les marchés de l'énergie et par conséquent une baisse du prix des énergies, ce qui encouragerait à une consommation plus élevée (du fait de l'élasticité négative de la demande d'énergie au prix de celle-ci). Cet effet n'est visible que dans les modèles représentant un équilibre entre l'offre et la demande d'énergie, excluant ainsi de fait les modèles ne traitant que de la demande. D'autre part, l'amélioration de la performance énergétique d'une technologie favoriserait principalement les secteurs les plus intensifs en énergie et utilisant cette technologie, pour lesquels l'énergie représente une part importante des coûts de production. Ceci impliquerait une baisse du prix des biens et services plus importante dans ces secteurs que dans ceux moins intensifs en énergie, ce qui aurait pour conséquence d'orienter davantage les consommateurs vers les biens et services intensifs en énergie, augmentant alors la consommation énergétique nécessaire pour satisfaire leurs besoins. Cet effet n'est observable que si différents producteurs sont représentés et que les intensités énergétiques de leur production sont sensiblement différentes. Enfin, une amélioration globale de la productivité de l'économie en ce qui concerne l'énergie entraîne une augmentation de la croissance plus importante, dont les fruits sont consommés dans des biens et services dont la production nécessite de l'énergie.

L'effet rebond direct étant explicitement pris en compte dans certains modèles ingénier, il constitue ainsi une des rares manières par laquelle la dépendance des comportements quotidiens de consommation d'énergie à d'autres variables est prise en compte dans ce type de modèle. En ce sens, cette représentation se rapproche des concepts d'élasticité de court terme de la demande d'énergie au revenu des ménages et aux prix des énergies dans les modèles économétriques. On peut observer d'une part que l'efficacité énergétique n'est représentée que dans une partie des modèles économétriques traitant de la demande d'énergie (et que ceux-ci n'ont pas forcément des formes fonctionnelles permettant de formaliser l'effet rebond de manière satisfaisante [Saunders, 2008]), et d'autre part que l'effet rebond direct est pris en compte dans un nombre croissant de

modèles BU ingénieur. L'effet rebond direct apparaît donc comme un concept à l'interface dans ces deux types de modèles et permet un dialogue sur des éléments communs, même si celui-ci est difficile. A l'inverse, les effets rebond indirect et macroéconomiques n'apparaissent que dans les modèles intersectoriels et macroéconomiques, ce qui limite leur compréhension par la communauté des ingénieurs et rend la possibilité d'un lieu commun de modélisation plus difficile. Dans le cadre de cette thèse, centrée sur un unique secteur et un unique pays, seul l'effet rebond direct sera traité en détail (dans la partie II). C'est pourquoi, sauf mention contraire, le terme d'effet rebond sera utilisé dans la suite de cette thèse pour désigner uniquement l'effet rebond direct.

1.2.2. Diffusion des technologies énergétiquement efficaces : de la constante de temps au changement technologique endogène

Une deuxième composante essentielle de la dynamique des consommations, outre l'usage qui est fait des technologies, est l'évolution temporelle de la performance de l'infrastructure technique. Celle-ci est la résultante de deux mécanismes distincts : le choix des technologies (plus ou moins efficaces) par les agents et l'évolution de la performance et du coût du panier technologique dans lequel les agents peuvent choisir leurs technologies. Le premier mécanisme a été principalement étudié et formalisé autour de deux théories : la théorie économique du consommateur (maximisant son utilité ou minimisant ses dépenses) et la théorie de la diffusion des innovations. La résultante de ce mécanisme est la diffusion d'une technologie au sein de la population. Le deuxième mécanisme, quant à lui, est un ensemble de phénomènes de natures diverses, pouvant toucher à la fois les consommateurs et les producteurs d'équipements, regroupés sous le terme d'apprentissage technologique, dont la résultante est l'évolution au cours du temps de la performance et du rapport prix/performance d'une technologie (ou de l'infrastructure technique globale lorsque les technologies individuelles ne sont pas détaillées).

a) Modélisation de la diffusion des technologies

Le modèle dominant dans la représentation de la diffusion des technologies est basé sur une forme fonctionnelle de type logistique (ou sigmoïde, ou encore « courbe en S »), comme indiqué sur la Figure 56. En effet, la diffusion observée de nombreuses innovations suit globalement cette forme, comme on peut le constater dans les Figure 36 et Figure 42 du chapitre 1. A partir de cette forme fonctionnelle, les deux seuls paramètres à déterminer pour modéliser la diffusion d'une technologie sont le marché maximum potentiel (ou niveau de saturation) de celle-ci et son temps de pénétration (*take-over time*) dans le marché, pouvant être défini comme le temps nécessaire pour qu'elle passe de 10% à 90% du marché maximum potentiel. C'est par exemple à partir de cette fonction qu'un des premiers modèles quantitatifs de diffusion des technologies a été proposé par Fischer et Pry (1971). L'étude de la diffusion des principales technologies énergétiques par l'IIASA⁵⁷ au cours des années 80 et 90⁵⁸ indique que leur temps de pénétration, autrement appelé « constante de temps », est en moyenne d'environ 40 ans, mais présente des variations non négligeables d'une technologie à l'autre (l'écart type des constantes de temps étant sensiblement égal à leur moyenne).

⁵⁷ Internationale Institute for Applied System Analysis.

⁵⁸ Voir [Grübler et al., 1999] pour les mentions détaillées de ces études.

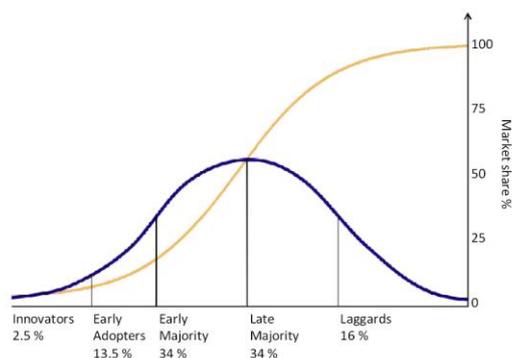


Figure 56 : Représentation simplifiée de la diffusion d'une technologie par sa part de marché cumulée (fonction logistique, en jaune) et le nombre de nouveaux adopteurs (fonction gaussienne, en bleu). [Rogers, 2003]

Pour expliquer les différences de vitesse et d'ampleur de diffusion des technologies existantes aujourd'hui sur le marché, une analyse statistique de leur diffusion peut être effectuée. Dans la littérature, cette analyse est réalisée à l'aide de régressions statistiques utilisant des formes fonctionnelles diverses (mais essentiellement logistiques) sur les facteurs pouvant être explicatifs de la diffusion des technologies étudiées. Par exemple, Zhang et ses collaborateurs (2011) utilisent une régression multilinéaire pour estimer la quantité de panneaux photovoltaïques installés au Japon, qui prend en compte l'ensoleillement des régions étudiées, la disponibilité de subventions, le revenu des ménages ou encore le coût des systèmes. McNeil et Letschert (2010) utilisent une forme fonctionnelle de type logistique pour estimer la pénétration d'équipements électriques les plus consommateurs (réfrigérateur, climatiseur, télévision, machine à laver) en fonction du revenu moyen, du taux d'électrification et du taux d'urbanisation des pays étudiés. On pourra noter que la saturation de la courbe logistique dépend dans leur modèle de la rigueur du climat.

Par contre, pour modéliser la diffusion de technologies actuellement inexistantes il est nécessaire d'asseoir cette modélisation sur des bases théoriques et non sur l'analyse statistique des observations. Les théories les plus utilisées sont la théorie néoclassique du consommateur et celle de l'utilité aléatoire (*random utility theory*). L'hypothèse de rationalité économique du consommateur peut aussi être retenue sans le formalisme lié à l'utilité du consommateur, pour déterminer la décision d'achat à partir de calcul technico-économique. Dans ce cas, l'option technologique apparaissant la plus intéressante économiquement (à partir de calculs de temps de retour, de valeur actualisée nette ou de coût global actualisé) est choisie par le consommateur.

Si les modèles de maximisation de l'utilité sous contrainte de revenu, caractéristiques de la théorie néoclassique du consommateur, ont déjà été présentés dans la section concernant les comportements d'achat (modèles d'élasticité constante de substitution, AIDS...), et pour lesquels les biens apportant l'utilité peuvent être l'énergie aussi bien que des technologies⁵⁹, les modèles issus de la théorie de l'utilité aléatoire nécessitent ici un bref rappel. Cette théorie, développée initialement par Thurstone (1927), puis étendue plus tard (e.g. [McFadden, 1974 ; Train, 2003]), permet de déterminer le choix, dit « discret », d'un bien dans un panier de biens (ces biens sont appelés « alternatives » du choix) par un consommateur. Pour ce faire, l'utilité retirée par le consommateur est décomposée en un terme dépendant des caractéristiques de l'alternative (et éventuellement de celles du consommateur) et un terme aléatoire ε , comme indiqué dans l'Equation 2.

⁵⁹ Par exemple, on pourra se référer au modèle à élasticité de substitution constante de Giraudet et Quirion (2008) dans lequel les ménages peuvent choisir entre un service énergétique, un bien énergétiquement efficace et un bien composite (représentant le reste des dépenses du ménage).

Equation 2

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in}$$

Avec U_{in} l'utilité inobservable que l'individu n associe à l'alternative i , V_{in} la part observable de l'utilité, pouvant être estimée à partir de données portant sur les choix des individus, et ε_{in} la part aléatoire et inobservable de l'utilité, représentant l'impossibilité de comprendre et d'observer tous les critères de choix des individus. Les ε_{in} sont indépendants et identiquement distribués et suivent une distribution de valeurs extrêmes.

Cette formalisation, sous certaines hypothèses concernant la forme du terme ε , permet de calculer la probabilité de choix d'une alternative parmi l'ensemble de celles-ci. Cette probabilité s'exprime sous une forme simple lorsque les alternatives du choix ne sont pas corrélées entre elles, tel qu'indiqué dans l'Equation 3.

Equation 3

$$P_{ni} = \frac{e^{V_{in}}}{\sum_{j \in J} e^{V_{jn}}}$$

Avec P_{ni} la probabilité que le ménage n choisisse l'alternative i , et J l'ensemble des alternatives possibles.

C'est cette famille de modèles, dits de type logit, qui est utilisée pour traiter le choix discret de technologie dans les modèles discrets-continus (e.g. [Dubin et Mc Fadden, 1984]) évoqués dans la section concernant les comportements quotidiens de consommation d'énergie.

Des modèles de décisions d'achat plus réalistes que ceux basés sur les hypothèses de pure rationalité économique existent mais ceux-ci sont plus complexes et plus difficiles à appliquer concrètement car ils nécessitent des données qui ne sont pas aussi aisément accessibles que les données économiques (et techniques dans une moindre mesure). Ces modèles sont essentiellement issus de la théorie de la diffusion des innovations (au sujet de laquelle un ouvrage central est celui de Rogers (1962)) et des théories comportementales de la décision, par exemple l'économie comportementale (e.g. [Simon, 1955 ; Kahneman et Tversky, 1979]), la théorie des comportements planifiés [Ajzen, 1991] ou encore la théorie valeur-croyance-norme [Stern, 2000]. Une présentation assez détaillée de ces modèles peut être trouvée dans la revue de littérature de Wilson et Dowlatabadi, c'est pourquoi ils ne sont qu'évoqués ici. Certaines applications quantitatives de ces théories (en particulier la théorie de la diffusion des innovations, celle des comportements planifiés et celle de la rationalité limitée) à la modélisation de la diffusion des équipements énergétiques dans le secteur résidentiel apparaissent cependant depuis quelques années (e.g. [Wittman et al., 2006 ; Michelsen et Madlener, 2010 ; Sopha, 2011]).

b) Phénomène d'apprentissage technologique

Par ailleurs, la diffusion des technologies entraîne des évolutions de leurs prix et de leurs performances. Comme ces variables influencent à leur tour les décisions d'investissement des ménages, la prise en compte de ce phénomène s'apparente donc à une boucle de rétroaction : plus une technologie est diffusée plus elle devient compétitive et donc plus elle est choisie. Elle gagnera donc progressivement des parts de marché jusqu'à ce que de nouvelles technologies, plus compétitives, la remplacent.

En ce qui concerne la modélisation technico-économique, le phénomène central analysé est l'apprentissage technologique, qui consiste à expliquer l'évolution (généralement la baisse) des prix des technologies et de leur performance (généralement à la hausse) au cours du temps. Celui-ci est la

résultante de plusieurs mécanismes, agissant à différents niveaux et stades de diffusion de l'innovation, et dont sont généralement distingués les cinq suivants :

- **Learning-by-researching** : cet apprentissage représente l'amélioration des technologies obtenue grâce à des investissements en recherche et développement, que Cohen et Levinthal (1989) ont été parmi les premiers à identifier. Cet apprentissage a lieu essentiellement aux premiers stades de développement d'une technologie.
- **Learning-by-doing** : ce concept, introduit initialement par Arrow (1962), se réfère à l'apprentissage qui a lieu lors de l'étape de production d'une technologie. Il consiste en l'amélioration progressive du processus de production, aussi bien vis-à-vis de l'infrastructure de production que de la main d'œuvre. Ses conséquences sont sensibles sur la diminution des coûts pour produire une même technologie. Il a lieu essentiellement lorsque la technologie est déjà introduite sur le marché et produite en quantités non négligeables.
- **Learning-by-using** : ce concept, développé par Rosenberg (1989), se réfère aux améliorations apportées à une technologie à partir du retour d'information des utilisateurs de celle-ci. Il est donc d'autant plus important que la technologie est largement utilisée.
- **Learning-by-interacting** : ce type d'apprentissage a lieu dans les derniers stades de diffusion d'une technologie et se réfère aux échanges entre les différents acteurs liés à cette technologie (chercheurs, producteurs, utilisateurs, pouvoirs publics). Ces échanges apportent une source supplémentaire de connaissance à la firme productrice et participent donc à l'amélioration de la technologie. L'étude de cet effet a été initiée par Lundvall (1988).
- **Effets d'échelle** : l'augmentation des capacités de production, lors du passage d'une technologie vers la production de masse, peut s'accompagner d'une réduction des coûts par unité produite, ce qui participe au processus d'apprentissage.

Les effets d'apprentissage ont principalement été étudiés en ce qui concerne les technologies de production d'énergie (et en particulier d'électricité) mais la dernière décennie a vu l'apparition de travaux portant sur les technologies de la demande. Les travaux pionniers concernant les technologies liées à la demande d'énergie sont ceux d'Iwafune (2000), Laitner et Sanstad (2004), Jakob et Madlener (2004), ainsi que ceux de Weiss et de ses collaborateurs (2008, 2009, 2010b), qui ont en particulier réalisé une importante revue de la littérature existante [Weiss et al., 2010a].

La modélisation la plus répandue de l'apprentissage technologique est celle des « courbes d'apprentissage », ou « courbes d'expérience », basées sur une fonction puissance décroissante (Equation 4). On définit par ailleurs le *taux d'apprentissage* d'une technologie par le pourcentage de réduction de prix d'une technologie associé à un doublement du cumul des capacités (ou du nombre d'unités) installées. D'après la revue de littérature de Weiss et de ses collaborateurs (2010a), les taux d'apprentissage des technologies de la demande d'énergie sont en moyenne de 18%, avec un écart-type de 9%.

Equation 4

$$C = \alpha \cdot K^\beta$$

Avec C le coût de la technologie, α une constante, K le nombre d'unités ou la capacité cumulée de la technologie et β tel que le taux d'apprentissage soit égal à $(1-2^{-\beta})$.

L'apprentissage technologique a été intégré dans des modèles en équilibre partiel (e.g. POLES), rendant plus réaliste l'évolution du coût des technologies, mais aussi dans des modèles d'optimisation du système énergétique. La représentation de l'apprentissage la plus répandue est

celle du *learning-by-doing* mais certains modèles intègrent aussi le *learning-by-searching* (e.g. [Kouvaritakis et al., 2000]). On pourra remarquer que l'intégration des phénomènes d'apprentissage technologique dans les modèles d'optimisation du système énergétique peut être difficile. En effet, ces derniers sont basés sur des algorithmes d'optimisation linéaire alors que le phénomène introduit est de nature non linéaire. Son introduction implique alors l'existence de plusieurs optimums locaux au lieu d'un unique optimum global et pose dans tous les cas des problèmes calculatoires importants.

Dans modèles *top-down*, les élasticités de substitution permettent de représenter les variations de performance énergétique en réponse à des variations de prix des énergies, tandis qu'un indice d'amélioration autonome de l'efficacité énergétique (*autonomous index of energy efficiency* (AIEE), e.g. [Lucik, 1999]) peut être utilisé pour représenter les améliorations de l'intensité énergétique pendant les périodes de stabilité du prix des énergies, dues au phénomènes d'apprentissage.

1.2.3. Le paradoxe de l'efficacité énergétique

Le mode de calcul généralement utilisé dans les modèles technico-économiques pour déterminer la solution technologique la plus rentable pour l'utilisateur (et donc celle qu'il choisira) est la valeur actuelle nette (VAN), telle que décrite dans l'Equation 5:

Equation 5

$$VAN = -\text{investissement} + \sum_{i=1}^{\text{durée de vie}} \frac{\text{économies d'énergie}_i}{(1+TA)^i}$$

Avec i l'année après l'investissement et
TA le taux d'actualisation

Le taux d'actualisation (TA) est un paramètre central dans le calcul de la VAN. Il reflète la préférence pour le présent des consommateurs. Avec un taux élevé, des bénéfices à long terme sont peu pris en compte par rapport à des bénéfices de court terme. Ainsi, plus ce taux est élevé moins un investissement dans une technologie énergétiquement efficace (présentant un coût d'investissement élevé mais permettant des économies d'énergies pendant toutes les années de sa durée de vie) apparait comme rentable vis-à-vis de ce critère.

Depuis le début des années 1970, la communauté des ingénieurs s'interroge sur les raisons de la non-réalisation des investissements en équipements énergétiquement efficaces à VAN positive. En effet, il est souvent observé que les technologies standard du marché ont des parts de marché sensiblement plus importantes que les technologies les plus efficaces même si ces dernières apparaissent plus rentables d'après l'analyse économique. C'est cet écart entre l'investissement optimal et l'investissement effectif dans les technologies énergétiquement efficaces qui a amené Jaffe et Stavins (1994) à l'énoncer sous le terme de *paradoxe de l'efficacité énergétique*.

Il est important de noter que les calculs de VAN à partir desquels est établi ce constat sont réalisés en utilisant des taux d'actualisation généralement compris entre 4% (reflétant une perspective d'optimisation sociale intergénérationnelle) et 8% (reflétant une préférence pour le présent plus proche de celle d'un investisseur privé). Pour pouvoir expliquer les choix effectifs des consommateurs en termes d'efficacité énergétique par leur rationalité économique à l'aide du calcul de la VAN, il faudrait que ce taux soit sensiblement plus élevé. Ceci a amené à la conceptualisation des taux d'actualisation dits « implicites » (*implicit discount rates*), qui sont calculés comme le taux d'actualisation permettant d'expliquer les choix observés. De nombreuses mesures de ces taux ont été publiées à propos d'une grande variété d'équipements énergétiques utilisés par les ménages

(voir [Train, 1985 ; Ansar et Sparks, 2009] pour des revues de la littérature) et varient généralement entre 20% et 100%.

Les travaux de Jaffe et Stavins ont permis d'unifier l'approche des ingénieurs et la vision du paradoxe de l'efficacité énergétique par la communauté des économistes. Ils ont d'une part recensé l'ensemble des barrières à l'efficacité énergétique avancées dans la littérature pour expliquer la sous-optimalité des investissements et d'autre part distingué celles qui justifient une intervention publique pour les réduire de celles n'en justifiant pas. On peut ainsi différencier les défaillances du marché de l'efficacité énergétique des autres obstacles à la diffusion des technologies énergétiquement efficaces.

Les défaillances des marchés de l'efficacité énergétique portent essentiellement sur les problèmes d'*information*, sous des formes variées, dont seules les plus fréquemment citées sont présentées ici⁶⁰. Parmi celles-ci, le concept d'*information imparfaite* se réfère au constat que les consommateurs (voire les producteurs) n'ont pas la connaissance précise des bénéfices de l'efficacité énergétique. L'*asymétrie d'information* caractérise la situation où l'information concernant les bénéfices de l'efficacité énergétique ne sont transmis que partiellement du vendeur au consommateur. En effet, ces bénéfices ne sont totalement révélés à l'usage, par exemple dans le cas des équipements électriques performants dont l'impact ne peut être évalué précisément par la lecture de la facture (qui concerne l'ensemble des consommations). Les *incitations clivées* (ou *split incentives*) concernent le cas où l'agent qui finance l'investissement n'en tire pas les bénéfices. C'est le cas en particulier du « dilemme propriétaire-locataire », situation dans laquelle le propriétaire n'a pas intérêt à améliorer la performance de son logement puisque c'est le locataire qui paie la facture énergétique (et qui bénéficierait donc d'une baisse de celle-ci). Inversement, le locataire n'a pas intérêt à investir non plus car sa durée de résidence dans le logement est généralement inférieure à la durée de vie des équipements, ce qui implique que les bénéfices d'une amélioration de la performance iraient en partie aux futurs locataires. Enfin, les *contraintes de financement* reflètent la difficulté, pour certains acteurs, d'avoir accès au capital nécessaire à l'achat d'équipements performants, par l'intermédiaire de crédit. Ces défaillances du marché de l'efficacité énergétique justifient une intervention publique.

Parmi les obstacles à l'efficacité énergétique qui ne sont pas des défaillances de marché, on peut tout d'abord retenir les *coûts cachés*. Ces derniers regroupent un ensemble de coûts non pris en compte dans le calcul de la VAN. Par exemple, l'effort nécessaire à la recherche d'information concernant les technologies et les vendeurs qui les proposent peut être considéré comme un coût (faisant partie des *coûts de transaction* dans le formalisme de l'économie institutionnelle [Sanstad et Howarth, 1994 ; Mundaca, 2007]). Ces coûts cachés regroupent aussi la perte de bien-être associée au dérangement lors de travaux, à la dégradation de certains attributs des équipements (par exemple la teinte de la lumière des ampoules à basse consommation) ou encore le fait que les bénéfices énergétiques réels soient inférieurs à ceux prédits par les calculs ingénieur [Metcalf et Hassett, 1999]. Un autre obstacle important est celui de l'*hétérogénéité des préférences*. En effet, les calculs de VAN sont effectués à partir d'une situation de référence qui peut être sensiblement éloignée de celle d'une partie de la population. Or, si la situation est suffisamment éloignée de la référence, ceci peut remettre en cause les calculs de bénéfices énergétiques d'une amélioration de la performance et justifier le non-investissement. Par exemple, en ce qui concerne le chauffage, un ménage qui n'occupe son logement que peu fréquemment ou dont les exigences en termes de température de confort sont faibles tirera moins de bénéfices d'une amélioration de la performance thermique de son logement qu'un ménage passant l'intégralité de ses journées dans un logement fortement chauffé. Enfin, l'évaluation des bénéfices financiers futurs de l'efficacité énergétique

⁶⁰ Une description plus exhaustive de ces défaillances de marché peut être trouvée dans les travaux de Sorrell (2004), de Gillingham (2009) ou de Giraudet (2011).

dépendent de nombreuses variables dont la connaissance de l'évolution est incertaine (prix des énergies, prix de l'équipement en lui-même, existence de subventions, climat...). Dans ce contexte, l'irréversibilité de l'investissement peut donc inciter le consommateur à retarder sa décision d'achat, ce qui peut être formalisé par le concept de *valeur d'option* [Henry, 1974 ; Hasset et Metcalf, 1993 ; Ansar et Sparks, 2009]. L'ensemble de ces obstacles peut être considéré comme une composante normale du marché de l'efficacité énergétique et ne justifie donc pas a priori d'intervention publique.

Le paradoxe de l'efficacité énergétique étant défini par la différence entre les choix observés des agents économiques et les choix optimaux d'après l'analyse économique, la notion d'optimalité est centrale dans la quantification de cette différence. C'est l'optimum de Pareto⁶¹ qui a ainsi été choisi comme situation de référence de l'efficacité économique collective par Jaffe et Stavins. L'écart entre la situation actuelle et cet optimum permet alors de quantifier un gisement d'efficacité énergétique (*energy efficiency gap*) ou « potentiel sans regret » [Ostertag, 2003]. Si l'écart entre la situation actuelle et la situation optimale est expliqué par l'ensemble des barrières à l'efficacité énergétique, alors la quantification du gisement dépend de la nature des barrières prises en compte. Jaffe et Stavins ont ainsi distingué quatre optimums en fonction de la nature des barrières pouvant être éliminées, comme indiqué sur la Figure 57.

Dans cette figure, deux éléments n'ont pas été développés précédemment : les défaillances du marché de l'énergie (essentiellement la trop faible internalisation, dans le prix des énergies, des externalités négatives de la consommation d'énergie sur l'environnement et la sécurité énergétique), et l'élimination des politiques socialement non-rentables. Ceux-ci permettent ainsi de définir deux optimums autres que ceux liés aux imperfections du marché de l'efficacité énergétique et aux obstacles à l'efficacité énergétique : l'optimum social théorique et l'optimum social véritable. Ces derniers permettent de définir des potentiels sans regret d'efficacité énergétique du point de vue de la société, qui complètent l'analyse pour l'intervention publique en faveur des économies d'énergie.

On pourra remarquer que cette figure ne représente pas la situation de diffusion des meilleures technologies disponibles, qui permettrait de définir le gisement maximal d'économie d'énergie. Ce gisement atteindrait la valeur maximale de l'efficacité énergétique (en ordonnée sur la Figure 57) mais il ne correspondrait pas à un optimum économique au sens de Pareto. En effet, le financement d'une telle diffusion de technologies efficaces serait globalement trop coûteux par rapport aux bénéfices énergétiques et financiers qui en découlent. Il apparaît donc important de souligner que l'optimum « technique » de cette figure est bien un optimum technique et économique, et qu'il ne représente pas la situation d'efficacité énergétique maximale, à partir de laquelle un autre gisement d'efficacité énergétique peut être calculé. C'est pourquoi le titre initial de cette figure (*les différentes notions de gisement d'efficacité énergétique*) a été modifié pour indiquer que les gisements présentés ne correspondent qu'à ceux définis par l'écart à un optimum de Pareto.

⁶¹ Défini comme un état de la société dans lequel on ne peut pas améliorer le bien-être d'un individu sans détériorer celui d'un autre.

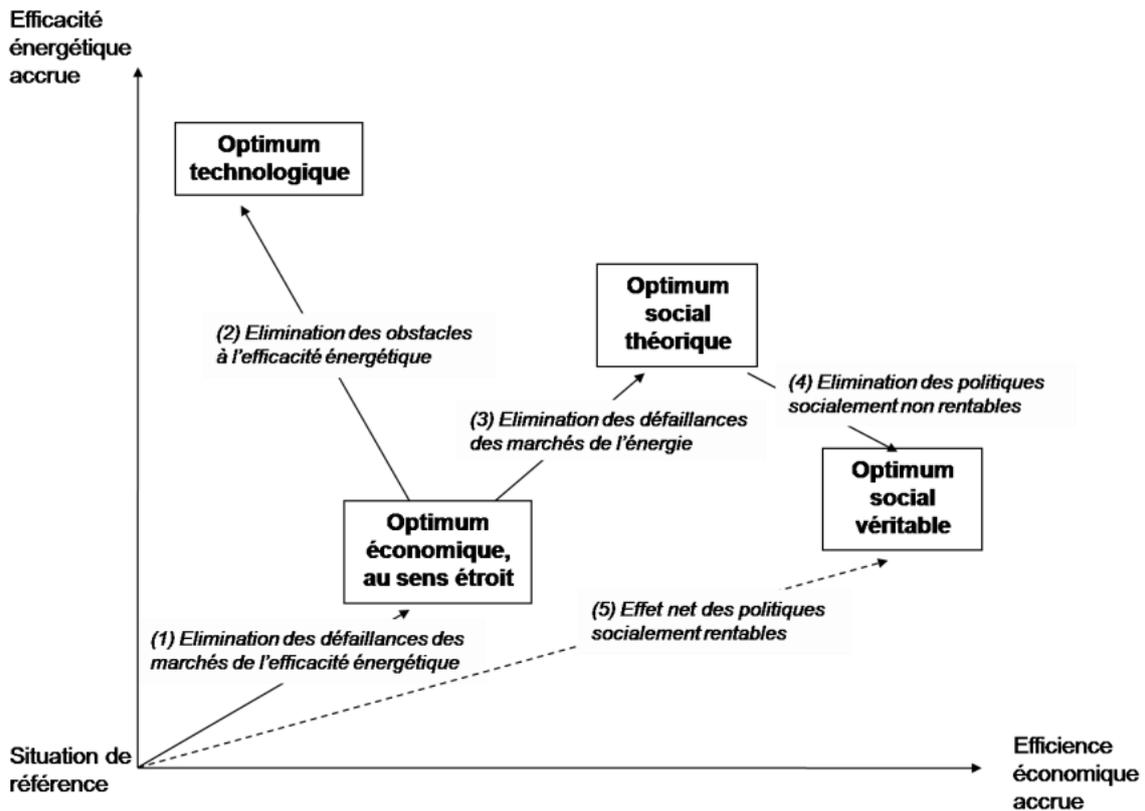


Figure 57 : Les différentes notions de situation optimale en termes d'efficacité énergétique permettant de quantifier les gisements d'économie d'énergie correspondants [Giraudet, 2011]

1.3. Taxonomie synthétique adaptée à la modélisation de la consommation d'énergie du secteur résidentiel et sa dynamique

Les taxonomies présentées dans la section 1.1 ainsi que la description des modèles utilisés pour déterminer l'évolution de l'usage des technologies et les caractéristiques de celles-ci (performance, prix) soulignent à la fois la grande quantité de modèles traitant de la dynamique des consommations d'énergie et la variété de leurs applications. Dans le cadre de cette thèse, l'objectif est d'une part de proposer un cadre analytique pouvant être un support de discussion entre plusieurs disciplines, principalement entre ingénieurs et économistes, et d'autre part de quantifier des scénarios variés d'évolution de la consommation d'énergie du secteur résidentiel. Cet objectif n'est donc exactement identique à aucun de ceux présentés dans les taxonomies présentées mais nécessite la prise en compte de chacune d'elles. Par conséquent, une taxonomie synthétique semble être nécessaire pour présenter la « boîte à outils » permettant d'atteindre l'objectif fixé, permettant par la suite de justifier les choix de modélisation réalisés.

La taxonomie proposée ici est décomposée en deux parties : les modèles relevant de l'estimation de la consommation d'énergie à un instant t , à partir de la description du système {ménages-environnement} (Figure 58), et les modèles traitant de l'évolution des éléments de ce système (Figure 59), eux-mêmes décomposés en déterminants directs et indirects de consommation d'énergie, tels que présentés dans le chapitre 1.

1.3.1. Modèles de calcul des consommations énergétiques à un instant t

En ce qui concerne les modèles permettant le calcul de la consommation d'énergie nationale à un instant t (Figure 58), la décomposition principale entre *top-down* (TD) et *bottom-up* (BU), largement utilisée dans la littérature, a été conservée. La distinction des modèles à l'intérieur de ces catégories a été choisie de manière différente de celle proposée par Swan et Ugursal (2009), présentée dans la section 1.1., en privilégiant une décomposition selon la nature théorique des modèles. Ainsi, parmi les BU, les deux catégories représentées dans notre taxonomie sont les modèles basés sur la théorie physique (ou modèles ingénieur) et ceux utilisant des méthodes statistiques pour estimer la consommation énergétique, ne reposant pas sur une théorie explicative de l'origine de ces consommations. De manière similaire, au sein des TD, sont distingués les modèles reposant sur la théorie du consommateur (microéconomie) des modèles reposant sur des méthodes statistiques.

Les modèles statistiques, qu'ils soient TD ou BU, peuvent permettre des estimations plus précises des consommations énergétiques actuelles ou passées car les formes fonctionnelles qu'ils utilisent ne sont pas contraintes par un formalisme issu d'une théorie particulière. Cependant, ces modèles étant basés sur l'observation du passé, il leur est difficile de simuler des situations qui en sont sensiblement différentes (par exemple l'introduction d'une nouvelle technologie), ce qui est nécessaire dans un contexte d'application de ces modèles à la prospective, et plus particulièrement pour envisager un système futur radicalement différent du présent vis-à-vis des émissions de gaz à effet de serre.

Enfin, on peut observer que la taxonomie proposée permet aussi de distinguer les modèles selon le type des déterminants utilisés comme données d'entrée. Les modèles physiques sont alimentés par des déterminants directs alors que ce sont essentiellement des déterminants indirects (prix des énergies et des équipements, revenu des ménages...) qui sont utilisés par les modèles économiques basés sur la théorie du consommateur. Les modèles statistiques, quant à eux, peuvent prendre en données d'entrée tout type de déterminant.

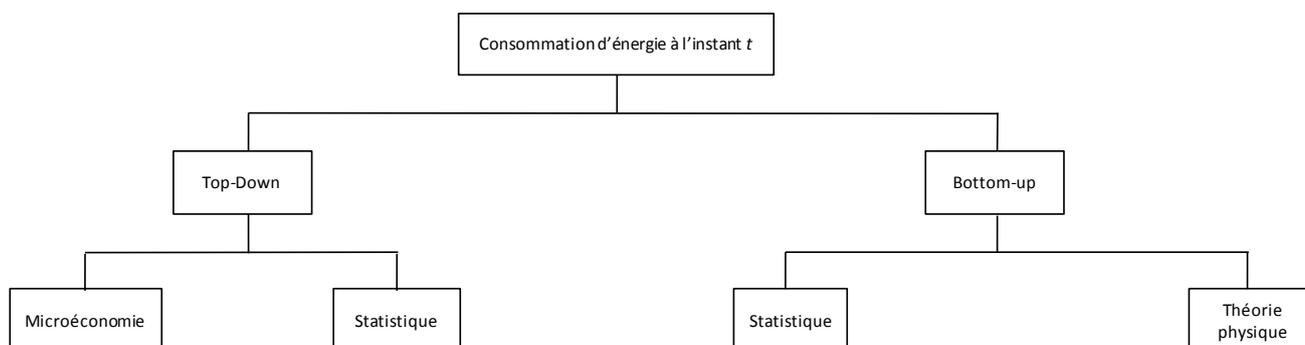


Figure 58 : Modèles permettant d'estimer les consommations d'énergie du secteur résidentiel à l'instant t

1.3.2. Modèles de dynamique des déterminants des consommations énergétiques

La deuxième partie de la taxonomie proposée (Figure 59) traite de la façon de modéliser la dynamique des déterminants des consommations énergétiques dans le cadre d'un modèle prospectif fonctionnant de manière récursive, c'est-à-dire par pas de temps. A chaque pas de temps, les déterminants permettent le calcul des consommations d'énergie par les modèles BU ou TD et, entre chaque pas de temps, l'évolution de ces déterminants peut être modélisée à l'aide de divers mécanismes dont les types les plus représentatifs sont rappelés ci-dessous.

Concernant le prix des énergies, soit les modèles étudiés au cours de cette thèse utilisent les résultats d'études particulières, essentiellement l'étude annuelle « World Energy Outlook » de l'Agence Internationale de l'Energie, soit ils déterminent le prix des énergies de manière endogène à l'aide d'une modélisation de l'équilibre offre-demande. Dans ce dernier cas, on peut distinguer les modèles d'équilibre partiel (e.g. POLES), ne représentant l'équilibre qu'au niveau d'un seul marché (celui de l'énergie), et les modèles en équilibre général qui représentent l'ensemble de l'économie (e.g. Imaclim-R). L'importance de la demande énergétique d'un secteur d'une économie nationale par rapport à celle de l'ensemble des secteurs à plus grande échelle géographique étant relativement faible, ceci explique pourquoi de nombreux modèles sectoriels à l'échelle nationale se basent sur des trajectoires exogènes de prix des énergies plutôt que sur une modélisation du marché de l'énergie.

Vis-à-vis de l'évolution des coûts et de la performance des technologies au cours du temps, le découpage proposé distingue les modèles basés sur des trajectoires exogènes, par exemple sur la base d'expertise externe (e.g. [Cayla, 2011]), de ceux représentant un ou plusieurs phénomènes d'apprentissage technologique (e.g. POLES, RES-IRF). L'utilisation de l'indice d'amélioration autonome de l'efficacité énergétique dans les modèles *top-down* est assimilée dans cette classification à une trajectoire exogène d'amélioration des coûts et de la performance des technologies. L'étude de l'apprentissage technologique sur les technologies de la demande d'énergie (par opposition à celles de la production) étant relativement récente, ceci explique pourquoi les modèles qui l'intègrent sont encore relativement rares.

Le dernier déterminant indirect des consommations énergétiques du secteur résidentiel est la richesse des ménages, dont la modélisation de l'évolution est assimilée ici de manière simplificatrice à celle de la croissance économique. Si la majorité des modèles *bottom-up* sont basés sur une hypothèse de croissance constante (voir par exemple la revue de littérature des scénarios « Facteur 4 » pour la France [Mathy et al., 2011]), déterminée de manière exogène, les modèles *top-down* représentent généralement la croissance économique de manière sensiblement plus fine. Ici sont regroupés sous le terme de « modèle de croissance » l'ensemble des modèles traités dans la taxonomie de Crassous (2008), c'est-à-dire les modèles récursifs de croissance exogène (définissant la famille des modèles récursifs d'équilibre général calculable), les modèles intertemporels de croissance exogène (avec taux d'épargne optimal endogène, principalement utilisés au sein de la famille des modèles de croissance optimale et dans le cadre de leurs hybridations avec des modèles *bottom-up*) et ceux de croissance endogène (avec progrès technique endogène ou même moteur de croissance endogène, encore peu utilisés).

En ce qui concerne les déterminants directs des consommations énergétiques, les déterminants directs dont la modélisation est réalisée avec le plus de détail au sein des modèles étudiés au cours de la thèse sont le choix et l'usage des technologies. C'est pourquoi la dynamique de l'environnement physique et du volume maximal de service n'est pas décomposée en sous-familles dans cette taxonomie. En ce qui concerne l'environnement physique, et essentiellement l'évolution du climat, les données utilisées sont le plus souvent issues de scénarios réalisés à l'aide de modèles climatiques dédiés. On pourra cependant noter des travaux récents de modélisation en ce qui concerne l'effet d'*îlot de chaleur urbain*, traitant des différences de température entre les zones urbaines et leurs zones périphériques (e.g. [Pigeon et al., 2007 ; Pigeon et al., 2008]). Quant au volume maximal de service, celui-ci fait le plus souvent l'objet d'hypothèses des modélisateurs, par exemple en ce qui concerne l'évolution future de la surface habitable par personne (e.g. [Traisnel et al., 2010]).

Comme indiqué dans la section 1.2.2.1., les choix technologiques des agents peuvent être modélisés par l'élasticité de long terme des modèles économiques ainsi que par les élasticités de substitution (suivant la nature du modèle), et ce même si les technologies ne sont pas explicitement représentées. Les choix peuvent aussi être déterminés à l'aide d'une modélisation statistique de la

diffusion des technologies représentées, par exemple à l'aide de fonctions logistiques, ou encore déterminés de manière exogène par le modélisateur (en particulier dans le cas de scénarios exploratoires). Enfin, la catégorie « simulation » des modèles de choix technologiques regroupe les modèles de choix discret (de la famille logit), la simulation technico-économique basée sur le choix de l'option technologique présentant la VAN maximale (ou le coût global actualisé minimal) ainsi que les modèles de choix plus fins, intégrant des notions de théorie de diffusion des innovations ou de théorie comportementale (e.g. [Sopha, 2011]).

Enfin, l'usage des technologies par les ménages, lorsqu'il est traité, prend généralement une des formes suivantes : des hypothèses exogènes du modélisateur, la prise en compte de l'effet rebond (dans les modèles ingénieur) et l'élasticité de court terme (dans les modèles économiques).

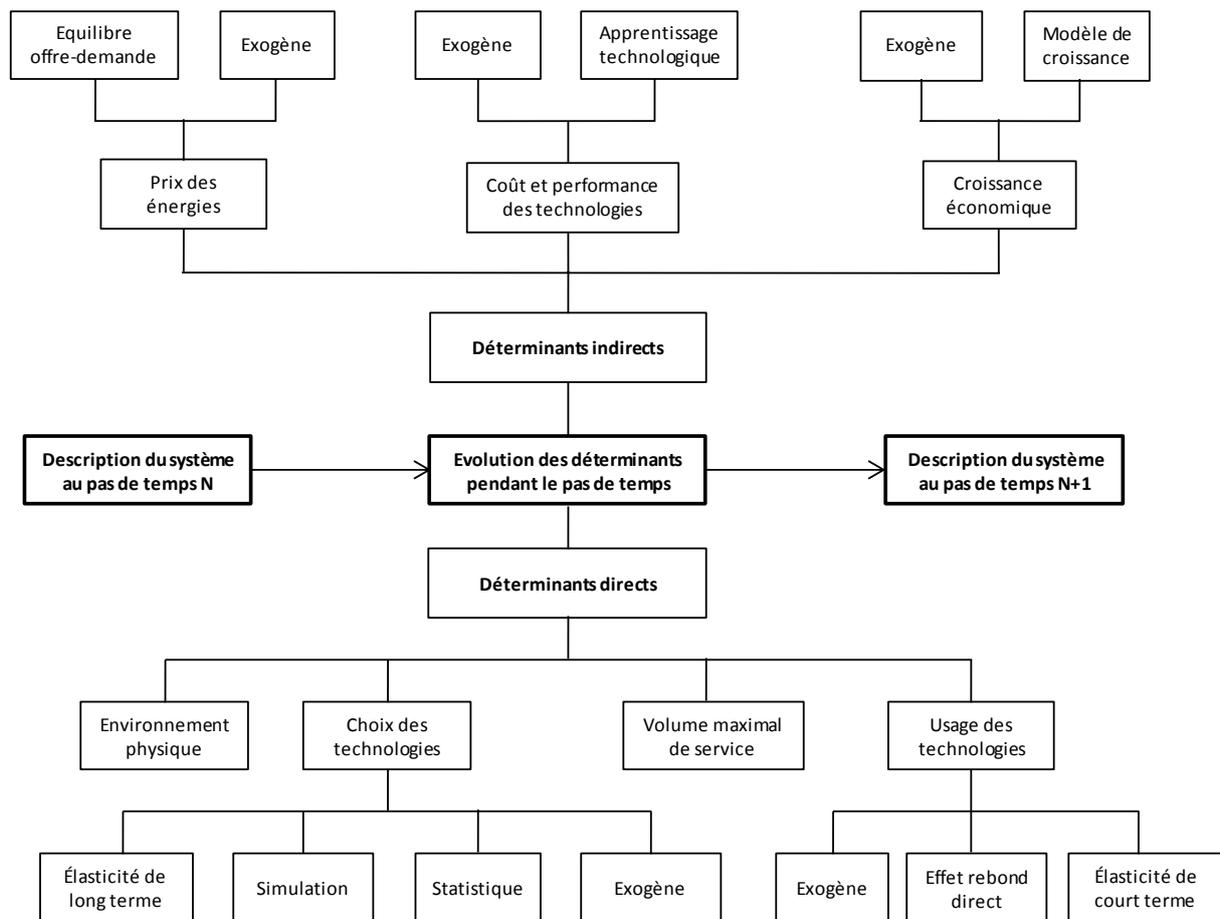


Figure 59 : Modèles de l'évolution temporelle des déterminants directs et indirects des consommations énergétiques du secteur résidentiel

2. Application des modèles à l'étude prospective de la demande d'énergie du secteur résidentiel à l'échelle nationale

Les modèles présentés dans la première section ont été développés pour répondre à des objectifs très divers, allant de la représentation des observations de corrélations entre variables du système {ménages-environnement} à l'aide à la décision pour les politiques internationales. Ceci explique que l'intégralité de ces modèles ne soit pas utilisée pour des applications à l'étude prospective des consommations énergétiques, même si les exercices prospectifs peuvent eux aussi répondre à des objectifs très différents. La présente section propose d'analyser les liens entre les objectifs de ces exercices et le choix des modèles les plus adaptés pour y répondre, parmi l'ensemble des modèles précités. Cette analyse vise à déterminer quelles sont les options de modélisation les plus pertinentes pour répondre à l'objectif de la thèse, c'est-à-dire la simulation de scénarios technico-économiques décrits de manière technologiquement explicite concernant les consommations d'énergie du secteur résidentiel français. Après un tour d'horizon des liens entre questionnements prospectifs et modèles, le cas particulier de la demande énergétique du secteur résidentiel français sera étudié au travers de la présentation des scénarios existants et des modèles utilisés.

2.1. Des caractéristiques des exercices prospectifs au choix du modèle

La prospective est une démarche dans laquelle les futurs possibles sont étudiés pour mieux guider les décisions actuelles. Si cette démarche est réalisée dans une perspective déterministe, elle reste cependant éloignée de la prédiction inconditionnelle, en se limitant à indiquer des futurs possibles sous un certain nombre d'hypothèses concernant l'évolution des données descriptives du système étudié et celle des liens entre ces variables. L'étude prospective repose donc sur la production et l'analyse de scénarios reflétant ces hypothèses. Leur objectif est essentiellement d'alimenter les décisions stratégiques [Boulanger et Bréchet, 2003] en permettant de gérer les incertitudes et les risques [Ringland, 1998]. Un avantage de la construction de scénarios est par ailleurs de réduire une quantité très importante d'informations en un format contrôlable sans simplification abusive [Lindgren et Bandhold, 2003].

Si l'étude de ce que pourraient être les consommations énergétiques dans un futur plus ou moins lointain a généralement pour but d'alimenter les réflexions autour de décisions stratégiques concernant les choix énergétiques actuels et futurs, cette étude revêt cependant un intérêt différent selon l'acteur qui s'attache à cet exercice. Les décisions stratégiques dans le domaine énergétique se réfèrent principalement au cadre réglementaire (politiques publiques) et aux choix d'investissement (publics et privés), les deux entretenant une relation d'interdépendance⁶². Cela explique pourquoi la production de scénarios énergétiques est limitée aux acteurs ayant les moyens de prendre ces décisions ou la légitimité de les influencer, soit essentiellement la puissance publique (de l'échelle

⁶² Voir par exemple le débat sur la sortie du nucléaire, décision qui pourrait être prise par la puissance publique mais dont le coût dépend très directement des investissements effectués par le passé dans le développement de l'infrastructure de production électrique basée sur cette source d'énergie. A l'inverse, un producteur d'énergie fortement carbonée peut conditionner ses choix de développement d'infrastructure aux décisions politiques contraignant les émissions de gaz à effet de serre.

infranationale à internationale), la société civile, les énergéticiens et les producteurs d'équipements liés aux consommations d'énergies. Ces acteurs ne partagent pas les mêmes intérêts entre eux, et ce même au sein d'une catégorie⁶³. La diversité de leurs objectifs explique la diversité des scénarios produits, dont les différences reposent autant sur le choix des modèles que sur le corps d'hypothèses les alimentant, ce que la suite de cette section se propose de détailler.

2.1.1. Typologie des scénarios

D'après la typologie proposée par Börjeson et ses collaborateurs (2006), les scénarios peuvent être regroupés en trois catégories : prédictifs, exploratoires et normatifs (Figure 60), qui correspondent à trois types de perception du futur modélisé : probable, possible et souhaitable [Marien, 2002], et répondent aux questions suivantes : « que va-t-il arriver ? », « que peut-il arriver ? » et « comment telle cible peut être atteinte ? ».

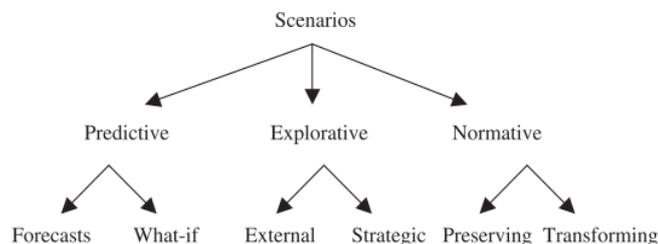


Figure 60 : Typologie des scénarios [Börjeson et al., 2006]

Les scénarios prédictifs essaient de décrire un futur probable, dont l'anticipation permet de planifier une adaptation. Ils peuvent être distingués en deux types : prévision (*forecast*) et scénario « et si... ». Dans le premier cas, le scénario essaie de prévoir l'évolution du système observé sans spécifier une discontinuité particulière. L'illustration la plus simple dans le cas énergétique est celle de la prévision des consommations dans un futur proche réalisée à partir de la prolongation de la tendance observée sur une certaine période passée (voir par exemple les différentes projections de la consommation française de pétrole depuis 1960, Figure 61). Ce type de scénario sous-entend cependant que le système étudié ne soit pas sujet à des modifications structurelles en forte discontinuité avec les observations du passé, ce qui cantonne son utilisation à des prévisions tendanciennes, généralement à court terme (moins de 15 ans pour la demande énergétique). Ces scénarios faisant référence à une vision d'un futur probable, ils peuvent être accompagnés d'indication d'un intervalle de confiance (marges hautes et basses), comme par exemple le Bilan Prévisionnel annuel du Réseau de Transport Electrique (RTE) (e.g. [RTE, 2012]). Le deuxième type de scénario prédictif, le « et si », quantifie l'impact qu'aurait un événement en particulier sur l'évolution du système observé. La production de ce type de scénario permet d'apprécier les résultats en valeurs relatives par rapport à un scénario de référence (qui peut être tendanciel) dans lequel l'événement n'arrive pas. On notera que dans cette typologie des scénarios, les « et si » n'intègrent pas de changements structuraux, mais seulement des modifications à la marge de la situation existante, ce qui permet cependant la production de scénarios contrastés (comme par exemple les politiques alternatives présentées dans le World Energy Outlook de l'Agence Internationale de l'Energie [AIE,

⁶³ Par exemple, un producteur de pétrole n'a pas les mêmes intérêts stratégiques qu'un producteur d'électricité. De même, les politiques territoriales sont plus sensibles au caractère local et non-délocalisable d'une éventuelle création d'emploi que les politiques nationales et internationales. Enfin, la société civile abrite des groupes de personnes ayant des perceptions et convictions sensiblement différentes, par exemple dans le rapport à la production électrique nucléaire.

2011]). On retiendra finalement que les scénarios prédictifs sont les seuls pour lesquels l'utilisation de modèles statistiques « répétant » les observations passées n'est pas gênante car la nature même de ces scénarios contraint de ne pas dévier fortement de ces observations. Pour les scénarios prédictifs, l'utilisation du modèle le plus réaliste possible est souhaitable. C'est pourquoi, en reprenant la taxonomie de Mundaca, les modèles de simulation semblent les plus adaptés.

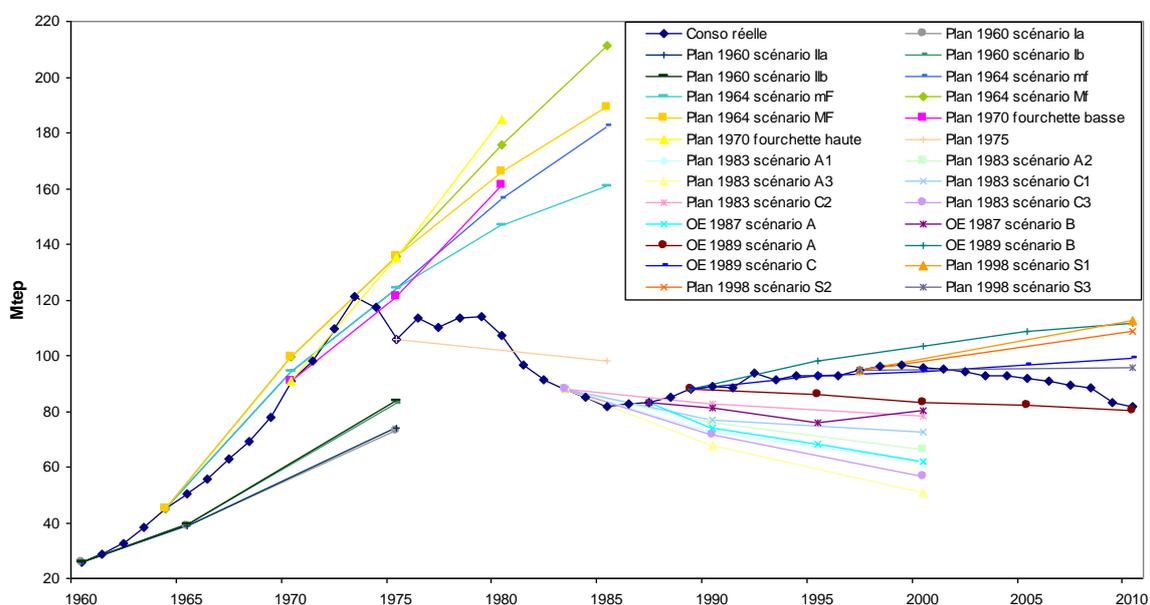


Figure 61 : Consommations primaires de pétrole en France : historique et projections [Laurent et al., 2011]

Les scénarios de la deuxième catégorie sont dits « exploratoires ». Les exercices prospectifs basés sur ces scénarios visent à explorer l'ensemble des possibles, et non des probables, ce qui implique des horizons temporels éloignés, une palette très vaste de scénarios et des résultats sensiblement plus contrastés que dans les exercices prédictifs. Leur approche ne diffère des scénarios « et si » que dans la profondeur des changements envisagés, qui peuvent être de nature non tendancielle non seulement vis-à-vis d'un élément du système mais aussi vis-à-vis du système dans son ensemble, ce qui requiert une connaissance fine du fonctionnement du système étudié. L'intérêt premier de cette catégorie de scénarios étant la description de futurs possibles, la transition entre l'état présent du système étudié et son état futur peut ne pas être explicitée. La distinction, proposée par Börjeson, entre scénarios « externes » et « stratégiques » concerne la nature des éléments du système sur lesquels les changements portent. Si ceux-ci sont hors de contrôle du décideur auquel s'adresse le scénario, alors ce scénario est qualifié d'« externe », alors que l'exploration de l'influence de variables sur lesquelles le décideur a une influence donne lieu aux scénarios dits « stratégiques ». On notera que les scénarios « externes » permettent de tester la robustesse des scénarios « stratégiques ». Les scénarios exploratoires ne fixent généralement pas de cible particulière à atteindre mais étudient l'impact de changements possibles sur une variable en particulier, spécifique aux intérêts du décideur. Selon la profondeur des changements envisagés, les modèles les plus adaptés peuvent être les modèles de comptabilité (pour les changements les plus radicaux) et les modèles de simulation (pour des modifications moins fortes). En effet, les modèles de comptabilité permettent une liberté très forte dans la description des futurs envisageables, alors que ceux de simulations sont en partie basés sur un mimétisme des observations passées. Parmi cette dernière catégorie de modèles, la structure de certains modèles leur permet cependant une flexibilité suffisante pour explorer un large spectre de futurs possibles.

La dernière catégorie de scénarios est constituée de ceux qui visent un objectif particulier, considéré comme un futur souhaitable. Ces scénarios, dits « normatifs », visent à déterminer la façon dont cette cible peut être atteinte. Börjeson distingue deux catégories de scénarios normatifs selon la façon d'atteindre la cible : soit par ajustement du système existant (scénarios « préservants ») soit en déterminant les éléments du système actuel qui empêchent fondamentalement l'atteinte de l'objectif (scénarios « transformants »). Cependant, cette terminologie n'est presque pas utilisée dans la littérature énergétique. Les scénarios normatifs présentent l'intérêt de décrire des structures du système futur compatibles avec la cible envisagée et de proposer, lorsque cela paraît possible, les transitions les plus efficaces (du point de vue du décideur) du système actuel vers cette cible. Pour ce type de scénario, la notion de futur souhaitable est souvent équivalente à celle de situation optimale. C'est pourquoi les modèles d'optimisation semblent les plus indiqués.

Enfin, on notera que les catégories de scénarios mentionnées ne sont pas exclusives. Des exercices complexes de prospective peuvent intégrer des composantes de plusieurs types de scénarios, comme par exemple les travaux du GIEC (e.g. [IPCC, 2000]).

2.2. Exercices français à horizon temporel de 20 à 40 ans concernant le secteur résidentiel

2.2.1. Des scénarios fortement orientés par la politique énergétique nationale

Des exercices prospectifs concernant les consommations énergétiques nationales ont été réalisés depuis le milieu du XX^e siècle, comme expliqué au début de ce chapitre. L'activité de production de scénarios a cependant connu un pic pendant la dernière décennie, ce qui correspond à une prise en compte de la problématique du réchauffement climatique, couplée à une forte augmentation du prix des énergies fossiles. Ces éléments ont en particulier eu une traduction dans la loi française, avec la fixation d'un objectif de réduction de 75% des émissions de GES (le fameux « facteur 4 ») à l'horizon 2050 par rapport à 1990⁶⁴, et la fixation, dans le cadre du Grenelle de l'environnement, d'un objectif de réduction de 38% de la consommation d'énergie primaire des bâtiments existants à l'horizon 2020⁶⁵. Ces cibles explicites ont eu pour conséquence une focalisation des scénarios prospectifs sur les façons dont ces engagements nationaux pouvaient être tenus. Ainsi, l'atteinte du facteur 4 a fait l'objet de plus de sept études prospectives (voir [Mathy et al., 2011] pour une présentation détaillée) et celle des objectifs du Grenelle d'au moins trois études [Giraudet et al., 2011; Briard et al., 2010; Enerdata, 2011]. Il est intéressant de noter qu'une partie non négligeable de ces scénarios sont issus de la société civile ([négaWatt⁶⁶, 2006 et 2011; Acket et Bacher⁶⁷, 2007; Prévot, 2004 et 2007; Dessus⁶⁸, 2011]) et non de centres de recherches, entités liées

⁶⁴ Loi de Programme fixant les Orientation de la Politique Énergétique (dite « loi POPE »), loi n°2005-781 du 13 juillet 2005

⁶⁵ 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

⁶⁶ « négaWatt » est une association regroupant des experts de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables. Les scénarios développés reposent sur un abandon de la production électrique d'origine nucléaire, un fort développement des énergies renouvelables et une sobriété des comportements de consommation d'énergie.

⁶⁷ Ce scénario, dit « Négatep », a été développé par l'association « Sauvons le Climat ». Cette association « est constituée de retraités pour beaucoup ayant œuvré dans le domaine du nucléaire » [Mathy et al., 2011]. Le scénario partage avec négaWatt le fort recours à l'efficacité énergétique et aux énergies renouvelables, mais en diffère fortement par le fait qu'il propose un développement du nucléaire.

à la puissance publique (commission, ministères, groupes de travail) ou énergéticiens. L'introduction de la société civile dans la production de scénarios énergétiques reflète l'existence d'un besoin de débat sur le choix de l'avenir énergétique national ouvert à toutes les parties de la société : décideurs, entreprises et société civile. Enfin, on pourrait penser que les « plans climat énergie territoriaux », dont l'objectif est de décliner les objectifs de « facteur 4 » à l'échelle territoriale, aient pu donner lieu à une profusion de scénarios prospectifs locaux. Cependant, le recours à la modélisation prospective quantitative pour ces exercices reste encore très marginal [Godinot, 2011].

La fixation par les politiques énergétiques d'objectifs futurs souhaitables classe les études mentionnées dans la catégorie « normative ». Cependant, on peut remarquer que la « meilleure » façon d'atteindre ces objectifs peut aussi bien être définie à partir des convictions et expertises des auteurs que d'un résultat de calcul d'optimum sur une unité relativement neutre (comme le coût du kWh ou de la tonne de CO₂ évités). En effet, seul un modèle d'optimisation a été utilisé sur demande de l'Etat français (en l'occurrence le modèle Markal, dans l'exercice commandé par le Centre d'Analyse Stratégique pour la commission Syrota [Chambolle, 2008]) et plus récemment un modèle de simulation (le modèle RES-IRF du CIREN, pour le compte du CGDD [Giraudet et al., 2011]). On observe par ailleurs une focalisation importante des scénarios de long terme sur l'offre énergétique⁶⁹. Le rapport de la Commission Energie 2050 a ainsi recensé 22 scénarios, au sein de 6 études, portant sur l'évolution possible du parc de production électrique français [Percebois et Mandril, 2012]). On notera cependant que la première recommandation de ce rapport consiste à « faire de la sobriété et de l'efficacité énergétique une grande cause nationale ; lancer des appels à proposition afin de mobiliser la R&D et l'innovation dans ce domaine en privilégiant les secteurs du bâtiment et des transports ». L'observation des résultats montre que la contribution du secteur résidentiel à la réduction des émissions de GES varie sensiblement d'un scénario à l'autre, ces émissions pouvant être réduite de seulement 10% à plus de 80%.

On notera par ailleurs que l'écrasante majorité⁷⁰ des modèles utilisés sont de type *bottom-up*, c'est-à-dire qu'ils se basent sur une description technologique détaillée de la demande énergétique et de la production pour déterminer les consommations énergétiques nationales. Ces modèles n'intègrent donc pas de rétroaction macroéconomique, à l'exception du couplage MedPro-POLES (utilisé dans l'exercice de la commission Syrota) dans lequel le prix des énergies est déterminé de manière endogène, et du modèle MESANGE (utilisé pour l'évaluation du Grenelle de l'environnement) qui est un modèle *top-down* basé sur la représentation des relations macroéconomiques (et donc de rétroactions). Ceci montre que les avancées conceptuelles développées dans le cadre de l'étude des impacts du changement climatique (modélisation économie-énergie-environnement), en particulier la modélisation en équilibre général calculable et les modèles hybrides (*bottom-up* et *top-down*), n'ont pas encore été intégrées dans les débats à l'échelle nationale. Il apparaît donc que, si le point de vue des économistes est prédominant en ce

⁶⁸ Benjamin Dessus est le président de l'association Global Chance, qui vise à « promouvoir un développement mondial équilibré ». Cette association est constituée de scientifiques (encore en activité ou non) dont les champs de recherche sont proches de l'économie de l'énergie et de l'environnement. Cette association promeut en particulier la sortie du nucléaire, comme l'indique le nom du scénario proposé en 2011 : « Sortir du nucléaire en 20 ans ».

⁶⁹ Par exemple, le rapport de la Mission Interministérielle sur l'Effet de Serre (MIES) [Radanne, 2004], s'il mentionne bien le besoin de réduire la demande, propose des scénarios qui ne diffèrent entre eux que par le mix énergétique répondant à un même niveau de demande d'énergie finale en 2050 (qui intègre une forte réduction de la demande d'énergie).

⁷⁰ Tous les modèles mentionnés sauf celui utilisé par la Direction Général du Trésor pour l'évaluation des impacts économiques du Grenelle de l'environnement [Briard et al., 2010], qui est un modèle macroéconomique de type *top-down*, dans lequel le secteur de la consommation énergétique n'est décrit que de manière frustrée (ce qui en fait son principal défaut dans le cadre de l'évaluation du Grenelle [Fayrolle, 2011]).

qui concerne le débat climatique international (du moins dans l'évaluation des impacts économiques du changement climatique et dans la proposition des politiques adaptées à son atténuation), c'est essentiellement celui des ingénieurs qui alimente le débat énergétique national.

Les études prospectives mentionnées précédemment ont été réalisées à l'échelle de la France et le niveau de détail concernant la demande d'énergie du secteur résidentiel y est assez variable, allant d'un niveau de détail poussé et documenté à l'expression d'une demande agrégée dont le contenu n'est que peu détaillé (pouvant même être couplée à celle des bâtiments tertiaires). Il est important de noter que des études prospectives très détaillées ont été réalisées à l'échelle du seul secteur résidentiel et que leur objectif a été l'étude particulière de la demande d'énergie⁷¹ ([Traisnel et al., 2001 ; Traisnel et al., 2010 ; Laurent et al., 2006 ; Marchand et al., 2008 ; Giraudet et al., 2011; Cayla, 2011 ; Charlier et Risch, 2011b]). Si celles-ci ont été plus rares et moins médiatisées⁷² que les études nationales intersectorielles, elles fournissent cependant une analyse en profondeur des déterminants de la dynamique des consommations et permettent de tirer des conclusions spécifiques au secteur résidentiel.

2.2.2. Une variété de modèles, même à l'échelle du seul secteur résidentiel

Les études prospectives ne traitant que du secteur résidentiel français, citées précédemment, font appel à une panoplie de modèles aussi large que les exercices traitant de l'atteinte du facteur 4 à l'échelle nationale. Ainsi, les travaux de Traisnel (2001), Laurent (2006), et Marchand (2008) sont basés sur des modèles de comptabilité permettant de simuler l'impact énergétique de la diffusion de technologies spécifiques (en particulier isolation, systèmes de chauffage et d'eau chaude sanitaire), au sein d'un secteur résidentiel qui est très détaillé technologiquement. Le scénario facteur 4 de Cayla (2011) a été réalisé à partir d'un modèle d'optimisation technico-économique (Times-Markal) dans lequel les ménages choisissent de rénover leurs logements avec l'option technologique disponible la plus rentable. Ces ménages sont représentés de manière suffisamment fine pour permettre une analyse de la répartition de la contrainte du facteur 4 sur la population, en étudiant en particulier deux combinaisons de politiques : taxe carbone seule ou couplée avec des subventions. Il faut noter que le modèle développé a aussi été utilisé sans imposer de contrainte carbone pour déterminer un scénario de référence. Dans cette configuration, ce modèle peut être considéré comme un modèle de simulation, en particulier quand sont comparées l'évolution des consommations ou celle des émissions de GES selon différents scénarios (exogènes) de prix des énergies. Enfin, les études de Giraudet (2011) et Charlier et Risch (2011b) sont des modèles de simulation permettant d'observer l'effet d'une variété de mesure de politique énergétique (crédit d'impôts, prêts à taux zéro, exigences réglementaires de performance, obligation de rénovation) sur la dynamique des consommations d'énergie.

Le modèle de Giraudet présente la caractéristique forte d'être construit à partir d'une représentation complète des différentes barrières à l'efficacité énergétique, au-delà de la simple utilisation de taux d'actualisation élevés. Ce modèle est basé sur la description de la performance du parc de logements français en étiquettes DPE « énergie primaire » de l'ANAH⁷³ [Marchal, 2008a], mais intègre un facteur correctif permettant la représentation de l'effet rebond (ce facteur correctif est issu des travaux présentés dans le premier chapitre de la partie II de cette thèse). Ce modèle a en

⁷¹ Dans lesquelles des études de sensibilité à l'offre, en particulier au contenu carbone de l'électricité, ont parfois été menées (e.g. [Traisnel et al., 2010])

⁷² Faible médiatisation dont une preuve flagrante est l'extrait d'un article de conférence française en microéconométrie, en 2011: "To our knowledge, there is no study modelling the dynamics of French housing stock and the residential energy consumption" [Charlier et Risch, 2011a].

⁷³ Agence Nationale de l'Habitat

outre été développé pour être couplé à un modèle *top-down* au sein de l'architecture d'Imaclim-R pour améliorer le réalisme macroéconomique des simulations. Il représente donc le modèle le plus complet du paysage de modélisation français dans sa capacité à représenter en détail les éléments participant aux choix d'investissement des ménages. Sa limite principale réside dans le caractère non explicite de la description de la performance des logements⁷⁴.

Parmi les autres modèles ayant servi à la production de scénarios, il est intéressant de noter que le modèle utilisé par Traisnel et ses collaborateurs (2010) est à la base un modèle de comptabilité, mais dans lequel les choix technologiques y ont en partie été endogénéisés. En effet, le choix de renouvellement des systèmes de chauffage n'est pas fixé par le modélisateur mais choisis par les ménages en fonction d'un ordre de priorité⁷⁵ défini par le modélisateur et changeant selon le scénario. Les scénarios se distinguent alors par l'ordre de priorité des énergies de chauffage (présentant les différentes combinaisons possibles d'électricité, bois et gaz naturel). Des choix aussi extrêmes ne sont pas réalistes mais permettent de dépeindre les conséquences que pourraient avoir le fait de favoriser une énergie plutôt qu'une autre au travers des politiques énergétiques nationales.

L'ensemble des modèles évoqués repose sur des calculs ou des résultats de calculs thermiques. L'intérêt de cette base commune de calcul thermique réside à la fois dans le fait de proposer des résultats présentant un fort réalisme physique et de pouvoir communiquer aisément ces résultats aux différents acteurs intéressés par les consommations d'énergie. En ce qui concerne ce dernier point, les dernières années ont vu le Diagnostic de Performance Energétique (DPE) devenir omniprésent dans la communication des travaux relatifs aux usages thermiques de l'énergie dans les logements. Celui-ci qualifie les logements en termes d'étiquettes, allant de A à G, en fonction de la performance énergétique (en kWh/m².an d'énergie primaire) et environnementale (kgCO₂/m².an) pour les usages chauffage, eau chaude sanitaire et climatisation. Il apparaît cependant nécessaire de soulever deux points relatifs à son utilisation. Tout d'abord, seules les étiquettes « énergie primaire » sont mentionnées dans la plupart des études, ce qui pose un réel problème pour réutiliser ces résultats dans une optique de lutter contre le réchauffement climatique⁷⁶. Le deuxième point, essentiel, est que ces étiquettes reflètent une indication de performance qui est à distinguer de la consommation réelle des logements. En effet, les étiquettes « énergie primaire » reflètent la performance globale du logement, certes exprimée en unité énergétiques, mais calculée à partir d'hypothèses concernant des comportements quotidiens « normaux » de chauffage et de consommation d'eau chaude des ménages.

On notera que d'autres modèles prospectifs ont été développés sans que leurs résultats scénarisés aient fait l'objet de publication. Ainsi, l'ANAH a développé un modèle descriptif de la performance du parc résidentiel français, en étiquettes DPE « énergie primaire », dans lequel il est possible de simuler des évolutions technologiques [Marchal, 2008b]. De même, le bureau d'étude « Energies Demain » a développé le modèle « Enerter » [Houdant et Schram, 2009]. Très détaillé technologiquement⁷⁷, ce modèle a été exploité par un grand nombre d'utilisateurs sans que cela fasse l'objet de publication particulière. On retiendra cependant que la dernière étude de Traisnel et de ses collaborateurs (2010) est basée sur les résultats de ce modèle. L'ADEME a par ailleurs

⁷⁴ Le parc de logements n'étant décrit qu'en étiquettes DPE « énergie primaire », le modèle ne peut distinguer les gisements énergétiques spécifiques à certaines technologies. De même, il ne peut simuler de politiques énergétiques ciblant une technologie en particulier.

⁷⁵ voir [Traisnel et al., 2010] page 50 pour plus de détail sur les modalités de cette priorisation.

⁷⁶ Du fait de contenus carbone, de rendement et de prix sensiblement différents selon les énergies, il est possible que la « perte » d'une étiquette en énergie primaire soit rentable et fasse « gagner » une étiquette environnementale. C'est par exemple le cas lors d'une substitution d'une chaudière au fioul par une pompe à chaleur.

⁷⁷ L'ensemble des logements français y sont représentés individuellement.

développé un modèle à usage interne, MENFIS [Callonnec, 2011], dans lequel le parc résidentiel est décrit à l'aide de 216 « logements types » pour lesquels les coûts et les gains énergétiques de nombreux gestes d'économie d'énergie sont calculés à l'aide du DPE. Son objectif principal est l'évaluation des incitations économiques suivantes : taxe carbone, prêts à taux zéro et crédits d'impôts. Ce modèle est calibré sur les observations actuelles afin de reproduire les comportements des ménages, mais son horizon temporel le plus lointain est 2050. Enfin, un modèle d'équilibre général calculable à l'échelle de la France a récemment été développé par Bernard (2011), mais ses résultats ne sont pas encore publics. Ceux-ci prennent d'ailleurs en compte les étiquettes DPE « énergie primaire » pour distinguer les classes de performance des logements. Enfin, on pourra mentionner le développement en cours d'une version nationale du modèle Imacim-R du CIRED, modèle hybride composé d'un modèle d'équilibre général calculable couplé à des modules sectoriels *bottom-up* (voir [Crassous, 2008] pour une description détaillée).

Enfin, les modèles prospectifs mentionnés peuvent être comparés sur leur transparence. La complexité propre à la modélisation de la dynamique des consommations énergétiques implique qu'il est difficile de décrire intégralement le fonctionnement d'un modèle ainsi que la validité des données sur lesquelles il est basé (en particulier sous la contrainte du formalisme d'un article de revue scientifique). Ce point est relevé comme un frein majeur à l'appropriation des résultats par des non-spécialistes [Mathy et al., 2011]. Or, si les modèles prospectifs ont pour objectif d'aider à la décision, il n'est pas rare que les décideurs ou les lecteurs souhaitant influencer des décideurs ne soient pas spécialistes. Ainsi, il est difficile d'évaluer les résultats quantitatifs de scénarios dont seules les hypothèses principales sont mentionnées, au détriment des étapes de calculs intermédiaires et d'une présentation de la validité des données utilisées. Ceci ne remet pas en cause le sérieux avec lequel les scénarios ont été élaborés, mais empêche une compréhension détaillée des différences que l'on peut observer entre des scénarios issus de modèles différents. Or, ces différences proviennent autant des concepts de modélisation utilisés que des données alimentant ces modèles [Crassous, 2008]. Ce problème est essentiellement contourné de deux manières : par la description détaillée des modèles dans le cadre de publications qui peuvent par conséquent être très longues⁷⁸, et par le caractère accessible des modèles. L'accessibilité totale et gratuite est cependant rare. Le seul exemple français est le modèle et les données du scénario « bâtiments sans fossiles » [Marchand et al., 2008], dont l'accès libre sur internet⁷⁹ a donné lieu à plusieurs milliers de téléchargements.

2.2.3. Analyse des résultats

a) Des gisements physiques d'économie d'énergie à géométrie variable

L'estimation des gisements physiques d'économie d'énergie⁸⁰ est une question qui peut être résolue de manière statique, c'est-à-dire en partant de la « photographie » du parc de logements, d'équipements et de comportements actuels et en calculant la résultante énergétique d'une modification de cette photographie par l'introduction des meilleures technologies disponibles et, même si l'expression n'est pas consacrée, des « meilleurs comportements disponibles ». Le calcul de

⁷⁸ Par exemple : 108 pages pour [Traisnel et al., 2010], 105 pages pour [Traisnel et al., 2001], thèses de doctorat pour les modèles de Giraudet et Cayla.

⁷⁹ <http://innovation.edf.com/fichiers/fckeditor/Commun/Innovation/articles/BatimentsFrance2050sansfossilesV28web.xls>

⁸⁰ Cette notion de gisement d'économies d'énergie ne fait pas appel à optimum économique (par exemple au sens de Pareto, comme présenté dans la section consacrée au paradoxe de l'efficacité énergétique) mais à un optimum technique défini par la quantité minimale d'énergie pouvant être consommée pour répondre aux besoins énergétiques. De ce fait, cette notion fait appel au concept de « meilleures technologies disponibles » (MTD), ou *best available technologies* (BAT).

cette résultante énergétique nécessite une connaissance fine des différentes technologies étudiées, ce qui explique le recours systématique aux modèles *bottom-up* pour l'évaluation des gisements physiques d'économie d'énergie. Les modèles de comptabilité mentionnés précédemment ne font donc « que » représenter différentes façons d'exploiter le gisement d'économie d'énergie qu'ils peuvent estimer. Le volontarisme des scénarios est alors proportionnel à la rapidité et la qualité avec lesquelles le gisement estimé est exploité.

Les résultats des différents scénarios diffèrent essentiellement vis-à-vis de deux points : la méthode de calcul utilisée pour estimer le gisement physique et la nature du flux de modifications apportées à la « photographie » du parc résidentiel à l'année initiale. Tout d'abord, comme cela a été présenté dans la première section de ce chapitre, l'estimation peut être réalisée à partir de modèles ingénieur, basés sur la théorie physique dont la résultante ne s'ajuste pas forcément aux observations⁸¹, ou à partir de modèles statistiques basés sur des observations de consommations réelles. Les données publiques concernant la consommation réelle d'énergie des logements en fonction de leur performance technique étant rares, la grande majorité des modèles utilisent une approche ingénieur. Or, l'estimation par modèle ingénieur des gains énergétiques consécutifs à l'installation d'un même équipement efficace peut être entre deux et six fois supérieure à une estimation basée sur des consommations observées [Laurent et al., 2009]. Il convient donc de distinguer les études basées sur des estimations réalistes de gisements techniques de celles issues des calculs théoriques des modèles ingénieur.

Comme cela sera présenté plus en détail dans le premier chapitre de la partie II, on peut considérer que les modèles ingénieur les plus réalistes, c'est-à-dire ceux qui prennent en compte l'adaptation du comportement quotidien de chauffage des ménages à leur facture énergétique et le fait que l'installation des équipements peut faire l'objet de malfaçons compromettant leurs performances, ne peuvent que très difficilement mener à une estimation de consommation à l'horizon 2050 plus de deux fois inférieure à ce qui est observé aujourd'hui (e.g. [Marchand et al., 2008 ; Giraudet, 2011]). A l'inverse, on observe que des modèles ingénieur moins réalistes et utilisés de manière exploratoire peuvent annoncer jusqu'à une division par 8 des consommations d'énergie de chauffage (scénario électricité/bois/gaz dans [Traisnel et al., 2010]). Ce constat vaut aussi pour les émissions de GES, dont la réduction dans le secteur résidentiel varie entre 10% (scénario « sortie du nucléaire avec recours à la séquestration de CO₂ » de la MIES [Radanne, 2004]) et près de 95% (scénario bois/élec/gaz dans [Traisnel et al., 2010]). Si les écarts observés sont en partie dus aux choix de trajectoires technologiques, ils le sont aussi en partie aux différences de mode de calcul des gisements et plus particulièrement des différences entre les résultats de modèles ingénieur théoriques et les observations de consommations réelles.

Certaines études indiquant des gisements d'économies d'énergie par technologie (e.g. [McKinsey, 2009]), il est important de rappeler que ceux-ci ne sont pas additifs, c'est-à-dire que la somme des gisements mentionnés est supérieure au gisement total. En effet, les améliorations de la performance thermique des logements sont caractérisées par des rendements décroissants : le gain énergétique apporté par une technologie est d'autant plus faible que le reste du logement est performant. Par exemple, si l'amélioration du rendement du système de chauffage fait économiser 10% des consommations, la quantité d'énergie économisée sera sensiblement plus importante dans un logement très déperditif que dans un logement bien isolé. Les gisements par technologie sont estimés en considérant les autres technologies fixes, alors que l'estimation du gisement total implique la mise en place de toutes les technologies.

⁸¹ Une analyse détaillée des écarts entre les résultats de modèles thermiques et les consommations de chauffage observées est proposée dans le premier chapitre de la partie II.

Enfin, on notera que l'estimation des gisements physiques d'économie d'énergie concerne principalement les consommations de chauffage et d'eau chaude sanitaire, usages pour lesquels des solutions techniques performantes sont matures mais n'équipent pas encore la majorité des logements. D'autre part, ces usages présentent l'avantage de pouvoir être fournis, au moins en partie, à partir d'énergies renouvelables par l'intermédiaire des pompes à chaleur et des panneaux solaires thermiques. La cuisson est un usage pour lequel très peu d'études de gisements sont réalisées. En effet, sa consommation est relativement faible et stable dans le temps, ne présente pas d'options technologiques particulièrement plus économes que celles existantes, et ne dispose que d'une capacité limitée de substitution des énergies actuelles par des énergies d'origine renouvelable. Enfin, les usages liés à l'électricité spécifique font aussi l'objet d'études de gisement physique d'économie d'énergie. Celui-ci est cependant exploité de manières très différentes selon les scénarios. Ainsi, malgré des hypothèses d'efficacité concernant certains appareils, la consommation d'électricité modélisée augmente d'environ 20% entre aujourd'hui et 2050 dans les scénarios « bâtiment sans fossile », augmente du même ordre de grandeur dans les travaux de Bibas et de ses collaborateurs (2012), mais est réduite de 50% dans le scénario négaWatt (2011), sous des hypothèses d'efficacité et de sobriété énergétiques qu'il est difficile de distinguer.

b) Inertie du parc résidentiel : logements, bâti, équipements

Le deuxième point pouvant expliquer les disparités entre scénarios en termes de consommation énergétique en 2050 est la façon dont les gisements estimés y sont exploités, caractérisée par un volume et une qualité de renouvellement des équipements et des éléments bâtis. Cette diffusion présente des flux et une performance sensiblement différents selon les scénarios. Une palette très large d'exploitation des gisements est proposée, allant des scénarios les plus exploratoires et volontaristes, proposant une diffusion immédiate des seules meilleures technologies disponibles [Laurent et al., 2006 ; Traisnel et al., 2010], à des scénarios ne présentant qu'une exploitation réduite de ce gisement, en particulier dans les scénarios de référence (laisser-faire ou *business-as-usual*). Entre les deux, les différences de trajectoires dépendent des hypothèses techniques des modèles de comptabilité et des hypothèses économiques et de politique énergétique faites par les modèles de simulation.

On peut noter qu'une partie non négligeable des modèles de comptabilité font l'hypothèse d'une rénovation intégrale du bâti des logements (murs, toitures, placher, fenêtres) à l'horizon 2050. Ceci force à un taux de rénovation sensiblement supérieur à ce qui est observé sur le marché actuellement. En effet, pour certains éléments du bâti comme les toitures ou les façades, le flux annuel observé⁸² de rénovations assez lourdes pour permettre l'introduction de technologies efficaces est insuffisant pour que, même si toutes les interventions intègrent des technologies efficaces, le parc soit traité dans son intégralité en 2050. La question du nombre annuel de rénovations est fondamentale car il caractérise l'inertie de la réponse du secteur résidentiel à des variations de son environnement (réglementaire, économique, technique, sociétal). La précision et le réalisme avec lequel ce flux de rénovations est représenté dans un modèle prospectif conditionne donc le caractère réaliste des scénarios proposés. Ce point particulier est encore difficilement représenté dans les modèles français de simulation et d'optimisation. En effet, on remarque ainsi que si l'on contraint uniquement le nombre annuel de rénovations, sans en préciser le type, cela

⁸² En effet, le flux annuel de logements touchés par des travaux permettant l'introduction d'efficacité énergétique est environ de : 300 000 pour les façades (potentiel d'isolation par l'extérieur), entre 400 000 et 600 000 pour les toitures, 900 000 pour les systèmes de chauffage, 800 000 pour l'isolation par l'intérieur et 1,3 millions pour les fenêtres [OPEN, 2010]. On observe bien que, sur 40 ans, les 27 millions de logements auront probablement tous fait l'objet d'un renouvellement de système de chauffage mais que ce n'est pas le cas de tous les éléments du bâti.

peut mener à une situation où les ménages choisissent d'abord la réduction massive du besoin en énergie utile (isolation et ventilation efficace, gisements théoriquement les plus rentables) puis orientent ensuite le type de rénovation vers un remplacement des systèmes de chauffage performants [Cayla, 2011]. De même, avec un modèle de simulation dans lequel le nombre de rénovations n'est pas contraint, l'imposition de conditions particulières comme une obligation de rénovation peut mener à une augmentation brutale du flux de rénovations⁸³. De telles variations apparaissent peu réalistes et rappellent que l'efficacité énergétique vient modifier qualitativement le marché de la rénovation des logements et de leurs équipements, et non l'inverse⁸⁴.

Les flux de rénovations ne sont pas les seuls qui expliquent la dynamique de la consommation de l'ensemble du secteur résidentiel. En effet, entre aujourd'hui et 2050, plusieurs millions de logements seront construits, impliquant de nouvelles consommations énergétiques en leur sein. Ce nombre de logements est usuellement déterminé en fonction des projections du nombre de ménages en France, dont le calcul est effectué à partir des projections de population et du nombre moyen de personnes par ménage. Ainsi, le nombre de futurs logements « neufs » dépendra des hypothèses de décohabitation des ménages⁸⁵. En prenant en compte le fait qu'une très faible partie des logements sont détruits tous les ans (entre 0,1% et 0,35% selon les sources [CDL, 2008 ; Allaire et al., 2008]), le parc de logements en 2050 sera constitué de seulement un tiers de logements n'existant pas déjà aujourd'hui. Par ailleurs, ces futurs logements auront été construits sous la contrainte de réglementations thermiques très exigeantes, ce qui devrait impliquer que le tiers de « logements neufs » en 2050, ne représente qu'une partie bien plus faible des consommations énergétiques nationale concernant les usages thermiques. Ce résultat a été particulièrement bien illustré par l'étude de Traisnel et de ses collaborateurs en 2001.

L'ensemble de ces éléments permet de définir une cible prioritaire dans l'objectif d'une forte réduction des consommations énergétiques et émissions de GES associées : la rénovation des logements existants, et en particulier des éléments dont la durée de vie est la plus longue (toitures, planchers et façades). Si les ménages ne choisissent pas les options technologiques énergétiquement performantes concernant ces éléments, ce seront des occasions manquées dont le poids énergétique sera visible pendant plusieurs décennies. Le seul moyen de rattraper ces occasions serait une future obligation de rénovation, mais celle-ci entraînerait une perte non négligeable de la valeur des éléments bâtis car ces derniers auraient pu « durer » sensiblement plus longtemps. A la lecture de ces scénarios, une réglementation stricte de la performance minimum des rénovations de toiture et de façade apparaît comme nécessaire⁸⁶ pour éviter ce coût.

c) Des coûts techniques très variables et finalement mal connus

⁸³ Voir [Giraudet, 2011] page 104, ou [Bibas et al., 2012] page 40. Ces deux exercices, basés sur le modèle de Giraudet, montrent une augmentation du nombre de rénovations d'un facteur 4,5 à 7 dans le cas d'obligations de rénovations.

⁸⁴ Eric Lagandré, directeur technique à l'ANAH, explique à propos des rénovations thermiques : « il n'y a pas de marché de l'efficacité énergétique, mais l'efficacité énergétique fait partie des critères de choix dans le marché du bâtiment ».

⁸⁵ Si la majorité des scénarios retiennent les projections médianes de l'INSEE concernant la population et la décohabitation, le scénario négaWatt fait l'hypothèse d'une décohabitation plus limitée (2,2 personnes par ménage en 2050 contre 2 si la projection INSEE, réalisée à l'horizon 2030 [Jacquot, 2006], est prolongée jusqu'en 2050).

⁸⁶ La réglementation thermique « par élément » existe déjà aujourd'hui. Cependant, elle n'impose d'épaisseur d'isolant minimum que dans le cas où le décideur choisi d'isoler. Il est aujourd'hui encore libre de choisir de ne pas isoler. Ainsi, en 2008, 85% des façades et 60% des toitures ont été rénovées sans être isolées [OPEN, 2010].

Les deux points précédents permettent d'expliquer les principales différences observées en termes de consommations énergétiques entre les scénarios. Cependant, l'information apportée par ces scénarios consiste aussi à en calculer le coût. Or, la mesure des coûts, en particulier à l'échelle d'un système complexe, est un exercice difficile⁸⁷. Si trois types de coûts peuvent principalement être distingués dans la littérature liée aux politiques énergétiques (coûts techniques, coûts macroéconomiques et coûts de bien-être [Guivarch, 2010]), seuls les premiers sont calculés dans les scénarios étudiés concernant le seul secteur résidentiel (deux scénarios calculent cependant le coût macroéconomique à des périmètres plus vastes [Briard et al., 2010 ; Bibas et al., 2012]). Cela s'explique par le fait que les modèles spécifiques au secteur résidentiel sont essentiellement des *bottom-up* ingénierie qui ne prennent en compte ni les rétroactions macroéconomiques, ni les interactions sectorielles, ni le consentement à payer ou à accepter une compensation.

On notera que même dans une analyse purement technologique des coûts, ces derniers ne font pas l'objet d'un consensus. Ainsi, Laurent et ses collaborateurs (2009) ont montré que pour une même technologie, les coûts trouvés dans la littérature sont très variables, pouvant aller du simple au triple dans certains cas. Il est important de souligner que le coût spécifique de l'efficacité énergétique peut être calculé en comparant le prix d'une technologie de performance standard et celui d'une technologie fournissant le même service, mais avec une performance plus élevée. Ceci rejoint la question de l'estimation des flux de rénovations qui auraient eu lieu sans politique énergétique spécifique. En effet, ces flux auraient eu un certain coût qu'il convient de ne pas comptabiliser dans le coût de transition. Il apparaît donc que le coût d'un scénario peut être exprimé en surcoût par rapport au coût du flux « naturel » de rénovations (dus à l'obsolescence des équipements et éléments du bâti des logements). Des différences sensibles peuvent aussi être observées dans l'estimation du surcoût de l'efficacité énergétique par rapport aux solutions standard. Par exemple, pour estimer le surcoût nécessaire pour qu'un logement passe d'une étiquette DPE « énergie primaire » à une autre lors de rénovations, les coûts utilisés par Giraudet sont sensiblement plus importants que de ceux de l'ADEME⁸⁸, les écarts pouvant aller jusqu'à un facteur 3 selon les étiquettes DPE. Le coût annuel total d'investissement dans le secteur résidentiel nécessaire à l'atteinte d'un facteur 4 est ainsi sujet à des estimations très variables, entre 3 milliards [Laurent et al., 2006] et une vingtaine de milliards d'euros⁸⁹ par an [Traisnel et al., 2010].

Le calcul du coût d'un scénario fait intervenir des investissements futurs, qui doivent donc prendre en compte le prix des technologies non pas actuel mais futur. Or, ce prix futur peut être influencé par des effets d'apprentissage technologique, en particulier pour les technologies encore peu présentes sur le marché actuel. Cet apprentissage technologique est endogène dans les travaux de Giraudet (2011), fait l'objet d'hypothèses dans ceux de Cayla (2011), mais n'est pas pris en compte dans les travaux de Laurent (2006), Marchand (2008) et Traisnel (2010).

Lorsque les coûts d'investissement sont mis en regard des quantités d'énergies économisées ou des émissions de GES évitées, la variété des méthodes de calcul de gain énergétique s'ajoute à celle des estimations de coûts. Ainsi, l'estimation du coût du kWh économisé présente des variations allant du simple au décuple pour une même technologie [Laurent et al., 2009] et peuvent être sensiblement supérieurs au prix de l'énergie commerciale (et d'autant plus hors taxes). Ces résultats

⁸⁷ Voir par exemple [Riveline, 2005].

⁸⁸ Ces coûts ont été comparés dans le cadre du projet européen Encilowcarb [Mathy et al., 2011 ; Bibas et al., 2012], ainsi que dans le cadre du groupe de travail « socio-économie » du PREBAT [Bernard, 2011].

⁸⁹ Le scénario de Traisnel (2010) ne quantifie que les coûts liés à la rénovation du bâti et des systèmes de ventilation, estimés entre 8 et 16 milliards d'euros par an, auxquels il convient d'ajouter le coût des systèmes de chauffage, dont le montant est moindre, d'où le chiffre approximatif de 20 milliards d'euros par an pour l'ensemble bâti et systèmes.

remettent en cause l'assertion de négaWatt stipulant que «les actions d'efficacité nécessitent un investissement qui grâce aux économies générées est toujours rentable pour la collectivité, fût-ce sur le long terme» [négaWatt, 2011]. On peut ainsi observer que le manque de données publiques fiables, pouvant servir de référence commune, concernant à la fois les consommations énergétiques spécifiques à des bouquets technologiques particuliers et les prix des technologies dans un niveau de détail suffisant, expliquent la forte dispersion des coûts d'une transition du secteur résidentiel actuel vers un état compatible avec le facteur 4.

d) *La question épineuse de la valorisation des coûts et bénéfices non énergétiques de l'efficacité énergétique*

Les scénarios étudiés ont évalué principalement les seuls coûts d'investissement et bénéfices énergétiques liés aux différentes technologies. Cependant, ces coûts seuls ne permettent pas d'expliquer les choix des ménages ni d'évaluer l'efficacité d'une politique. En effet, la rénovation des logements et l'achat d'équipements impliquent aussi des coûts et bénéfices non énergétiques, qu'il convient de prendre en compte aussi bien à l'échelle individuelle que sociétale.

A l'échelle individuelle, le choix technologique peut ainsi être influencé par le niveau de confort que va procurer un équipement, par l'augmentation de valeur patrimoniale liée à une rénovation visible du logement (voir le second chapitre de la partie II pour plus de détails) ou encore par la difficulté d'obtenir des informations sur un équipement en particulier ou de trouver des entreprises capables de l'installer. A l'échelle sociétale, la diffusion d'équipements énergétiquement efficaces peut aussi impliquer des effets positifs sur l'emploi (ce qui est traité en détail dans le scénario négaWatt à partir des travaux de Quirion et Demailly (2009)), sur la diminution des émissions polluantes (dont les GES), sur la morbidité et la mortalité⁹⁰, sur la solvabilité des ménages ou encore leur productivité au travail.

Bien que ce sujet ait émergé depuis une vingtaine d'années [Skumatz, 1996 ; Clinch et al., 2001 ; Amann, 2006 ; Ürge-Vorsatz, 2009], il n'est encore intégré que de manière très partielle dans les exercices prospectifs *bottom-up*. Les exceptions sont le modèle de Giraudet, qui représente de manière globale certains coûts non énergétiques par l'intermédiaire de « coûts intangibles », et le scénario de négaWatt, dont l'impact en terme d'emploi est quantifié (mais dont le détail concernant spécifiquement le secteur résidentiel n'est pas connu). On remarquera par ailleurs que les économies d'énergie dues aux comportements sobres ne sont pas quantifiées comme un coût pour les ménages dans le scénario négaWatt.

Les résultats que l'on peut retirer de ces deux études sont que les coûts non énergétiques influencent fortement les choix individuels (les coûts intangibles pouvant représenter la moitié du coût d'investissement, limitant ainsi la diffusion des technologies les plus performantes), et qu'un programme d'efficacité énergétique national devrait avoir des conséquences bénéfiques pour l'emploi. On notera par ailleurs que, dans un contexte où les achats d'équipements performants sont poussés au moyen d'une taxe carbone, ou contribution énergie-climat, l'impact sur l'emploi dépend de la manière dont la taxe est recyclée [Bibas et al., 2012].

⁹⁰ La mortalité est plus fréquente en hiver qu'en été, phénomène formalisé par le concept d'« excess winter death », mesuré annuellement par l'Office for National Statistics au Royaume-Uni [El-Ansari et El-Silimy, 2008]. Il apparaît qu'une partie de cette mortalité pourrait être évitée par des logements mieux chauffés [Marmot, 2011]. Or, une conséquence d'une amélioration sensible de la performance thermique des logements serait d'offrir un niveau de confort thermique à un prix abordable et par conséquent de limiter la mortalité hivernale, en particulier chez les ménages ayant les plus fortes contraintes de revenu.

e) *Atteinte des objectifs de politique énergétique : de la formule magique à la contrainte forte*

Les quatre points cités précédemment (influence du réalisme des modèles ingénieur sur l'estimation du gisement d'économie d'énergie, prise en compte de l'inertie du renouvellement des éléments des logements, réflexion en surcoût et prise en compte des coûts et bénéfices non énergétiques) expliquent que l'atteinte à long terme d'une forte réduction des consommations d'énergie et des émissions de GES au sein du secteur résidentiel puisse être présentée de manières sensiblement différentes selon les scénarios étudiés, aussi bien au niveau de la faisabilité physique que du coût économique. Ainsi, on peut observer que le facteur 4 peut être atteint assez « facilement » dans les scénarios volontaristes basés sur des modèles de comptabilité utilisant des calculs thermiques ne prenant pas ou peu en compte les comportements quotidiens de chauffage (e.g. [Traisnel et al., 2010 ; négaWatt, 2011]). A l'inverse, les modèles de simulation plus réalistes doivent introduire des contraintes politiques très fortes pour pouvoir atteindre les objectifs du Grenelle ou du facteur 4. Ainsi, d'après les résultats de Giraudet, l'atteinte des objectifs du Grenelle pour les logements existants ne serait possible qu'en ajoutant aux mesures déjà implémentées aujourd'hui (CIDD et éco-PTZ⁹¹) une taxe carbone d'environ 200€/tCO₂ dès maintenant, et augmentant jusqu'à 400€/tCO₂ en 2020. De même, d'après ces résultats, le facteur 4 ne serait atteignable qu'en prolongeant l'augmentation de la taxe jusqu'à près de 2000€/tCO₂ en 2050, ou en prolongeant le CIDD et l'éco-PTZ jusqu'en 2050, ou encore en mettant en place une obligation de rénovation progressive jusqu'à la classe B en 2030. Ces trois options représentent des contraintes très importantes sur le budget des ménages, celui de l'Etat ou sur les filières du bâtiment et des équipements.

Si les propositions pouvant permettre l'atteinte des objectifs à long terme divergent dans les détails du bouquet technologique qu'elles mettent en avant, certaines grandes tendances peuvent cependant être observées parmi les scénarios technologiquement explicites (principalement issus des modèles de comptabilité) :

- la **diminution des déperditions thermiques des logements** à l'aide de matériaux d'isolation et d'équipement de ventilation performants (la rénovation quasi intégrale du bâti des logements est observable dans la majorité des scénarios),
- l'**abandon du fioul domestique** pour le chauffage, dont le contenu carbone est trop élevé par rapport aux énergies qui peuvent s'y substituer,
- un fort recours au **chauffage au bois** et aux **pompes à chaleur** pour le chauffage,
- la production d'eau chaude sanitaire à l'aide de **panneaux solaires thermiques**,
- l'atteinte du facteur 4 est conditionné au fait que le contenu carbone de l'électricité n'augmente pas de manière trop importante,
- la réglementation thermique concernant les logements neufs doit être appliquée fermement pour que les logements construits à partir d'aujourd'hui n'annulent pas une partie des améliorations réalisées sur les logements existants.

En ce qui concerne les politiques énergétiques permettant ces évolutions technologiques, plusieurs constats semblent aussi partagés par les modèles de simulation et d'optimisation :

⁹¹ Crédit d'Impôts au Développement Durable et éco-prêt à taux zéro

- **les mesures actuellement en place sont insuffisantes** pour atteindre les objectifs du Grenelle et du facteur 4 [Giraudet, 2011],
- une **taxe carbone** pourrait permettre l'atteinte des objectifs nationaux, mais elle devrait être appliquée rapidement et augmenter progressivement jusqu'à plusieurs centaines voire milliers d'euros par tonne de CO₂ en 2050,
- une taxe carbone seule peut particulièrement pénaliser les **ménages les moins aisés** si elle n'est pas recyclée de manière adéquate. Un mécanisme de **subventions** peut limiter ces effets distributifs défavorables aux ménages les moins aisés [Cayla, 2011]. De fait, toute augmentation du prix des énergies ne fait qu'accentuer la problématique de la **précarité énergétique**.

On peut par ailleurs relever la difficile adéquation entre un objectif très ambitieux à relativement court terme (cible Grenelle à horizon 2020) exprimé en réduction de consommation d'énergie primaire, et donc étant plutôt défavorable aux systèmes thermiques fonctionnant à l'électricité⁹², et un objectif à long terme exprimé en émissions de GES, pour lequel les systèmes électriques performants apparaissent comme une solution technique quasi-incontournable sous l'hypothèse que le contenu carbone de l'électricité en France n'augmente pas de manière trop importante. Cette situation est ainsi un cas concret de l'étude de la problématique plus générale des interactions, positives comme négatives, entre politiques énergétiques ciblant des objectifs différents (e.g. [Lecuyer et Bibas, 2012]).

Enfin, les fortes diffusions de technologies performantes de chauffage et production d'eau chaude sanitaire fonctionnant à l'électricité impliquent de devoir étudier les conséquences sur l'équilibre offre-demande d'électricité, et donc prendre en compte les contraintes du parc de production électrique. D'autre part, la structure du parc de production pourrait être sensiblement modifiée en 2050 par rapport à la situation actuelle, en particulier par l'introduction en quantité non négligeable de production électrique renouvelable peu contrôlable. Ces modifications impliquent des besoins de stockage pour lesquels les solutions technologiques diffèrent. Une de celles-ci consiste à utiliser du stockage thermique pour les usages thermiques des bâtiments (en particulier l'eau chaude sanitaire⁹³). Or, l'adéquation offre-demande n'est que rarement traitée de manière détaillée dans les scénarios étudiés.

⁹² Par convention, une unité d'énergie finale de gaz ou fioul équivaut à une unité en énergie primaire, mais à 2,58 unités dans le cas de l'électricité. Un objectif exprimé en énergie primaire incite non seulement à la performance énergétique (diminution des pertes thermiques et amélioration du rendement des systèmes de chauffage et ECS) mais aussi à changer les systèmes électriques pour des systèmes à combustibles fossiles (ou au bois).

⁹³ Le stockage d'énergie électrique dans les ballons d'eau chaude est une solution technique exploitée depuis plusieurs décennies en France pour stocker l'énergie nucléaire produite durant la nuit (ce qui fait de ce système un des premiers « smart-grids » mondiaux, par sa date de création et sa taille). Si cette solution semble aussi la plus adaptée au stockage d'énergie renouvelable intermittente, le pilotage du chauffage apparaît comme une solution alternative non dénuée d'intérêt (e.g. [Hugues, 2010]).

3. Voies d'amélioration pour la modélisation dynamique de la demande énergétique résidentielle

Cette section présente les améliorations qui pourraient être apportées aux modèles français de prospective tels qu'ils existaient en 2009, au début de cette thèse, permettant ainsi de justifier l'orientation des travaux qui ont été réalisés depuis et qui sont présentés dans les chapitres suivants. Ces modèles ont évolué et certains ont intégré des résultats provenant des travaux réalisés dans le cadre de cette thèse. Ainsi, les modèles de Giraudet et de Cayla utilisent sous des formes différentes le concept d'*intensité d'utilisation*, développé dans le premier chapitre de la partie II. Les collaborations évoquées ont consisté principalement en la reformulation de mes résultats sous une forme compatible avec le formalisme du modèle RES-IRF de Giraudet, et en l'écriture d'un article sur l'impact des comportements quotidiens de chauffage avec Cayla [Cayla et al., 2010].

3.1. De la capacité d'un modèle à être interprétable par des acteurs divers

Comme cela a été développé précédemment, les modèles prospectifs répondent à une variété d'objectifs parmi lesquels celui de constituer un support de discussion à propos des moyens d'atteindre un futur considéré comme souhaitable. Le caractère souhaitable du futur dépend évidemment des acteurs auxquels s'adressent les scénarios déterminés par le modèle. Dans le contexte de la prospective énergétique dans le secteur résidentiel, les acteurs concernés sont les énergéticiens, les filières liées aux équipements influençant les consommations énergétiques, les organes de politique publique ainsi que la société civile. Ces acteurs ont tous une certaine légitimité dans la définition d'un futur souhaitable prenant en compte leurs intérêts, ce qui rend cette définition et la production de scénarios sensiblement plus complexes que lorsqu'un seul acteur est concerné. Une fois un futur souhaitable défini, la discussion sur les moyens de l'atteindre relève alors d'une analyse des effets distributifs des instruments envisagés sur l'ensemble des acteurs, essayant de déterminer une combinaison équitable d'instruments.

Le mécanisme de construction d'un futur souhaitable et de détermination des instruments les mieux à même de l'atteindre nécessite la représentation des intérêts de chaque partie prenante. Ces intérêts peuvent être observés à l'aide de variables qui sont propres à leur analyse. De même, les instruments envisagés pour atteindre un objectif fixé reposent eux aussi sur des variables spécifiques et des représentations d'interactions entre celles-ci.

Enfin, un modèle prospectif sert aussi de support de synthèse des connaissances existantes et doit par conséquent pouvoir représenter les variables par lesquelles la connaissance existante est exprimée. Cette connaissance ainsi que son formalisme sont propres à certains types d'acteurs et d'analyses. C'est pourquoi la formulation d'un modèle permettant de capitaliser un vaste champ de connaissances et pouvant être le support d'analyses variées est un exercice complexe requérant une compréhension interdisciplinaire de l'objet d'étude (à même de formaliser la problématique de manière « parlante » pour chacun des acteurs).

Pour pouvoir être interprétable par les différentes parties prenantes des débats entourant la dynamique des consommations du secteur résidentiel français, les caractéristiques suivantes semblent importantes :

- Le **caractère explicite de la description des technologies existantes**. Ce point est nécessaire à l'intégration de l'expertise technique du bâtiment et des équipements. Il est en outre intéressant pour les entreprises dont les produits feront ainsi partie des parts de marché simulées (pouvant alors reconnaître explicitement les gammes de produits vendus). Cette caractéristique, partagée par l'ensemble des modèles de comptabilité (basés sur l'expertise d'ingénieurs), est encore perfectible dans les modèles de simulation (le détail technologique est par exemple limité par la représentation en étiquette DPE « énergie primaire » dans le modèle de Giraudet).
- L'utilisation d'un modèle de **calcul thermique validé par les observations**. La modélisation thermique est une garantie du réalisme physique des trajectoires de consommation calculées, tandis que la validation par les observations apparaît incontournable pour que le calcul des gains énergétiques soit le moins biaisé possible. L'objectif consiste en partie à prendre en compte les biais mentionnés par les modélisateurs eux-mêmes dans les exercices techniques, en particulier en ce qui concerne l'effet rebond et la malfaçon. D'autre part, l'utilisation d'un moteur de calcul thermique, combiné à une représentation explicite des technologies, permet un calcul du coût des améliorations techniques au stade énergétique qui leur sont propres⁹⁴.
- L'utilisation des **étiquettes DPE en énergie primaire et en émissions de GES**. Ce formalisme permet aujourd'hui une communication efficace des résultats avec le plus grand nombre d'acteurs, le DPE étant devenu une référence incontournable des discours portant sur les consommations énergétiques des logements existants.
- Le calcul des indicateurs économiques usuels : temps de retour sur investissement, coût global actualisé, part budgétaire allouée aux consommations énergétiques.
- L'utilisation d'une **base de données des coûts la plus représentative et accessible possible**. Cet élément garantit une estimation des coûts qui pourra être partagée par le plus grand nombre d'acteurs. Cette base de données doit par ailleurs faire figurer non seulement le coût des gestes de rénovation performants mais aussi celui des gestes de rénovation usuels, sans apport particulier d'efficacité énergétique. C'est à cette condition que l'estimation du surcoût d'un scénario « facteur 4 » peut être réalisée de la manière la plus compréhensible.
- La représentation de **critères non énergétiques dans la modélisation des choix technologiques** des ménages. En effet, les coûts et bénéfices non-énergétiques ainsi que l'hétérogénéité des préférences des ménages apparaissent d'après les travaux de Giraudet comme des variables pouvant influencer fortement les choix technologiques et donc la dynamique des consommations. Leur représentation apparaît nécessaire au réalisme d'un modèle de choix technologique des ménages.
- L'utilisation d'un **modèle de choix technologiques validé sur des observations de choix réels**. Par analogie avec le modèle de calcul thermique validé sur les observations, il apparaît

⁹⁴ Par exemple, à partir de la connaissance du prix d'un matériau isolant et de sa performance, il est aisé de déterminer le coût d'un gain en énergie utile, stade auquel intervient l'isolation. Par contre, le gain d'énergie finale dépend du système de chauffage, de même que le gain en énergie primaire. Si un modèle n'est basé que sur une vision en énergie primaire, alors il lui sera difficile de prévoir dans quelle mesure le coût de l'isolation pourra varier en fonction des variations de parts de marché des systèmes de chauffage. Pour une explication plus détaillée, voir en Annexe II (Communications écrites au cours de la thèse) la note réalisée pour le groupe socio-économie du PREBAT (Programme national de Recherche et d'expérimentation sur l'Énergie dans les BATiments).

important que la modélisation des choix technologique des ménages soit validée de manière empirique sur les données existantes.

Si la partie macroéconomique est écartée de cette liste, c'est essentiellement dû au fait qu'un modèle *bottom-up* peut être couplé à un modèle *top-down* dont la structure est adaptée à la représentation des interactions macroéconomiques. C'est en particulier ce qui a été réalisé par le modèle RES-IRF de Giraudet, qui constitue le module « résidentiel » du modèle hybride Imaclim-R France du CIREN. Un couplage de ce type augmente alors la gamme des questions auxquelles le modèle peut apporter des éléments de réponse.

3.2. Flexibilité du formalisme sous lequel le secteur résidentiel est représenté

Le formalisme sous lequel est représenté le secteur résidentiel dans un modèle est déterminé par la forme de la question qui a guidé son développement. Ainsi on peut observer au sein des modèles étudiés des représentations sensiblement différentes du système {ménages-environnement} : par classe de revenu des ménages pour étudier les effets distributifs de politiques énergétiques (e.g. [Combet, 2007 ; Cayla, 2011]), par étiquette DPE pour représenter des contraintes de niveau de performance minimum (e.g. [Giraudet, 2011]), ou encore par critères exogènes lorsque la structure du modèle est appuyée sur une source de données extérieure (par exemple les données de consommation du CEREN utilisées dans [Laurent et al., 2006]).

Cette représentation du système {ménages-environnement} peut être effectuée principalement de deux manières: par segments ou par échantillon représentatif. La représentation par segments a l'avantage d'offrir un découpage lisible du système étudié à partir des caractéristiques considérées comme les plus importantes dans le cadre d'une analyse particulière. Par exemple, le modèle de Cayla présente une segmentation adaptée à l'étude de la part budgétaire que les ménages allouent aux dépenses énergétiques⁹⁵. Cependant, une fois les critères déterminés et le modèle construit autour de cette représentation, il peut ensuite être difficile de modifier la segmentation pour intégrer d'autres variables servant au traitement de problématiques pour lesquelles le modèle initial n'était pas prévu.

A l'opposé, il est possible de décrire le système par ses éléments constitutifs individuels, sans les regrouper par catégorie. C'est par exemple le cas du modèle Enerter, sur lequel est basée l'étude de Traisnel et de ses collaborateurs (2010), dans laquelle l'intégralité des logements français est représentée. Si le côté exhaustif n'est pas forcément nécessaire à la représentation du système⁹⁶, la représentation des éléments constitutifs du système étudié permet d'introduire aisément de nouvelles caractéristiques à partir du moment où l'on dispose d'indications concernant la répartition de ces caractéristiques sur la population. Cette représentation a en outre l'intérêt de permettre le choix de critères de segmentation adaptés à l'observation de certains phénomènes en particulier, à la seule condition que les variables de segmentation existent dans la description des éléments du système.

Ainsi, un modèle sur échantillon de population renseigné vis-à-vis de nombreux critères apparaît comme plus flexible qu'un modèle sur segments quant à son aptitude à intégrer de

⁹⁵ Voir [Cayla, 2011], page 122 à 126 pour une présentation de sa méthodologie de segmentation.

⁹⁶ Certaines observations peuvent être effectuées à partir d'un échantillon représentatif, comme cela est montré dans le deuxième chapitre de la partie II.

nouvelles variables descriptives et à proposer des analyses à l'aide de variables diverses et non connues a priori. Enfin, un échantillon permet d'observer les hétérogénéités du système existant de manière plus détaillée que dans une représentation par segments, qui est généralement basée sur des valeurs moyennes de variables descriptives sans indication de la distribution existante des valeurs observées autour de la moyenne.

Le modèle développé au cours de la thèse, présenté dans le premier chapitre de la partie III, représente une exploration dans la direction des modèles sur échantillon. Il n'est basé que sur un millier de logements environ, mais ceux-ci sont caractérisés par un jeu de variables très complet, issu de l'enquête réalisée par Cayla au cours de sa thèse [Cayla et al., 2010 ; Cayla 2011 ; Cayla et al., 2011].

3.3. Flexibilité dans la nature des scénarios pouvant être produits

L'observation des modèles prospectifs existants montre que les frontières entre modèles de comptabilité, de simulation et d'optimisation sont de moins en moins marquées. Ainsi, une première étape d'endogénéisation des choix technologiques a été intégrée dans le modèle de Traisnel et de ses collaborateurs (2010), tandis que le modèle de Cayla a été utilisé en simulation comme en optimisation, avec un niveau élevé de détail technologique. Enfin, le modèle de Giraudet, conçu pour être couplé (ou « hybridé ») à un modèle macroéconomique, intègre un niveau de détail technologique suffisant (étiquettes DPE) pour la communication avec les autres acteurs du secteur des logements existants. On peut donc constater qu'un des axes d'amélioration des modèles s'est avéré être la capacité des modèles à produire des scénarios de natures variées.

D'un point de vue technique, si la programmation d'un choix optimal à l'échelle d'un individu, et selon ses critères, n'est pas particulièrement complexe, celle d'une optimisation intertemporelle⁹⁷ à l'échelle d'un système complexe tel que le secteur résidentiel l'est sensiblement plus. Ainsi, parmi les modèles technologiquement explicites qui en sont capables, seul le modèle MARKAL est utilisé en France (à ma connaissance). Ceci explique pourquoi les rapprochements qui ont été observés entre catégories de modèles ne comprennent pas de modèle ayant développé une capacité à produire des scénarios présentant une trajectoire technologique optimale.

En observant les différentes composantes des modèles existants, il apparaît que le choix entre un caractère exogène (propre aux modèles de comptabilité) et endogène (propre aux modèles de simulation) des mécanismes représentés peut toucher plusieurs variables essentielles de la dynamique des consommations. Si l'endogénéisation la plus fréquente est celle des choix technologiques, généralement réalisée en faisant choisir aux ménages la solution technique présentant le coût global actualisé le plus faible⁹⁸, celle du prix des équipements et des comportements d'usage des technologies sont beaucoup plus rares. Ainsi, une hausse tendancielle de la température de chauffage des logements est justifiée par de faibles prix de l'énergie et une augmentation des revenus dans le modèle MED-Pro [Enerdata, 2005], les comportements quotidiens de chauffage sont déterminés en fonction du coût théorique du chauffage par m² dans le modèle de Giraudet, et dépendent du revenu des ménages dans celui de Cayla. Le prix des équipements peut par ailleurs être endogénéisé à l'aide de fonctions d'apprentissage technologique. Seul le modèle de Giraudet présente cette caractéristique, les autres utilisant des prix d'équipements constants ou définis de manière exogène par le modélisateur.

⁹⁷ Permettant par exemple de déterminer s'il est optimal de subventionner une technologie particulière dès à présent ou d'attendre un certain délai.

⁹⁸ Voir chapitre 2 de la partie II pour plus de détails.

Enfin, le prix des énergies peut aussi être déterminé de manière endogène, mais cela est limité à certains modèles économiques fonctionnant de manière plus ou moins couplée avec les modèles sectoriels étudiés ici. Par exemple, le modèle POLES est utilisé pour déterminer les prix des énergies dans les scénarios Enerdata 2005 et la partie *top-down* du modèle Imaclim-R les détermine dans les scénarios du modèle de Giraudet lorsque les deux sont couplés. On retiendra cependant que le prix des énergies (et plus particulièrement des énergies fossiles) relève de mécanismes à l'échelle internationale, peu sensibles aux variations de la demande du seul secteur résidentiel français. C'est pourquoi on ne peut considérer l'endogénéisation du prix des énergies comme une caractéristique spécifique des modèles prospectifs de la demande d'énergie du secteur résidentiel à l'échelle nationale.

Le modèle développé dans le cadre de la thèse vise à laisser au modélisateur le choix de positionnement dans le continuum entre modèles de comptabilité et modèles de simulation. Cela est fait en lui proposant de choisir de statut endogène ou exogène des choix technologiques, des comportements d'usage des ménages ou des prix des équipements. Cette particularité permet à la fois d'adapter le modèle aux connaissances du modélisateur et de lui permettre de réaliser des scénarios exploratoires comme des simulations en réponse à des stimuli spécifiques.

3.4. Amélioration de l'intégration des comportements des ménages dans les modèles technologiquement explicites

Les sections précédentes ont montré que la dynamique des consommations relève en grande partie des choix des ménages, en ce qui concerne leur usage des technologies comme leur choix d'achat de technologies (nouvelles ou dans le cas de renouvellement). Ces choix sont cependant fortement influencés par l'environnement dans lequel ils sont effectués : caractéristiques des technologies existantes, environnement économique, politiques existantes ou encore normes sociales. Or, comme cela a été montré dans ce chapitre, les modèles BU ingénieur souffrent généralement d'un déficit important de prise en compte des comportements. Une partie du défi de modélisation, et une voie d'amélioration centrale des modèles prospectifs techniques dans le cas du secteur résidentiel français, semble donc d'améliorer la représentation des mécanismes qui déterminent les comportements des ménages dans les modèles BU ingénieur, ce qui fait l'objet de la partie II de cette thèse.

Pour pouvoir intégrer ces comportements, il apparaît essentiel de distinguer où ils interviennent dans les données manipulées par les modèles techniques. Pour cela, il semble intéressant de revenir à un avantage fondamental des modèles physiques par rapport aux modèles statistiques et économiques : la représentation des phénomènes intervenant en amont de la consommation d'énergie mesurée. Les modèles physiques permettent en effet le calcul d'une consommation d'énergie finale à partir de la description du service demandé par l'utilisateur (par exemple une certaine température dans le logement), de celle de l'infrastructure technique et de l'environnement physique. La Figure 62 décompose les étapes énergétiques entre un niveau de service « idéal » pour le ménage et la consommation d'énergie finale et fait correspondre à chaque étape les comportements qui peuvent influencer la transition d'une étape à l'autre. A partir de la définition d'un service idéal pour le ménage, sont distinguées les étapes suivantes :

- **Le service satisfaisant effectivement demandé** : ce service peut être différent du service idéal lorsque le ménage est contraint. Cette contrainte peut être technique (par exemple un système de chauffage pas assez puissant pour assurer une température lors de pics de froid), économique (revenu disponible insuffisant pour payer le service idéal) ou encore psychologique (par exemple lorsque le service idéal d'un ménage est perçu comme sensiblement différent de la norme sociale de l'entourage du ménage). La relation entre la contrainte économique et le niveau de service demandé permet de faire le parallèle avec les élasticité prix et revenu de la demande d'énergie, telles que mentionnées précédemment dans ce chapitre. Cependant, l'ajustement du niveau de service effectivement demandé n'est possible que si l'infrastructure technique présente un certain niveau de flexibilité dans la production de ce service. Par exemple, la production de chauffage permet une variété de niveaux de service alors qu'un réfrigérateur propose une flexibilité du service produit sensiblement inférieure. Cette étape est donc le lieu des comportements quotidiens tels que décrits précédemment dans ce chapitre.

- **L'énergie utile qu'il est nécessaire de produire pour assurer le service satisfaisant demandé** : comme cela a été indiqué dans le premier chapitre de cette thèse, le stade de l'énergie utile n'existe que pour les services énergétiques (température, lumière, force motrice). Pour ces services, il est possible de convertir le service « satisfaisant » en quantité énergétique que les équipements producteurs de ces services doivent émettre. Cette conversion peut nécessiter la connaissance d'autres données que le service demandé. Par exemple, l'énergie nécessaire au maintien d'une certaine température dans un logement nécessite (entre autres) la connaissance de la température extérieure et de la résistance thermique des parois du logement. Parmi ces données, certaines peuvent relever des comportements humains. Par exemple, pour atteindre un certain niveau de luminosité dans une pièce, une ampoule doit fournir d'autant plus d'énergie qu'elle est couverte de poussière. De même, l'énergie nécessaire au maintien de la température à l'intérieur d'un congélateur est d'autant plus grande que les parois de celui-ci sont givrées. On observe donc que le type de comportements intervenant à cette étape consiste d'une part en des comportements d'achat (par exemple vis-à-vis de l'isolation des murs) et d'autre part en des comportements de maintenance (nettoyage des points lumineux, dégivrage). Enfin, on pourra noter que la fourniture d'un certain service énergétique à un lieu et un moment donné peut nécessiter un besoin d'énergie finale plus large d'un point de vue spatio-temporel. Par exemple, dans le cas d'un système de chauffage central utilisant des radiateurs à eau et pour lequel le seul réglage disponible se fait au niveau de la chaudière, il est nécessaire de chauffer l'intégralité des pièces pour répondre à la demande de chauffage dans une seule pièce. De même, pour assurer un niveau de confort à un instant donné, les systèmes de chauffage les plus inertes nécessitent la production du service énergétique bien avant que le ménage ne perçoive ce service.

- **L'énergie utile effectivement produite par les équipements** : la différence entre cette étape et la précédente peut être considérée comme le « gaspillage », c'est-à-dire l'énergie produite sans qu'elle corresponde à un service effectivement demandé. Ceci correspond par exemple à une lampe laissée allumée dans une pièce où personne ne se trouve, ou encore à un chauffage laissé allumé lors d'une période d'absence conséquente. Les comportements qui permettent de limiter l'écart entre cette étape et la précédente sont donc ceux associés à la gestion de la consommation énergétique ne correspondant pas à un service rendu, et peuvent être rapprochés de la notion d'« attention » à la consommation. Ces comportements permettent ainsi de diminuer une consommation d'énergie sans réduire le service énergétique désiré.

- **L'énergie finale effectivement consommée par les équipements** : cette consommation est déduite de l'étape précédente par l'intermédiaire du rendement des équipements. Celui-ci peut être à la fois influencé par le type d'équipement, qui peut être caractérisé par sa performance énergétique dans des conditions normales, et par l'entretien de celui-ci par les ménages. Les comportements intervenants à cette étape sont donc à la fois liés à l'achat d'équipement et à la maintenance de ces derniers.

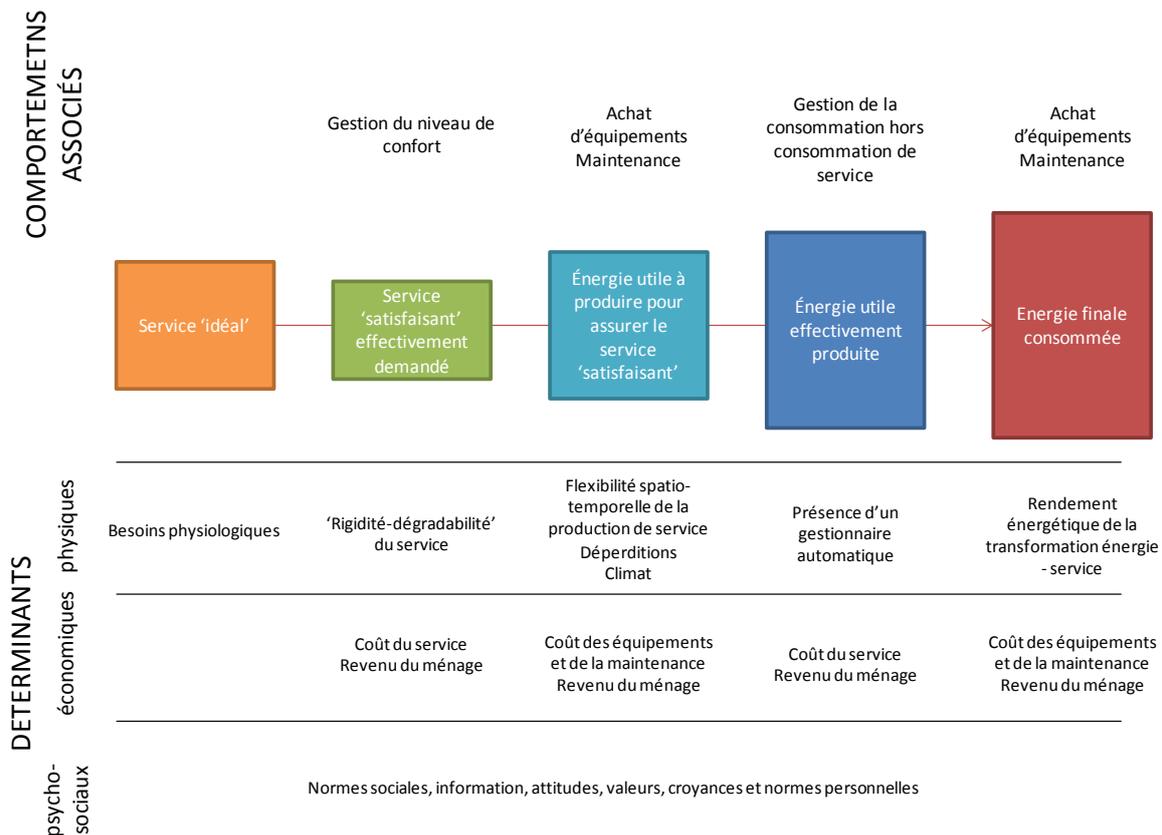


Figure 62 : Représentation des comportements des ménages et de leurs déterminants dans la chaîne de transformation de l'énergie finale en service

En ce qui concerne l'usage des technologies par les ménages (gestion du confort et gestion de la consommation qui ne correspond pas à un service rendu), la revue de littérature proposée précédemment dans ce chapitre indique qu'il dépend à la fois de variables économiques (élasticité de court terme au prix des énergies et au revenu des ménages) et de variables physique (effet rebond, i.e. élasticité à la performance énergétique). Pour intégrer cette dépendance dans un modèle physique, le recours à une modélisation statistique (ou économique) apparaît incontournable. Aydinalp-Koksal et Ugursal (2008) concluent d'ailleurs leur article (sur la comparaison des modèles physiques et statistiques) par la recommandation suivante : "It may be possible to develop a hybrid model that uses the engineering model for physical and thermodynamic modeling and the CDA (conditional demand analysis) and NN (neural networks) models for modeling of socio-economic factors". Les travaux réalisés durant cette thèse pour effectuer cette intégration font l'objet du premier chapitre de la partie II.

La représentation des comportements d'achat dans les modèles *bottom-up* ingénieur est sensiblement plus avancée que celle des comportements d'usage. En effet, plusieurs modèles

intègrent des notions de rationalité économique pour déterminer les choix d'achat des ménages en termes de performance énergétique de leurs équipements. Cependant, on peut observer que ces modèles peuvent encore être relativement frustrés, par exemple quand ils négligent l'existence de barrières à l'efficacité énergétique. Cette situation a justifié la réalisation de travaux sur la nature des différences entre les modèles technico-économiques les plus simples et les modèles économiques en ce qui concerne la représentation de l'achat d'équipements par les ménages. Ces travaux sont présentés dans le deuxième chapitre de la partie II.

Les comportements de maintenance des équipements représentent une zone d'ombre de la modélisation de la dynamique des consommations énergétiques, la littérature les concernant étant particulièrement frustrée. Leur traitement dans les modèles prospectifs est limité à de très rares scénarios exploratoires, centrés exclusivement sur l'impact des comportements (e.g. [Dietz et al., 2009]). Malgré l'intérêt potentiel de leur étude, la faible quantité de données disponibles ainsi que le manque de modélisation théorique de la dynamique de ces comportements dans la littérature nous a poussé à écarter ces comportements de la démarche de modélisation (et donc de simplification) entreprise dans cette thèse.

Conclusion

La revue de littérature concernant la modélisation de la consommation énergétique et de sa dynamique, avec une attention particulière accordée au secteur résidentiel, a permis de proposer une taxonomie des modèles adaptée à l'étude du sujet de cette thèse. A partir de celle-ci, les mécanismes essentiels permettant de modéliser au mieux la dynamique des consommations énergétiques ont pu être mis en relief (calcul des consommations énergétiques, choix technologiques des ménages, usage des technologies par les ménages, apprentissage technologique...). C'est sur la base de cette analyse qu'a pu être développé le modèle prospectif présenté dans le premier chapitre de la partie III.

L'analyse des scénarios prospectifs concernant le secteur résidentiel français a montré qu'ils ont été réalisés majoritairement à partir de modèles *bottom-up* ingénieur dont le réalisme de la représentation des comportements des ménages apparaît perfectible. Sur ce point, les lacunes observées concernent essentiellement les comportements d'usage des technologies par les ménages et dans une moindre mesure les comportements d'achat de ces technologies. C'est sur l'intégration dans un modèle ingénieur de ces deux types de comportement qu'ont porté les travaux présentés dans la partie II.

Par ailleurs, l'analyse des modèles français et des scénarios dont ils ont permis la quantification a mis en relief plusieurs points qui ont servi de base pour concevoir le modèle développé au cours de cette thèse et présenté dans le premier chapitre de la partie III. La représentation explicite des technologies ne permet pas seulement l'utilisation des modèles ingénieur pour le calcul énergétique mais a aussi pour avantage de pouvoir prendre en compte des durées de vie spécifiques aux technologies modélisées. Ceci permet de représenter finement les origines de la forte inertie du secteur résidentiel, mise en relief dans le chapitre précédent. L'intégration dans un modèle ingénieur des comportements d'usage et d'achat des technologies par les ménages permet par ailleurs d'enrichir la palette de scénarios « et si... » à laquelle un modèle ingénieur peut répondre : si les modèles les plus basiques sont cantonnés à la quantification d'un scénario technique prédéfini, la modélisation des comportements des ménages permet par exemple de simuler l'effet de subventions aux équipements énergétiquement performants ou celui de la mise en place d'une taxe carbone.

Enfin, les résultats prospectifs utilisant les modèles les plus réalistes semblent indiquer que les politiques énergétiques actuellement en vigueur dans le secteur résidentiel français sont insuffisantes pour atteindre les objectifs nationaux à moyen et long terme (cible Grenelle à l'horizon 2020 et facteur 4 à l'horizon 2050). Par exemple, seule l'application d'une taxe carbone particulièrement élevée, couplée à un ensemble d'autres instruments (subventions, prêts, réglementation thermique, obligation de rénovation), semblerait en mesure de permettre l'atteinte du facteur 4 dans le secteur résidentiel français. Cependant, une telle taxe amplifierait le problème de la précarité énergétique, dont la prise en compte par les politiques énergétiques est croissante. Ces constats ont poussé à simuler et concevoir, dans le cadre de cette thèse, d'autres instruments de maîtrise de la demande d'énergie, comme une subvention conditionnelle au prix de vente des équipements, présentée dans la partie III.

Bibliographie

Acket, C., P. Bacher, 2007, *Diviser par 4 nos rejets : le scénario Negatep*, association « Sauvons le climat »

[AIE, 2011] World Energy Outlook, Agence Internationale de l'Énergie, 2011, 659p

Ajzen, I., 1991, "The theory of planned behavior", *Organisational Behavior and Human Decision Processes*, 50, 179-211

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

Amann, J.T., 2006, *Valuation of non energy benefit to determine cost-effectiveness of whole-house retrofit program: a literature review*, ACEEE report n° A061, mai 2006

Ansar, J., R. Sparks, 2009, "The experience curve, option value, and the energy paradox", *Energy Policy*, 37, 1012-1020

Arrow, K., 1962, "The economic implication of learning-by-doing", *Review of Economic Studies*, 29, 155-173

Aydinalp-Koksal, M., V.I.Ugursal, 2008, "Comparison of neural network, conditional demand analysis, and engineering approaches for modeling end-use energy consumption in the residential sector", *Applied Energy*, 85, 271-96

Azadeh, A., S. Tarverdian, 2007, "Integration of genetic algorithm, computer simulation and design of experiments for forecasting electrical energy consumption", *Energy Policy*, 35(10), 2007, 5229-5241

Barker, T., P. Ekins, T. Foxon, 2007, "The macroeconomic rebound effect and the UK economy", *Energy Policy*, 35(10), 4935-4946

Barker, T., A. Dagoumas, J. Rubin, 2009, "The macroeconomic rebound effect and the world economy", *Energy Efficiency*, 2(4), 411-427

Bataille, C., M. Jaccard, J. Nyboer, N. Rivers, 2006, "Towards general equilibrium in a technology-rich model with empirically estimated behavioral parameters", *Energy Journal*, 27, 93-112.

[BC Hydro, 2007]: "BC Hydro 2007 Conservation Potential Review. The Potential for Energy Savings through Behavioural Changes, 2006-2026. Residential and Commercial Sectors in British Columbia", Marbek Resource Associates for BC Hydro, Final Report, Eleven volumes plus appendices, Nov 20. Ontario, Canada

Bernard, A., 2010, "An Assessment of CGE models based on GEMINI-E3: Shortcomings and Prospects for Improvement", présentation au Massachusetts Institute of Technology, 2010

Bernard, A., 2011, Représentation du logement de la nouvelle version du modèle GEMINI-E3: un exemple de traitement de l'hétérogénéité, présentation dans le cadre du groupe socio-économique du PREBAT, 2 mai 2011

Bibas, R., S. Mathy, M. Fink, 2012, "Acceptance and Economic assessment of Low carbon scenarios - A participatory approach applied to France", research project ENCI-LowCarb (Engaging Civil Society in Low-carbon Scenarios), European Community's Seventh Framework Program (FP7/2007-2013) under grant agreement N° 213106

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, 133-157

Börjeson, L., M. Hojer, K. Dreborg, T. Ekvall, G. Finnveden, 2006, "Scenario types and techniques: Towards a user's guide", *Futures*, 38, 723-739

Boulanger, P-M., T. Bréchet, 2003, « Une analyse comparative des classes de modèles - Modélisation et aide à la décision pour un développement durable », Action de support PADD I, SSTC, 20 janvier 2003

Briard, P., P. Fery, E. Galko, M.-L. Guillerminet, C. Klein, T. Ollivier, 2010, « Impacts macroéconomiques du Grenelle de l'environnement », Documents de travail de la DG Trésor, Numéro 2010/06, décembre 2010

Brookes, L., 1979, "A low-energy strategy for the UK by G. Leach et al: a review and reply", *Atom*, 269, 3-8

Cayla, J-M., B. Allibe, M-H. Laurent, 2010, "From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption", Proceedings of the ACEEE Summer Study on Buildings, 15-20 août 2010, Pacific Grove, États-Unis

Cayla J-M., 2011, "Les ménages sous la contrainte carbone – Exercice de modélisation prospective des secteurs résidentiel et transports avec TIMES", thèse de doctorat soutenue le 3 mars 2011 à Paris

Cayla J.-M., N. Maizi, C. Marchand, 2011, "The role of income in energy consumption behavior: Evidence from French households data", *Energy Policy*, Volume 39, Issue 12, December 2011, Pages 7874-7883

[CDL, 2008] Comptes du logement 2006, Édition juillet 2008, www.statistiques.equipement.gouv.fr

Chambolle, T., 2008, « Partie 5 – Scénarios énergétiques », Rapport du Groupe de Travail 5, Président Thierry Chambolle, rapporteur Hervé Pouliquen, Perspectives énergétiques de la France à l’horizon 2020-2050, rapport d’orientation, Centre d’Analyse Stratégique

Charlier, D., A. Risch, 2011a, “Modelling Energy Consumption in the French Housing Sector”, XXIXe Journées de Microéconomie Appliquée, Brest, 2-3 juin 2011

Charlier, D., A. Risch, 2011b, “Evaluation of the impact of environmental public policy measures on energy consumption and greenhouse gas emissions in the French residential sector”, Note de Recherche n° 11-22 Novembre 2011

Christensen, L.R., D.W. Jorgenson, L.J. Lau, 1975, “Transcendental Logarithmic Utility Functions”, The American Economic Review, 65(3), 367–383.

Clinch, J.P., J.D. Healy, C. King, 2001, “Modelling improvements in domestic energy efficiency”, Environmental Modelling & Software, 16, 87–106

Cohen, W., D. Levinthal, 1989, “Innovation and learning: the two faces of R&D”, The Economic Journal, 99, 569–596

Combet, E., 2007, Evaluation des effets distributifs de politiques publiques dans un cadre d’équilibre général calculable Application au cas de réformes fiscales environnementales : le double dividende revisité, mémoire de Master 2 recherche « Economie du Développement Durable de l’Environnement et de l’Energie », septembre 2007

Crassous, R., 2008, Modéliser le long terme dans un monde de second rang : application aux politiques climatiques, thèse de doctorat, 21 novembre 2008

Deaton, A., J. Muellbauer, 1980, “An Almost Ideal Demand System”, American Economic Review, 70(3), 312–326

Dessus, B., 2011, *Sortir du nucléaire en 20 ans*, Global Chance, 21 juin 2011

Dietz, T., G.T. Gardner, J. Gilligan, P.C. Stern, M.P. Vandenbergh, 2009, “Household actions can provide a behavioral wedge to rapidly reduce US carbon emissions”, PNAS, 44(106), 18452-18456

[DOE, 2000] : “Model Documentation Report: Residential Sector Demand Module of the National Energy Modeling System”, U.S. Department of Energy, Washington DC, décembre 2000

Dubin, J.A., D.L. McFadden, 1984, “An Econometric Analysis of Residential Electric Appliance Holdings and Consumption”, Econometrica, 52(2), 345-362

Giraudet L.-G., C. Guivarch, P. Quirion, L. Penot-Antoniou, 2011, “*Evaluation des mesures du Grenelle de l’environnement sur le parc de logements*”, 2011, Commissariat Général au Développement Durable, Etudes et documents n°58, novembre 2011

Godinot, S., 2011, « Les plans climat énergie territoriaux : voies d’appropriation du facteur 4 par les collectivités et les acteurs locaux ? », Développement durable et territoires, vol. 2, mars 2011

Greening, L.A., D.L. Greene, 1998, “Energy use, Technical Efficiency, and the Rebound Effect: A Review of the Literature”, Hagler Bailly and Co., Denver

Guivarch, C., 2010, « Evaluer le coût des politiques climatiques – De l'importance des mécanismes de second rang », Thèse de doctorat, Université Paris-Est

El-Ansari, W., S. El-Silimy, 2008, "Are fuel poverty reduction schemes associated with decreased excess winter mortality in elders? A case study from London, UK", *Chronic Illness*, 4(4), 289–294.

[Enerdata, 2005] *Etude pour une prospective énergétique concernant la France, Rapport final, 1^{er} février 2005*, convention n° 03.2.18.09.07, Observatoire de l'Énergie, Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières

[Enerdata, 2011] Quantitative evaluation of explanatory factors of the lower energy efficiency performance of France for space heating compared to European benchmarks, rapport préparé par Enerdata pour l'ADEME, août 2011

Espey, J.A., M. Espey, 2004, "Turning on the Lights: A Meta-Analysis of Residential Electricity Demand Elasticities", *Journal of Agriculture and Applied Economics*, 36, 65-81

Fayrolle, J., 2011, « Commentaire sur le document de travail de la DG Trésor » (Impacts macroéconomiques du Grenelle de l'environnement), Numéro 2010/06, Décembre 2010), billet du CEP, 25 janvier 2011

Fishbone, L.G., G. Giesen, G. Goldstein, H.A. Hymmen, K.J. Stocks, H. Vos, D. Wilde, R. Zelcher, C. Balzer, H. Abilock, 1983, "User's Guide for MARKAL (BNLIKFA Version 2.0) A Multi-period Linear-programming Model for Energy Systems Analysis", Brookhaven National Laboratory, Long Island, USA, and Kernforschungsanlage Jülich, Jülich, FRG, 1983

Fischer, J.C., R.H. Pry, 1971, "A simple substitution model of technological change", *Technological Forecast and Social Change*, 3, 75-88

Gardner, G.T., P.C. Stern, 2008, "The short list: The most effective actions U.S. households can take to curb climate change", *Environment*, 50, 12–23

GIEC, 1995, *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change*, Contribution of Working Group III to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, J.P.Bruce, H.Lee, E.F.Haites (Eds), Cambridge University Press, UK, 448 p.

GIEC, 2001, *Climate Change 2001: Mitigation*, Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Bert Metz, Ogunlade Davidson, Rob Swart and Jiahua Pan (Eds.), Cambridge University Press, UK. 700 p.

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

Giraudet, L.-G., P.Quirion, 2008, "Efficiency and distributional impacts of tradable white certificates compared to taxes, subsidies and regulations", *Revue d'Economie Politique*, 118, 885-914

Giraudet, L.-G., 2011, "Les instruments économiques de maîtrise de l'énergie : Une évaluation multidimensionnelle", Thèse de doctorat soutenue le 28 mars 2011, 283 p

Giraudet, L.-G., C. Guivarch, P. Quirion, 2011, "Exploring the potential for energy conservation in French households through hybrid modeling", DT/WP No 2011-26

- Godinot, S., 2011, « Les plans climat énergie territoriaux : voies d'appropriation du facteur 4 par les collectivités et les acteurs locaux ? », *Revue développement durable et territoires* », 2(1), mars 2011
- Grübler, A., N. Nakicenovic, D.G. Victor, 1999, "Dynamics of energy technologies and global change", *Energy Policy*, 27, 247-280
- Guidolin, M. et C. Mortarino, 2010, "Cross-country diffusion of photovoltaic systems: Modelling choices and forecasts for national adoption patterns", *Technological Forecasting and Social Change*, 77, 279–296
- Guivarch, C., 2010, *Evaluer le coût des politiques climatiques, de l'importance des mécanismes de second rand*, thèse de doctorat soutenue le 22 octobre 2010 à Nogent sur Marne
- Haas, R., L. Schipper, 1998, "Residential energy demand in OECD-countries and the role of irreversible efficiency improvements", *Energy Economics*, 20(4), 421-442
- Haas, R., Biermayr, P., 2000, "The rebound effect for space heating: Empirical evidence from Austria" *Energy Policy*, 28, 403-410
- Hassett, K.A., G.E. Metcalf, 1993, "Energy conservation investment: Do consumers discount the future correctly?", *Energy Policy*, 21, 710-716
- Henry, C., 1974, "Option values in the economics of irreplaceable assets", *The Review of Economic Studies*, 41, 89-104
- Houdant, N., J. Schram, 2009, "ENERTER: a tool to simulate housing energy consumption", *Proceedings of the 2009 ECEEE Summer Study*, France
- Hourcade, J-C., M. Jaccard, C. Bataille, 2006, "Hybrid modeling: new answers to old challenges", *Introduction to the special issue of the Energy Journal*, *Energy Journal*, 27, 1–12
- Houthakker, H.S., 1951, "Some calculations of electricity consumption in Great-Britain", *Journal of the Royal Statistical Society, Series A*, 114, Part III, 351-71
- Hughes, L., 2010, "Meeting residential space heating demand with wind-generated electricity", *Renewable Energy*, 35, 1765-1772
- Hwang, R.J., F.X. Johnson, R.E. Brown, J.W. Hanford, A.H. Sanstad, J.G. Koomey, 1994, "Residential Appliance Data, Assumptions and Methodology for End-Use Forecasting with EPRI-REEPS 2.1.", Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-34046, juin 1994
- [IPCC, 2000] *Emissions Scenarios*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge, 2000
- Iwafune, Y., 2000, "Technology progress dynamics of compact fluorescent lamps", *Interim Report IR-00-009*, IIASA—International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria
- Jacquot, A., 2006, « Des ménages toujours plus petits, Projection de ménages pour la France métropolitaine à l'horizon 2030 », *Insee Première N°1106*, octobre 2006
- Jaffe, A.B., R.N. Stavins, 1994, "The energy-efficiency gap: What does it mean?", *Energy Policy*, 22, 804-810

Jager, W., 2000, "Modeling consumer behavior", thèse de doctorat, Rijksuniversiteit, Groningen, Pays-Bas

Jakob, M., R. Madlener, 2004, "Riding down the experience curve for energy-efficient building envelopes: the Swiss case for 1970–2000", *International Journal of Energy Technology and Policy*, 2, 153–178

Jenkins, J., T. Nordhaus, M. Shellenberger, 2011, "Energy Emergence – Rebound & backfire as emergent phenomena", Breakthrough Institute, février 2011

Jevons, W.S., 1865, "The Coal Question : An Inquiry Concerning the Progress of the Nation and the Probable Exhaustion of Our Coal Mines", London: Macmillan and Co.

Johnson, F.X., J.W. Hanford, R.E. Brown, A.H. Sanstad, J.G. Koomey, 1994, "Residential HVAC Data, Assumptions and Methodology for End-Use Forecasting with EPRI-REEPS 2.1.", Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-34045, juin 1994

Kahneman, D., A. Tversky, 1979, "Prospect theory: an analysis of decision under risk", *Econometrica*, 47, 263-291

Katz, M., C. Shapiro, 1986, "Technology adoption in the presence of network externalities", *Journal of Political Economy*, 94, 822-841

Keirstead, J., 2006, "Evaluating the applicability of integrated domestic energy consumption frameworks in the UK", *Energy Policy*, 34, 3065-3077

Khazzoom, J.D., 1980, "Economic implications of mandated efficiency standards for household appliances", *Energy Journal*, 1, 21–39

Koomey, J.G., F.X. Johnson, R.J. Hwang, J.W. Hanford, A.H. Sanstad, R.E. Brown, 1994., "Residential Sector End-use Forecasting with EPRI-REEPS 2.1: Summary Input Assumptions and Results", Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-34044

Koomey, J.G., P. Craig, A. Gadgil, D. Lorenzetti, 2003, "Improving long-range energy modeling: A plea for historical retrospectives", *The Energy Journal* 24(4), 75-92

Kouvaritakis, N., A. Soria, S. Isoard, 2000, "Endogenous Learning in World Post-Kyoto Scenarios: Application of the POLES Model under Adaptive Expectations", *International Journal of Global Energy Issues*, 14 (1-4), 222-248

Laitner, J.A., 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

Lapillonne B., B. Chateau, 1981, "The MEDEE models for long term energy demand forecasting", *Socio-Economic Planning Sciences*, 15(2), pages 53-58

Larsen B.M., R. Nesbakken, 2004, "Household electricity end-use consumption: results from econometric and engineering models", *Energy Economics*, 26(2), 179-200

Laurent, M.H., D. Osso, P. Mandrou, H. Bouia, 2006, « Scénarios de rénovation du parc résidentiel à 2030 en France dans un contexte « MDE » », article de conférence IBPSA France 2006, 2-3 novembre 2006

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

Laurent, M-H., F. Cattier, D. Osso, P. Pourouchottamin, 2011, « Scénarios de la demande en énergie : une rétrospective critique. Tirer les enseignements du passé au profit de l'exploration du futur », *Futuribles*, 376, 5-28

Lecuyer, O., R. Bibas, 2012, "Combining climate and energy policies: synergies or antagonism? Modeling interactions with energy efficiency instruments", CIREN Working Paper No 37-2012, janvier 2012

Lindgren, M., H. Bandhold, 2003, *Scenario Planning: The Link Between Future and Strategy*, New York: Palgrave Macmillan, 180 p

Lucik, D.R., 1999, "The Price-Independent Trend in Energy Efficiency in Canada and the Potential Influence of Non-Price Policies", research project submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of resource management in the School of Resource and Environmental Management, novembre 1999

Lundvall, B.A., 1988, "Innovation as an interactive process: from user-producer interaction to the national system of innovation". In: Dosi, G., Freeman, C., Nelson, R., Silverberg, G., Soete, L. (Eds.), *Technical Change and Economic Theory*, Pinter, London, UK, pp. 349-369

Lutzenhiser, L., 1992, "A cultural model of household energy consumption", *Energy*, 17 (1), 47-60

Madlener, R., 1996, "Econometric Analysis of Residential Energy Demand – A survey", *The Journal of Energy Literature*, II (2), 3-32

Manne, A.S., R.G. Richels, 1990, "CO₂ emission reductions: an economic cost analysis for the USA", *The Energy Journal*, 11(2):51-75

Marchal, J., 2008a, « Modélisation des performances thermiques du parc de logements, Etat énergétique du parc en 2008, Rapport détaillé », Agence nationale de l'habitat, janvier 2008

Marchal, J., 2008b, « Descriptif du programme de simulation, description détaillée du fonctionnement des sous programmes », Agence nationale de l'habitat, février 2008

Marchand C., M.-H. Laurent, R. Rezakhanlou et Y. Bamberger, 2008, "Le bâtiment sans énergies fossiles ? Les bâtiments pourront-ils se passer des énergies fossiles en France à l'horizon 2050?", *Futuribles*, n° 343, juillet 2008, p.79-100

Marien, M., 2002, "Futures studies in the 21st Century: a reality based view", *Futures* 34, 261-281

Marmot, M., 2011, "The Health Impacts of Cold Homes and Fuel Poverty", Marmot Review Team pour Les amis de la Terre

Mathy, S., M. Fink, R. Bibas, 2011, « Quel rôle pour les scénarios Facteur 4 dans la construction de la décision publique ? », *Revue développement durable et territoires* », 2(1), mars 2011

McFadden, D., 1974, "Conditional logit analysis of qualitative choice behavior", in P. Zarembka (ed.) *Frontiers in Econometrics*, New York: Academic Press, 105-142

McKinsey & Company, 2009, *Pathways to a Low-Carbon Economy*, Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve

McNeil, M.A., V.E. Letschert, 2010, "Modeling diffusion of electrical appliances in the residential sector", *Energy and Buildings*, 42, 783-790

[MECSL, 2008] Ministère de l'Emploi, de la Cohésion Sociale et du Logement, Arrêté du 6 mai 2008 portant confirmation de l'approbation de diverses méthodes de calcul pour le diagnostic de performance énergétique en France métropolitaine, NOR DEVU0810970A, JORF n°0114 du 17 mai 2008, page 8063, 96p

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, 516-528

Michelsen, C.C., R. Madlener, 2010, "Integrated Theoretical Framework for a Homeowner's Decision in Favor of an Innovative Residential Heating System", FCN working paper No. 2/2010

Mundaca, L., 2007, "Transaction costs of Tradable White Certificate schemes: The Energy Efficiency Commitment as case study", *Energy Policy*, 35, 4340-4354

Mundaca, L., L. Neij, E. Worrell, M. McNeil, 2010, "Evaluating energy efficiency policies with energy-economy models", *Annual review of environment and resources*, 35, 305-344

MURE, 1999, "MURE database tutorial—Household sector", <http://www.mure2.com/downloads/Muretut.pdf>

[négaWatt, 2011] dossier de présentation conférence de presse / réunion publique, « Scénario négaWatt 2011 », associaton négaWatt, 29 septembre 2011

Nesbakken, R., 2001, "Energy Consumption for Space Heating: A Discrete-Continuous Approach", *Scandinavian Journal of Economics*, 103, 165-184

Nordhaus, W., 1980, "Thinking about carbon dioxide: theoretical and empirical aspects of optimal control strategies", Cowles Foundation Discussion Paper No 565, Yale University, octobre 1980

Nordhaus, W., 1993, "Optimal Greenhouse-Gas Reductions and Tax Policy in the 'DICE' Model", *American Economic Review*, 83, 313-317

Ostertag, K., 2003, *No-regret potentials in energy conservation: An analysis of their relevance, size and determinants*, Heidelberg: Physica

Parti, M., C. Parti, 1980, "The total and appliance-specific conditional demand for electricity in the household sector", *Bell Journal of Economics*, Vol. 11, no 1, 309-321

Penot-Antoniou, L., P. Têtu, 2010, *Modélisation économétrique des consommations de chauffage des logements en France*, Commissariat Général au Développement Durable, Etudes et documents n°21, mai 2010

- Percebois, J., C. Mandril, 2012, « Rapport de la Commission Energie 2050 »
- Pigeon, G., D. Legain, P. Durand, V. Masson, 2007, "Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France)", *International Journal of Climatology*, 27, 1969-1981
- Pigeon, G., A. Lemonsu, V. Masson, J. Hidalgo, 2008, "De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville", *La Météorologie*, 62, 39-47
- Pindyck, R., 1980, "International Comparisons of the Residential Demand for Energy", *European Economic Review*, 13, 1-24
- Prévoit, H., 2004, « Politique énergétique nationale et lutte contre l'effet de serre », *La Revue de l'énergie*, n°554, p. 69-78.
- Prévoit, H., 2007, *Trop de pétrole – énergie fossile et réchauffement climatique*, Le Seuil, Paris
- Quirion, P., D. Demailly, 2009, « - 30% de CO₂ = + 684 000 emplois, L'équation gagnante pour la France », pour WWF-France
- Radanne, P., 2004, « La division par 4 des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050 », Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, 36p
- Riveline, C., 2005, *Evaluation des Coûts - Eléments d'une théorie de la Gestion*, Mines Paris, Les Presses, 2005, 145 p
- Ringland, G., 1998, *Scenario Planning: Managing for the Future*, New York: Wiley, 407 p
- Rogers, E., 1932, *Diffusion of Innovations*, First Edition, Free Press of Glencoe, 367 p
- Rosenberg, N., 1986, "Inside the Black Box: Technology and Economics", Cambridge University Press, Cambridge.
- [RTE, 2012] Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande, édition 2012, Réseau de transport d'électricité (RTE), 152 pages
- Sanstad, A.H., R.B. Howarth, 1994, "'Normal' markets, market imperfections and energy efficiency", *Energy Policy*, 22, 811-818
- Saunders, H.D., 1992, "The Khazzoom-Brookes postulate and neoclassical growth", *Energy Journal*, 13, 131-48
- Saunders, H.D., 2008, "Fuel conserving (and using) production functions", *Energy Economics*, 30, 2184-2235
- Schipper, L., M. Grubb, 1998, "On the rebound? Using energy indicators to measure the feedback between energy intensities and energy uses", IAEE Conference, Quebec (Canada)
- [SEI, 1993a] : "The Long-Range Energy Alternatives Planning System, Overview of LEAP version 94.0", Stockholm Environment Institute, Boston, États-unis

[SEI, 1993b] : "The Long-Range Energy Alternatives Planning System, User Guide for LEAP version 94.0", Stockholm Environment Institute, Boston, États-unis

Simon, H., 1955, "A behavioural model of rational choice", *Quarterly Journal of Economics*, 69, 99-118

Skumatz, L., 1996, "Recognizing All Program Benefits: Estimates of Non-Energy Benefits from the Customer Perspective", Skumatz Economic Research Associates, Inc., Seattle, Washington, Research Paper Series 9699-3, 1996

Solow, R.M., 1956, "A contribution to the theory of economic growth", *The Quarterly Journal of Economics*, 70, 65-94

Sopha, B.M., 2011, "Agent-Based Modeling and Simulation of Clean Heating System Adoption in Norway", thèse de doctorat, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, mars 2011

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., 2007, *The Rebound Effect: an assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency*, report produced by the Sussex Energy Group for the Technology and Policy Assessment function of the UK Energy Research Centre, octobre 2007

Sorrell, S., J. Dimitropoulos, 2008, "The rebound effect: microeconomic definitions, limitations and extensions", *Ecological Economics*, 65, 636-649

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

Stern, P.C., 2000, "Toward a coherent theory of environmentally significant behavior", *Journal of Social Issues*, 56, 523-530

Swan, L.G., V.I. Ugursal, 2009, "Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 13, Issue 8, October 2009, 1819-1835

Swan, L., V.I. Ugursal, I. Beausoleil-Morrison, 2009, "Implementation of a Canadian residential energy end-use model for assessing new technology impacts", 11th International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, 27-30 juillet 2009

Thurstone, L.L., 1927, "A law of comparative judgment", *Psychological Review*, 34, 273-286

Tiedemann, K.H., 2007, Using conditional demand analysis to estimate residential energy use and energy savings, proceedings of the ECEEE Summer Study 2007, paper 6-288

Train, K., 1985, "Discount rates in consumer's energy-related decisions: a review of the literature", *Energy*, 10, 1243-1253

Train, K., 2003, "Discrete Choice Methods with Simulation", Cambridge University Press

Traisnel J-P., B. Peuportier, A. Bornarel, 2001, « Habitat et développement durable – bilan rétrospectif et prospectif », Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement (CLIP), Les cahiers du CLIP, n°13, avril 2001, 104 p.

Traisnel, J-P., D. Joliton, M-H. Laurent, S. Caffiaux, A. Mazzenga, 2010, « Habitat Facteur 4 Étude d'une réduction des émissions de CO₂ liées au confort thermique dans l'habitat à l'horizon 2050 », Les Cahiers du CLIP n°20, novembre 2010, 104p

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, Volume 2, Number 4, 293-316

Vielle, M., 2007, « Les déterminants économiques de la demande en énergie du secteur résidentiel », rapport pour EDF R&D, note H-E12-2007-03104-FR, 28 novembre 2007

Weiss, M., M. Junginger, M.K. Patel, 2008, "Learning energy efficiency - Experience curves for household appliances and space heating, cooling, and lighting technologies", Report NWS-E-2008-26, Utrecht University

Weiss, M., L. Dittmar, M. Junginger, M.K. Patel, K. Blok, 2009, "Market diffusion, technological learning, and cost-benefit dynamics of condensing gas boilers in the Netherlands", Energy Policy, 37, 2962-2976

Weiss, M., M. Junginger, M.K. Patel, K. Blok, 2010a, "A review of experience curve analyses for energy demand technologies", Technological Forecasting and Social Change, 77, 411-428

Weiss, M., M.K. Patel, M. Junginger, K. Blok, 2010b, "Analyzing price and efficiency dynamics of large appliances with the experience curve approach", Energy Policy, 38, 770-783

Wiesmann, D., I.L. Azevedo, P. Ferrao, J.E. Fernandez, 2011, "Residential electricity consumption in Portugal: Findings from *top-down* and *bottom-up* models", Energy Policy, 39, 2772-2779

Wilson, C., H. Dowlatabadi, 2007, "Models of Decision Making and Residential Energy Use", Annual Review of Environmental Resources, 32(2), 1-35

Wittmann, T., R. Morrison, J. Richter, T. Bruckner, 2006, "A bounded rationality model of private energy investment decisions", Proceedings of the 29th IAEE International Conference: Securing Energy in Insecure Times, Potsdam

Zhang, Y., J. Song, S. Hamori, 2011, "Impact of subsidy policies on diffusion of photovoltaic power generation", Energy Policy, 39, 1958-1964

Partie II

Améliorations de l'estimation des consommations d'énergie et de leur dynamique dans un modèle technologiquement explicite, entre ingénieurs et économistes

"In theory, theory and practice are the same. In practice, they are not."
Albert Einstein

Chapitre 1

Chauffage résidentiel : un gap entre consommations théoriques et consommations observées

Résumé

Du fait de la prépondérance du chauffage dans les consommations d'énergie des logements, cet usage est au cœur des politiques énergétiques du secteur résidentiel. En France, ces politiques s'appuient en partie sur des résultats de modèles prospectifs nationaux utilisant un mode de calcul thermique proche de celui du Diagnostic de Performance Energétique⁹⁹ (e.g. Menfils pour l'ADEME, SceGES pour la DGEC¹⁰⁰). Cette norme de calcul des consommations de chauffage permet de disposer d'un langage de référence commun aux acteurs de ce secteur (Etat, collectivités, scientifiques, industriels, artisans...). Cependant, notre étude révèle des divergences significatives entre les consommations calculées avec cet outil et les consommations de chauffage observées. A partir d'une application au parc résidentiel français, ce chapitre propose une estimation et une modélisation de ces divergences ainsi qu'une analyse de leurs conséquences pour la modélisation de l'évolution future des consommations de chauffage individuel. Nos résultats montrent :

- 1) une adaptation des comportements de chauffage des ménages au prix du service (dépendant du prix de l'énergie de chauffage, de la rigueur climatique, de la performance du logement et de celle de son système de chauffage), stable sur la période 1998-2005, et qui ne dépend que très peu du type de logement, du type de chauffage ou de l'âge du logement,
- 2) que l'usage de la norme de calcul du DPE surestime très fortement les consommations de chauffage individuel actuelles et plus encore les gisements d'économie d'énergie qui y sont associés,
- 3) que les résultats issus de cette norme de calcul peuvent être corrigés de manière simple pour apporter plus de réalisme à des simulations de dynamique de consommation de chauffage.

Les résultats portent à croire que les objectifs nationaux de réduction de consommation d'énergie dans le secteur résidentiel à l'horizon 2020, déjà ambitieux en termes de consommations théoriques, seront particulièrement difficiles à atteindre en termes de consommations réelles, dont la réduction future sera limitée par l'effet rebond et les malfaçons techniques (non pris en compte dans le DPE).

Les résultats de ce chapitre reprennent en partie ceux issus des communications suivantes :

⁹⁹ Le Diagnostic de Performance Energétique (DPE) est la version française de l'Energy Performance Certificate (EPC), promu par la directive européenne EPBD [EPBD, 2002].

¹⁰⁰ Direction Générale de l'Energie et du Climat.

- 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, 2009, November 16, Washington, D.C.
- Allibe, B., 2012, « Modéliser la dynamique des consommations : du normatif au réaliste, Illustration par le DPE: écueil et pistes de solutions », Journée PREBAT « Atteindre le facteur 4 dans l'habitat : enseignements et incertitudes des travaux d'étude et de modélisation », 22 juin 2012
- Cayla, J-M., B. Allibe, M-H. Laurent, 2010, "From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption", Proceedings of the ACEEE Summer Study on Buildings, 15–20 août 2010, Pacific Grove, Etats-unis
- Allibe, B., M-H. Laurent, D. Osso, 2011, "Bind the rebound! How the combination of progressive energy tariffs and adapted soft loans can curb rebound effect and promote energy sufficiency", Proceedings of the 2011 ECEEE Summer Study, Paper 1-234
- 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 2011 ECEEE Summer Study, Paper 7-277

Avertissement : ce chapitre a été écrit sous la forme d'un article pouvant être lu de manière indépendante du reste de la thèse. Ceci explique pourquoi un bref rappel des éléments déjà traités dans les chapitres précédents est proposé dans la section 1.

Introduction

Le premier chapitre de cette thèse a montré que la composante principale de la dynamique des consommations énergétiques du secteur résidentiel français est le chauffage des logements existants (par opposition aux logements neufs). En France, la modélisation la plus utilisée pour cet usage et cette partie du parc de logements, est le mode de calcul 3CL du Diagnostic de Performance Energétique (DPE) [MECSL, 2008]. Obligatoire depuis 2007 pour la vente ou la location de logements, le DPE permet d'attribuer aux logements une étiquette (de A à G) en énergie primaire et en émissions de CO₂ à partir de calculs normés de la consommation (par m² de surface habitable) de trois usages : chauffage, eau chaude sanitaire et climatisation. Ces calculs sont qualifiés de normés car ils ne sont pas basés sur des mesures effectives des différentes variables physiques mais sur des données fixées par décret. Ces dernières définissent la performance « normale » des différents types d'équipements et de matériaux de même que des comportements « normaux » de demande de

service. Ainsi, une température intérieure de confort est fixée pour le chauffage¹⁰¹, de manière indépendante de toute autre variable.

Ceci ne poserait pas de problème particulier si ce modèle n'était utilisé que pour donner une indication de la performance des logements et de la chaîne énergétique en amont du logement (puisque le DPE est exprimé en énergie primaire). Cependant certains modèles (dont des modèles prospectifs) décrivant de manière technologiquement explicite la demande de chauffage du secteur résidentiel à l'échelle nationale utilisent ce mode de calcul (ou un autre mode très proche) pour estimer des consommations ou des gains énergétiques réalistes (e.g. [Houdant et Schram, 2009 ; Callonnec, 2011]). Or, la littérature issue des sciences humaines révèle que les comportements d'usage sont hétérogènes (e.g. [Socolow, 1978]), qu'ils peuvent être influencés par de nombreuses variables (e.g. [Haas et Biermayr, 2000 ; Santin et al., 2009]), qu'ils ont présenté des variations temporelles significatives (cf Figure 40) et qu'ils peuvent donc fortement diverger des comportements « normaux » définis dans les hypothèses du DPE. D'autre part, une littérature, encore peu étoffée (e.g. [Hong et al., 2006]), semble indiquer que des différences sensibles existent entre la performance « normale » des équipements et leur performance réelle. Enfin, le climat réel n'est le plus souvent pas mesuré et est remplacé dans les calculs thermiques par un climat dit « normal », représentant généralement le climat moyen. Dans la suite de cette thèse, les modèles utilisant en données d'entrée des comportements « normaux », des performances « normales » et un climat « normal » seront appelés modèles « normés »¹⁰². Pour déterminer dans quelle mesure l'utilisation de modèles thermiques normés peut être préjudiciable à l'analyse des consommations de chauffage du secteur résidentiel, leurs résultats sont confrontés dans cet article à des consommations réellement observées (actuellement et par le passé).

Ce chapitre propose dans une première partie un aperçu des modèles prospectifs utilisés pour modéliser l'évolution des consommations de chauffage du secteur résidentiel (section I) avec une attention particulière sur les modèles *bottom-up* ingénieur, qui sont les plus directement touchés par la problématique proposée dans ce chapitre. Ensuite (section II), les méthodes et données utilisées pour la comparaison entre les résultats de modèles thermiques normés et les consommations réelles de chauffage sont présentées. Cette partie est suivie de la présentation des résultats obtenus et d'une proposition de modélisation des différences observées (section III). Enfin, une discussion est proposée autour des résultats et de leurs implications en termes de dimensionnement des mesures d'efficacité énergétique et de décarbonation des consommations de chauffage dans les logements existants (section IV). Ces travaux apportent un éclairage détaillé sur les conditions sous lesquelles les modèles thermiques normés peuvent être utilisés de la manière la plus pertinente dans le cadre de modélisation prospective.

¹⁰¹ Cette température intérieure de référence est fixée de manière indirecte par la fixation du nombre de degrés-jours « normaux » par département. En effet, le calcul du nombre de degrés-jours quantifie la rigueur d'un climat par la somme, cumulée sur la période de chauffe, des différences entre température intérieure et extérieure.

¹⁰² Dans les articles présentés en Annexe II, ces modèles (et les consommations qu'ils calculent) sont qualifiés de « normatifs ». Cependant, pour éviter toute confusion avec le terme « normatif » utilisé dans le chapitre précédent pour qualifier des scénarios prospectifs, la notion de modèles « normés » a été préférée dans cette thèse.

1. Modèles prospectifs pour l'évaluation et l'orientation des politiques énergétiques relatives au chauffage résidentiel

1.1. Quels modèles prospectifs sont concernés par le réalisme des modèles thermiques ?

Comme l'ont indiqué les deux premiers chapitres, la consommation de chauffage du secteur résidentiel à l'échelle nationale et sa dynamique temporelle résultent de la combinaison d'un nombre important de déterminants dont les influences réciproques peuvent être particulièrement complexes. Ces déterminants peuvent avoir un impact physique direct sur les consommations (e.g. performance technique, climat, gestion de la température intérieure, surface chauffée) ou indirect dans le cas où le lien avec la consommation n'est pas de nature physique (e.g. revenus, information, prix des énergies et des équipements). Les liens entre ces différents déterminants et l'évolution des consommations de chauffage au cours du temps ont été l'objet de nombreuses approches de modélisation. Seule une partie de ces modèles permet une évaluation quantitative de la consommation de chauffage résidentiel d'un pays et de sa dynamique temporelle. Parmi ceux-ci, on peut observer deux approches principales qui se distinguent par l'échelle à laquelle la consommation et les déterminants sont observés : les modèles dits « *bottom-up* » (BU), dans lesquels la consommation nationale est calculée comme la somme de la consommation de logements individuels ou de groupes de logements semblables, et les modèles dits « *top-down* » (TD), dans lesquels la consommation et ses déterminants sont observés à grande échelle (généralement nationale ou internationale). Or, de l'échelle à laquelle sont observés les logements et leurs consommations dépend le type de données auxquelles l'accès est le plus aisé, et donc la forme sous laquelle l'objet d'étude peut être décrit de la manière la plus simple. Ainsi, on retrouve dans les modèles BU une majorité de déterminants techniques (pour lesquels il n'existe généralement pas d'indicateur agrégé à l'échelle nationale, mais qui peuvent être estimés à l'échelle individuelle à partir d'informations aisément accessibles) et, à l'inverse, des déterminants économiques (PIB, revenu des ménages, prix des énergies) dans les modèles TD. Ce sont donc essentiellement¹⁰³ les modèles *bottom-up* qui sont concernés par la problématique proposée dans ce chapitre.

Au sein des modèles utilisés pour les études prospectives quantitatives de consommations d'un seul usage (par exemple le chauffage) à l'échelle nationale, il convient de distinguer deux tâches réalisées par des modèles différents : le calcul de consommation à partir d'une description de certains déterminants à une date donnée et la simulation de l'évolution de ces déterminants dans le temps. Les modèles BU de calcul de consommation peuvent être de type « ingénieur » ou « statistiques ». Dans les BU ingénieur, seuls les déterminants directs sont utilisés dans le calcul, alors que, dans les BU statistiques, toute variable révélée comme explicative (au sens statistique du terme) de la consommation peut être utilisée, qu'elle soit un déterminant direct ou indirect. Les modèles statistiques ne sont donc pas basés sur une compréhension physique de l'origine de la consommation d'énergie mais sur des corrélations observées. Ils n'intègrent donc aucune notion de comportement « normal » et ne sont pas concernés par la problématique de ce chapitre.

En ce qui concerne la modélisation de l'évolution temporelle des déterminants, celle-ci peut être soit fixée de manière exogène, c'est-à-dire imposée par le modélisateur (par exemple en imposant une certaine évolution du prix des énergies ou un taux de pénétration pour une

¹⁰³ Certains modèles *top-down* utilisent aussi des éléments techniques, dont les étiquettes DPE (e.g. [Bernard, 2012])

technologie) soit calculée de manière endogène, c'est-à-dire déterminée par un mécanisme en fonction d'autres variables. Si une de ces autres variables est la consommation de chauffage des ménages, et que celle-ci est calculée à l'aide d'un BU ingénieur, alors la pertinence de l'évolution temporelle du déterminant dépendra de celle du calcul de consommation. En particulier, les choix technologiques des ménages peuvent être calculés de manière endogène en fonction de la rentabilité des différents équipements sur le marché, elle-même calculée à partir des consommations énergétiques estimées à l'aide d'un modèle ingénieur. Les modèles intégrant ce type de mécanisme sont donc aussi concernés par la problématique du réalisme du calcul thermique (utilisé dans les BU ingénieur traitant des consommations de chauffage).

En France, les principales études prospectives de long terme (à horizon 2030 et plus) traitant explicitement de la demande de chauffage du secteur résidentiel en France sont des exercices exploratoires basés sur des modèles BU ingénieur avec trajectoires techniques définies par le modélisateur [Traisnel, 2001; Traisnel et al., 2010 ; Laurent et al., 2006 ; négaWatt, 2011 ; Marchand et al., 2008]. C'est seulement récemment que l'évolution technologique du parc de logements (représenté de manière *bottom-up*) est passée d'une détermination intégrale par le modélisateur à une détermination par un modèle de choix d'investissement des ménages entre plusieurs options de performance énergétique [Giraudet, 2011 ; Cayla, 2011 ; Callonnec, 2011].

Parmi les BU ingénieur à l'échelle de la France, le mode de calcul thermique du Diagnostic de Performance Énergétique (DPE) est très répandu pour évaluer les consommations de chauffage à partir de la description technique des logements étudiés. Si seuls les modèles les plus récents l'utilisent explicitement (ANAH [Marchal, 2008] ; RES-IRF [Giraudet et al., 2011] ; MENFILS [Callonnec, 2011]), les modèles de demande développés avant l'existence du DPE utilisent des modes de calcul proches de celui du DPE (par exemple MleL [Laurent et al., 2006] ; Enerter [Houdant et Schram, 2009] ; [Traisnel, 2001]). On notera que ces modèles prospectifs utilisent ces modes de calcul de manières très diverses : pour l'estimation des consommations de chauffage actuelle et future (ANAH), pour le calcul des gains énergétiques uniquement (MENFILS) ou pour le calcul des consommations et des gains énergétiques mais en leur appliquant un facteur correctif (MleL, RES-IRF¹⁰⁴, Enerter). Devant la diversité de ces usages, il a semblé nécessaire de vérifier la validité de chacun.

1.2. De quoi se prive-t-on en se limitant à une représentation technique à comportement normé ?

Le DPE a été mis en place pour estimer la performance énergétique des logements et il est important de comprendre la différence entre l'estimation de la performance d'un logement et celle de sa consommation réelle. Celle-ci réside essentiellement dans la prise en compte des comportements d'usage des équipements par les ménages. En effet, au sein de logements techniquement semblables, les consommations peuvent varier sensiblement selon l'usage qui en est fait (e.g. [Socolow, 1978]). La prise en compte de différents comportements quotidiens de chauffage dans des modèles de simulation thermique révèle ainsi que ces derniers ont un impact très important sur les résultats de simulation. Ainsi, à performance thermique donnée d'un logement, on observe un facteur 3 entre les consommations théoriques résultant d'un comportement énergivore¹⁰⁵ et d'un comportement sobre¹⁰⁶ (Figure 63). En réalisant des calculs thermiques avec un

¹⁰⁴ Le facteur correctif appliqué dans le modèle RES-IRF est issu de résultats préliminaires des travaux présentés dans cet article.

¹⁰⁵ 21°C dans tout le logement et pendant toute la période de chauffage, renouvellement d'air permanent à 1 volume par heure

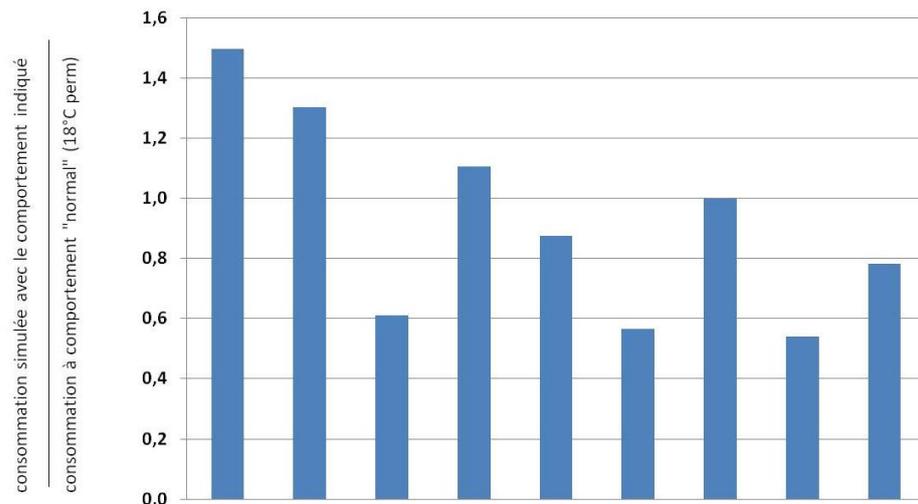
comportement fixé, et dans un environnement physique donné (température extérieure, ensoleillement), la consommation de chauffage calculée pour le logement étudié ne peut varier qu'en fonction de la performance de ses éléments constitutifs (bâti, système de chauffage, système de ventilation). Ceci explique pourquoi il est nécessaire de définir un comportement de référence pour réaliser des calculs de consommations s'ils ont vocation à estimer la performance d'un logement, résultante de celles de ses éléments constitutifs.

Si les observations et les calculs thermiques montrent que les comportements quotidiens ont un fort impact sur l'estimation de la consommation de chauffage à l'échelle d'un logement, cela ne remet pas forcément en cause l'usage d'un comportement normal unique dans une modélisation à l'échelle nationale. En effet, si les comportements quotidiens de chauffage sont distribués de manière aléatoire au sein des ménages, alors on peut certes observer qu'il existe des variations à l'échelle individuelle mais aussi que ces variations se compensent statistiquement lorsqu'on analyse un grand nombre de logements, par exemple à l'échelle d'un segment du parc résidentiel. Cette compensation à grande échelle peut porter à penser que l'utilisation d'un mode de calcul thermique avec une norme de comportement représentative du comportement moyen n'est pas problématique. Cependant :

- il n'est pas certain que le comportement « normal » du calcul de performance corresponde au comportement moyen, et que ce comportement moyen soit le même au sein des différents segments du parc résidentiel,
- même si c'était le cas, s'il apparaît que les comportements dépendent de certaines variables qui évoluent au cours du temps, alors le comportement moyen varierait en conséquence. Il deviendrait alors nécessaire de modéliser cette dépendance pour disposer d'estimations de consommations réalistes dans un exercice prospectif.

Nous avons donc essayé d'évaluer le comportement moyen de chauffage au sein de plusieurs segments du parc résidentiel français pour déterminer si l'utilisation d'un modèle de calcul de performance pour le calcul de consommations de chauffage relève d'une vision simpliste des comportements de chauffage ou au contraire d'une simplification justifiée par le fait que ces comportements sont en moyenne les mêmes dès lors qu'on les observe à une échelle suffisamment grande. Pour ce faire, nous avons donc recalculé les consommations théoriques de chauffage individuel du parc résidentiel français et les avons comparées aux consommations observées.

¹⁰⁶ 18°C lors des périodes de présence, chauffage coupé en absences, la nuit et dans une pièce « moins utilisée » du logement, renouvellement d'air réduit de moitié



température de confort	23	21	21	19	19	19	18	18	16
baisse de temp. la nuit (-3°C)					X				
baisse de temp. lors absences (-3°C)					X				
éteindre la nuit			X			X		X	
éteindre lors des absences			X			X		X	
baisser le renouvellement d'air (-50%)			X			X		X	

Figure 63 : Influence des comportements quotidiens de chauffage sur la consommation [Allibe, 2009]

2. Méthodes et données

2.1. Calcul des consommations de chauffage à partir de modèles thermiques normés

Pour comparer les consommations observées et celles calculées par des modèles thermiques normés, il est nécessaire de disposer d'une description de la performance thermique du parc de logements français. Cette description, avec un niveau de détail suffisant pour réaliser des calculs thermiques, n'étant pas une donnée publique en France, nous nous sommes basés sur deux sources de données privées, propriétés d'EDF R&D. La première concerne la description de la performance des éléments du bâti et des équipements du parc de logements français en 2005, complétée par des données concernant les flux d'équipements de rénovation sur la période 1998-2005, issues d'une étude du CEREN¹⁰⁷ et permettant de reconstituer l'évolution de la performance des logements français sur cette période. La seconde source de données est l'enquête réalisée en 2009 par EDF R&D sur un ensemble de 2000 logements¹⁰⁸, lesquels ont été décrits techniquement par les ménages. Ces deux bases de données proposent un niveau de détail sensiblement différent, ce qui a mené à l'utilisation de deux modes de calculs dont le niveau de détail des variables d'entrée était adapté à ceux des données disponibles. Ainsi, le mode de calcul du DPE (3CL) n'a été appliqué qu'à la

¹⁰⁷ Centre d'Etudes et de Recherches Economiques sur l'Energie. Ce groupement d'intérêt industriel qui analyse plusieurs panels de ménages depuis 1973 est à l'origine de toutes les données de consommations nationales par usages dans le secteur résidentiel. Ses données ne sont accessibles qu'à ses membres (ADEME, EDF, GDF, RTE, GRTgaz, ErDF) et au ministère en charge de l'énergie.

¹⁰⁸ Décrite dans les travaux de Jean-Michel Cayla [Cayla et al., 2010 ; Cayla, 2011 ; Cayla et al., 2011].

deuxième base de données, plus détaillée, tandis qu'un modèle thermique plus simple (mais de structure similaire à celle de 3CL) a été appliqué aux données par segments.

2.1.1. Reconstitution de la performance thermique du parc résidentiel

La reconstitution de la performance thermique d'un parc de logement à l'échelle nationale est généralement réalisée en deux étapes. La première consiste à décrire le parc de logements à partir de variables dont la validité de la distribution de valeurs à l'échelle nationale est élevée (par exemple grâce à des enquêtes régulières réalisées par les instituts statistiques nationaux, comme le Recensement Général de la Population et l'Enquête Logement en France). Le résultat de cette étape est une typologie du parc, dans laquelle est indiqué le nombre de logement appartenant aux différentes catégories définies par les croisements possibles des variables retenues. Ces variables retenues, généralement qualitatives (par exemple le type de logement ou la période de construction), sont celles à partir desquelles il est possible d'estimer les valeurs des variables physiques quantitatives (résistance thermique du bâti, rigueur du climat, rendement des systèmes de chauffage) utilisées par les modèles de calcul thermique.

Cette estimation constitue la deuxième étape de la reconstitution de la performance du parc de logements. Elle peut être réalisée de trois manières : normée, par jugement d'expert ou à partir de mesures *in-situ*. L'estimation normée des performances est réalisée en se basant sur des documents publics faisant l'objet d'un consensus officiel. Ainsi, il est possible d'estimer de manière normée la performance des différents éléments d'un logement à partir de sa date de construction (permettant de savoir quelle réglementation thermique était en vigueur à sa construction), son type (individuel ou collectif), son énergie de chauffage et sa localisation géographique, car les exigences de performance minimale précisées dans les textes officiels des réglementations thermiques dépendent principalement de ces variables. Ceci explique pourquoi la majeure partie des typologies de parc résidentiel sont basées sur ces variables (e.g. [Marchal, 2008; Ebel et al., 1990]). Si cette méthode a pour avantage de reposer sur des documents publics, elle présente cependant l'inconvénient de pouvoir diverger sensiblement de la réalité observée. En effet, la réglementation thermique n'est respectée que partiellement [OPECST, 2009] et les performances réelles des équipements et matériaux peuvent être différentes en moyenne de la performance « normale » mesurée dans des conditions particulières. C'est pourquoi les données normées peuvent être complétées par des dires d'experts, ces derniers constituant un consensus officieux a priori plus proche de la réalité mais ayant l'inconvénient de n'être que rarement public. Enfin, les mesures de terrain représentent les données les plus proches de la réalité mais ne sont que très rarement représentatives à l'échelle nationale et, si elles existent, constituent une source directe des dires d'experts.

Dans le cas des données à partir desquelles les travaux présentés ici ont été réalisés, la reconstitution de la performance du parc résidentiel a été réalisée de manière différente selon la source de données utilisée. La description qualitative du parc de logements français en 2005 est basée sur la segmentation utilisée par le CEREN (période de construction, type de logement, énergie de chauffage, système de chauffage) et l'estimation des variables physiques a été réalisée à partir de dires d'experts d'EDF R&D. La description qualitative de la performance des logements sur la période 1998-2005 a été reconstituée en retirant de la description de 2005 les flux annuels de rénovations thermique décrits dans une étude du CEREN [CEREN, 2008a]. L'analyse présentée ici ne porte pas sur l'intégralité des logements décrits dans le CEREN mais seulement sur les logements construits avant

1988¹⁰⁹ et équipés d'un chauffage individuel au gaz, à l'électricité ou au fioul. La description de la performance du parc de logements en 2009 provient quant à elle des déclarations des ménages interrogés lors de l'enquête EDF R&D 2009 et l'estimation des variables physiques correspondantes a été réalisée de manière normée à partir des valeurs précisées dans le décret du DPE [MECSL, 2008]. Cette description ne concerne que les logements équipés de chauffage individuel¹¹⁰.

2.1.2. Modèles thermiques utilisés pour le calcul de consommation à partir des données de performance

a) Mode de calcul thermique 3CL du Diagnostic de Performance Énergétique

Le mode de calcul 3CL est le cœur de calcul thermique du DPE, dont l'algorithme de calcul et les bases de données ont été publiés par décret [MECSL, 2008]. Le calcul est basé sur l'hypothèse simplificatrice d'un régime permanent de la différence entre température intérieure (dans le logement) et extérieure (climat environnant) au cours de l'année ainsi que sur celle d'une répartition homogène de la température au sein du logement et des matériaux. Les simplifications utilisées pour la description des phénomènes de diffusion de la chaleur résultent en une forme fonctionnelle dont le calcul est aisé et dont les résultats sont proches de ceux d'une équation linéaire [Cayla, 2011, p234]. Nous utilisons ici les résultats de 3CL en termes d'énergie finale (celle effectivement consommée par les ménages et mesurable sur leur facture énergétique) sans en faire la conversion en énergie primaire.

Equation 6

$$Cch = Bch \cdot Ich$$

avec : Cch la consommation de chauffage (en MWh/an, énergie finale)
 Bch le besoin de chauffage (en MWh/an, énergie utile)
 Ich l'inverse du rendement du système de chauffage

Equation 7

$$Bch = ENV \cdot SH \cdot INT \cdot METEO$$

avec : ENV les pertes thermiques du logement par m²
 SH la surface habitable (en m²)
 INT le coefficient d'intermittence
 METEO la correction météorologique (en degrés-heures)

Les pertes thermiques (variable *ENV*) sont calculées à partir de la morphologie du logement (permettant d'évaluer la taille des différentes surfaces de déperdition thermique), de la performance du bâti (niveau d'isolation de chaque paroi) et de celle de l'éventuel système de ventilation.

Le coefficient d'intermittence (*INT*) prend en compte l'effet sur le besoin de chauffage d'une réduction de la température pendant la nuit et d'une semaine d'absence en hiver, prises comme hypothèses [Tribu Energie, 2006]. La valeur de ce coefficient d'intermittence dépend de la performance du bâti et de la ventilation mais pas de l'énergie utilisée ou de la performance du système de chauffage, comme indiqué dans l'équation ci-dessous.

¹⁰⁹ Ce choix s'explique par le fait que les logements construits après 1988 sont regroupés dans une même catégorie dans la segmentation de données utilisée. Or, deux réglementations thermiques ont été mises en place entre 1988 et 2005, ce qui rendait plus difficile la reconstruction de la performance de ces logements.

¹¹⁰ Ce choix s'explique par le fait qu'il est sensiblement plus difficile d'avoir accès aux factures énergétiques des logements équipés de chauffage collectif que dans le cas du chauffage individuel, et que le chauffage collectif ne représente « que » 20% des consommations de chauffage résidentiel en France [CEREN, 2011].

Equation 8

$$INT = \frac{I_0}{1 + 0,1.(G - 1)}$$

avec : $I_0 = 0,85$
 $G = ENV/CORH$
 ENV les pertes thermiques (parois et renouvellement d'air) par m^2
 $CORH$: (hauteur sous plafond)/2,5

b) *Modèle thermique simplifié*

Le modèle thermique simplifié utilisé pour l'analyse des données par segment est un modèle développé par EDF R&D pour permettre d'estimer les consommations de chauffage d'un groupe de logements avec un minimum de données descriptives. Il est construit sur une structure semblable à celle du DPE (approximation linéaire annualisée de la consommation d'énergie). Sa différence principale avec ce dernier est l'absence de facteur d'intermittence (soit $INT=1$) et le formalisme plus agrégé des valeurs d'entrée en ce qui concerne la description physique du logement (servant au calcul de la variable ENV).

2.2. Données de consommations et indicateur utilisé pour la comparaison avec les calculs théoriques

2.2.1. Données de consommations observées

Les consommations de chauffage observées auxquelles sont comparées les consommations théoriques calculées par segment du parc résidentiel sur la période 1998-2005 sont issues du CEREN [CEREN, 2007a]. L'enquête EDF R&D 2009 a porté sur 2012 ménages parmi les quels 913 ont été retenus d'après les critères précisés dans les premières exploitations de cette enquête [Cayla et al., 2010 ; Cayla, 2011 ; Cayla et al., 2011]. Les consommations d'énergie par usage ont été déduites des factures énergétiques des ménages en se basant sur la méthodologie du CEREN [CEREN, 2007b]. La consommation de chauffage des ménages est ainsi obtenue en déduisant de la facture totale la consommation d'électricité spécifique, de cuisson et d'ECS, estimées chacune par une régression multilinéaire. Nous disposons donc d'une part de consommations moyennes de chauffage de plusieurs segments du parc résidentiel français, sur plusieurs années, et d'autre part d'une estimation de la consommation de chauffage de chaque logement d'un échantillon, à un instant donné.

2.2.2. Indicateur utilisé pour la comparaison

Les écarts entre la consommation de chauffage calculée par un modèle thermique et celle observée peuvent provenir de trois sources :

- L'utilisation d'un modèle thermique simpliste,
- L'existence d'un biais de mesure ou d'estimation de la consommation : mesure partielle (si un équipement complémentaire est utilisé mais non déclaré) et aléa de la méthode

d'extraction statistique de l'usage chauffage au sein d'une consommation d'énergie multi-usages¹¹¹,

- L'estimation erronée de données d'entrée du modèle physique, pouvant concerner les variables suivantes : la performance thermique réelle (isolation et équipements, à cause de la non prise en compte de malfaçons ou d'un non-respect partiel de la réglementation thermique), l'environnement physique (température extérieure, ensoleillement, vent, effets de masque, mitoyenneté) et les comportements d'usage (gestion de la température intérieure et du renouvellement d'air différente du comportement normé).

Pour étudier les écarts observés, l'indicateur suivant est utilisé :

Equation 9

$$I = \frac{Cobs}{Cth}$$

avec :

- *Cobs* la consommation observée
- *Cth* la consommation calculée par un modèle de calcul thermique et son jeu d'hypothèses concernant les performances et le climat

Cet indicateur a été introduit par Wirl en 1998 et a été repris depuis sous plusieurs dénominations : « facteur de service » [Haas et al., 1998 ; Haas et Biermayr, 2000], « facteur d'intensité » [Schuler et al., 2000], « taux d'utilisation » [Giraudet, 2011] ou encore « facteur de chauffage » [Tigchelaar, 2011]. Ces appellations se réfèrent à l'interprétation des différences entre consommations observées et théoriques en termes de comportements quotidiens de chauffage. Le terme d'*intensité d'utilisation* sera utilisé dans la suite de ce chapitre. A défaut de donner plus de précisions sur les comportements à l'origine des variations de consommation (gestion spatio-temporelle de la température ou du renouvellement d'air), cet indicateur renseigne sur la résultante des comportements en termes de consommation d'énergie, en la comparant à celle résultant des comportements normaux tels que définis dans le modèle de calcul thermique utilisé. Par ailleurs, ces consommations étant calculées, les valeurs de l'indicateur sont propres à un modèle de calcul, aux hypothèses relatives à la performance énergétique des logements et à leur environnement physique extérieur.

Pour analyser les résultats présentés dans la section suivante, il est nécessaire de garder à l'esprit que le calcul de *intensité d'utilisation* n'est pas soumis aux mêmes biais sur les deux jeux de données utilisés dans ce chapitre. En effet, pour la comparaison des consommations observées et théoriques sur la période 1998-2005, le biais de mauvaise estimation des données d'entrée du modèle thermique est limité par le fait que sont utilisées des données de climat réel et des performances estimées à dire d'experts. A l'inverse, l'analyse des données de 2009 est basée sur des performances et un climat normés, mais le modèle de calcul thermique est plus fin que celui utilisé sur les données 2005 et devrait donc être moins biaisé. Enfin, les données de consommation de 2009 sont déclarées par les ménages. En cas de divergence sensible des résultats entre les deux sources de données exploitées, le fait que celles-ci soient soumises à des biais différents aurait l'avantage de fournir des éléments permettant d'expliquer les divergences observées.

¹¹¹ En effet, l'énergie utilisée pour le chauffage peut aussi l'être pour d'autres usages dans le logement (par exemple : chaudières double usage chauffage + eau chaude sanitaire, chauffage électrique). Il est alors nécessaire de répartir la consommation de cette énergie entre chacun de ces usages. La même méthodologie que celle du CEREN [CEREN, 2007] a été appliquée pour extraire les consommations de chauffage des factures énergétiques des ménages enquêtés.

3. Résultats

3.1. Observations par segment du parc résidentiel

3.1.1. Résultats en coupe transversale 2005

Cette première confrontation entre consommations théoriques et réelles sur les segments principaux du parc résidentiel français en 2005, présentée sur le Tableau 6, permet déjà de tirer certains enseignements. Tout d'abord, on observe que les taux d'utilisation ne sont pas répartis de manière homogène sur le parc, un facteur 2,5 étant observable entre les valeurs extrêmes. Le deuxième enseignement est que les intensités d'utilisation calculées sont inférieures à 1 pour tous les segments étudiés, ce qui indique que le modèle thermique utilisé pour le calcul des consommations théoriques surestime de manière systématique les consommations observées des logements construits avant 1988. La surestimation des consommations implique de fait la surestimation, en valeur absolue, des gains énergétiques maximum que l'on peut attendre de rénovations. Or, ce sont précisément les logements construits avant 1988 qui devraient faire l'objet des rénovations thermiques les plus importantes au cours des dizaines d'années à venir. La surestimation du gisement d'économie d'énergie est donc problématique dans le cadre de l'évaluation *ex ante* de l'impact des politiques énergétiques visant la rénovation des logements en France.

Période de construction	Maisons			Immeubles collectifs	
	Elec	Gaz	Fioul	Elec	Gaz
<1975	0,35	0,48	0,37	0,46	0,48
1975-1981	0,40	0,50	0,44	0,47	0,65
1982-1988	0,49	0,67	0,57	0,67	0,87

Tableau 6 : intensités d'utilisation observées par segment du parc résidentiel français en 2005

D'autre part, on peut observer que :

- *l'intensité d'utilisation* est d'autant plus grande que les logements du segment étudié sont récents (et donc performants du fait des réglementations thermiques successives),
- qu'elle est plus élevée pour les immeubles collectifs que pour les maisons individuelles ,
- qu'elle est globalement plus élevée dans les logements chauffés au gaz que ceux chauffés au fioul ou à l'électricité.

Les deux premiers éléments révèlent une corrélation positive entre *l'intensité d'utilisation* et la performance énergétique alors que le troisième peut être interprété comme une corrélation négative entre cette intensité et le prix de l'énergie (indiqués dans le Tableau 7). Enfin, le Tableau 8 présente le revenu moyen des ménages de chaque segment, ce qui permet d'observer une corrélation globalement positive entre *l'intensité d'utilisation* et le revenu des ménages.

	Electricité	Gaz	Fioul
Prix en €/kWh _{pci}	0.11	0.04	0.05

Tableau 7 : Prix des énergies de chauffage en 2005 [PEGASE, 2012]

Revenu par ménage	Maisons			Immeubles collectifs	
	Electricité	Gaz	Fioul	Electricité	Gaz
<1975	25464	30968	29257	18789	26213
1975-1981	34429	36092	34586	20034	24709
1982-1988	35729	37229	35373	25231	25270

Tableau 8 : Revenu total des ménages par segment d'après l'Enquête Logement 2002 [EL, 2002]

3.1.2. Quel indicateur pour estimer l'intensité d'utilisation ?

Parmi les indicateurs utilisés dans la littérature pour décrire les liens entre consommation d'énergie et les caractéristiques des ménages, de leurs logements et de leur environnement économique, celui utilisé dans la définition originelle de la précarité énergétique a retenu notre attention. En effet, la précarité énergétique d'un ménage a été définie initialement dans le cas où la part budgétaire qu'un ménage devrait allouer à ses dépenses énergétiques pour satisfaire un certain niveau de confort dépasserait le seuil de 10% du revenu [DECC, 2011]. Elle sera appelée « part budgétaire théorique » (PBT) dans la suite de ce chapitre, et appliquée au seul usage « chauffage », comme indiqué dans l'Equation 10 détaillant la façon dont nous la calculons. Elle sera calculée comme la part budgétaire que les ménages alloueraient au chauffage s'ils consommaient autant de chauffage que ce qui est calculé par le modèle thermique normé, c'est-à-dire avec un comportement de chauffage permettant d'atteindre un niveau de confort donné.

Equation 10

$$PBT = \frac{Pe.Cthnorm}{R}$$

avec :

- PBT est la part budgétaire théoriquement associée au chauffage
- Pe le prix de l'énergie
- Cthnorm la consommation de chauffage calculée avec un comportement normé
- R le revenu du ménage

Il est important de noter que nous utilisons ici l'indicateur de la définition originale de l'indicateur de précarité énergétique, c'est-à-dire la part budgétaire nécessaire à un ménage pour maintenir un niveau de confort de référence¹¹² [DECC, 2011] et non la part budgétaire réellement allouée aux consommations d'énergie (définition la plus couramment utilisée, et sensiblement plus simple à mesurer). Par ailleurs, il faut noter que le calcul de la consommation théorique (Cthnorm), dépend du modèle de calcul thermique utilisé ainsi que de ces données d'entrée (concernant la performance des équipements et surtout le niveau de confort « normal » retenu dans les hypothèses de calcul). La PBT ne sera donc pas la même entre les calculs réalisés avec le modèle thermique simplifié et le DPE.

Le fait qui a retenu notre attention est que le calcul de la PBT allouée au chauffage fait intervenir les variables pour lesquelles une corrélation a été observée avec l'intensité d'utilisation sur

¹¹² Défini usuellement (au Royaume-Uni, d'où vient la définition de la précarité énergétique) comme 21°C dans la pièce principale et 18°C dans les autres pièces occupées.

les données de 2005 (performance du logement, prix des énergies, revenu du ménage). Vis-à-vis de ces variables, elle évolue dans le sens opposé à celui de l'*intensité d'utilisation* : plus la performance ou le revenu du ménage est élevé (ou plus le prix de l'énergie est bas), plus la part budgétaire théorique est faible. Une corrélation négative entre l'*intensité d'utilisation* du chauffage et la part budgétaire théorique devrait donc a priori être observable. La représentation du facteur d'intensité des différents segments en fonction de la PBT en 2005 est présentée sur la Figure 64, ainsi que les frontières définissant la précarité énergétique selon la définition retenue (les ménages à droite des frontières présentées sont considérés en précarité énergétique). Cette figure montre que la corrélation négative attendue est effectivement observée et que, pour les segments du parc ayant des PBT moyennes semblables ont des intensités d'utilisation semblables. La PBT apparait donc comme un assez bon indicateur de l'*intensité d'utilisation*. D'autre part, on peut observer que si l'intensité décroît fortement entre 2% et 4% de la PBT, les variations sont moins importantes pour les PBT plus élevée, ce qui peut évoquer un seuil minimal de confort thermique que les ménages sont prêts à payer, même en situation de contrainte budgétaire non négligeable.

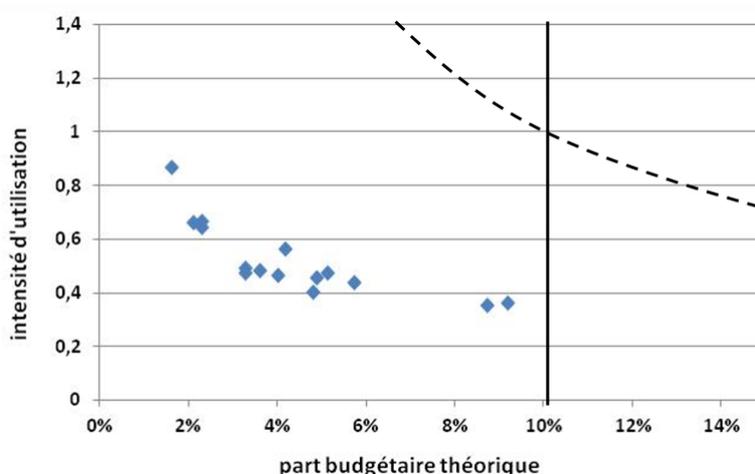


Figure 64 : Représentation de l'*intensité d'utilisation* en fonction de la part budgétaire théorique de chauffage et indication de la frontière de la précarité énergétique en fonction de la définition retenue (ligne pleine : originelle, en pointillés : courante (utilisant les consommations réelles))

Comme l'*intensité d'utilisation* observée est toujours inférieure à 1 (une *intensité d'utilisation* égale à 1 correspondant au confort de référence pour le calcul de la PBT), la frontière de la précarité énergétique est sensiblement plus proche des points observés avec sa définition originale (utilisant un confort de référence) que de ceux observés avec la définition usuelle. Si aucun segment ne se situe dans une zone de précarité énergétique, quelle que soit la définition retenue, cela ne signifie pas qu'aucun ménage au sein de ces segments n'est touché par cette précarité. En effet, les segments étudiés abritent des ménages dont les revenus et la performance des logements sont sensiblement différents. Il est donc probable qu'au sein de chaque segment, certains ménages soient en situation de précarité énergétique, mais ceci n'est pas visible au travers des PBT moyennes.

3.1.3. Evolutions de l'intensité d'utilisation sur la période 1998-2005

La mesure des différentes intensités d'utilisation sur les segments du parc résidentiel en 2005 a montré une certaine corrélation avec la part budgétaire PBT. Il est cependant légitime de questionner la validité dynamique de cette corrélation : est-ce que, si la PBT d'un segment évolue au cours du temps, son intensité va évoluer selon la corrélation observée en 2005 ? C'est pourquoi une

étude rétrospective a été réalisée sur les données disponibles, c'est-à-dire sur les sept années précédant 2005.

La Figure 65 présente ainsi le suivi de l'*intensité d'utilisation* de chaque segment étudié entre 1998 et 2005. Sur cette période, la variation annuelle des parts budgétaires par segment est essentiellement due à celle du prix du fioul¹¹³ et à celle de la rigueur du climat réel¹¹⁴, et non pas à l'évolution de la performance, qui est très lente à l'échelle des segments observés¹¹⁵, ou à celle du revenu, très lente aussi. Les évolutions observées valident l'hypothèse que les différences mesurées entre consommations théoriques et observées sont en partie de nature comportementale¹¹⁶. En effet, si elles n'avaient été dues qu'à une mauvaise estimation des performances techniques et que le comportement des ménages était réparti de manière homogène et constante au sein du parc de logements, alors l'évolution de l'*intensité d'utilisation* de chacun des segments n'aurait pas changé au cours de la période d'observation et l'on aurait observé des trajectoires horizontales de l'*intensité d'utilisation* des segments sur la Figure 65, ce qui n'est visiblement pas le cas.

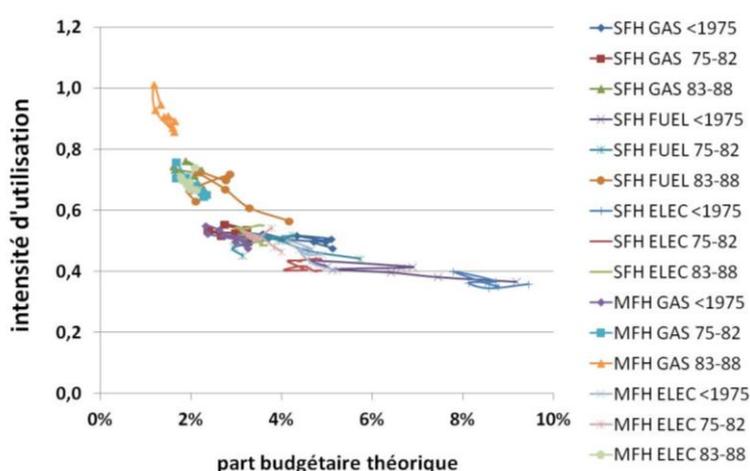


Figure 65 : Evolution de l'*intensité d'utilisation* des segments du parc résidentiel français entre 1998 et 2005, SFH : maison individuelle, MFH : immeuble collectif

On observe par ailleurs que la trajectoire des segments reste sur l'alignement observé en coupe transversale 2005. On peut donc en déduire que, en moyenne et à grande échelle (chaque segment représentant plusieurs centaines de milliers de logements), les ménages réagissent sensiblement de la même manière aux variations du prix du service de chauffage, quel que soit le type de leurs logements, la performance de ceux-ci et l'énergie de chauffage qu'ils utilisent. On observe par exemple que le segment « maisons individuelles construites avant 1975 et chauffées au fioul » (SFH FUEL <1975) présente une *intensité d'utilisation* variant, sur la période d'observation, entre celle des « maisons individuelles chauffées à l'électricité construites entre 1975 et 1982 » (SFH ELEC 75-82 et celle des « maisons individuelles chauffées à l'électricité construites avant 1975 » (SFH ELEC <1975). Ce constat est a priori surprenant car l'électricité et le fioul sont deux énergies qui diffèrent vis-à-vis de nombreuses caractéristiques : par leur visibilité (la consommation d'électricité

¹¹³ Variations entre 2,9 et 5,5 c€/kWh, alors que le prix de l'électricité et du gaz sont restés relativement stables sur cette période.

¹¹⁴ Variations entre 1951 et 2292 degrés-jours unifiés.

¹¹⁵ Car seulement une faible partie des logements de ces segments réalisent des travaux améliorant sensiblement la performance énergétique de leur logement.

¹¹⁶ La possibilité d'un biais de modélisation concernant la prise en compte des variations de rigueur climatique n'est pourtant pas rejetée. Cependant, au vu de l'amplitude des variations de l'*intensité d'utilisation*, on peut raisonnablement penser que celles-ci ne peuvent être dues au seul biais de modélisation et dépendent donc en partie de variations de comportements.

quasi invisible par rapport au remplissage d'une cuve de fioul), leur possibilité de régulation (les convecteurs électriques présentent une inertie presque nulle et proposent donc un ajustement pièce par pièce plus flexible que les radiateurs d'un réseau d'eau chaude) et le type d'émetteurs de chauffage.

On notera que la définition d'un prix de service pour le chauffage, basée sur une définition précise du service, n'est possible que par un calcul thermique de ces consommations à partir d'un comportement de référence (servant alors à définir la qualité du service). En effet, un modèle basé uniquement sur les consommations observées (cas des modèles statistiques et économétriques) n'aurait accès qu'à la résultante de niveaux de services réels, de performances et d'environnements physiques dont il serait impossible d'accéder aux valeurs individuelles sans l'ajout d'informations techniques. Il serait certes possible pour ces modèles de quantifier un prix du chauffage (par exemple en €/m²) pour chaque logement, mais celui-ci ferait référence à des niveaux de services différents d'un logement à l'autre.

3.2. Analyse de l'échantillon 2009

3.2.1. Intensités d'utilisation au sein de l'échantillon

L'analyse rétrospective proposée dans la partie précédente est limitée par le fait que les consommations observées et calculées sont des moyennes à l'échelle de segments, ne rendant pas compte de la diversité importante existante au sein de chaque segment. Le calcul du facteur d'intensité et de la PBT de chaque ménage dans l'échantillon EDF R&D 2009, y remédie en présentant un aperçu de la dispersion de ces valeurs au sein de la population (Figure 66). Ceci permet d'observer qu'une partie des logements est effectivement dans la zone de précarité énergétique, quelle que soit la définition choisie (10% des consommations de chauffage réelles ou calculées de manière normée), et ce sans compter les autres dépenses énergétiques. Avec les données utilisées, la définition originelle place ainsi 17,3% de l'échantillon en précarité énergétique en ne comptant que les consommations de chauffage alors que la définition usuellement utilisée en France limite cette part à 6,4%.

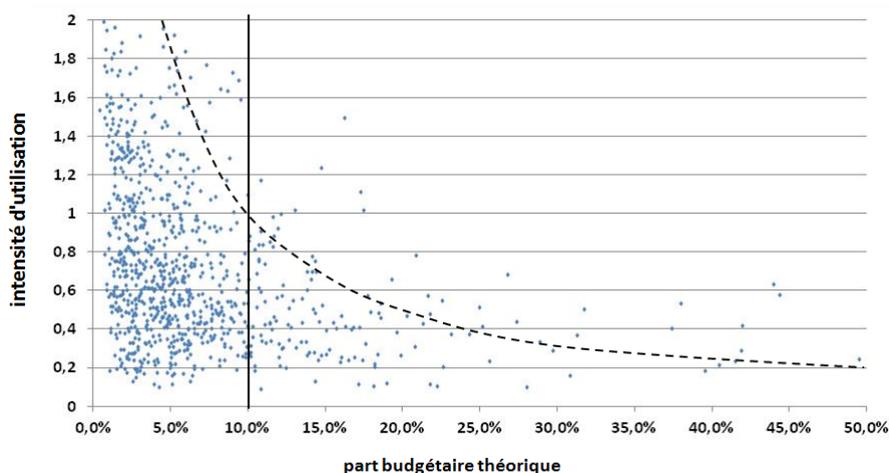


Figure 66 : *Intensité d'utilisation* de chacun des 913 logements de l'enquête EDF R&D 2009. Les limites de la précarité énergétique sont représentées en ligne pleine pour la définition originelle et en pointillés pour celle utilisant les consommations réelles

Pour pouvoir comparer ces résultats obtenus précédemment, il est possible de regrouper les 913 ménages de l'échantillon en segments. Pour observer la plus grande variété d'intensités d'utilisation moyennes par segment, l'échantillon a été segmenté en déciles de part budgétaire théorique (PBT), en calculant l'intensité moyenne¹¹⁷ par l'Equation 11. Les résultats sont présentés Figure 67 et comparés à ceux obtenus par segment sur l'année 2005 avec le modèle de calcul simplifié. On observe que les calculs réalisés avec le modèle 3CL, en utilisant des données d'entrée normées, révèlent une distribution des valeurs d'intensité d'utilisation de forme similaire à celle issue de l'analyse par segment en 2005. D'autre, part, les résultats obtenus avec 3CL révèlent des intensités d'utilisation plus élevées, indiquant que ce modèle surestime moins les consommations de chauffage que le modèle thermique simplifié. Ceci est en partie dû au fait que le modèle thermique simplifié utilisé sur les données du CEREN ne prend pas en compte le facteur d'intermittence (variable *INT* de l'Equation 7), dont la valeur moyenne sur le parc est environ 0,8 (expliquant donc grossièrement 20% d'écart entre les deux modèles de calcul).

La surestimation des consommations de chauffage individuel par le modèle 3CL reste cependant très forte : elle est en moyenne de 63%, et peut aller jusqu'à 130% pour le dernier décile de PBT. D'autre part, la segmentation par PBT permet d'observer des PBT moyennes très supérieures à celles observées par segment technique, ce qui permet en particulier d'observer que les derniers déciles de PBT se situent dans la zone de précarité énergétique (avec définition originelle).

Equation 11

$$I_i = \frac{\sum_i C_{obs}}{\sum_i C_{th}}$$

avec *i* le segment étudié, *C_{obs}* la consommation observée, *C_{th}* la consommation théorique

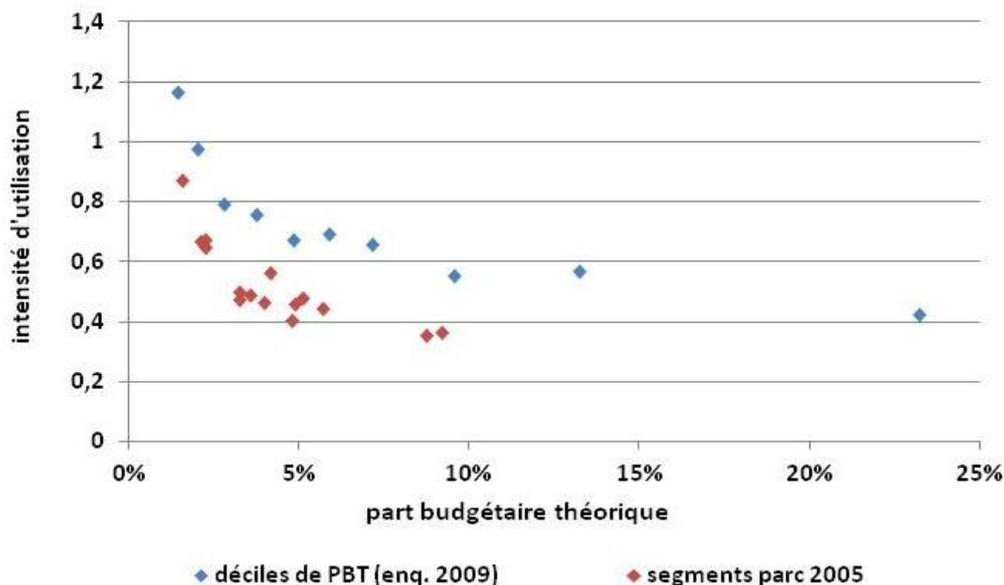


Figure 67 : Intensité d'utilisation, calculée par décile de PBT sur l'échantillon 2009 avec le DPE (bleu) et sur les segments techniques du parc 2005 avec le modèle thermique simplifié (rouge)

¹¹⁷ Qui n'est pas la moyenne des intensités mais bien l'intensité d'utilisation du groupe de logements dans son ensemble

3.2.2. Analyse économétrique en coupe transversale

Pour avoir une indication plus détaillée de l'influence de chacune des variables utilisées pour le calcul de la PBT sur l'intensité d'utilisation, une analyse économétrique a été réalisée sur l'échantillon 2009. Pour la réaliser, la consommation de chauffage (E) des ménages est décomposée de la façon suivante (Equation 12) :

Equation 12

$$E = k \cdot DH^\alpha \cdot \eta^\beta \cdot S^\gamma \cdot q^\delta \cdot Y^\lambda \cdot P^\mu$$

avec :

- k une constante
- DH le nombre de degrés-heures (en K .h)
- H le rendement du système de chauffage
- S la surface (en m²)
- q les déperditions thermiques (en W/m².K)
- Y le revenu du ménage
- P le prix de l'énergie de chauffage
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \lambda$ et μ des paramètres à estimer

Cette forme fonctionnelle est dérivée d'une fonction de production couramment utilisée en économétrie car elle permet d'estimer aisément les paramètres associés à chacune des variables à l'aide d'une régression linéaire appliquée au logarithme de chaque terme de l'équation (Equation 13). De plus, les paramètres sont aisément interprétables, étant égaux à l'élasticité de la demande d'énergie aux variables auxquelles ils sont rattachés¹¹⁸.

Equation 13

$$\ln(E) = \ln(k) + \alpha \cdot \ln(DH) + \beta \cdot \ln(\eta) + \gamma \cdot \ln(S) + \delta \cdot \ln(q) + \lambda \cdot \ln(Y) + \mu \cdot \ln(P)$$

Cette forme fonctionnelle a par ailleurs été choisie car elle permet de décomposer la consommation de chauffage en un produit de la consommation théorique de chauffage (calculée avec un modèle de calcul thermique) et de l'intensité d'utilisation (I), comme indiqué dans l'Equation 14 ci-dessous. En estimant les paramètres de l'Equation 13, il est alors possible d'en déduire la forme fonctionnelle de l'intensité d'utilisation par l'Equation 15, tirée de l'Equation 14.

Equation 14

$$\begin{aligned} E &= k \cdot DH^\alpha \cdot \eta^\beta \cdot S^\gamma \cdot q^\delta \cdot Y^\lambda \cdot P^\mu \\ &= [DH^1 \cdot \eta^{-1} \cdot S^1 \cdot q^1] \cdot [k \cdot DH^{\alpha-1} \cdot \eta^{\beta+1} \cdot S^{\gamma-1} \cdot q^{\delta-1} \cdot Y^\lambda \cdot P^\mu] \\ &= C_{thnorm} \cdot I \end{aligned}$$

Equation 15

$$I = k \cdot DH^{\alpha-1} \cdot \eta^{\beta+1} \cdot S^{\gamma-1} \cdot q^{\delta-1} \cdot Y^\lambda \cdot P^\mu$$

¹¹⁸ Par exemple, si $\mu = -0.1$, alors l'élasticité de la demande d'énergie au prix de l'énergie vaut -0.1 , c'est-à-dire que si les prix augmentent de 10% alors la consommation baissera de 1%.

Les résultats de l'estimation des paramètres de l'Equation 13 par une régression multilinéaire, présentés dans le Tableau 9, montrent que les élasticités ont toutes le signe attendu : la consommation est d'autant plus élevée que le climat est rigoureux, que le rendement du système de chauffage est faible, que la surface habitable est importante, que les déperditions thermiques sont élevées (faible performance du bâti et du renouvellement d'air), que le revenu est élevé et que le prix de l'énergie principale de chauffage est faible. On retiendra que toutes les variables peuvent être considérées comme statistiquement explicatives de la consommation ($(Pr > |t|) < 0,1$), mais que le revenu et la surface ont des pouvoirs explicatifs moins importants que les autres variables utilisées. Toutes les variables intervenant dans le calcul de la part budgétaire théorique ont donc bien une influence sur l'intensité d'utilisation.

Variable	Coefficients	Valeur	Pr > t	Ecart-type	t-value
Constante	k	-6,984	< 0,0001	1,233	-5,664
DH	α	0,639	< 0,0001	0,096	6,675
Rendement	β	-0,209	0,034	0,098	2,129
Surface	γ	1,219	< 0,0001	0,054	22,704
Pertes thermiques	δ	0,283	< 0,0001	0,036	7,852
Revenu	λ	0,064	0,064	0,035	1,853
Prix énergie	μ	-0,522	< 0,0001	0,102	-5,135
R ² ajusté		0,56			
Nombre d'observations		913			

Tableau 9 : Résultats de l'estimation des coefficients de l'Equation 13

En ce qui concerne les valeurs quantitatives, on peut noter que l'élasticité de la consommation d'énergie au revenu des ménages est très faible (0,06), ce qui est plutôt dans la fourchette basse des estimations trouvées dans la littérature (e.g. [Haas et Biermayr, 2000 ; Leth-Petersen, 2002 ; Berkhout et al., 2004]). La valeur de l'élasticité au prix de l'énergie de chauffage (-0,52) est quant à elle plus élevée que la moyenne observée dans la littérature, dont la valeur est environ -0,4 (e.g. [Dahl, 1993 ; Espey et Espey, 2004 ; Vielle, 2007]) mais dont la dispersion est conséquente (voir par exemple les résultats mentionnés dans [Risch et Salmon, 2010]). Concernant les variables physiques non liées à la performance du logement, on observe que l'élasticité de la consommation de chauffage à la surface (1,22) est supérieure à 1, ce qui paraît surprenant. En effet, on pourrait s'attendre à ce que les habitants soient d'autant plus en mesure de gérer la température dans les différentes pièces (et ainsi réduire la facture énergétique) que le logement est grand. Cette intuition est peut-être vraie pour les plus grands logements mais ne se vérifie pas en moyenne d'après les résultats obtenus. L'élasticité de la demande de chauffage au nombre de degrés-heures (0,64) est quant à elle sensiblement inférieure à 1, ce qui peut s'interpréter par une gestion du chauffage par les ménages d'autant plus efficace que le climat est froid.

Plus surprenants sont les résultats concernant les variables liées à la performance du logement et de son système de chauffage : alors que les lois de la thermique laissent supposer des coefficients β et δ proches des valeurs -1 et 1¹¹⁹, les valeurs de ces paramètres sont respectivement de -0,21 et 0,28. Si l'élasticité à la performance du bâti estimée ici ($\delta=0,28$) est proche de celle estimée par Haas et Biermayr (2000) ($\delta=0,22$), l'écart avec leurs résultats est plus important concernant l'élasticité au rendement du système de chauffage ($\beta=-0,21$ contre $\beta=-0,48$ pour Haas et Biermayr). En pourcentage, l'effet observé d'une différence de performance (sur les systèmes ou le

¹¹⁹ Dans un calcul thermique, le doublement du rendement de chauffage ou une diminution par deux des pertes thermiques entraîne grossièrement une division par deux des consommations de chauffage. La traduction de cette relation en termes d'élasticité donne des valeurs absolues égales à l'unité.

bâti) sur la consommation de chauffage apparaît donc environ quatre fois moins important que celui prédit par les modèles de calcul thermique normés. Il est important de rappeler que le rendement réel des systèmes de chauffage et la performance réelle du bâti et de l'éventuel système de ventilation n'ont pas été mesurés dans l'enquête utilisée. Les rendements indiqués dans les données utilisées pour la régression proviennent de la base de données du DPE, qui indique un rendement normé en fonction du type de système de chauffage, un taux de renouvellement d'air en fonction du système de ventilation et une résistance thermique en fonction de la période de construction du logement, de son énergie de chauffage et de sa zone climatique (en prenant aussi en compte une éventuelle pose d'isolation supplémentaire, supposée parfaitement installée). Les élasticités mesurées sont donc celles de la consommation de chauffage à la performance théorique (ou normée) du système de chauffage, du bâti et du système de ventilation, et pas à leur performance réelle.

Il existe plusieurs interprétations possibles à un effet moins important des améliorations (théoriques) de performance sur la consommation d'énergie, dont les deux principales sont l'effet rebond (augmentation de l'*intensité d'utilisation* lorsque le prix du service baisse [Sorrell et Dimitropoulos, 2008]) et la malfaçon technique (l'augmentation réelle de performance est inférieure à l'augmentation théorique). Le fait que la performance réelle des équipements et les comportements de chauffage effectifs ne soient pas mesurés empêche de pouvoir attribuer l'explication de l'effet observé (impact de la performance sur les consommations sensiblement plus faible que prévu par les modèles thermiques) à une cause plutôt qu'à l'autre, ce qui pousse à nuancer l'interprétation des résultats uniquement en termes d'effet rebond. Les résultats obtenus ne permettent que de donner une borne haute à l'estimation de l'effet rebond.

Si on définit cet effet rebond comme l'élasticité de la demande de service (c'est-à-dire de l'*intensité d'utilisation*) au prix du service (en €/m²), il peut être estimé grossièrement à partir de la moyenne des paramètres associés aux variables permettant le calcul de ce prix du service dans l'Equation 10 : le prix de l'énergie, la performance du bâti, la performance des systèmes, le nombre de degrés-heures et la surface. En utilisant les résultats obtenus, l'estimation de l'effet rebond maximum est alors de 60%¹²⁰. Cette valeur est parmi les plus élevées de la littérature [Sorrell et al., 2009], ce qui pousse à questionner les résultats obtenus. D'après Sanders et Phillipson (2006), l'augmentation de confort n'explique qu'environ un tiers des écarts observés entre gains énergétiques réels et théoriques consécutifs à une rénovation, ce qui pousserait à réévaluer l'effet rebond obtenu autour de 20%, valeur qui correspond davantage aux estimations de la littérature [Sorrell et al., 2009]. Ceci souligne l'importance de comprendre que l'élasticité mesurée n'est pas celle de la demande de service au prix du service réel mais au prix du service normé (calculé avec une approche normée du comportement d'usage mais aussi de la performance). Cette élasticité ne consiste pas uniquement en un effet rebond (purement comportemental) mais capte aussi les défauts d'estimation de variation de consommation théorique liés au modèle thermique (biais de modélisation) et aux hypothèses sur les performances des équipements et éléments du bâti (malfaçon, non-respect de la réglementation thermique).

Le report des résultats du Tableau 9 dans l'Equation 15 montrent que la demande de service (l'*intensité d'utilisation*) présente des élasticités sensiblement différentes aux différentes variables intervenant dans le calcul de la part budgétaire théorique. En particulier, le revenu et la surface présentent des élasticités faibles. C'est pourquoi un nouvel indicateur, plus homogène, peut être proposé, utilisant des variables auxquelles la demande de service présente une élasticité similaire : le coût théorique du chauffage par unité de surface, à climat réel. Celui-ci sera appelé par la suite *coût du service normal* (CSN). En imposant de manière simplificatrice une élasticité égale de l'*intensité d'utilisation* aux variables permettant le calcul de ce coût théorique du chauffage, il est alors possible

¹²⁰ Moyenne(| α -1| ; | β +1| ; | δ -1| ; | μ |) = (0.36+0.79+0.72+0.52)/4 = 0.6

de simplifier l'Equation 15 en l'Equation 16 (avec $\theta=0,6$ comme indiqué précédemment, et C une constante). Cette amélioration de l'indicateur permettant d'estimer l'intensité d'utilisation a été réalisée à la fin de la thèse, ce qui explique qu'une partie des résultats suivants, en particulier ceux concernant l'analyse par segment du parc sur les données du CEREN, seront présentés dans leur version initiale, c'est-à-dire en fonction de la part budgétaire théorique.

Equation 16

$$I = C. \left(\frac{P \cdot q \cdot DH}{\eta} \right)^\theta = C. CSN^\theta$$

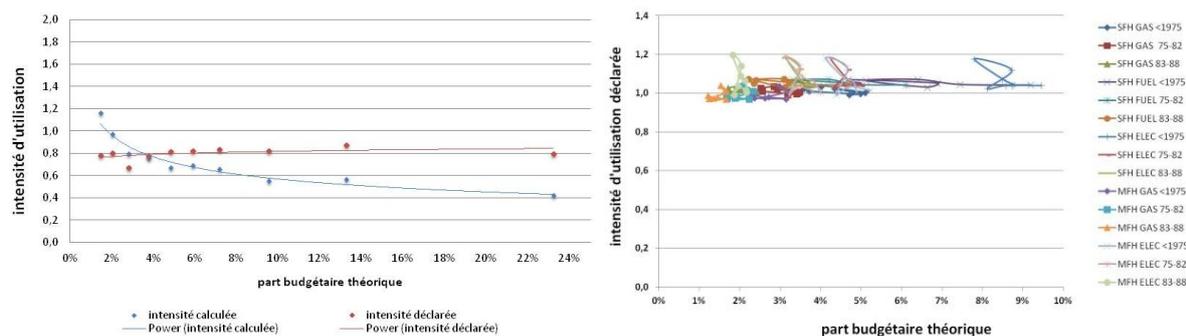
3.2.3. Confrontation aux comportements déclarés

L'enquête réalisée en 2009 incluait des questions relatives aux pratiques de chauffage des ménages. Les comportements déclarés ont pu être introduits dans le mode de calcul du DPE en leur faisant correspondre une température intérieure équivalente permettant de recalculer le nombre de degrés-jours utilisés pour le calcul des consommations théoriques [Cayla et al., 2010]. D'autre part, des données concernant les températures (déclarées) de chauffage des ménages sont relevées par le CEREN auprès de ses panels, ce qui permet de connaître l'évolution des températures intérieures déclarées ainsi que celle de la gestion de température pendant la nuit [CEREN, 2008b]. Ces comportements ont aussi pu être introduits dans le calcul thermique en recalculant le nombre de degrés-jour correspondant non plus à la température « normale » du modèle simple d'EDF R&D mais à la température déclarée des ménages sur la période 1998-2005 [Allibe, 2009]. Les résultats des calculs thermiques ne sont alors plus normés vis-à-vis des comportements mais reflètent les comportements déclarés par les ménages. Il semble alors intéressant de comparer les résultats obtenus aux valeurs d'intensité d'utilisation trouvées en comparant les consommations réelles et normées. Pour l'analyse des données de l'enquête 2009, nous définissons l'indicateur d'intensité d'utilisation déclarée, tel que décrit dans l'Equation 17 (de manière analogue à celle de la Figure 63), pour permettre une comparaison avec l'intensité d'utilisation que l'on peut qualifier de « révélée » par les comparaisons précédentes entre consommations observées et théoriques.

Equation 17

$$I_{déclarée} = \frac{C_{sim}}{C_{norm}} \quad \text{avec } C_{sim} \text{ la consommation calculée avec les comportements déclarés par les ménages, et } C_{norm} \text{ la consommation calculée avec le comportement "normal" du modèle thermique}$$

Pour la comparaison entre les intensités d'utilisation déclarées et observée, les ménages de l'enquête EDF R&D 2009 ont été segmentés en déciles de part budgétaire théorique, dont l'intensité d'utilisation moyenne est calculée de manière analogue à l'Equation 11 (avec C_{sim} à la place de C_{obs}). La comparaison à partir des données du CEREN est quant à elle réalisée sur les mêmes segments que ceux utilisés précédemment dans ce chapitre (énergie de chauffage, période de construction, type de logement). Les résultats sont présentés sur les Figures 68a et b concernant les deux sources de données.



Figures 68a et b : Comparaison intensité déclarée vs révélée dans l'échantillon 2009 (a, à gauche) et dans la rétrospective 1998-2005 (b, à droite)

Ces résultats sont assez frappants dans la mesure où ils indiquent, quelle que soit la part budgétaire théorique ou le segment technique, les ménages déclarent sensiblement la même intensité de chauffage (à l'exception d'une légère variation pour les années 2002 et 2003 dans les logements chauffés à l'électricité). On n'observe donc pas de corrélation entre l'intensité calculée à partir des consommations et celles calculée à partir des comportements de chauffage déclarés. Une explication de cette observation peut être le *biais de désirabilité* [Luyben, 1982], qui correspond au fait que les personnes se chauffant le plus (respectivement le moins) déclarent des températures plus basses (respectivement plus hautes) qu'en réalité pour mieux correspondre à une température qu'ils considèrent plus souhaitable que la leur. Ceci implique un écart moindre entre les comportements extrêmes déclarés qu'entre les comportements réels. Par ailleurs, il est théoriquement interdit en France de chauffer les logements au-dessus de 19°C [CCH, 1979], ce qui pourrait expliquer une certaine normalisation des déclarations. Une autre explication possible est celle d'un *biais de rappel*, qui correspond au fait que les comportements déclarés en moyenne pour une grande période de temps puissent être sensiblement éloignés des comportements réels quotidiens [Wutich, 2009]. En effet, les pratiques de chauffage sont la combinaison de l'action de plusieurs personnes dans le ménage et sont variables dans le temps et dans l'espace. Un comportement déclaré par une seule personne du ménage lors d'une enquête peut donc être particulièrement biaisé par le fait d'être obligé de ne donner qu'une seule réponse pour caractériser un phénomène variable. On remarquera d'ailleurs que les comportements moyens déclarés sur une période de chauffage ne permettent d'expliquer que quelques pourcents de la variance du besoin de chauffage [Cayla et al., 2010 ; Santin et al., 2009].

Du fait que les comportements ne sont pas mesurés physiquement mais déclarés, les résultats présentés dans les Figures 68a et b et le rappel des différents biais de déclaration permettent seulement de nuancer l'interprétation purement comportementale des différentes valeurs de *l'intensité d'utilisation* dans les sections précédentes, et en particulier de limiter la partie que l'on peut attribuer à une variation du niveau de confort des ménages. Cette limitation serait en cohérence avec les résultats de Sanders et Phillipson (2006) mentionnés précédemment, qui n'imputent qu'une responsabilité assez faible aux comportements d'usage dans l'explication des écarts observés entre gains d'énergie théoriques et réels lors de rénovations thermiques. Cette source étant la seule référence bibliographique trouvée qui estime les effets respectifs des facteurs explicatifs des écarts observés, des recherches plus approfondies semblent nécessaires pour permettre de déterminer la part relative des comportements, des malfaçons techniques et éventuellement des biais de modélisation dans les écarts observés entre consommations réelles et normées.

3.3. Discussion sur la forme fonctionnelle d'une modélisation du facteur d'intensité/correctif

3.3.1. Formes fonctionnelles envisagées

Les résultats précédents ont montré la nécessité de corriger les résultats des modèles de calcul thermiques normés pour pouvoir estimer de manière plus réaliste la consommation de chauffage des logements existants (et par la même occasion leurs consommations futures). Pour pouvoir effectuer ces corrections, il est nécessaire de disposer du facteur correctif ayant une forme fonctionnelle applicable à tout ensemble de logements (segment, décile...) disposant de chauffage individuel.

Si la forme fonctionnelle en puissance de la régression économétrique (Equation 16) constitue une possibilité, celle-ci présente cependant le défaut de tendre vers l'infini lorsque la part budgétaire théorique ou le prix du service normal tendent vers zéro. Or, une *intensité d'utilisation* prenant des valeurs très élevée impliquerait une température intérieure très supérieure à la température à partir de laquelle un inconfort thermique peut être ressenti. A l'inverse, une fonction logistique (ou courbe en S) présente l'avantage de borner les valeurs de l'*intensité d'utilisation* et de pouvoir représenter la transition d'un niveau de confort minimum pour les PBT élevées à un niveau de confort maximum pour les très faibles PBT. On pourrait alors choisir le niveau de confort minimum comme celui observé dans l'analyse par segment et le niveau maximum comme la température optimale de confort des ménages¹²¹ appliquée à toutes les pièces et toute l'année (pour représenter le confort issu de la disparition du besoin de gérer la température). Si elle garantit un réalisme thermique, cette forme fonctionnelle présente cependant l'inconvénient d'être assez éloignée des données observées pour les PBT extrêmes. Ceci est gênant en particulier pour l'étude des ménages en précarité énergétique, pour lesquels la prise en compte des restrictions de confort est essentielle, et qui représentent la population pour laquelle l'effet rebond semble le plus important [Milne et Bordman, 2000; Hong et al., 2006]. Enfin, la forme fonctionnelle la plus élémentaire est la fonction linéaire, mais celle-ci présente à la fois le défaut de pouvoir prendre des valeurs négatives pour les PBT élevées et de ne pas bien s'ajuster aux données (voir Figure 69).

Ces trois formes fonctionnelles ont été utilisées pour exprimer l'*intensité d'utilisation* en fonction de la facture de chauffage théorique par m², qui définit le coût du service normal (CSN) mentionné précédemment. Les régressions ont été effectuées sur les intensités d'utilisation moyennes des déciles de CSN (Equation 11 appliquée au CSN à la place de la PBT). Les résultats de ces régressions sont présentés dans le Tableau 10 et représentés sur la Figure 69. On remarquera que la régression « puissance » (en pointillés noirs) réalisée sur les déciles de CSN estime l'élasticité de l'*intensité d'utilisation* au CSN à 64% et non 60% comme calculé précédemment. Cette nouvelle valeur étant issue d'une régression et pas d'une moyenne sur les coefficients puissance des variables constituant le CSN, elle peut être considérée comme une estimation plus précise de la somme de l'effet rebond, de la malfaçon et du biais de modèle.

Par ailleurs, la régression logistique des intensités d'utilisation calculée avec le modèle simplifié sur les données par segment en 2005 a été ajoutée à titre indicatif sur la Figure 69. C'est en effet cette forme, issue des premiers résultats de la thèse, qui a été intégrée en premier au modèle

¹²¹ Celle-ci peut être déterminée grâce à des études de satisfaction des ménages vis-à-vis du confort thermique, comme celle proposée par L. Peeters et ses collaborateurs (2009), à partir de laquelle on peut établir qu'une majorité de personnes ressentent un inconfort thermique au-delà de 22°C, soit au-delà d'une *intensité d'utilisation* d'environ 1,3.

RES-IRF du CIRED pour prendre en compte les écarts entre consommations théoriques et observées [Giraudet 2011; Giraudet et al., 2011a; Giraudet et al., 2011b].

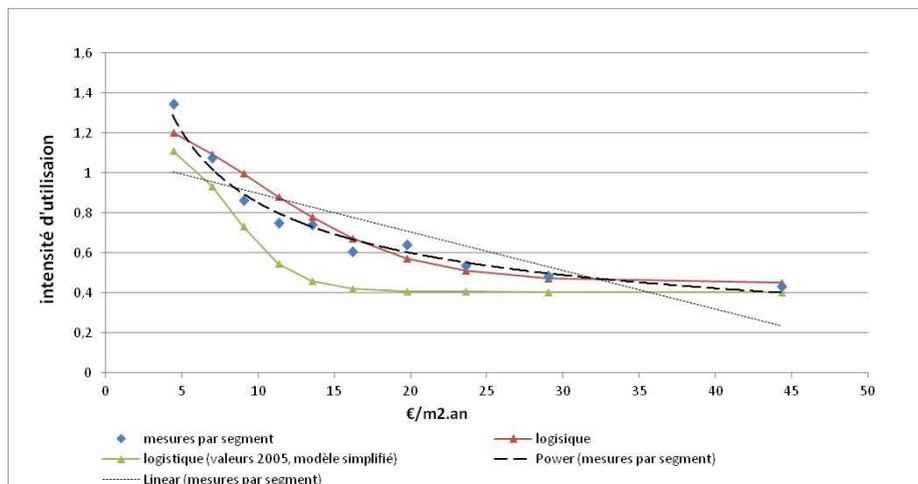


Figure 69 : Représentation graphique des formes fonctionnelles de l'intensité d'utilisation en fonction du coût du service normé (CSN) en €/m².an

Forme fonctionnelle	Variante	Valeurs des paramètres	Coefficient de régression (R ²) par décile de CSN sur échantillon 2009
« puissance » $I = k \cdot x^a$	Régression sur déciles de CSN 2009	k = 3.53 a = -0.64	0.98
« logistique » $I = a + \frac{b}{1 + c \cdot e^{d \cdot (x-e)}}$	Régression sur segments de PBT 2005*	a = 0.406 b = 0.812 c = 4 d = 0.5 e = 5.5	-
	Régression sur segments de CSN 2009	a = 0.4 b = 1 c = 1 d = 0.27 e = 10	0.30 (Mac Fadden) 0.33 (Cox & Snell) 0.45 (Nagelkerke)
« linéaire » $I = ax + b$	Régression sur segments de CSN 2009	a = -0.019 b = 1.093	0.67

Tableau 10 : Résultats des régressions utilisant les formes fonctionnelles possibles de l'intensité d'utilisation en fonction du coût du service normal (CSN). Avec x le coût du service normal, en €/m².an. * : résultats utilisés dans le modèle RES-IRF [Giraudet et al., 2011a]

3.3.2. Proposition d'un facteur correctif simple

Si aucune forme fonctionnelle n'est exempte de défaut, la forme puissance est celle qui s'ajuste le mieux aux données moyennées (par segment ou décile) et elle ne présente de défaut particulier qu'à son origine. De plus, ce défaut est localisé dans une plage de valeur qui n'est atteignable que par des logements très performants, pour lesquels une surestimation de l'intensité d'utilisation n'influence que marginalement la consommation de chauffage nationale en valeur absolue. On peut par ailleurs penser que les valeurs élevées mesurées vers l'origine sont davantage dues à un biais de malfaçon et à une limite du modèle de calcul thermique qu'à une réelle tendance des ménages à adopter des températures intérieures très élevées et ne pas pratiquer de gestion de la température et de la ventilation. En effet, plus la performance est élevée, plus l'impact de malfaçons est grand en valeurs relatives. De plus, le mode de calcul 3CL du DPE étant issu de la

réglementation thermique de 1988, son domaine de validité touche probablement à ses limites pour les logements les plus performants, ce qui peut être un facteur explicatif des forts écarts observés. Le dernier argument en faveur de la forme puissance est qu'elle permet de représenter un effet rebond non nul pour les ménages en précarité énergétique, ce qui semble indispensable pour l'analyse des problématiques propres à cette population, dont la prise en compte est grandissante en France. La forme fonctionnelle qui semble la plus appropriée pour estimer l'intensité d'utilisation est donc celle présentée sur la Figure 70, soit une forme puissance en fonction du coût du service normé (CSN).

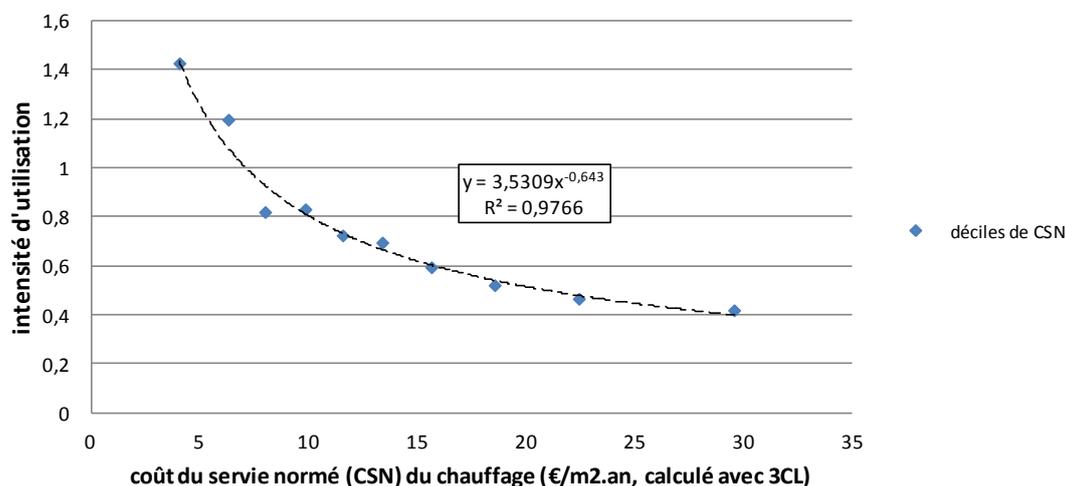


Figure 70 : Forme fonctionnelle retenue pour estimer l'intensité d'utilisation en fonction du CSN. Régression faite sur l'échantillon EDF R&D 2009 en regroupant les logements par déciles de CSN.

En choisissant la forme fonctionnelle puissance, et en prenant en compte les résultats présentés précédemment, le facteur correctif à apporter aux calculs réalisés de manière normée par le DPE concernant uniquement la consommation de chauffage prend alors la forme suivante :

Equation 18

$$C_{EF\text{ réaliste}} = C_{EF\text{ DPE}} \cdot COR$$

Avec COR le facteur correctif à appliquer aux résultats normés du DPE, $C_{EF\text{ réaliste}}$ la consommation réaliste d'énergie finale par m^2 par an, $C_{EF\text{ DPE}}$ et $C_{EP\text{ DPE}}$ les consommations d'énergie finale et primaire par m^2 par an telles que calculées par le Diagnostic de Performance Energétique

Equation 19

$$COR = 3,5 \cdot \left(\frac{C_{EP\text{ DPE}} \cdot CC \cdot P}{coefEP} \right)^{-0,64}$$

Avec CC un facteur de correction climatique permettant de corriger les résultats normés de la rigueur réelle du climat, P le prix de l'énergie de chauffage et $coefEP$ le coefficient de conversion de l'énergie finale en énergie primaire (soit 1 pour les énergies fossiles et 2,58 pour l'électricité).

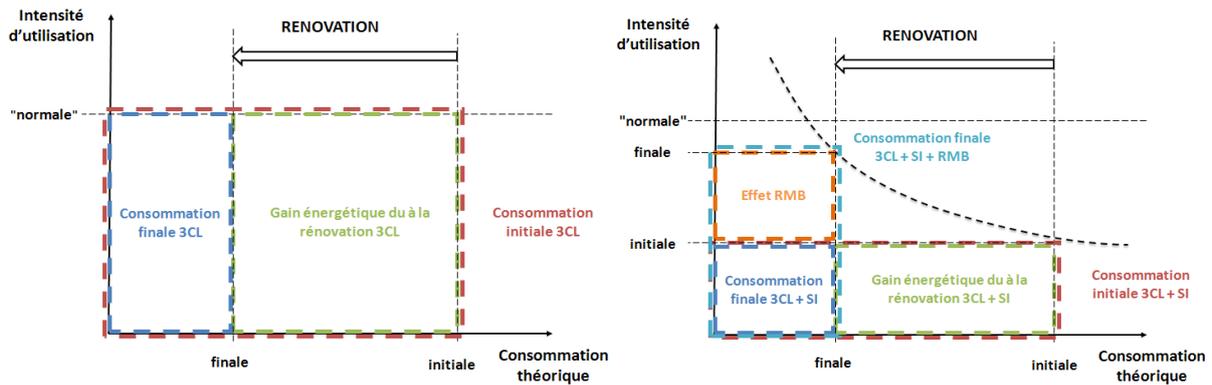
4. Impact du facteur correctif sur l'estimation des gisements d'économie d'énergie par calcul thermique normé

4.1. Décomposition de l'impact énergétique de l'intégration du facteur correctif sur l'estimation des gains énergétiques liés à la rénovation thermique de logements

Lors d'une rénovation thermique sans changement d'énergie et sans augmentation de la surface chauffée, seule la performance énergétique du logement (bâti et/ou systèmes) évolue. Graphiquement, il est alors possible de ne représenter les variations de l'*intensité d'utilisation* (ordonnées) qu'en fonction des variations de la performance, exprimée comme la consommation théorique de chauffage (abscisses), ce qui a été réalisé dans les Figures 71a et b. Cette représentation présente l'intérêt de permettre un calcul graphique aisé des consommations théorique et réaliste. En effet, la consommation réaliste résulte de la multiplication de la valeur en abscisse (consommation théorique) par la valeur en ordonnées (*intensité d'utilisation*), et représente donc l'aire du rectangle défini par ces deux longueurs (Figure 71b). La consommation théorique correspond alors au cas particulier où l'intensité est égale à 1 (Figure 71a).

Les Figures 71a et b présentent le cas de la rénovation d'un groupe de logements suffisamment grand¹²² pour que notre modèle s'applique, c'est-à-dire que l'on puisse estimer l'*intensité d'utilisation* moyenne du groupe de logements à partir de la forme fonctionnelle de l'Equation 18. Le premier cas (Figure 71a) présente le mode de calcul normé des économies d'énergie résultantes de la rénovation : la consommation initiale (avant travaux) est normée, et le gain énergétique lié à la rénovation l'est aussi. Dans le second cas (Figure 71b), l'*intensité d'utilisation* est d'abord utilisée pour calculer la consommation réaliste avant travaux, par le biais du calcul de l'intensité « initiale » (I_{init}). Du fait du coût élevé du service chauffage pour les logements peu rénovés, I_{init} est généralement inférieure à 1, ce qui implique que l'impact de la rénovation, même en absence d'effet rebond, de malfaçon et de biais de modèle, ne pourra pas faire économiser autant d'énergie que ce qui est calculé par le modèle normé. Le deuxième effet lié à la prise en compte de l'*intensité d'utilisation* (via la forme fonctionnelle définie) est la prise en compte, après travaux, de l'effet rebond, de la malfaçon et des biais du modèle thermique. Ceci implique une *intensité d'utilisation* finale (I_{final}) sensiblement supérieure à I_{init} (l'*intensité d'utilisation* se « déplace » en suivant la courbe). Les deux effets présentés seront par la suite appelés « SI » (pour surestimation initiale) et « RMB » (pour rebond, malfaçon et biais de modèle), et utilisés avec ces abréviations dans les illustrations.

¹²² Si le nombre de logement est trop faible, la variabilité des intensités d'utilisation (observable sur la Figure 66) pourrait mener à une intensité moyenne sensiblement différente de celle déterminée par la forme fonctionnelle.



Figures 71a et 71b : Calcul du gain énergétique par le mode de calcul 3CL sans correction (71a, à gauche) et avec correction (71b, à droite). SI : prise en compte de la surestimation initiale, RMB : effet rebond, malfaçon et biais de modèle. En pointillés le facteur d'intensité, variant en fonction de la performance des logements.

Si la quantification en termes énergétiques de l'effet SI est élémentaire (il suffit de multiplier les gains normés par l'intensité d'utilisation initiale observée, voir Equation 20), celle de l'effet RMB l'est moins. L'Equation 21 (issu de calculs détaillés dans l'Annexe I) montre qu'avec la forme fonctionnelle choisie pour l'intensité d'utilisation, l'importance de cet effet dépend du ratio entre la consommation initiale et la consommation finale, appelé ici *facteur de réduction F*, et du paramètre puissance θ de l'Equation 16.

Equation 20

$$C_{finale\ 3CL+SI} = C_{finale\ 3CL} \cdot \frac{C_{init\ obs}}{C_{init\ 3CL}}$$

Avec $C_{finale\ 3CL+SI}$ la consommation finale (après travaux) prenant en compte la surconsommation initiale, $C_{finale\ 3CL}$ la consommation finale normée, $C_{init\ obs}$ la consommation initiale (avant travaux) observée et $C_{init\ 3CL}$ la consommation initiale normée.

Equation 21

$$Effet\ RMB = \frac{\text{surconsommation due à l'augmentation de l'intensité d'utilisation}}{\text{gain énergétique normatif}} = I_{init} \cdot \frac{F^{-\theta} - 1}{F - 1}$$

Avec θ le paramètre puissance de l'Equation 16, F le facteur de réduction de consommation théorique et I_{init} l'intensité d'utilisation avant rénovation

4.2. Application numérique à l'estimation d'un gisement technique d'économie d'énergie de chauffage à l'échelle nationale

Pour évaluer l'impact de la prise en compte des effets « surestimation initiale » et « RMB » sur le calcul des gisements techniques à l'échelle nationale, nous nous sommes basés sur le gisement maximum d'économie d'énergie de chauffage à l'horizon 2050 estimé par la dernière étude du Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement [Traissnel et al., 2010]. Cette étude étant basée sur des consommations réelles par segment du parc résidentiel, ses résultats sont déjà corrigés du biais

de surestimation de la consommation initiale. Parmi les scénarios proposés par cette étude, celui favorisant les pompes à chaleur électriques et les appareils de chauffage au bois (scénario appelé « E/B/G » pour « électricité/bois/gaz ») est celui permettant la plus grande économie d'énergie finale, faisant passer la consommation de chauffage actuelle de 393,9 TWh à 46,8 TWh, soit un facteur de réduction de 8,4 et un gisement technique maximum de 347,1 TWh. En appliquant les résultats trouvés précédemment, et en faisant l'hypothèse forte¹²³ qu'ils sont aussi valables pour le chauffage collectif, ce gisement serait « seulement » de 205,6 TWh en prenant en compte la combinaison de l'effet rebond, de la malfaçon et du biais de modélisation (RMB), et de 565,8 TWh s'il n'était pas corrigé de la surestimation initiale (SI). Il est important de noter que l'effet RMB a été calculé en gardant constants le climat et le prix moyen de l'énergie de chauffage. Or, une éventuelle hausse des prix futurs de l'énergie pourrait atténuer l'effet RMB en limitant la baisse du coût du service normé (CSN) due à la forte amélioration de la performance énergétique du parc de logements dans le scénario analysé. Des simulations de l'effet RMB prenant en compte une hausse des prix de l'énergie et un réchauffement climatique durant les prochaines décennies sont proposées dans le dernier chapitre de cette thèse pour apporter une analyse complémentaire à celle présentée ici.

Une fois définis ces trois types de gisement, il est important de savoir comment ils sont déduits des consommations actuelles. Les différents cas possibles sont présentés sur la Figure 72. Le plus important est de rester homogène dans les quantités manipulées, c'est-à-dire de soustraire des gisements techniques non corrigés à une consommation initiale estimée avec le même moteur de calcul, ou de déduire des consommations réelles les gisements techniques corrigés à minima de la surestimation initiale (ce qui peut se faire aisément en ne soustrayant pas les valeurs absolues des calculs de gisements mais les gains exprimés en pourcentage) voire des effets RMB (en divisant ces gains en pourcentage par 2). On remarque que la soustraction du gisement technique maximum non corrigé et en valeur absolue à la consommation actuelle peut mener à des valeurs négatives de consommation, discréditant alors toute approche de modélisation réalisant ses calculs de la sorte.

Les résultats montrent que la surestimation initiale (SI) réduit le gisement technique de 39%¹²⁴ tandis que la combinaison de l'effet rebond, de la malfaçon et du biais de modèle réduit encore ce gisement de 24%¹²⁵ (soit 39% du gisement prenant en compte la surestimation initiale). Ces deux effets combinés montrent donc que le gisement technique réaliste est inférieur de près de 2/3 au gisement technique théorique d'économies d'énergie de chauffage en France si ce dernier est calculé avec le mode de calcul 3CL du DPE. Le calcul 3CL étant l'outil de référence pour le calcul de performance, on peut en déduire que, pour un ensemble de mesures données, la réduction de consommation réelle est plus de trois fois inférieure à celle de l'augmentation de performance.

L'ordre de grandeur de cette différence est tel qu'il apparait essentiel de prendre en compte ces résultats pour dimensionner une politique énergétique à partir de calculs de performance si celle-ci vise un objectif en termes de consommation. On notera par ailleurs que les résultats des récentes études de Giraudet et de ses collaborateurs, basés en partie sur les travaux présentés ici, remettent sérieusement en question la possibilité d'atteindre les objectifs 2020 du Grenelle de l'environnement concernant les logements existants [Giraudet, 2011 ; Giraudet et al., 2011b].

¹²³ Le chauffage collectif représente 20% de l'ensemble des consommations de chauffage du secteur résidentiel en énergie finale.

¹²⁴ Le mode de calcul 3CL surestimant en moyenne de 63% la consommation de chauffage individuel on peut calculer l'effet de surestimation de la façon suivante : $1 - 1 / (1,63) = 0,39$.

¹²⁵ Application de l'Equation 21 au facteur de réduction de cette étude (8,3) et à l'effet SI trouvé.

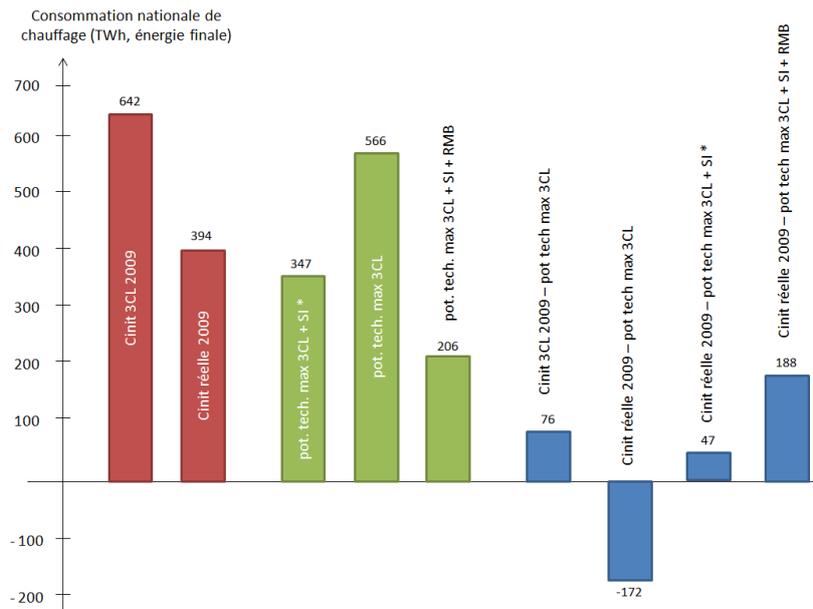


Figure 72 : Illustration de l'effet des différents biais sur l'estimation de la consommation de chauffage du parc [Allibe, 2012]. *Cinit* : consommation initiale, *pot. tech. max.* : potentiel technique maximum, *SI* : prise en compte de la surestimation initiale, *RMB* : corrigé de l'effet rebond, de la malfaçon, et du biais de modélisation, * : tel que calculé dans le scénario électricité/bois/gaz de Trainsel et ses collaborateurs (2010).

Pour traduire les résultats précédents en termes d'émissions de CO₂, il est nécessaire de prendre en compte le fait que la réduction de ces émissions vient d'une part de gains d'efficacité énergétique et d'autre part de la réduction du contenu carbone moyen des énergies utilisées. Si le calcul réaliste des gains énergétiques dus à l'augmentation de l'efficacité énergétique est concerné par l'intensité d'utilisation, le pourcentage de réduction des émissions dues à la diminution du contenu carbone moyen des énergies utilisées ne l'est pas. Pour illustrer cela, nous avons répété l'exercice présenté ci-dessus pour tous les scénarios proposés dans l'étude du CLIP [Trainsel et al., 2010], c'est-à-dire en corrigeant les résultats pour introduire l'effet RMB. Ici aussi, les calculs ont été réalisés en supposant de manière simplificatrice que le climat et le prix moyen de l'énergie de chauffage sont constants.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 11, où l'on peut observer que la prise en compte de l'effet rebond, de la malfaçon technique et des biais de modèle thermique a des conséquences sensiblement différentes sur le facteur de réduction des émissions de CO₂ dues au chauffage. Ainsi, plus la réduction des émissions de CO₂ des scénarios étudiés est due à une amélioration de la performance énergétique plutôt qu'à une baisse du contenu carbone moyen des énergies de chauffage, plus l'introduction de l'effet RMB diminue le facteur de réduction des émissions de CO₂ calculé pour le scénario en question. Par exemple, le scénario E/B/G, présenté ci-dessus, est basé sur une très forte augmentation de la performance des systèmes de chauffage et voit le facteur de réduction des émissions de CO₂ très fortement baisser (de 12,5 à 2,9) avec l'introduction de l'effet RMB. A l'inverse, dans le scénario B/G/E, simulant une diffusion massive de systèmes de chauffage au bois et au gaz, la réduction des émissions de CO₂ est principalement due à l'usage du bois-énergie, dont le contenu carbone est très faible. On observe alors que le facteur de réduction des émissions est sensiblement moins touché par la prise en compte de l'effet RMB que le facteur du scénario E/B/G.

L'analyse des résultats renforce par conséquent la nécessité d'une forte baisse du contenu carbone des énergies de chauffage pour espérer atteindre une division par 4 des émissions de CO₂ liées au chauffage résidentiel à l'horizon 2050.

Facteur de réduction CO ₂ en 2050		
Scénario	CLIP	avec RMB
B/G/E	4	2.8
B/E/G	16.3	9.2
G/B/E	2.5	1.6
E/B/G	12.5	2.9

Tableau 11 : Impact de la prise en compte de l'effet RMB sur le facteur de réduction des émissions de CO₂ dans les scénarios du CLIP, effectués par Traisnel et ses collaborateurs en 2010 [Allibe, 2012]. *B : bois, G : gaz, E : électricité; l'ordre précisé dans le nom du scénario indique l'ordre de priorité concernant l'énergie de chauffage à installer dans les logements.*

4.3. Application au calcul de rentabilité des investissements en efficacité énergétique

Les calculs précédents ont montré que les gains énergétiques résultant d'une amélioration de la performance thermique d'un logement pouvaient être très inférieurs à la quantité prévue par un modèle thermique normé. Par conséquent, ces conclusions sont aussi valables pour les économies financières que l'on peut attendre d'actions d'efficacité énergétique liées au chauffage. Or, la rentabilité financière des équipements énergétiquement performants est un des moteurs principaux de la diffusion de ceux-ci au sein des logements car elle justifie en partie l'investissement à l'échelle individuelle et fait partie des critères d'analyse pour la mise en œuvre des politiques énergétiques favorisant cette diffusion. Pour essayer de modéliser la diffusion future d'équipements performants de chauffage au sein du parc résidentiel, il apparaît donc important d'étudier les impacts de l'introduction de *l'intensité d'utilisation* dans les calculs de rentabilité des investissements en isolation et systèmes de chauffage.

Pour ce faire, une simulation a été réalisée, dans laquelle les ménages de l'échantillon 2009 remplacent leurs équipements de chauffage et l'isolation de leur logement. Pour chaque élément des logements (système de chauffage, fenêtres, intérieur des murs, extérieur des murs, toiture), les ménages ont le choix entre trois options technologiques ayant des performances énergétiques différentes. Les types d'équipements, leurs performances et les prix associés sont issus de l'enquête OPEN de l'ADEME¹²⁶ [OPEN, 2010]. Les ménages choisissent l'option technologique ayant le coût global actualisé (CGA) le plus faible. Pour plus d'information sur le modèle d'investissement, une description détaillée est proposée dans le premier chapitre de la partie III (description des modèles développés durant la thèse). Le taux d'actualisation est fixé à 12% pour tous les ménages, les prix de l'énergie sont ceux de 2010 et le crédit d'impôt au développement durable est pris en compte dans le calcul du CGA.

Pour observer l'effet de l'introduction de *l'intensité d'utilisation* sur les investissements des ménages, trois simulations ont été effectuées : la première en n'utilisant que le calcul thermique normé, la deuxième en prenant en compte *l'intensité d'utilisation* observée des ménages pendant l'enquête 2009 et en la considérant fixe (pas d'effet rebond, ni de malfaçon ni de biais de modèle), et la troisième en modélisant *l'intensité d'utilisation* telle que décrite dans les sections précédentes.

¹²⁶ Nous remercions l'ADEME de nous avoir communiqué les prix des équipements, qui ne sont pas intégrés dans le rapport public de l'enquête.

Les résultats de ces simulations sont présentés dans la Figure 73, sous la forme de parts de marché par niveau de performance en fonction du mode de représentation choisi de l'intensité d'utilisation (normée, observée et fixée, observée et dépendant du coût du service). Ces résultats sont comparés aux parts de marché observées en 2008 par l'enquête OPEN [OPEN, 2010]. On peut ainsi observer que les simulations utilisant des représentations plus réalistes de l'intensité d'utilisation donnent des parts de marché sensiblement plus faibles aux équipements les plus performants (performance 3, correspondant aux meilleures technologies disponibles pour la rénovation des logements et de leur système de chauffage). On notera en particulier que, la simulation prenant en compte tous les effets décrits dans ce chapitre (SI et RMB) donne des résultats proches des parts de marché observées en 2008. Ce constat confirme que l'intensité d'utilisation telle que décrite dans ce chapitre permet en partie d'expliquer l'energy efficiency gap (sous-investissement des ménages en efficacité énergétique par rapport à ce que les calculs d'ingénieurs indiquent comme rentable, voir chapitre précédent) [Jaffe et Stavins, 1994].

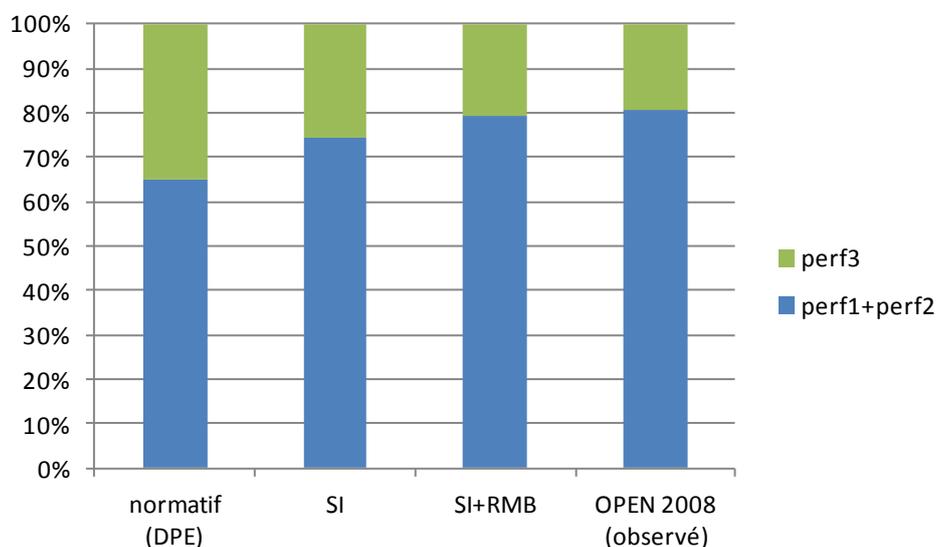


Figure 73 : Influence du mode de représentation de l'intensité d'utilisation sur les choix d'investissement des ménages. Résultats de simulation des parts de marché de la rénovation d'éléments des logements (bâti et systèmes de chauffage), perf1 : performance standard, perf2 : performance intermédiaire ; perf3 : meilleures technologies disponibles.

Conclusion

Les résultats obtenus révèlent de fortes divergences entre les consommations observées et les consommations calculées de manière normée avec le DPE. Ces écarts peuvent être décomposés en une partie statique, où l'approche normée introduit un biais systématique de surestimation de la consommation initiale, et une partie dynamique, où l'approche normée, même si elle prend en compte la surestimation initiale, est biaisée par la non prise en compte des effets rebond et de malfaçon et par les hypothèses simplificatrices du modèle thermique utilisé. Faute de données disponibles suffisamment précises, les travaux présentés ici n'ont pas permis de distinguer l'effet individuel des biais dynamiques, ce pourquoi des recherches plus approfondies seraient nécessaires. La combinaison de ces effets implique qu'une augmentation de la performance énergétique des logements français se traduise en moyenne par une baisse des consommations réelles inférieure de 63% à celle calculée par le DPE. C'est pourquoi un facteur correctif relativement simple est proposé dans ce chapitre, permettant de rendre les résultats du DPE plus réalistes. D'après l'analyse

économétrique proposée, ce facteur correctif, appelé *intensité d'utilisation*, dépend fortement de la performance du logement et de son système de chauffage, du prix de l'énergie de chauffage et du climat, mais très peu du revenu des ménages.

D'après notre analyse, le DPE apparaît comme un outil valable d'estimation des performances (utilisation pour laquelle le comportement peut être considéré fixe). Mais son utilisation pour estimer des consommations réalistes de chauffage à l'échelle nationale, et a fortiori pour évaluer l'impact de politiques énergétiques en termes de consommation, peut mener à des résultats très fortement biaisés. Se baser sur de telles estimations peut donc avoir pour conséquence une large sous-estimation des efforts nécessaires pour atteindre des objectifs quantifiés d'économie d'énergie à long terme. L'effet de l'augmentation de la performance des logements sur leurs consommations de chauffage étant plus faible que prédit par les modèles thermiques normés, cela renforce la nécessité de réduire très fortement le contenu carbone moyen des énergies de chauffage en France pour espérer atteindre une division par 4 des émissions de CO₂ liées au chauffage résidentiel.

Enfin, les choix technologiques des ménages en termes de rénovation thermique de leur logement (bâti et systèmes de chauffage) ont été simulés en représentant le comportement quotidien de chauffage des ménages sous plusieurs formes. Les résultats indiquent que la prise en compte de l'*intensité d'utilisation*, telle que décrite dans ce chapitre, permet d'expliquer en partie l'*energy efficiency gap*.

Bibliographie

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, 2009, November 16, Washington, D.C.

Allibe, B., 2012, « Modéliser la dynamique des consommations : du normatif au réaliste, Illustration par le DPE: écueil et pistes de solutions », Journée PREBAT « Atteindre le facteur 4 dans l'habitat : enseignements et incertitudes des travaux d'étude et de modélisation », 22 juin 2012

Allibe, B., M-H. Laurent, D. Osso, 2010, "Modélisation thermique du chauffage individuel : d'un logement unique à l'ensemble du parc", conférence IBPSA France, 9 et 10 novembre 2010

Amann, J.T., 2006, Valuation of non energy benefit to determine cost-effectiveness of whole-house retrofit program: a literature review, ACEEE report n° A061, mai 2006

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

Berkhout, P., A. Ferrer-i-Carbonell, J. Muskens, 2004, "The ex post impact of an energy tax on household energy demand", Energy Economics, 26, 297-317

Callonnec, G., 2011, Présentation orale de l'outil MENFILS au CSTB, Paris, 2011

Cayla J.-M., B. Allibe, M.-H. Laurent, 2010, "From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption", Proceedings of the ACEEE Summer Study on Buildings, 15–20 août 2010, Pacific Grove, États-unis

Cayla J.-M., N. Maizi, C. Marchand, 2011, "The role of income in energy consumption behavior: Evidence from French households data", Energy Policy, Volume 39, Issue 12, December 2011, Pages 7874-7883

Cayla J.-M., 2011, "Les ménages sous la contrainte carbone – Exercice de modélisation prospective des secteurs résidentiel et transports avec TIMES", thèse de doctorat soutenue le 3 mars 2011

[CCH, 1979] Article R*131-20 du Code de la construction et de l'habitation

[CE, 2005] Commission Européenne (CE), 2005, Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council of 6 July 2005 establishing a framework for the setting of Ecodesign requirements for energy-using products and amending council directive 92/42/EEC and directives 96/57/EC and 2000/55/EC of the European Parliament

[CEREN, 2007a] Suivi du par cet des consommations d'énergie – évolution de 1990 à 2005, France consommations, volume 2.B, étude 6102, janvier 2007

[CEREN, 2007b] Ré-estimation en 2005 de la consommation d'électricité par usage final, CEREN, Ref FL/07.074, étude 6104, octobre 2007

[CEREN, 2008a] Effet de l'isolation du bâti et de la rénovation de l'installation de chauffage sur les consommations d'énergie dans les logements construits avant 1975, CEREN, RES/08.024, étude 7152, mai 2008

[CEREN, 2008b] Suivi annuel du comportement des ménages en matière de chauffage, Résultats sur la période 1990-2007, CEREN, étude 8108, octobre 2008

[CEREN, 2011] *Analyse rétrospective du France des flux de logements de 1973 à 2009*, CEREN, référence RES/11.001, étude 0102, janvier 2011

Claudy M.C., C. Michelsen, A. O'Driscoll, 2011, "The diffusion of microgeneration technologies – assessing the influence of perceived product characteristics on home owners' willingness to pay", Energy Policy, Volume 39, Issue 3, March 2011, Pages 1459-1469

Crassous, R., 2008, "Modéliser le long terme dans un monde de second rang : application aux politiques climatiques", thèse de doctorat soutenue le 21 novembre 2008, 341 p

Dahl, C., 1993, "A survey of energy demand elasticities in support of the development of the NEMs", Contract No. DE-AP01-93EI23499, Washington, DC, October.

[DECC, 2011] *Annual report on fuel poverty statistics 2011*, UK Department of Energy and Climate Change, juillet 2011, 84 pages

Ebel, W., W. Eicke, W. Feist, O. Hildebrandt, H.-P. Hilpert, J. Klien, W. Kröning, H. Schmidt, B. Siepe, U. Wullkopf, 1990, *Energies-parpotentiale im Gebäudebestand. Institut Wohnen und Umwelt*, Darmstadt

[EL, 2002] *Enquête Logement*, réalisée auprès de 45000 ménages, Institut National de la statistique et des études économiques, janvier 2002

[EPBD, 2002] Directive 2002/91/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments

Espey, J.A., M. Espey, 2004, "Turning on the Lights: A Meta-Analysis of Residential Electricity Demand Elasticities", *Journal of Agriculture and Applied Economics*, 36, 65-81

Giraudet L.-G., 2011, "Les instruments économiques de maîtrise de l'énergie : Une évaluation multidimensionnelle", Thèse de doctorat soutenue le 28 mars 2011, 283 p

Giraudet L.-G., C. Guivarch, P. Quirion, 2011a, "Exploring the potential for energy conservation in French households through hybrid modeling", DT/WP No 2011-26

Giraudet L.-G., C. Guivarch, P. Quirion, L. Penot-Antoniou, 2011b, "*Evaluation des mesures du Grenelle de l'environnement sur le parc de logements*", 2011, Commissariat Général au Développement Durable, Etudes et documents n°58, novembre 2011

Haas R., Biermayr, P., 2000, "The rebound effect for space heating: Empirical evidence from Austria" *Energy Policy*, 28, 403-410

Haas R., H. Auer, P. Biermayr, 1998, "The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating", *Energy and Buildings*, 27, 195-205

Hong S.H., T. Oreszczyn, I. Ridley, the Warm Front Study Group, 2006, "The impact of energy efficient refurbishment on the space heating fuel consumption in English dwellings", *Energy and Buildings*, Volume 38, Issue 10, October 2006, Pages 1171-1181

Houdant, N., J. Schram, "ENERTER: a tool to simulate housing energy consumption", *Proceedings of the 2009 ECEEE Summer Study*, France

[JO, 2007] Arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants, publié au Journal Officiel le 17 mai 2007

Jaffe, A.B., R.N. Stavins, 1994, "The energy-efficiency gap. What does it mean?", *Energy Policy*, 22, 804-881

Kriström B., 2008, chapitre "Residential Energy Demand" du rapport "Household Behaviour and the Environment - reviewing the evidence", OCDE, 2008

Lapillonne B., B. Chateau, 1981, "The MEDEE models for long term energy demand forecasting", *Socio-Economic Planning Sciences*, 15(2), pages 53-58

Laurent M.-H., D. Osso, P. Mandrou, H. Bouia, 2006, "*Scénarios de rénovation du parc résidentiel à 2030 en France dans un contexte « MDE »*", IBPSA France 2006 à La Réunion – 2 et 3 novembre 2006

Laurent M.-H., B. Allibe, D. Osso, 2011, "Energy efficiency for all! How an innovative conditional subsidy on refurbishment could lead to enhanced access to efficient technologies", *Proceedings of the 2011 ECEEE Summer Study*

Leth-Petersen, S., 2002, "Micro econometric modelling of household energy use: Testing for dependence between demand for electricity and natural gas", *Energy Journal*, 23(4), pp. 57-84.

Luyben, P.D., 1982, "Prompting thermostat setting behavior: Public response to a presidential appeal for conservation", *Environment and Behavior*, 14, 113-128

Marchal, J., 2008, « Descriptif du programme de simulation, description détaillée du fonctionnement des sous programmes », Agence nationale de l'habitat, février 2008

Marchand C., M.-H. Laurent, R. Rezakhanlou et Y. Bamberger, 2008, « Le bâtiment sans énergies fossiles ? Les bâtiments pourront-ils se passer des énergies fossiles en France à l'horizon 2050? », *Futuribles*, n° 343, juillet 2008, pp. 79-100

[MECSL, 2008] Ministère de l'Emploi, de la Cohésion Sociale et du Logement, Arrêté du 6 mai 2008 portant confirmation de l'approbation de diverses méthodes de calcul pour le diagnostic de performance énergétique en France métropolitaine, NOR DEVU0810970A, JORF n°0114 du 17 mai 2008, page 8063, 96p

Milne G., B. Boardman, 2000, "Making cold homes warmer: the effect of energy efficiency improvements in low-income homes", *Energy Policy*, 28, 411-424

[négaWatt, 2011] Dossier de présentation conférence de presse / réunion publique, « Scénario négaWatt 2011 », association négaWatt, 29 septembre 2011

[OPECST, 2009] : La performance énergétique des bâtiments : comment moduler la règle pour mieux atteindre les objectifs ?, Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

[OPEN, 2009] : Observatoire Permanent de l'amélioration Energétique du Logement, *Campagne 2009, Résultats 2006/2008*, ADEME, BIIS, CAH, 28 p

Peeters L., R. Dear, J. Hensen, W. Dhaeseleer, 2009, "Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation", *Applied Energy*, 86, 2009, p.772-780

[PEGASE, 2012] Consultation de la base de données en ligne PEGASE du MEDDTL en janvier 2012

Risch, A., C. Salmon, 2010, "French residential energy demand: micro-econometric analysis of household multi-fuel energy consumption", *Note de Recherche n° 10-34*, décembre 2010

Sanders C., M. Phillipson, 2006, "*Review of Differences between Measured and Theoretical Energy Savings for Insulation Measures*", Centre for Research on Indoor Climate and Health, Glasgow Caledonian University, décembre 2006

Santin, O., L. Itard, H. Visscher, 2009, "The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock", *Energy and Buildings*, 41, 2009, p. 1223-1232

Schuler, A., C. Weber, U. Fahl, 2000, "Energy consumption for space heating of West-German households: empirical evidence, scenario projections and policy implications", *Energy Policy*, 28, 2000, 877-894

Socolow, R.H., 1978, *Saving Energy in the Home: Princeton's Experiments at Twin Rivers*, editor. Ballinger Press, 1978

Sorrell, S., J. Dimitropoulos, 2008, "The rebound effect: microeconomic definitions, limitations and extensions", *Ecological Economics*, 65, 636-649

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

Tigchelaar C., B. Daniels, M.Menkveld, 2011, "Obligations in the existing housing stock: who pays the bill?", *Proceedings of the 2011 ECEEE Summer Study, France*

Train, K., 1985, "Discount rates in consumer's energy-related decisions: a review of the literature", *Energy*, 10(12):1243-1253

Traisnel J-P., B. Peuportier, A. Bornarel, 2001, *Habitat et développement durable – bilan rétrospectif et prospectif*, Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement (CLIP), Les cahiers du CLIP, n°13, avril 2001, 104 p.

Traisnel J-P., D.Joliton, M-H. Laurent, S. Caffiaux, A. Mazzenga, 2010, *Habitat Facteur 4 Étude d'une réduction des émissions de CO₂ liées au confort thermique dans l'habitat à l'horizon 2050*, Les Cahiers du CLIP n°20, novembre 2010, 104p

[Tribu Energie, 2006] : La méthode de Calcul des Consommations Conventionnelles dans les Logements -> 3CL (Calculs des consommations conventionnelles dans les logements), Tribu Energie, 16 mars 2006

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*, Volume 2, Number 4, 293-316

Vielle, M., 2007, « Les déterminants économiques de la demande en énergie du secteur résidentiel », rapport pour EDF R&D, note H-E12-2007-03104-FR, 28 novembre 2007

Wirl, F., 1988, "Thermal comfort, energy conservation and fuel substitution: an economic-engineering approach", *Energy Systems and Policy*, 11, 311-328

Wutich, A., 2009, "Estimating Household Water Use: A Comparison of Diary, Prompted Recall, and Free Recall Methods", *Field Methods*, 21 (1), 49-68

Chapitre 2 : Impact de l'hétérogénéité des variables manipulées sur l'estimation de la consommation d'énergie et de sa dynamique

Résumé

La modélisation *bottom-up* « ingénieur » des consommations d'énergie du secteur résidentiel et de leur dynamique est actuellement dominée par une approche par segments du parc de logements, caractérisés par des consommations énergétiques moyennes et des valeurs moyennes des déterminants de ces consommations. Cependant, des observations à l'échelle individuelle révèlent qu'il subsiste une hétérogénéité non négligeable de la consommation d'énergie et de ses déterminants à l'intérieur des segments utilisés. Or, ces hétérogénéités ont des conséquences à la fois sur l'estimation de la consommation d'énergie à un instant t mais aussi sur sa dynamique. Ce chapitre propose une analyse générale de ces deux types d'influence et présente une application numérique aux consommations de chauffage. Le cas particulier de l'hétérogénéité des prix des rénovations thermiques, largement absente des modèles de simulation *bottom-up* existants, est étudié.

Nos résultats montrent que sa prise en compte dans un modèle d'investissement en équipements énergétiquement efficaces a une influence forte sur les parts de marché simulées. Notre analyse permet par ailleurs d'observer l'influence du niveau de détail des modèles *bottom-up* (donc de la représentation des hétérogénéités existantes) sur la dynamique des consommations d'énergie qu'ils simulent. La représentation *bottom-up* des hétérogénéités existantes, si elle permet une meilleure compréhension de la demande et une analyse quantitative plus fine des gisements d'économie d'énergie, apparaît cependant un exercice difficile du fait des corrélations multiples entre déterminants des consommations d'énergie et entre déterminants des choix technologiques des ménages.

Les résultats de ce chapitre reprennent en partie ceux issus des communications suivantes :

- Allibe, B., D. Osso, M-H. Laurent, 2010, "Modélisation thermique du chauffage individuel : d'un logement unique à l'ensemble du parc", Conférence IBPSA France, Moret-sur-Loing, 9-10 novembre 2010
- Cayla, J-M., B. Allibe, M-H. Laurent, 2010, "From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption", Proceedings of the ACEEE Summer Study on Buildings, 15-20 août 2010, Pacific Grove, États-unis

- Allibe, B., M-H. Laurent, D. Osso, 2011, "Explicit and realistic representation of heterogeneities in residential demand for space heating: modelling principles and implications for national energy policies", 34th IAEE International Conference, présentation orale, Stockholm School of Economics, Suède, 19-23 juin 2011
- Laurent, M-H., B. Allibe, D. Osso, 2011, "Energy efficient technologies for all! Testing the efficiency of an innovative conditional subsidy on refurbishment market", Proceedings of the ECEEE 2011 Summer Study, paper 2-231

Introduction

La modélisation *bottom-up* « ingénieur » de la demande d'énergie du secteur résidentiel et de sa dynamique est principalement réalisée à l'échelle de segments du parc de logements. Les variables utilisées pour la segmentation sont le plus souvent de nature technique, distinguant principalement les groupes de logements par leur période de construction, leur caractère individuel ou collectif, les énergies et systèmes de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire. Cette structure a pour but d'attribuer aux segments des valeurs moyennes pour chaque déterminant des consommations d'énergie, sensiblement différents d'un segment à un autre. Concernant la modélisation de la dynamique des consommations, résultant de l'évolution temporelle des déterminants directs de ces consommations, celle-ci peut être soit entièrement définie par le modélisateur (e.g. [Marchand et al., 2008 ; Dietz et al., 2009 ; MURE, 1999]) ou calculée de manière endogène grâce à un algorithme simulant les choix techniques des ménages, dépendant généralement de la rentabilité économique des différentes options technologiques présentes sur le marché et parfois de certaines caractéristiques comme le revenu des ménages (e.g. [Cayla, 2011]) ou leur statut d'occupation (e.g. [Giraudet et al., 2011]). Si l'approche par segment convient bien à une démarche de modélisation par son aspect simplificateur, l'observation révèle de nombreuses hétérogénéités au sein des segments modélisés, que ce soit au niveau de la consommation d'énergie, de ses déterminants ou de ceux qui conditionnent sa dynamique. Ce chapitre propose donc de répertorier et classifier ces hétérogénéités et de déterminer en quoi leur prise en compte peut influencer les résultats d'un modèle de simulation des consommations énergétiques du secteur résidentiel.

La section I présente tout d'abord les origines de l'hétérogénéité des consommations d'énergie par usage ainsi que les conditions sous lesquelles leur représentation en valeur moyenne, propre à l'approche par segment, ne biaise pas l'estimation de la consommation d'énergie. Ces éléments permettent de déterminer, selon le modèle de calcul *bottom-up* utilisé, l'échelle d'observation (nombre de logements observés) suffisante pour déterminer la consommation moyenne d'un groupe de logements avec un intervalle de confiance souhaité.

La section II aborde la problématique de l'influence de l'hétérogénéité du marché des équipements et des rénovations sur la diffusion des technologies présentes dans ce marché. L'origine de cette hétérogénéité est attribuée dans la littérature économique à la seule hétérogénéité des préférences des ménages, exprimée comme celle de leur perception des coûts (e.g. [Jaccard et Dennis, 2006]). Dans les modèles *bottom-up* ingénieur, elle est au contraire simulée à partir de l'hétérogénéité des déterminants directs de la consommation d'énergie. L'analyse proposée dans cette section tente de répertorier les sources possibles d'hétérogénéité du marché, provenant aussi bien de l'hétérogénéité de la demande (par exemple les préférences des ménages) que de celle de

l'offre (par exemple le prix des technologies), pour en présenter une approche synthétique. Cette section propose par ailleurs l'analyse du cas particulier de l'hétérogénéité des prix des rénovations thermiques de logements qui n'est que très rarement prise en compte dans les modèles existants, alors que les résultats que nous obtenons montrent qu'elle est importante et que son influence sur les parts de marché des différentes options technologiques de rénovation thermique est significative.

1. Analyse statique : influence de l'hétérogénéité des inputs des modèles *bottom-up* de consommation énergétique

1.1. Sources d'hétérogénéité des consommations d'énergie dans le secteur résidentiel

Comme cela a été expliqué dans le premier chapitre de cette thèse, la consommation d'énergie est la résultante des valeurs que prennent les déterminants directs de cette consommation : l'usage et la performance des technologies, le volume de service demandé, ainsi que l'environnement physique dans le cas des services thermiques. Si ces derniers présentent, au sein d'une population étudiée, non pas une valeur unique mais une distribution de valeurs, alors on observera une variété de consommations unitaires (par logement ou par m² chauffé). Dans le cadre d'une analyse des consommations énergétiques du secteur résidentiel, leur variété justifie l'usage d'une segmentation du parc de logements, dont le but est de minimiser la variance des consommations à l'intérieur du segment et à l'inverse de maximiser la variance entre les différents segments. La suite de cette section propose une présentation de l'hétérogénéité des consommations d'énergie des usages majoritaires (principalement le chauffage) ainsi que celle de leurs déterminants directs.

1.1.1. Chauffage

Les déterminants directs des consommations de chauffage sont la surface des logements, la rigueur du climat, le niveau d'isolation thermique du bâti, le rendement des systèmes de chauffage, l'efficacité des systèmes de ventilation et la demande de température de chauffage et de renouvellement d'air des ménages. Chacun de ces déterminants présente une distribution de valeurs au sein du parc résidentiel, comme le montre la Figure 74, réalisée à partir d'un échantillon de plus de 700 maisons individuelles issues de l'enquête EDF R&D 2009 [Cayla, 2011]. Sur cette figure, la rigueur du climat et la performance des éléments constitutifs de l'infrastructure de chauffage sont estimés à partir des valeurs proposées dans le Diagnostic de Performance Energétique [MECSL, 2008]. Les variables liées aux comportements d'usage (température et aération) sont présentées sous la forme d'*intensité d'utilisation*, qui est soit calculée à partir des déclarations des ménages (de manière similaire à l'Equation 17), soit à partir de la consommation observée de chauffage (de manière similaire à l'Equation 9).

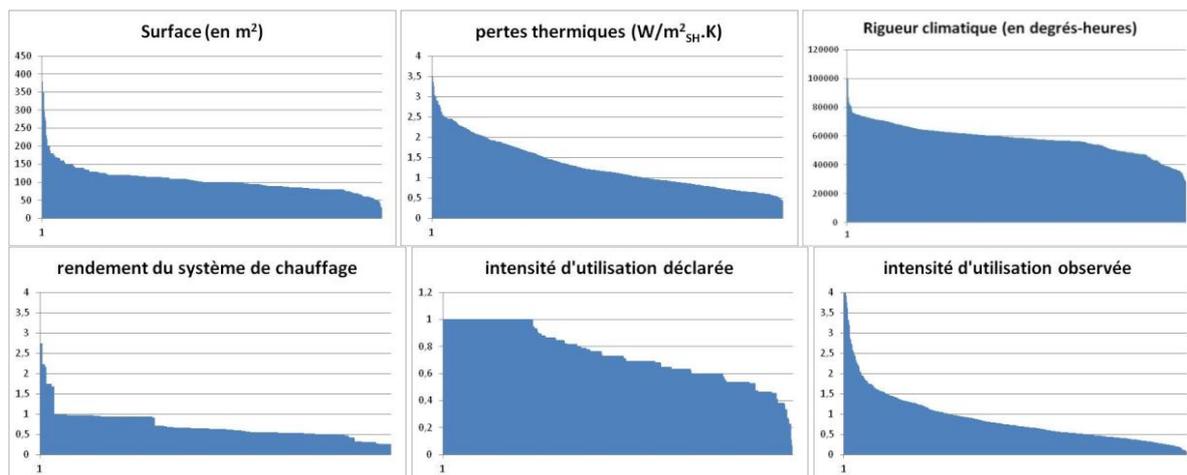


Figure 74 : Distribution des déterminants physiques directs observés ou calculés sur un échantillon de 704 maisons individuelles (*illustration personnelle*)

Si ces déterminants étaient répartis de manière aléatoire au sein d'une population donnée, les consommations énergétiques calculées à partir de ces déterminants seraient particulièrement hétérogènes. Or, l'analyse des valeurs prises par ces déterminants dans l'enquête EDF R&D 2009 montre que ceux-ci peuvent être fortement corrélés (Tableau 12). Les corrélations observées indiquent que plus l'environnement physique et économique des ménages devrait entraîner une consommation de chauffage élevée (climat rigoureux ou prix de l'énergie élevé) plus le logement est énergétiquement performant (haut rendement du système ou faibles déperditions thermiques due à une bonne isolation thermique) et les comportements sobres (*intensité d'utilisation* faible). Cette observation est cohérente avec d'autres sources de la littérature utilisant des méthodes statistiques plus développées que celle utilisée ici (e.g. [Kelly, 2011]). Ces résultats montrent que les ménages adaptent leur infrastructure technique (performance du bâti et du système de chauffage) et leur demande de confort à leur environnement physique et économique.

Variables	log(degrés-heures)	log(rendement)	log(surface)	log(déperditions thermiques)	log(revenu)	log(prix énergie)	log(<i>intensité d'utilisation observée</i>)
log(degrés-heures)	1,000	0,001	0,119	0,102	0,068	-0,054	-0,173
log(rendement)	0,001	1,000	-0,072	-0,225	0,039	0,882	0,265
log(surface)	0,119	-0,072	1,000	-0,299	0,326	-0,165	0,221
log(déperditions thermiques)	0,102	-0,225	-0,299	1,000	-0,249	-0,228	-0,560
log(revenu)	0,068	0,039	0,326	-0,249	1,000	0,000	0,213
log(prix énergie)	-0,054	0,882	-0,165	-0,228	0,000	1,000	0,173
log(<i>intensité d'utilisation observée</i>)	-0,173	-0,265	0,221	-0,560	0,213	0,173	1,000

Tableau 12 : Matrice de corrélations entre déterminants directs des consommations de chauffage. Issue des résultats de la régression de l'Equation 15 du chapitre précédent

Pour observer la résultante énergétique de la distribution des déterminants directs au sein du parc de logement, la consommation de chauffage des maisons individuelles de l'échantillon mentionné précédemment a été simulée à partir de trois types de distribution :

- Tirage aléatoire de tous les déterminants directs, y compris *l'intensité d'utilisation*. Cette distribution correspond à une situation où les déterminants directs seraient indépendants les uns des autres.

- Tirage aléatoire des déterminants directs non comportementaux et utilisation d'un comportement constant unique dans toutes les maisons. Cette distribution correspond à la précédente mais avec une *intensité d'utilisation* fixée à une valeur unique.
- Utilisation des déterminants tels que déclarés par les ménages, c'est-à-dire prenant en compte les corrélations observées sur l'échantillon. La distribution des déterminants n'est donc pas aléatoire.

La Figure 75 présente la distribution des consommations de chauffage calculées à l'aide d'un modèle thermique pour chaque type de distribution de déterminants directs, et les compare à la distribution des consommations estimées lors de l'enquête. Les résultats montrent que la distribution aléatoire des déterminants directs donne une distribution des consommations de chauffage calculées présentant un plus grand nombre de valeurs élevées que dans la distribution des consommations calculées à partir des corrélations observées entre déterminants et dans celle des consommations observées. Ceci montre qu'au-delà d'un certain seuil de consommation de chauffage, les ménages se sont adaptés par leurs comportements d'usage ou par leurs choix techniques pour éviter une facture de chauffage trop forte.

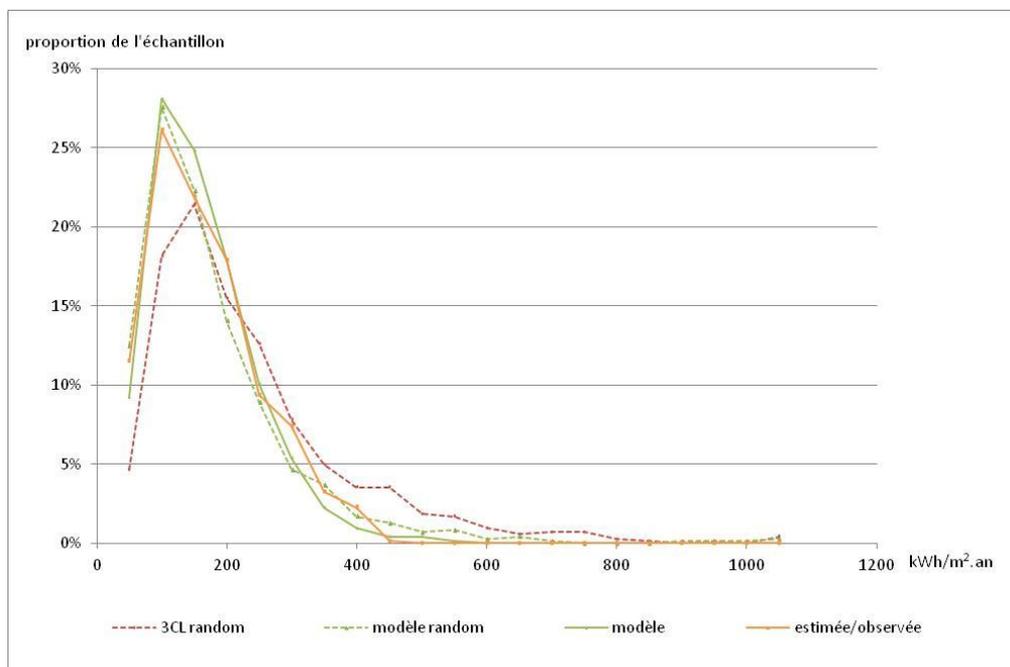


Figure 75 : Distribution des consommations de chauffage en fonction de la façon dont l'hétérogénéité des déterminants directs est répartie sur l'échantillon de maisons individuelles de l'enquête EDF R&D 2009. *En pointillés rouge : hétérogénéités indépendantes, pas de comportement (calcul 3CL classique); en pointillés verts : hétérogénéités indépendantes dont comportements modélisés par l'intensité d'utilisation (cf modèle du premier chapitre de cette partie), en trait plein vert : hétérogénéités corrélées telles qu'observées sur l'échantillon, comportement modélisé par l'intensité d'utilisation, en trait plein orange : consommations réelles ou estimées.*

Une analyse statistique de la variance de la consommation de chauffage a été réalisée sur les données de l'enquête EDF R&D 2009 [Cayla et al., 2010]. Celle-ci montre que les informations disponibles sur les logements, les ménages y habitant, ainsi que leur environnement physique et économique, permettent d'expliquer environ la moitié de la variance observée des consommations. Au sein de cette variance observée, les déterminants techniques (surface, énergie utilisée,

performance des équipements et du bâti) en expliquant 2/3 contre 1/3 pour les non-techniques (caractéristiques des ménages, prix des énergies), comme indiqué sur le Tableau 13.

Type of variables	R ² adjusted	Part
Total	0.50	100%
Technical + Environment	0.33	66%
Socio-demographic⁶ + Practices	0.17	33%
of which socio-demographic	0.13	75%
of which practices	0.04	25%
Technical + Environment + Practices	0.37	74%

Tableau 13 : Importance des différents types de variables dans l'explication des consommations de chauffage (en pourcentage de la variance expliquée) [Cayla et al., 2010]

D'une part, ces résultats confirment la pertinence d'utiliser des critères techniques pour segmenter le parc résidentiel vis-à-vis des consommations de chauffage exprimées par unité de surface. D'autre part, la part explicative issue de variables non-techniques ainsi que la forte part de variance inexpliquée permet de comprendre pourquoi des consommations très hétérogènes sont fréquemment observées au sein d'un groupe de logements identiques sur le plan technique (e.g. [Schnieders et Hermelink, 2006]).

On peut par ailleurs interpréter la forte part non expliquée de la variance par le fait que les déterminants techniques sont définis par des catégories au sein desquelles les valeurs individuelles peuvent varier sensiblement. Ainsi, dans cette analyse comme dans la majorité des modèles *bottom-up*, ce n'est pas directement la performance réelle des éléments du bâti qui est renseignée mais la période de construction du logement (dont la performance moyenne est déduite à partir de bases de données, comme par exemple celle proposée par le Diagnostic de Performance Énergétique [MECSL, 2008]). Or, pour une même période de construction, ou pour un même matériau de construction, la performance thermique peut très fortement varier, en particuliers pour les logements anciens [Rye, 2010]. L'hétérogénéité observée des consommations par unité de surface au sein d'un segment technique peut donc être la conséquence de celle des comportements d'usage, mais aussi de la variation des déterminants techniques autour de la valeur moyenne qualifiant le segment.

1.1.2. Autres usages

Pour les usages résidentiels autres que le chauffage, moins de données descriptives sont disponibles de manière générale, et ce plus particulièrement pour la distribution des valeurs des déterminants directs. En ce qui concerne l'eau chaude sanitaire (ECS), la variable qui apparaît la plus explicative des consommations énergétiques est le nombre de personnes du ménage (c'est par exemple la seule variable retenue par le CEREN pour estimer la consommation d'électricité due à l'ECS [CEREN, 2007]). Le besoin moyen par personne (exprimé en litres d'eau chaude par personne et par jour) décroît quant à lui avec le nombre de personnes du ménage et on peut observer, pour un nombre de personnes donné, qu'il peut varier du simple au double (Figure 76).

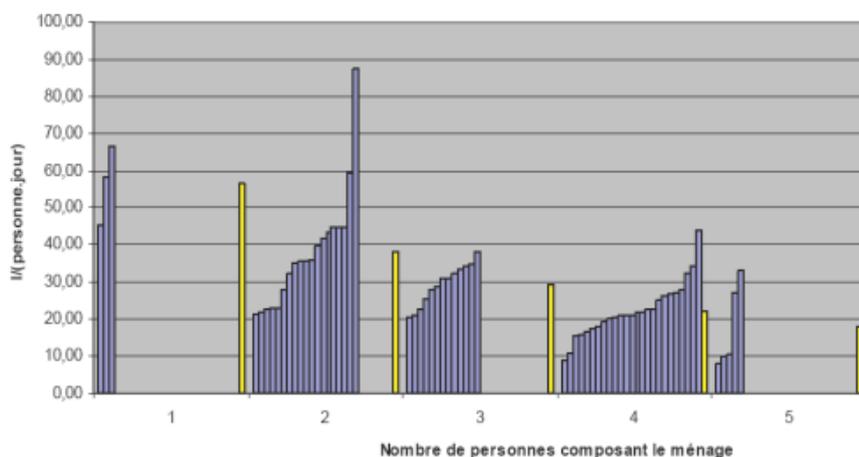


Figure 76 : Volume quotidien d'eau chaude à 60°C puisé par personne en fonction de la taille du ménage.

Source : EDF R&D

Peu de données existent concernant les consommations énergétiques associées à la cuisson. Le CEREN modélise sa consommation de manière similaire à celle d'ECS, en fonction¹²⁷ du nombre de personnes (au sein d'une catégorie d'équipement de cuisson) [CEREN, 2007]. Aucune donnée sur la dispersion des consommations énergétiques autour des valeurs moyennes par personne n'a été trouvée.

Problème de l'estimation de la consommation d'électricité par usage

Si l'estimation de la consommation moyenne des différents usages de l'« électricité spécifique » peut être réalisée de manière statistique, par exemple par analyse de demande conditionnelle (*conditional demand analysis* [Parti et Parti, 1980]), la connaissance précise de la distribution des consommations autour de cette moyenne requiert des techniques de mesure physique par équipement (*end-use metering*). Le coût de ces mesures *in situ* explique la rareté des données disponibles. En France, les données les plus détaillées et les plus récentes par usage de l'électricité spécifique sont issues de la campagne européenne REMODECE [Enertech, 2008], dont la partie française a été menée sur un échantillon d'une centaine de logements. Les mesures effectuées, à défaut d'être représentatives au niveau national, permettent d'avoir un aperçu des distributions autour des valeurs moyennes concernant de nombreux usages de l'électricité. Les deux exemples issus de cette campagne, présentés sur la Figure 77, montrent que le taux d'équipement et l'usage de ces équipements peuvent varier sensiblement au sein de l'échantillon étudié, même lorsqu'il concerne des usages présents dans la quasi-totalité des ménages (comme l'éclairage et la télévision). L'hétérogénéité des consommations d'électricité spécifique provient donc à la fois de celle des équipements (présence et performance) et de celle de leur usage par les ménages.

¹²⁷ Fonction affine.

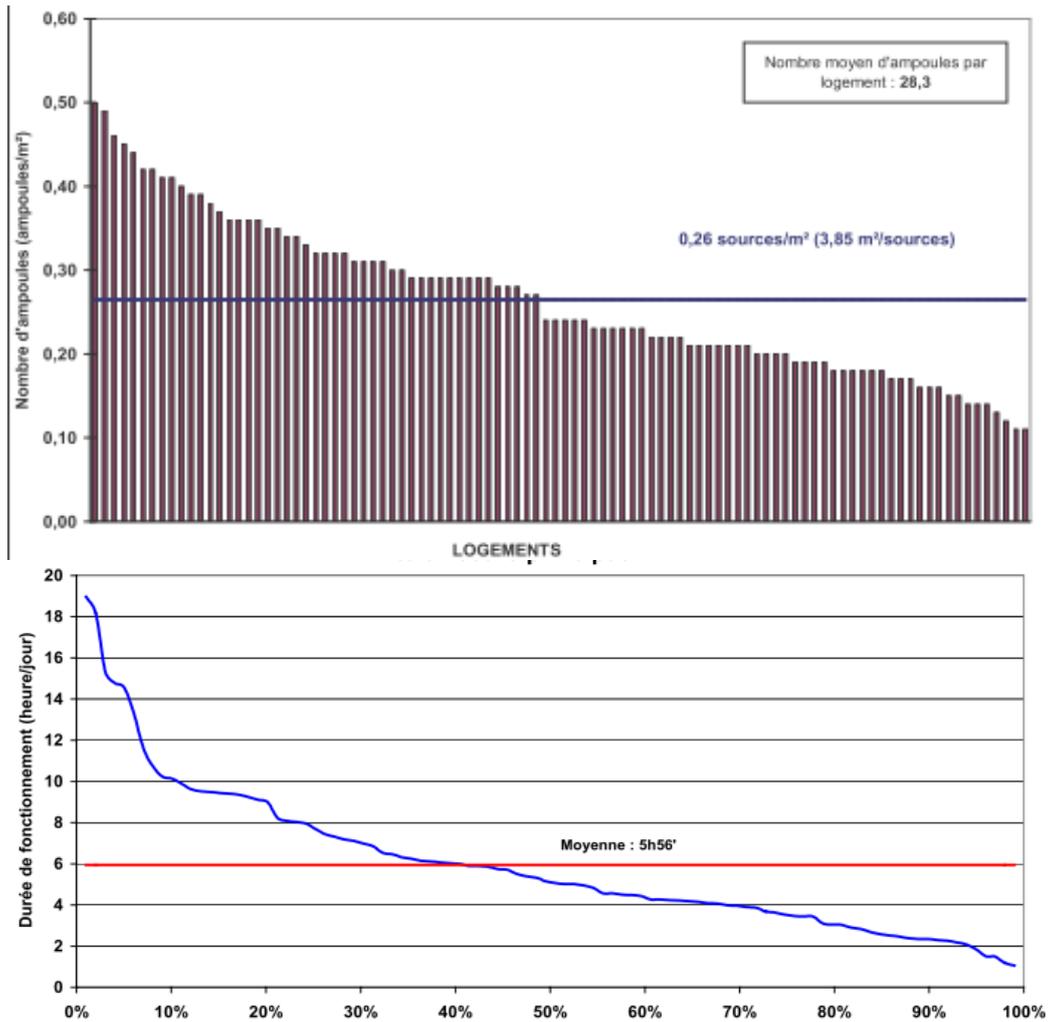


Figure 77 : Nombre moyen de sources lumineuses par m² (à gauche), et courbe de fréquence cumulée des durées de fonctionnement des téléviseurs principaux (à droite)

1.2. Biais introduit par l'utilisation de valeurs moyennes pour décrire les segments de consommation

Dans les modèles *bottom-up* ingénieur, la consommation d'un segment est calculée en prenant comme données d'entrée la valeur moyenne des déterminants qualifiant ce segment. Ceci sous-entend qu'il y ait équivalence entre la consommation moyenne du segment, qui est la moyenne des consommations de chacun des logements constitutifs du segment, et la consommation calculée avec, comme donnée d'entrée, la valeur moyenne des déterminants au sein des logements du segment, ce qui peut se traduire par l'équation ci-dessous :

Equation 22

$$\frac{1}{k} \sum_{G_j \in G} C(x_{1_j}, \dots, x_{N_j}) = C\left(\frac{1}{k} \sum_{G_j \in G} x_{1_j}, \dots, \frac{1}{k} \sum_{G_j \in G} x_{N_j}\right)$$

avec x_i les N déterminants de la consommation étudiée et G_j les k logements constitutifs du segment G .

Or cette égalité n'est valable pour tout logement du segment et pour tout déterminant de la consommation que si la consommation d'énergie est une fonction linéaire de chacun des déterminants. L'utilisation des valeurs moyennes pour le calcul des consommations par segment introduit donc un biais dès que cette condition n'est pas respectée, biais dont l'amplitude dépend alors de la concavité de la fonction définissant la consommation en fonction de ses déterminants, comme cela est observable sur la Figure 78.

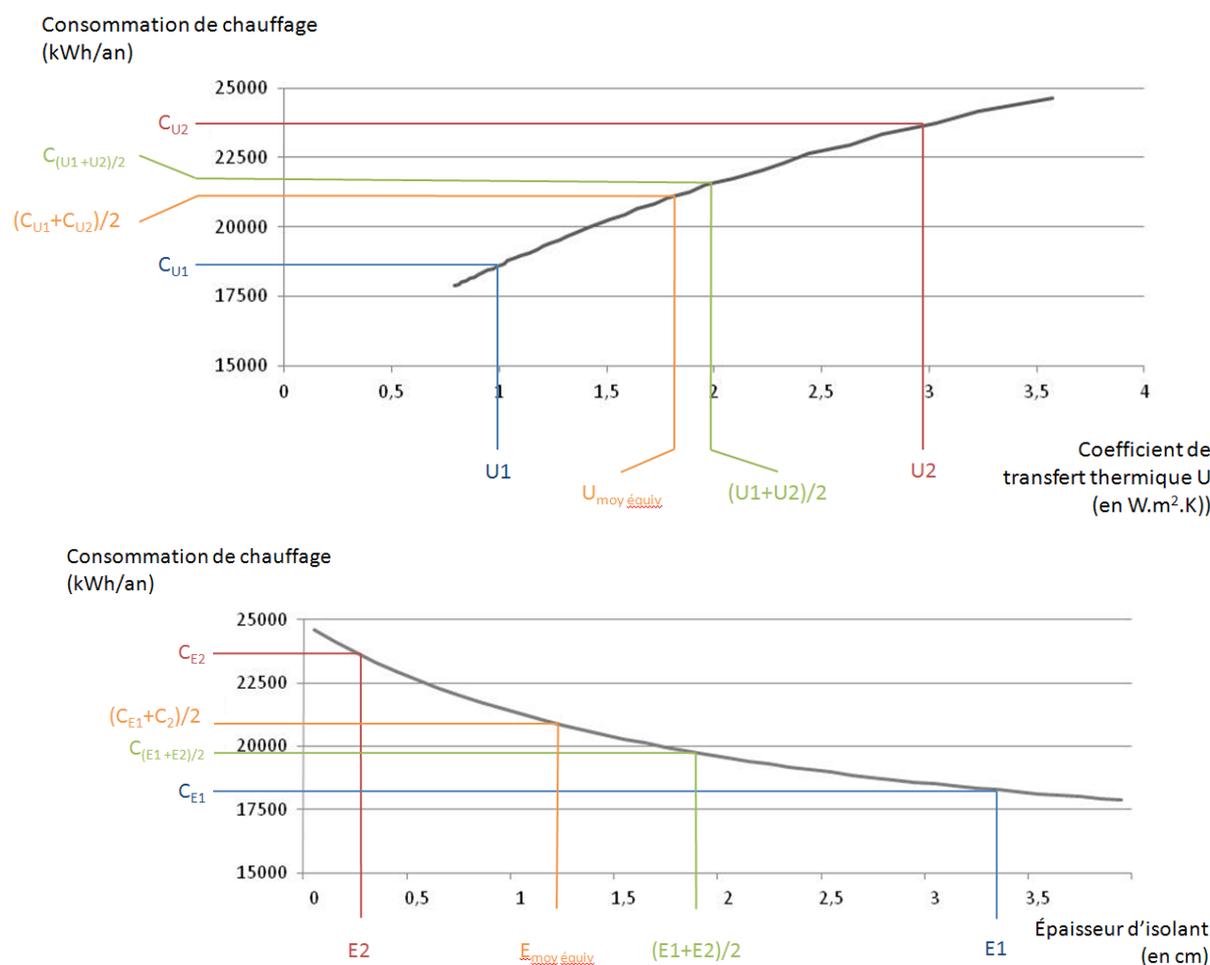


Figure 78 : Illustration du biais introduit par l'utilisation de valeurs moyennes de déterminants selon la forme de la fonction qui les lie à la consommation (en haut : convexe; en bas : concave). *Comparaison entre la consommation moyenne et la consommation calculée à partir du déterminant moyen dans le cas de deux logements fictifs (1 et 2). Le déterminant avec lequel la consommation moyenne aurait pu être calculée de manière réaliste est indiqué « moy équiv ».* (illustrations personnelles)

Si la relation entre la consommation d'un usage et ses déterminants peut être modélisée sous la forme d'une régression linéaire ou multilinéaire (auquel cas l'utilisation des valeurs moyennes n'introduit pas de biais), elle peut aussi l'être sous des formes fonctionnelles plus complexes. C'est en particulier le cas du chauffage, dont le besoin résulte de phénomènes liés à la diffusion de la chaleur. Or cette diffusion suit des principes physiques que l'on peut décrire par une équation différentielle du second ordre liant le besoin de chauffage à la résistance thermique des éléments bâtis et à leur inertie thermique. Cette relation peut être simplifiée par une approximation linéaire, ce qui est par exemple le cas du mode de calcul 3CL du DPE. Dans ce cas, l'utilisation de valeurs moyennes ne biaise pas les résultats du modèle linéaire, mais celui-ci consiste bien en une

approximation du phénomène physique réel (non linéaire). La validité de cette approximation est alors limitée à une certaine plage de valeurs généralement inconnue des utilisateurs du modèle simplifié.

La modélisation des besoins de chauffage par segment à partir de valeurs moyennes des déterminants est donc confrontée à un choix entre un modèle fidèle au phénomène observé, mais pour lequel l'utilisation de valeurs moyennes introduit un biais d'estimation, et un modèle linéaire (donc biaisé) pour lequel l'utilisation de valeurs moyennes ne biaise pas l'estimation des consommations du segment (telle qu'estimée avec ce modèle linéaire). Enfin, on notera que, dans le cas de l'utilisation d'un modèle thermique non simplifié, la concavité de la fonction exprimant le besoin de chauffage à partir de ses déterminants varie selon les déterminants et selon la forme sous laquelle ceux-ci sont exprimés. Ainsi, le biais est sensiblement plus fort si l'isolation du bâti est exprimée à partir de valeurs moyennes de résistance thermique (ou d'épaisseur d'isolant) que si elle l'est à partir des valeurs moyennes de coefficient de transfert thermique (inverse de la résistance thermique, noté U , exprimé en $W/m^2.K$), comme cela est illustré sur la Figure 78. L'erreur commise est ainsi différente si l'on fait une moyenne sur la résistance thermique ou son inverse.

La modélisation thermique dynamique sans approximation linéaire étant généralement destinée à l'étude des bâtiments à l'échelle individuelle du fait de contraintes de temps de calcul, la littérature concernant le biais d'agrégation lié à l'utilisation de valeurs moyennes pour estimer les consommations de chauffage d'un ensemble de logements est pauvre. Les résultats précédents, concernant le déterminant « isolation », indiquent un biais de l'ordre de 5 à 10% mais ce biais peut atteindre 20% en ce qui concerne l'utilisation de comportements d'usage moyens [Woods et al., 2010]. Ces éléments permettent d'expliquer en partie les écarts observés entre résultats de calculs thermiques et consommations réelles de chauffage et montrent que plus le segment étudié est hétérogène, plus ces écarts peuvent être importants. Cela soulève aussi la question de la validité des modèles thermiques simplifiés pour représenter des logements très performants, qui seraient en dehors du domaine de validité de l'approximation linéaire utilisée dans ces modèles.

1.3. Conséquences sur le choix de l'échelle d'observation adaptée à l'estimation de la consommation d'un groupe de logements

Un segment du parc résidentiel est généralement défini par le croisement de plusieurs variables qualitatives. Le nombre de ces variables est généralement largement inférieur à celui des déterminants des consommations de chauffage. Ceci implique que non seulement les consommations réelles mais aussi les consommations modélisées de manière *bottom-up* (à partir des valeurs prises par l'ensemble des déterminants pris en compte dans le modèle) soient hétérogènes au sein d'un segment. Pour estimer la consommation énergétique unitaire¹²⁸ moyenne d'un segment, il est nécessaire de calculer cette moyenne sur un nombre de logements d'autant plus élevé que les consommations unitaires sont hétérogènes au sein du logement. Il se pose donc la question du nombre suffisant de logements dont il faut calculer la consommation énergétique pour estimer la consommation unitaire moyenne du segment avec un intervalle de confiance donné.

Nous avons étudié cette problématique à partir des données de l'enquête EDF R&D 2009 en modélisant les consommations de chauffage à l'aide de plusieurs modèles *bottom-up* [Allibe et al., 2010]. Trois modèles ont été utilisés : deux modèles thermiques et un modèle hybride thermique-statistique.

¹²⁸ Par logement ou par m^2 .

Le premier modèle thermique adopte le mode de calcul 3CL¹²⁹ du DPE, que l'on a utilisé dans deux versions :

- sa version standard, n'utilisant que des variables techniques (DPEt) et un comportement de chauffage unique (celui défini dans le DPE),
- une version dans lequel nous avons introduit¹³⁰ les comportements déclarés par les ménages (DPEt+C)

L'autre modèle thermique utilisé est Simfast [Déqué et al., 2000], un modèle thermique dynamique développé par EDF R&D, ne reposant pas sur une modélisation linéaire du besoin de chauffage en fonction de ses déterminants. Nous l'avons utilisé en renseignant les variables techniques à partir des déclarations des ménages, et avec deux variantes concernant les comportements d'usage :

- en utilisant ceux renseignés par défaut dans le modèle (Sft),
- en y intégrant ceux déclarés par les ménages (Sft+c).

Enfin, le modèle hybride thermique-statistique (DPE-s) est le produit des résultats du DPE standard (DPEt) et de l'*intensité d'utilisation* (cf. chapitre précédent) déterminée par une régression logistique (ou « courbe en S », d'où le nom) sur les données de consommation de l'enquête. Cette régression logistique est issue de premiers résultats de la thèse et pourrait être remplacée par une régression « puissance » pour mieux s'ajuster aux données.

Les résultats des modèles sont comparés à la distribution des consommations de chauffage observées ou estimées à partir des factures énergétiques des ménages enquêtés. Dans le cas où l'énergie de chauffage est utilisée pour plusieurs usages, la part dédiée uniquement au chauffage a été extraite des factures énergétiques à l'aide d'une régression multilinéaire (RML)¹³¹, on parle alors de consommations estimées. A l'inverse, si l'énergie de chauffage n'est pas utilisée pour d'autres usages alors la consommation d'énergie est celle indiquée sur la facture annuelle des ménages concernant cette énergie, on peut alors parler de consommation « réelle ». Du fait de la possible utilisation d'une estimation par régression multilinéaire, les consommations de chauffage réelles ou estimées sont appelées "RML" dans les figures suivantes.

La consommation unitaire moyenne de chauffage de l'ensemble de l'échantillon de logements de l'enquête EDF R&D 2009 a été estimée à partir de la consommation moyenne calculée sur un groupe de x logements de l'échantillon, tirés aléatoirement. Pour connaître la dispersion des consommations moyennes que l'on peut estimer de la sorte (deux tirages aléatoires de x logements ne donnant pas la même consommation moyenne), une centaine de tirages aléatoires a été effectuée pour chaque valeur de x . En faisant l'hypothèse que les tirages soient distribués selon une loi normale d'écart-type σ et de moyenne \bar{c} (estimée à partir des x logements), la consommation moyenne de l'ensemble de l'échantillon (C) peut être estimée avec un intervalle de confiance à 95% de la façon suivante (résultat élémentaire de statistiques) : $\left[\bar{c} - 1,96 \cdot \frac{\sigma}{x}; \bar{c} + 1,96 \cdot \frac{\sigma}{x} \right]$ est l'intervalle de confiance à 95% de l'estimation de C .

¹²⁹ Dont la structure est très proche d'une approximation linéaire de la diffusion de la chaleur.

¹³⁰ Une description plus détaillée de la façon dont les comportements sont introduits est présentée dans [Cayla et al., 2010].

¹³¹ Cette méthodologie est celle du CEREN [CEREN, 2007], et est décrite dans [Cayla et al., 2010] pour son application aux données de l'enquête EDF R&D 2009.

La Figure 79 a été réalisée à partir de cette relation, en faisant varier x pour chaque modèle. Cette figure montre que les modèles n'estiment pas tous la même consommation moyenne de l'échantillon. Ceci rappelle les résultats du chapitre précédent en montrant que le mode de calcul 3CL du DPE, même lorsqu'on y introduit les comportements déclarés, présente une forte surestimation de la consommation de chauffage à l'échelle nationale.

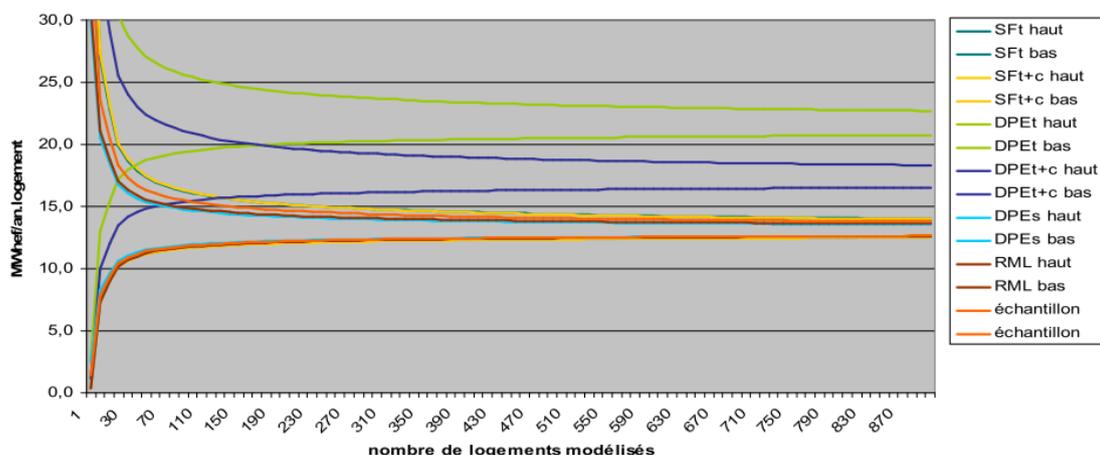


Figure 79 : Estimation de la consommation moyenne d'un groupe hétérogène de logement selon le modèle utilisé et le nombre de logements constitutifs du groupe (intervalles de confiance à 95%, indiqué par ses valeurs « haut » et « bas » pour chaque modèle) [Allibe et al., 2010]

Une autre figure a été réalisée, en exprimant l'intervalle de confiance (cette fois à 98%) comme l'intervalle dans lequel 98 des 100 estimations de consommations moyennes (pour chaque x) de trouvaient (Figure 80). Ceci permet de s'affranchir d'une hypothèse à faire sur la distribution des résultats du tirage aléatoire, et explique que les courbes obtenues soient moins lisses que quand elles sont déterminées par la relation statistique mentionnée précédemment. Pour que les modèles soient plus faciles à comparer entre eux, les intervalles de confiance ont été exprimés en pourcentage de la consommation moyenne estimée par chaque modèle.

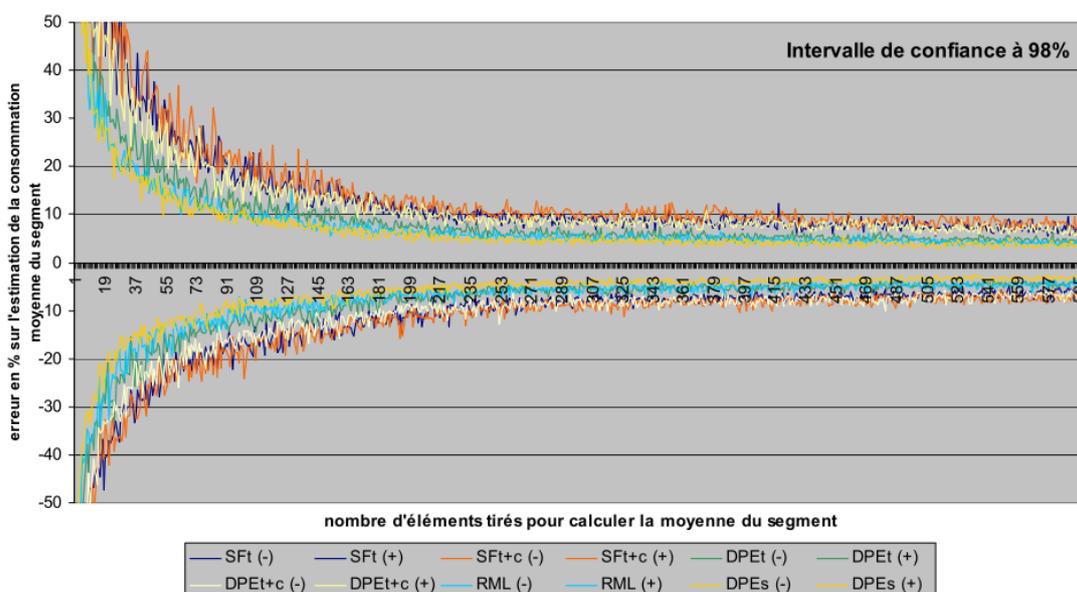


Figure 80 : Intervalle de confiance à 98% des estimations de consommation moyenne d'un groupe de logement en fonction du nombre de logements constitutifs du groupe [Allibe et al., 2010]

La comparaison des résultats selon le modèle utilisé indique que les modèles statistiques, basés sur des observations réelles de consommation, permettent d'estimer la consommation moyenne théorique d'un ensemble de logements à l'aide d'un nombre de logements sensiblement plus faible que les modèles thermiques. Ainsi, si environ 200 logements sont nécessaires aux modèles thermiques pour estimer à 10% près la consommation théorique moyenne de chauffage du parc résidentiel avec un intervalle de confiance à 98%, seulement 100 sont nécessaires au modèle hybride thermique-statistique (DPE-s), de même que pour les données de consommation de chauffage réelles ou estimées (RML).

Ces résultats sont calculés à l'échelle d'un échantillon du parc français de logements équipés de chauffage individuels, ce qui peut être considéré comme un segment spécifié par un seul critère. Ils proposent donc une estimation maximale du nombre de logements nécessaires pour estimer la consommation d'un segment avec un intervalle de confiance donné. Ce nombre est un maximum car le nombre de critères de segmentation est minimum. En effet, tout ajout de critère de segmentation permettra de diminuer la variance (et donc l'écart-type, et donc l'intervalle de confiance) des consommations théoriques de chauffage au sein de ces logements constitutifs. Cela permet par conséquent de diminuer le nombre de consommations à calculer à l'échelle individuelle nécessaire à l'estimation de la consommation moyenne du segment avec un intervalle de confiance donné.

Ces éléments permettent par ailleurs de savoir, lorsque l'on dispose d'un échantillon donné, en combien de segments cet échantillon peut être découpé tout en pouvant estimer la consommation moyenne de ces segments avec une incertitude limitée. En particulier, le modèle prospectif développé dans le cadre de cette thèse (présenté en détail dans le premier chapitre de la partie III), décrit le parc résidentiel français à partir de l'échantillon EDF R&D 2009, soit à partir de 913 logements (auxquels ont été attachées des pondérations pour les rendre représentatifs du parc résidentiel national). La taille de cet échantillon permet donc d'évaluer la consommation nationale moyenne avec une incertitude faible mais cette incertitude augmente lorsque l'on n'observe qu'un segment du parc représenté dans le modèle. Les résultats présentés précédemment donnent donc un ordre de grandeur du nombre de segments pouvant faire l'objet d'une estimation de consommation avec une incertitude limitée dans le modèle développé : avec 913 logements représentés, ce nombre est limité à une dizaine, ce qui réduit le nombre de variables de segmentation à une ou deux.

2. Analyse dynamique : influence de l'hétérogénéité du marché sur la diffusion des technologies

Cette section propose une décomposition des éléments constitutifs du marché de la rénovation thermique des logements (systèmes de chauffage et isolation du bâti) dans le but de comprendre dans quelle mesure leur hétérogénéité individuelle peut influencer les choix technologiques réalisés par les ménages, et donc la dynamique des consommations de chauffage. La littérature montre en effet que l'hétérogénéité d'un marché, au sein duquel cohabitent des options technologiques de performances énergétiques différentes, est un élément central dans la modélisation des parts de marché respectives de ces technologies (e.g. [Rivers et Jaccard, 2005]). Or, cette hétérogénéité, lorsqu'elle est modélisée explicitement, est généralement exprimée par un seul terme générique alors que celle-ci est la résultante de plusieurs sources d'hétérogénéité (e.g. préférences des ménages, infrastructure technique existante, caractéristiques technico-économiques de l'offre de rénovation). Cette section propose tout d'abord une décomposition de l'hétérogénéité d'un marché, puis une étude particulière de l'hétérogénéité du prix des rénovations thermiques.

2.1. Modélisation des choix technologiques des ménages

2.1.1. Critères de choix technologique

La répartition d'un marché entre les différentes technologies qui le composent est la résultante des choix qui ont été réalisés par les agents opérant dans ce marché. Pour décrire quelles peuvent être les sources de l'hétérogénéité d'un marché, il apparaît nécessaire d'observer quels sont les déterminants des choix technologiques individuels.

Si l'on se place dans une situation dans laquelle un équipement doit être remplacé au sein d'un logement, le ménage doit choisir entre plusieurs alternatives techniques que l'on peut décrire par un ensemble de caractéristiques énergétiques (performance, puissance) ou non (prix, esthétique, facilité d'usage, impact environnemental...). Il convient par la suite de modéliser les logiques des choix technologiques individuels, dans lesquelles les caractéristiques des technologies vendues sont certes importantes mais où celles du contexte économique, de l'environnement physique, du ménage ou de son logement peuvent aussi avoir une influence non négligeable.

Dans les modèles *bottom-up* ingénieur dans lesquels les choix technologiques sont endogènes, l'indicateur utilisé pour comparer les alternatives technologiques est généralement la valeur actuelle nette (VAN), ou son opposé, le coût global actualisé, appelé aussi coût sur le cycle de vie (e.g. [Jaccard et Dennis, 2006 ; Giraudet, 2011 ; Auffhammer et Sanstad, 2011]). Ces indicateurs permettent de faire apparaître trois éléments fondamentaux intervenant dans le choix d'un équipement consommateur d'énergie :

- le coût d'investissement,
- les factures énergétiques futures (dépendant de la performance des équipements et du prix des énergies),
- le taux d'actualisation qui reflète la préférence temporelle des agents¹³².

Par souci de simplicité et d'homogénéité, nous retiendrons dans la suite de ce chapitre l'indicateur de coût global actualisé, noté CGA.

Certains modèles utilisent d'autres critères d'investissement, comme le temps de retour sur investissement (e.g. [Callonnec, 2011]). Ces représentations du choix des ménages peuvent être considérées tout aussi pertinentes que la minimisation du CGA (la logique d'achat étant dans les deux cas particulièrement simplifiée) mais sont moins utilisées dans la littérature technico-économique. Pour que l'analyse présentée ici puisse être reliée plus facilement à la littérature existante, seul le formalisme du CGA est retenu.

La simulation des parts de marché des différentes technologies à l'échelle nationale peut être réalisée essentiellement de deux manières. La première, qui ne peut être appliquée de manière réaliste qu'à l'échelle de segments de petite taille, consiste à simuler un choix univoque de chaque segment au profit de l'alternative présentant le CGA le plus faible (cas du modèle Times-Markal développé par J-M. Cayla [Cayla, 2011]). Le deuxième type de reconstitution des parts de marché, qui peut s'appliquer à toute échelle, consiste à utiliser une fonction dérivée de modèles économétriques de type logit, permettant d'exprimer la part de marché d'une technologie en fonction de son utilité et de celle des autres alternatives [Train, 2003]. Cette expression peut être par la suite transformée

¹³² Un taux d'actualisation faible correspond à une forte valorisation des gains futurs, et vice-versa.

pour exprimer la part de marché (*PDM*) d'une technologie en fonction de son CGA moyen sur la population étudiée, de celui des autres alternatives et d'un paramètre γ exprimant l'hétérogénéité de marché dans lequel les choix technologiques ont lieu (cas des modèles CIMS [Rivers et Jaccard, 2005] et RES-IRF [Giraudet et al., 2011]), comme indiqué dans l'équation suivante :

Equation 23

$$PDM_i = \frac{CGA_i^{-\gamma}}{\sum_{k \in J} (CGA_k^{-\gamma})}$$

avec *PDM* la part de marché de la technologie *i*, *CGA* le coût global actualisé, *J* l'ensemble des options technologiques disponibles et $\gamma \in]0; +\infty[$ le paramètre d'hétérogénéité.

On observe ainsi que l'hétérogénéité du marché des technologies est explicite dans ce mode de reconstitution des parts de marché à l'échelle nationale alors qu'elle ne l'est pas dans les modèles de choix optimal (par minimisation du CGA) à l'échelle de segments. Or, les deux modes de reconstitution (économétrique et ingénieur) peuvent simuler des parts de marché semblables, en particulier si les modèles correspondants sont calibrés sur les mêmes données. On en déduit qu'une segmentation fine de la demande d'énergie (dans les modèles ingénieur) permet de reconstituer une certaine hétérogénéité du marché, de manière analogue au paramètre γ , alors que celui-ci n'est le plus souvent interprété que comme un indicateur de l'hétérogénéité des préférences des ménages dans les modèles économétriques. Cette apparente contradiction révèle donc des différences d'interprétations des origines de l'hétérogénéité d'un marché.

A partir de l'étude des éléments constitutifs du CGA, une analyse des sources d'hétérogénéité de celui-ci est présentée dans la section suivante, ce qui permet d'en proposer une décomposition faisant apparaître distinctement la contribution de la finesse de la description technologique de la demande énergétique et celle des préférences des ménages.

2.1.2. Hétérogénéité des éléments constitutifs du CGA

Le coût global actualisé d'un investissement dans une technologie *k*, perçu par un ménage *m*, se définit de la manière suivante :

Equation 24

$$CGA = I_0 + \sum_{i=1}^N \frac{C_i - B_i}{(1+a)^i}$$

avec I_0 le coût initial, C_i et B_i les coûts et bénéfices à l'année *i*, *N* la durée de vie de la technologie, *a* le taux d'actualisation

Les termes de ce coût peuvent ensuite être décomposés en leurs éléments constitutifs, comme présenté dans les Equations 25, 26 et 27 :

Equation 25

$$I_0 = CINV_k + PCI_{k,m} + RESID_{l,m} - PS_{k,m}$$

avec *CINV* le prix d'achat de la technologie *k*, *PCI* la valorisation (positive ou négative) des caractéristiques de *k* perçues par le ménage *m*, *RESID* la perte de valeur résiduelle si l'investissement concerne le renouvellement anticipé d'un équipement de l'infrastructure existante *l*, et *PS* la valorisation d'une éventuelle subvention par le ménage.

Equation 26

$$C_i = CENERG_{k,l,ep,ee,m} + CMAINT_k + PNEC_{k,m}$$

avec *CENERG* la facture énergétique annuelle dépendant de la technologie *k*, de l'infrastructure existante *l*, de l'environnement physique *ep*, de l'environnement économique *ee*, et de l'usage de l'équipement par le ménage, *CMAINT* le coût de maintenance annuel, *PNEC* les coûts non-énergétiques annuels perçus par le ménage.

Equation 27

$$B_i = PNEB_{k,m}$$

avec *PNEB* les bénéfices non-énergétiques annuels perçus par le ménage.

Enfin, la facture énergétique peut être elle aussi décomposée de la manière suivante :

Equation 28

$$\begin{aligned} CENERG_{k,l,ep,ee,m} &= CR \cdot PEN = CTH_{k,l,ep} \cdot I \cdot PEN \\ &= PERFTH_{k,l,ep} \cdot V_l \cdot I \cdot PEN \end{aligned}$$

avec *CR* la consommation énergétique réelle, *PEN* le prix de l'énergie, *CTH* la consommation d'énergie théorique, *I* l'intensité d'utilisation de la technologie par rapport à l'usage normal théorique, *PERFTH* la consommation théorique par unité de service, *V* le volume de service maximal

Cette décomposition permet d'observer que la consommation d'énergie (*CENERG*) et les préférences des ménages (que l'on peut assimiler à l'ensemble des perceptions des ménages, soit les termes *PCI*¹³³, *PS*, *PNEB* et *PNEC*¹³⁴) ne sont que deux sources d'hétérogénéité parmi d'autres du CGA d'une technologie sur une population. Tout d'abord, en ce qui concerne les variables définissant le coût initial, le prix d'une technologie n'est pas forcément constant selon le vendeur, et même selon l'acheteur pour un même vendeur. Par exemple, le prix des technologies liées au chauffage (isolation et systèmes) est une information peu accessible et très variable dans la littérature : les prix moyens publiés peuvent varier d'un facteur 3 pour une même technologie [Laurent et al., 2007], et la distribution de ces prix autour de la moyenne n'est mentionnée que de manière extrêmement rare. Cependant, les données détaillées de l'enquête *OPEN*¹³⁵ [OPEN, 2010] et celles d'EDF R&D indiquent que la distribution de ces prix peut être très large : l'écart-type du prix unitaire peut dans certains cas atteindre la valeur de la moyenne [Laurent et al., 2011]. L'étude particulière de cette hétérogénéité étant un élément assez novateur dans l'analyse du marché de la rénovation thermique des logements, elle fait l'objet de la section 2.2 de ce chapitre.

¹³³ Une étude détaillée des perceptions des technologies par les ménages peut être trouvée dans les travaux de Claudy et de ses collaborateurs [Claudy et al., 2011] concernant les technologies de micro-génération et dans ceux de Michelsen et Madlener au sujet des équipements de chauffage résidentiel [Michelsen et Madlener, 2011]. On retiendra que la valorisation des caractéristiques non-énergétiques influence très fortement les choix des ménages, pouvant faire varier le temps de retour accepté du simple au double pour un même coût d'investissement et bénéfice financier annuel.

¹³⁴ La lettre P désigne la perception : *PCI* (perceived characteristics of innovations), *PS* (perceived subsidy), *PNEB/C* (perceived non-energy benefits/costs).

¹³⁵ Demandant les factures de travaux d'amélioration énergétiques de logements à un échantillon de 30000 ménages.

D'autre part, la valeur résiduelle d'un équipement renouvelé peut être considérée comme nulle si la raison du renouvellement tient au fait que l'équipement n'est plus satisfaisant (ex : panne non réparable). Cependant, si le renouvellement d'un équipement est contraint, par exemple par une réglementation, alors que celui-ci est encore satisfaisant pour le ménage, alors la valeur résiduelle dépend de la durée de vie de l'équipement et du nombre d'année pendant lesquelles il aurait pu satisfaire le ménage¹³⁶. Le renouvellement contraint d'une technologie à un moment donné impliquerait donc un coût en valeur résiduelle dont le montant serait hétérogène au sein de la population car fonction de la durée de vie restante des équipements existants à renouveler.

On notera par ailleurs que l'investisseur n'est pas forcément celui qui profite des coûts et bénéfiques, ce qui constitue une situation d'incitations clivées (*split incentives*). Ainsi, un propriétaire non occupant ne percevra ni l'éventuelle augmentation de confort ni la réduction de facture énergétique consécutives à un choix de technologie énergétiquement efficace. Le seul bénéfice qu'il percevrait serait une augmentation de la valeur de son bien si l'amélioration de l'efficacité augmentait le consentement à payer des acheteurs potentiels de son bien. Cependant, la différence de consentement à payer des acheteurs et locataires entre une rénovation à haute performance et une rénovation standard apparaît assez faible (e.g. [Banfi et al., 2008] pour le cas particulier des fenêtres et des murs).

Parmi les variables liées aux ménages, le taux d'actualisation est lui aussi hétérogène au sein de la population. En effet, la littérature montre qu'il peut par exemple varier sensiblement selon le revenu des ménages [Hausman, 1979 ; Berkovec et al., 1983 ; Little, 1984 ; Cayla et al., 2011]. On notera que, dans le formalisme du CGA, le taux d'actualisation est le seul paramètre permettant de représenter la diversité des logiques d'investissement¹³⁷. Par ailleurs, pour une même technologie, les coûts et bénéfiques non-énergétiques sont aussi amenés à varier au sein d'une population. Par exemple, la perte d'espace consécutive à l'isolation par l'intérieur d'un logement peut être perçue comme une perte de valeur foncière. Or, le prix de l'immobilier varie sensiblement au sein de la population : la perte d'un m² à Paris peut annuler financièrement les gains sur facture énergétique d'une isolation par l'intérieur alors que la perte ne sera que marginale dans la plupart des maisons en tissu rural diffus où le prix de l'immobilier est très inférieur. Un autre exemple est celui du gain de confort consécutif à l'amélioration de l'isolation d'un logement, celui-ci étant plus important dans le cas où le logement est initialement très mal isolé. Enfin, le désagrément des travaux nécessaires à l'installation d'isolation par l'intérieur [van Oel, 2009] n'est pas perçu de la même manière pour les personnes habitant déjà dans le logement et pour celles qui y emménagent et peuvent donc prévoir une arrivée plus tardive sans subir le désagrément.

Une autre variable pouvant varier au sein d'une population et d'une technologie à l'autre est la perception des subventions potentiellement associées aux technologies les plus performantes. La littérature montre que les ménages peuvent valoriser une subvention à une hauteur supérieure à son montant réel, ce qui peut être appelé « effet d'annonce » [Kooimey, 2002]. Cependant, peu d'études mentionnent cette survalorisation et les valeurs trouvées sont assez variées. Ainsi, 1€ de subvention a le même effet qu'une réduction de 1,6€ du prix de vente pour les technologies de chauffage et d'isolation au Canada d'après Jaccard et Dennis (2006). En Allemagne, l'effet marginal de la variation d'un pourcent de subvention sur le choix du système de chauffage est le même que celui d'une baisse du prix de vente de 0,4% à 1,9% d'après Michelsen et Madlener (2011). L'effet d'annonce, mesuré aux Etats-Unis par Kooimey (2002), est du même ordre à deux fois plus important que le seul

¹³⁶ Un exemple de calcul de valeur résiduelle peut être trouvé dans [Polly et al., 2011].

¹³⁷ Cependant, la variété de ces logiques implique qu'elles ne peuvent pas toutes être exprimées sous cette forme. Il est ainsi difficile de représenter la rationalité limitée de certaines logiques d'achat qui peuvent conduire à ne considérer qu'une partie des options disponibles, comme dans le cas de la répétition des choix passés (e.g. [Wittman et al., 2006]) ou de l'imitation des choix de personnes proches (e.g. [Sopha, 2011]).

effet de réduction de prix selon la technologie étudiée. La perception des subventions semble donc pouvoir varier selon la technologie et la population étudiées, mais on retiendra que, de manière générale, un euro de subvention sur un équipement a plus d'effet sur les choix technologiques des ménages qu'un euro de baisse du prix de vente de cet équipement.

Enfin, la facture énergétique dépend non seulement de la performance de la technologie installée, du prix des énergies, ainsi que de l'environnement physique et de la performance de l'infrastructure existante¹³⁸ dans le cas des usages thermiques, ce qui est classiquement pris en compte dans les modèles *bottom-up* ingénieur, mais aussi de l'usage de l'infrastructure technique par les ménages. Or, comme cela a été présenté dans la section I, ces variables peuvent présenter des hétérogénéités fortes, même au sein de segments techniques finement décrits.

Comme cela a été présenté concernant l'hétérogénéité des déterminants directs de la consommation d'énergie, il est également important de prendre en compte le fait que les hétérogénéités observés du CGA ne sont pas indépendantes les unes des autres. Une reconstitution de l'hétérogénéité d'un marché ne peut être réalisée de manière fidèle si les ces corrélations ne sont pas prises en compte. Ainsi, parmi les modèles économétriques de la famille logit, certains prennent en compte le fait que certaines variables mesurées peuvent être hétérogènes et corrélées. C'est notamment le cas des modèles dits « *mixed logit* » (e.g. [Revelt et Train, 1998 ; Train , 2003], dont les résultats se révèlent plus explicatifs des observations que ceux des modèles plus standards de type « *multinomial logit* » (e.g. [Scarpa et Willis, 2010]). Du fait de la présence de corrélations entre les variables permettant de calculer le CGA d'une technologie, l'hétérogénéité de celui-ci est différente de celle que l'on pourrait calculer en utilisant la distribution de valeurs de chacun de ses éléments constitutifs de manière indépendante.

2.1.3. Proposition de décomposition de l'hétérogénéité d'un marché

La description des sources d'hétérogénéité par élément du coût global actualisé permet de décomposer en six composantes distinctes l'hétérogénéité globale d'un marché dans lequel les technologies se différencient essentiellement par leur performance énergétique:

- Déterminants directs des consommations d'énergie de l'infrastructure existante (environnement, performance, usage, durées de vie restantes des éléments constitutifs),
- Caractéristiques du bouquet technologique proposé par l'offre (performance, prix, accessibilité, caractéristiques non-énergétiques, subventions associées),
- Perceptions des caractéristiques des technologies et des coûts et bénéfices non-énergétiques par les ménages (confort, image, esthétique, dérangement, subventions, valeur patrimoniale...),
- Logiques d'achat (« algorithmes », préférence pour le présent...),
- Présence de corrélations entre les composantes précédentes,
- Résidu non expliqué par les éléments précédents.

¹³⁸ La valeur absolue des gains énergétiques consécutifs à l'amélioration de l'isolation dépend du rendement du système de chauffage, et vice-versa.

Cette décomposition peut être formalisée par l'Equation 29, en caractérisant chaque composante (hors corrélations) par une valeur h étant nulle quand aucune hétérogénéité n'est présente sur le segment étudié et prenant des valeurs positives dans le cas contraire :

Equation 29

$$\frac{1}{\nu} = h_{d\acute{e}term\ direct\ s} + h_{offre} + h_{perceptions} + h_{logique} + h_{inexpliqu\ ee} + corr\ elations$$

On notera que le terme de gauche de cette équation n'est pas ν mais son inverse. Ceci est dû au fait que dans le formalisme économétrique (Equation 23), une forte hétérogénéité du marché est caractérisée par des valeurs faibles de γ , et vice versa. La formulation par l'inverse de ν permet donc de définir une variable croissant avec l'hétérogénéité de chacune des composantes du marché. Cette forme permet d'observer que les modèles ingénieur *bottom-up* ne prennent généralement en compte que deux composantes de l'hétérogénéité du marché des technologies : celle de la demande d'énergie, par l'usage d'une segmentation fine du parc de logement, et celle des logiques d'achat par l'usage de taux d'actualisation potentiellement différents selon les segments. Cependant, on remarquera que l'hétérogénéité réelle de ces deux composantes n'est que partiellement reproduite car les segments sont généralement caractérisés par des valeurs moyennes autour desquelles une hétérogénéité subsiste¹³⁹.

A l'opposé, le paramètre d'hétérogénéité γ , utilisé dans les modèles économétriques de type logit se basant sur le calcul de CGA moyens pour attribuer les parts de marché des technologies, ne capte pas uniquement l'hétérogénéité des préférences des ménages (terme sous lequel on peut regrouper au plus l'hétérogénéité de leur perception des technologies, celle de leur logique d'achat et l'hétérogénéité inexpliquée). Le paramètre ν du modèle économétrique reflète bien l'hétérogénéité globale du marché, celle-ci étant la résultante de chacune des composantes mentionnées et pas seulement de celles relatives aux perceptions des ménages. Par conséquent, ce paramètre n'est pas spécifique à un ensemble de ménages mais à un ensemble constitué des ménages, de l'infrastructure technique dans laquelle ils vivent et de l'offre technologique existante. Il apparaît donc que sa valeur n'est pas indépendante de la finesse du segment technique sur lequel les calculs de CGA moyens sont réalisés pour alimenter la fonction logit définissant les parts de marché.

2.2. Hétérogénéité du prix des équipements (à performance donnée) : étude du cas particulier du chauffage résidentiel

2.2.1. Observation et modélisation de la distribution des prix des technologies liées au chauffage résidentiel

L'hétérogénéité du prix d'un équipement, pour une performance donnée, est une information mal connue, ce qui peut expliquer son absence dans les modèles de simulation de choix technologique. Or, comme cela a été montré précédemment, sa prise en compte peut modifier sensiblement les parts de marché simulées. A partir de données non publiques, propriété d'EDF R&D, concernant l'installation de systèmes de chauffage et la pose de matériaux d'isolation, nous avons pu

¹³⁹ Par exemple les coefficients de transfert thermique des murs peuvent varier sensiblement d'un logement à l'autre pour un même matériau utilisé et une même période de construction [Rye, 2011].

étudier cette hétérogénéité, la modéliser et l'intégrer à un modèle de choix technologique individuel. La Figure 81 présente la distribution des prix, à performance donnée, qui a été observée sur la majorité des équipements étudiés. Cette forme peut être modélisée par une fonction log-normale (Equation 30). La distribution de prix de chaque technologie peut alors être caractérisée par le prix moyen μ et l'écart-type σ de ce prix.

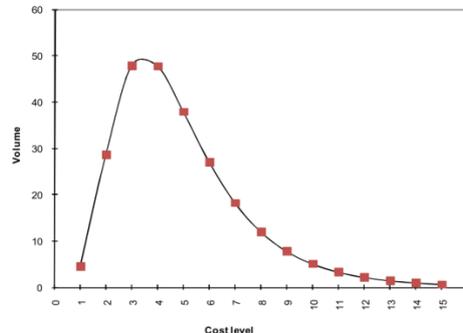


Figure 81 : Histogramme des coûts de rénovation observés [Laurent et al., 2011]

Equation 30

$$Freq(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[\ln(x) - \mu]^2}{2\sigma^2}\right)$$

avec x le prix de l'équipement, $Freq$ la proportion des équipements vendus au prix x , μ le prix moyen, σ l'écart-type du prix

Les observations montrent que le ratio entre l'écart-type du prix de vente et le prix de vente moyen varie entre 0,3 et 1 au sein des différentes technologies. Par ailleurs, l'installation de systèmes de chauffage présente un ratio $\frac{\sigma}{\mu}$ inférieur à celui de la pose de matériaux d'isolation, tandis que la part du prix relative aux matériaux et équipements présente un ratio inférieur à celle attribuée à la main d'œuvre. Ces ratios présentent des valeurs que l'on peut considérer comme élevées car on pourrait s'attendre à ce que le prix d'équipement d'efficacité énergétique dépende en grande partie de la performance. En effet, les caractères non énergétique (esthétique, image de marque...) sont a priori moins importants pour les systèmes de chauffage et l'isolation que pour des biens plus visibles (voiture, réfrigérateur...) pour lesquels on comprendrait que la performance énergétique n'ait un impact que marginal sur le prix de vente. Force est donc de constater que, même à performance énergétique donnée d'équipements rendant un service énergétique coûteux et étant très peu visibles, les prix de vente observés en France sont très hétérogènes.

Deux explications théoriques de cette observation peuvent être avancées : une discrimination par les prix et une situation d'oligopole en concurrence par les prix avec contrainte de capacité. La discrimination par les prix résulte du fait que le consentement à payer pour un bien est réparti de manière hétérogène au sein de la population et que les vendeurs peuvent avoir comme stratégie de maximiser leurs bénéfices en proposant des prix différents pour des biens semblables (en ajustant les prix en fonction du consentement à payer des acheteurs). Trois « degrés » de discrimination sont distingués en théorie économique :

- Dans le cas de discrimination de premier degré, le vendeur connaît le consentement à payer du client et fixe un prix égal à celui-ci. Ce type de discrimination ne peut toucher les biens dont le prix est fixé à l'avance (sur catalogue par exemple) mais touche les biens dont la fixation du prix relève de la négociation, ce qui est le cas d'une partie non négligeable des prestations de rénovation thermique.

- La discrimination de deuxième degré consiste à proposer une tarification non linéaire du bien, proposant par exemple un prix dégressif avec la quantité demandée (forfaits mobiles, vente liée).
- Dans le cas de la discrimination de troisième degré, le vendeur propose des prix différents pour un même bien selon les caractéristiques observables du client.

Si la discrimination par les prix de deuxième degré ne semble pas correspondre à la situation du marché de la rénovation thermique, les discriminations de premier et troisième degré reflètent une partie des phénomènes qui peuvent être observés sur ce marché. En effet, certaines observations semblent indiquer que le prix de vente d'une rénovation de logement est généralement indexé sur le revenu du client¹⁴⁰.

La deuxième explication apparaît si l'on utilise le modèle d'oligopole de Bertrand pour décrire le marché de la rénovation, dans lequel a lieu une concurrence par les prix. Dans ce cadre de modélisation, s'il existe des contraintes de capacité pour les vendeurs, alors plusieurs prix peuvent coexister pour le même bien sur le marché [Jacques, 2009]. En effet, l'entreprise proposant les prix les plus bas ne peut satisfaire qu'un nombre limité de clients et le reste de la demande est contraint à se tourner vers des concurrents pouvant alors pratiquer des tarifs plus élevés pour le même service proposé. Or, le marché de la rénovation thermique des logements est composé en grande partie d'entreprise de petite taille dont la capacité à augmenter la production de services pour répondre à une demande accrue est limitée, ce qui se traduit par une disponibilité limitée et des temps d'attente pour les particuliers pouvant aller jusqu'à plusieurs mois. A défaut d'avoir réalisé une modélisation détaillée de ce marché, l'interprétation de l'hétérogénéité des prix pour cause de contrainte de capacité apparaît plausible.

2.2.2. Influence sur les parts de marché simulées

a) Description du modèle de simulation des choix technologiques

Pour observer l'influence de l'introduction de l'hétérogénéité des prix sur les parts de marché des technologies, un modèle de simulation de choix technologique¹⁴¹ a été utilisé. Dans ce modèle, les ménages, logements et équipements sont ceux issus des questionnaires de l'enquête EDF R&D 2009, soit 914 ménages après exclusion des réponses aberrantes et des non-réponses¹⁴². Une pondération a été définie de manière à rendre ces logements représentatifs de la population française. Ces ménages rénovent un élément du logement (système ou élément du bâti) lorsque celui-ci arrive en fin de vie¹⁴³. Ils peuvent alors choisir entre trois niveaux de performance caractérisés par un couple {prix ; performance}. Les prix moyens par type de rénovation et par niveau de performance sont issus de données non publiques de l'enquête OPEN 2008. L'hétérogénéité des prix est modélisée par la distribution log-normale présentée précédemment, dont le ratio entre l'écart-type et la moyenne est un paramètre du modèle. Les trois niveaux de performance correspondent aux niveaux « basic », « medium » et « optimum » de la même enquête, et la

¹⁴⁰ Dont l'estimation relève de lois empiriques le liant par exemple au modèle de la voiture du client et à l'aspect global de son logement.

¹⁴¹ Voir chapitre suivant pour plus de détails sur ce modèle.

¹⁴² Y compris la non-réponse concernant la facture de chauffage, ce qui exclut les logements équipés de chauffage collectif. Pour plus de détails sur la sélection des questionnaires retenus, voir [Cayla et al., 2010].

¹⁴³ Les durées de vie ont été calculées à partir des flux de rénovation observés dans l'enquête OPEN 2008 [OPEN, 2010] d'après la méthodologie décrite dans [Laurent et al., 2011].

performance technique de chaque niveau de performance est celle de l'équipement principal de la catégorie (par exemple : « pompe à chaleur air-air » pour la catégorie « pompe à chaleur »).

Les consommations énergétiques correspondant aux différentes combinaisons possibles de leurs déterminants (performance du bâti, de l'équipement de chauffage, rigueur climatique, prix des énergies) sont calculées grâce au modèle présenté dans le chapitre précédent, soit le produit de la consommation normée de chauffage (calculée à l'aide du DPE) et de l'*intensité d'utilisation* (telle que définie dans le chapitre précédent). Les consommations de chauffage simulées incluent donc l'effet rebond, la malfaçon et le biais de modèle. Cela sous-entend que les ménages prennent en compte ces trois effets pour leur prise de décision, ce qui est une hypothèse forte d'information parfaite. L'objectif des simulations étant d'observer l'effet relatif de l'hétérogénéité des prix des gestes de rénovation sur les parts de marché par niveau de performance, les autres paramètres peuvent être fixés de manière normée sans trop altérer la qualité des résultats. Dans ce cadre, les coûts et bénéfices non-énergétiques ainsi que le montant des subventions proposées ont été fixés à des valeurs nulles pour plus de simplicité.

Les taux d'actualisation utilisés dans la simulation sont répartis sur la population de sorte que les ménages les moins aisés aient des taux d'actualisation plus élevés que les ménages les plus riches, et que les ménages de revenu moyen aient un taux d'actualisation de 12%. Le choix de cette valeur nous situe plutôt dans la fourchette basse des valeurs de la littérature relative aux taux d'actualisation implicites concernant l'achat d'équipement de chauffage et d'isolation [Dubin et McFadden, 1984 ; Train, 1985 ; Jaccard et Dennis, 2006], mais correspond à la rentabilité exigée d'un renouvellement d'équipement de chauffage déclaré par les ménages de revenu moyen dans l'enquête de Cayla (2011). Le choix d'un taux d'actualisation peu élevé est par ailleurs justifié par le formalisme de la représentation des éléments du CGA présenté précédemment. En effet, les valeurs élevées de taux d'actualisation sont dues au fait que ce taux capte l'ensemble des barrières à l'efficacité énergétique [Jaffe et Stavins, 1994] lorsque les seules composantes représentées du CGA sont le prix des équipements et les gains financiers dus aux équipements efficaces. Or, une partie de ces barrières est représentée par d'autres variables dans la décomposition du CGA proposée dans ce chapitre (hétérogénéité des préférences, caractéristiques des technologies dont leur accessibilité, perceptions des caractéristiques des technologies intégrant le fait que l'information des ménages peut être biaisée). Quant à la distribution des taux d'actualisation au sein de la population, celle-ci a été effectuée en attribuant des taux différents à chaque quintile de revenu à partir d'un ratio constant de taux d'actualisation entre deux quintiles successifs. Ce ratio est une représentation simplifiée des observations faites par Hausman (1979), à partir desquelles on peut calculer la valeur moyenne de ce ratio (0,6). Ainsi, dans le modèle, le quintile médian a un taux d'actualisation de 12%, à partir duquel les taux d'actualisation des autres quintiles sont calculés. Par exemple, le deuxième quintile (plus riche que le médian) a un taux d'actualisation de 7,2% (=12% x 0,6).

b) Introduction de l'hétérogénéité des prix des rénovations

Dans notre modèle, pour simuler la présence de prix hétérogènes pour un même équipement, les ménages ne paient pas le prix moyen de celui-ci mais tirent aléatoirement un prix dans la distribution définie par la fonction log-normale décrite par le prix moyen de l'équipement et l'écart-type de ce prix. Lors d'une rénovation, le ménage a le choix entre trois niveaux de performance et réalise un tirage aléatoire du prix de chacun des niveaux. Si les prix sont suffisamment hétérogènes, il est alors possible que le prix tiré de l'équipement le plus performant soit inférieur au prix tiré de l'équipement standard (Figure 82).

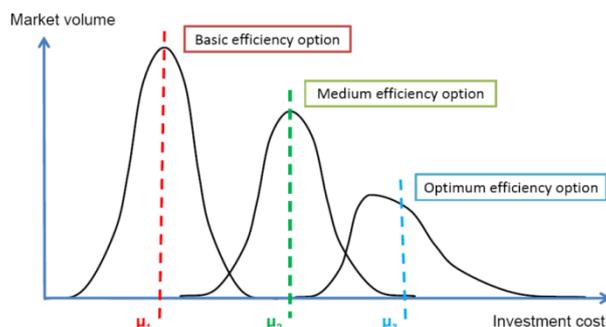


Figure 82 : Distribution de probabilité des prix correspondant à trois niveaux de performance pour un même type de rénovation [Laurent et al., 2011]

Pour prendre en compte le fait que la distribution des prix puisse être due à une discrimination par les prix, deux cas de figure ont été simulés :

- chaque ménage réalise un tirage aléatoire dans l'intégralité de la distribution des prix de chaque option, comme décrit précédemment. Dans ce cas, aucune discrimination par les prix n'est présente.
- le tirage est contraint par le revenu du ménage : si un ménage appartient au i -ème quartile de revenu, alors le tirage aléatoire n'est effectué qu'au sein du i -ème quartile de prix. Plus un ménage a un revenu élevé, plus le vendeur lui proposera un prix élevé pour un même bien.

Ce dernier cas reflète la situation dans laquelle le vendeur d'équipement arrive, à partir de caractéristiques observables du client (par exemple en estimant la valeur de sa voiture ou de son logement), à définir le prix qu'il va proposer au client (en proposant dans le cas présent un prix plus élevé aux ménages les plus aisés), ce qui caractérise une situation de discrimination de troisième degré.

c) Résultats

Les résultats de simulations, présentés sur la Figure 83, montrent que l'introduction de l'hétérogénéité des prix des rénovations peut avoir une très forte influence sur les parts de marché simulées. Son effet est dans le fond le même que celui de l'introduction d'une autre forme d'hétérogénéité dans le sens où plus l'hétérogénéité est forte, plus les parts de marché des technologies les moins compétitives (celles présentant les CGA les plus élevés) sont importantes. On peut ainsi observer que sans l'introduction de l'hétérogénéité des prix, les technologies les plus performantes ne sont que très peu choisies (les calculs présentés sont réalisés en l'absence de subventions). La comparaison des deux cas simulés montre que l'introduction d'une corrélation entre le prix de vente et le revenu des ménages diminue sensiblement l'effet de l'introduction de l'hétérogénéité du prix des rénovations. En effet, l'introduction de la corrélation entre le prix des équipements (pour une performance donnée) et le revenu des ménages diminue sensiblement la diversité des prix qui peuvent être proposés à un ménage. Avec cette corrélation, il est beaucoup moins probable pour un ménage de se voir proposer un prix très bas pour un équipement performant et un prix très haut pour un équipement standard. Or, ce sont ces cas extrêmes, d'autant plus fréquents que les prix sont hétérogènes, qui expliquent l'augmentation de la part de marché des équipements performants lorsqu'on augmente l'hétérogénéité des prix des équipements, à performance donnée.

Ces résultats illustrent par conséquent le dilemme auquel est confrontée la modélisation *bottom-up* ingénieur des hétérogénéités d'un marché. Toute représentation de l'hétérogénéité d'une des variables utilisées pour le calcul du CGA peut modifier sensiblement les résultats de simulation. Cependant cet effet peut être largement surestimé si les corrélations entre variables manipulées ne sont pas connues ou prises en compte. Ce constat conduit donc à être très précautionneux lors de la modélisation des hétérogénéités observées, et à ne considérer les résultats comme réalistes qu'à condition d'avoir une mesure connue des corrélations existantes entre la variable détaillée et d'autres éléments du modèle.

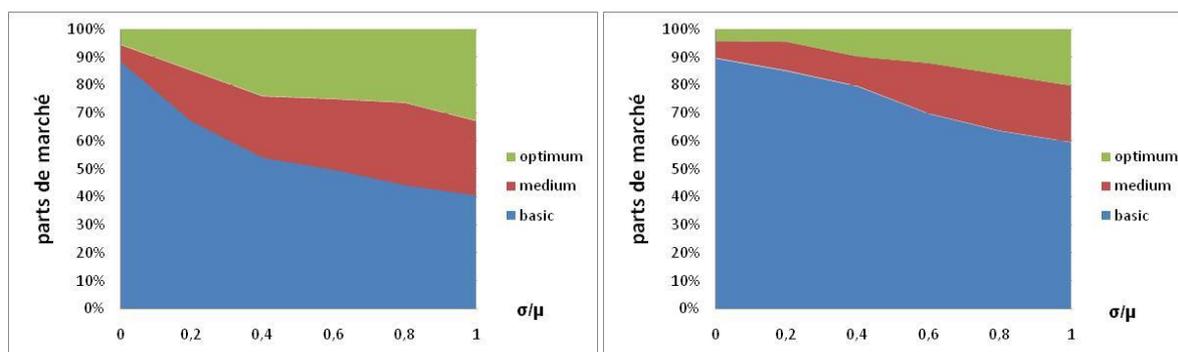


Figure 83 : Parts de marché simulées des différents niveaux de performance énergétique des rénovations selon l'hétérogénéité des prix. A gauche : cas général, tirage aléatoire du prix dans sa distribution. A droite : tirage aléatoire sous contrainte, un ménage du i -ème quartile de revenu réalise un tirage dans le i -ème quartile de prix.

2.2.3. Influence sur l'effet de subventions à la performance énergétique

En politique publique, un instrument visant à atteindre une certaine cible (efficacité énergétique, niveau absolu de consommation d'énergie ou d'émissions de gaz à effet de serre) est évalué à partir des critères d'efficacité (quel niveau de réalisation additionnel par rapport à une référence ?), de coût-efficacité (à quel coût le niveau de réalisation est atteint ?) et d'efficacité (le niveau de réalisation atteint dégage-t-il des bénéfices sociaux nets?) [Giraudet, 2011]. Cette section montre comment l'hétérogénéité du marché influence la capacité d'une subvention donnée à transformer le marché¹⁴⁴ pour un coût donné¹⁴⁵.

Par ailleurs, une étude du critère de coût-efficacité d'une subvention est proposée dans le cas particulier où cette subvention consiste en une réduction en pourcentage du prix de vente des équipements. Enfin, un mécanisme innovant de subvention est proposé, dans lequel le pourcentage de réduction proposé dépend du prix auquel l'équipement est vendu au client : à performance donnée, plus l'équipement est cher, plus la subvention (en pourcentage du prix de vente) est faible. Ce mécanisme, étudié à titre « exploratoire », permettrait, de rendre les équipements énergétiquement efficaces plus accessibles aux ménages dont les capacités d'investissement sont limitées, tout en réduisant le surcoût associé à la subvention des équipements vendus aux prix les plus élevés.

¹⁴⁴ Autrement dit l' « efficacité » de la subvention, soit le niveau de réalisations additionnelles par rapport à une situation de référence.

¹⁴⁵ Autrement dit le rapport « coût-efficacité » de la subvention, soit à quel coût le niveau de réalisations additionnelles a été atteint.

a) *Influence sur le critère d'efficacité*

L'objectif d'une subvention consiste à rendre plus intéressantes pour les ménages les options technologiques énergétiquement performantes par rapport au standard du marché. Ceci peut être représenté par une réduction du coût global actualisé qui peut être atteinte soit en réduisant le coût initial (ex : CIDD), soit en réduisant les coûts annuels (ex : prêt à taux préférentiels). On peut modéliser de manière élémentaire le marché avec deux biens A et B, présentant un CGA égal et des parts de marché égales, avec A le bien standard, caractérisé par un faible coût d'investissement et des consommations énergétiques élevées, et B le bien énergétiquement performant, caractérisé par un coût d'investissement élevé mais des consommations énergétiques réduites. Dans ce cas, l'apport d'une subvention pour le bien B implique que le ratio entre le CGA du bien A et celui du bien B devienne supérieur à 1. Si l'on utilise la formule déterminant les parts de marché des options technologiques en fonction de leurs CGA (Equation 23) alors on observe que l'effet de la subvention sur l'évolution de la part de marché du bien B dépend du paramètre d'hétérogénéité utilisé dans la formule, ce qui est illustré par la Figure 84. Cette figure montre qu'une subvention augmentant de 1 à 1,2 le ratio entre le CGA du bien A et celui du bien B impliquera une augmentation de 13%, 20% ou 35% selon si le paramètre d'hétérogénéité prend la valeur 3, 5 ou 10. On observe donc que, pour un même niveau de subvention, plus un marché est hétérogène, plus l'augmentation de parts de marché de la technologie subventionnée est faible, et donc moins la subvention est efficace et coût-efficace.

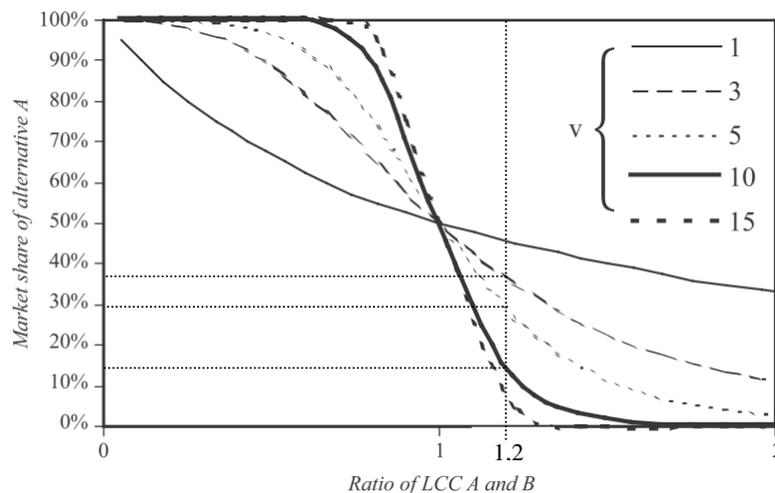


Figure 84 : Effet de l'hétérogénéité sur l'estimation, par l'Equation 23, des parts de marché de deux biens (A et B) caractérisés par leur coût global actualisé (LCC en anglais) [Rivers et Jaccard, 2005]

b) *Influence du prix de vente sur la coût-efficacité de la subvention d'un équipement*

Parmi les formes existantes de subvention, la forme aujourd'hui majoritaire consiste à proposer une réduction du prix d'achat des équipements efficaces, exprimée en pourcentage du prix de vente de ces équipements. Cela implique que la dépense de subvention en valeur absolue, pour installer le même équipement soit proportionnelle au prix de vente de celui-ci. Si ce prix est hétérogène, alors l'entité qui propose la subvention dépensera de fait sensiblement plus pour subventionner les équipements vendus aux prix les plus élevés que pour ceux vendus à prix inférieur. Afin de quantifier ces différences de dépenses pour subventionner des équipements de même performance avec un même pourcentage de réduction sur le prix de vente, nous avons segmenté la distribution de prix des équipements en quatre quartiles (Q1,...,Q4), tels que décrits sur la Figure 85.

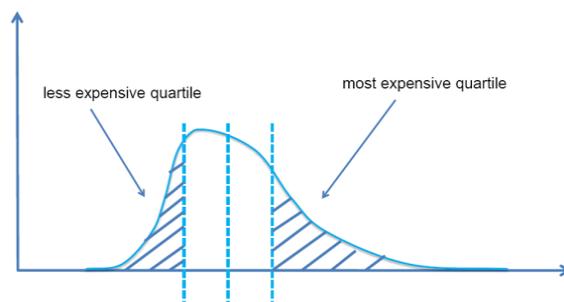


Figure 85 : Quartiles de la distribution de prix

A partir de ce découpage, le ratio $\frac{\text{SUBQ } 4}{\text{SUBQ } 1}$ entre la dépense totale associée à la subvention du premier quartile et celle associée au dernier quartile a été calculée en fonction de l'hétérogénéité du prix des équipements (exprimée par le ratio $\frac{\sigma}{\mu}$). Les résultats de ce calcul, présentés sur la Figure 86, permettent d'observer que, dans l'intervalle des valeurs que prennent ce ratio dans les différentes filières de la rénovation thermique (entre 0,3 et 1), l'entité fournissant les subventions dépense entre 2 fois et 8 fois plus d'argent pour subventionner les équipements dont le prix de vente est le plus élevé (Q4) que pour subventionner les moins onéreux (Q1), alors que les résultats en termes d'économies d'énergies sont théoriquement les mêmes. Le caractère coût-efficace (*cost-effectiveness*) d'une subvention en pourcentage peut donc être très inférieur pour le dernier quartile de prix que pour le premier quartile. Se pose alors la question, pour le pourvoyeur de subventions, de la pertinence de dédier un flux financier plus important aux installateurs proposant les prix les plus élevés pour un même niveau de performance. Cela peut se justifier dans le cadre de la création d'un marché pour une technologie performante émergente, dans lequel les nouveaux entrants peuvent pratiquer des marges élevées pour se couvrir d'un risque encore mal maîtrisé. Dans ce cas, le flux financier de subventions supplémentaires associé aux prix les plus élevés peut être justifié par le fait qu'il apporte une aide aux nouveaux entrants et favorise donc le développement du marché. A l'inverse, dans le cas du marché d'une technologie mature, il est difficile de justifier le fait de dédier une quantité de subventions plus importante à une partie du marché alors que sa contribution à l'atteinte de la cible visée par la subvention est la même que le reste du marché. L'isolation des murs étant le type de rénovation qui présente la plus grande hétérogénéité de prix et une certaine maturité¹⁴⁶, les résultats présentés permettent d'apporter une explication possible à la décision récente du gouvernement français de fixer des seuils maximum de prix d'isolation par unité de surface concernant l'isolation par l'intérieur et l'extérieur [Finances, 2010 ; JORF, 2010]. Au-delà de ces seuils, la subvention n'est plus proportionnelle au prix réel mais fixée à sa valeur maximale.

¹⁴⁶ L'isolation des murs par l'intérieur a été développée fortement au cours des années 1970 par l'introduction de la réglementation thermique des logements neufs, et peut donc aujourd'hui être considérée comme mature. Cependant, l'isolation des murs par l'extérieur est encore une filière récente en France (à l'opposé de l'Allemagne) et ne peut donc être considérée comme mature. Elle représentait moins de 1,5% des surfaces de murs isolées en 2006 et 4,4% en 2008 (hors isolants en matières végétales et animales) [OPEN, 2009].

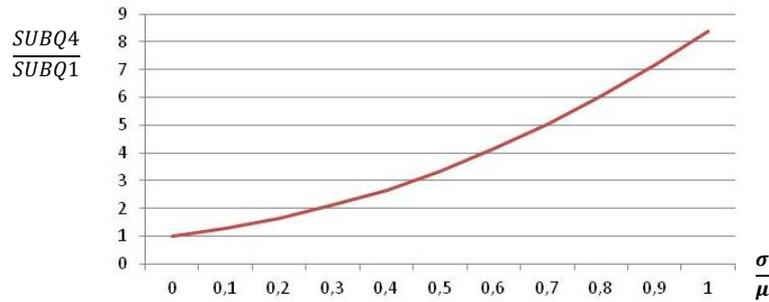


Figure 86 : Rapport entre le coût de subventionner les 25% d'équipements les plus chers et les 25% les moins chers, en fonction de l'hétérogénéité des prix des équipements concernés (avec μ le prix moyen et σ l'écart-type)

Conclusion

Ce chapitre a illustré dans quelle mesure la représentation de l'hétérogénéité des déterminants des consommations énergétiques et des choix technologiques dans les modèles *bottom-up* ingénieur est nécessaire au réalisme de ces modèles, à la fois pour l'estimation d'une consommation d'énergie à un instant t et pour l'estimation de la dynamique des consommations. Cependant, ce chapitre a également mis en relief à quel point les résultats de simulation sont sensibles à la façon dont les différentes valeurs d'une variable sont réparties au sein de la population, soulignant les précautions nécessaires lors de la modélisation de l'hétérogénéité d'une variable.

Dans le cas de l'estimation de la consommation d'énergie à un instant t , les travaux présentés ont montré que l'utilisation de valeurs moyennes pour décrire la performance thermique des bâtiments ne biaisait pas les résultats de modèles linéaires de thermique, tels ceux utilisés à l'échelle nationale, mais représentait une approximation d'ampleur mal connue des résultats de modèles thermiques plus fidèles aux lois de la physique. Un travail de comparaison de résultats de modèles thermiques détaillés et de modèles linéaires sur un ensemble de cas hétérogènes semble nécessaire pour évaluer avec précision le biais introduit par la linéarisation des lois de la thermique et par l'utilisation de valeurs moyennes pour décrire la performance du bâti des logements. Deux hétérogénéités apparaissent assez mal connues : celle de la performance réelle des équipements (systèmes de chauffage et isolation) au sein d'une même catégorie technique (telle que décrite dans les bases de données techniques, par exemple définie par la période de construction du logement, sa zone climatique et l'énergie de chauffage), et celle des comportements quotidiens réels.

En ce qui concerne les choix technologiques des ménages, l'analyse proposée dans ce chapitre permet d'observer comment les modèles de type économétrique et ceux de type ingénieur reconstituent les parts de marché des différentes technologies à partir de l'introduction d'hétérogénéités de types différents. Si les modèles économétriques de type logit représentent l'hétérogénéité globale d'un marché, ils n'en distinguent généralement pas les différentes composantes. A l'inverse, les modèles *bottom-up* ingénieur représentent explicitement les hétérogénéités de plusieurs variables (le climat, la performance et plus rarement l'utilisation des équipements et les logiques d'achat) mais celles-ci ne permettent d'expliquer qu'une partie de l'hétérogénéité du marché des technologies existantes. En effet, l'hétérogénéité des prix des équipements et celle des préférences individuelles sont le plus souvent absentes des modèles de simulation *bottom-up* ingénieur malgré leur importance.

L'analyse proposée dans ce chapitre permet de souligner que l'introduction d'hétérogénéités non liées à la seule demande d'énergie apparaît incontournable pour pouvoir réaliser de manière satisfaisante des évaluations *ex ante* de subventions à l'aide de modèles *bottom-up* ingénieur. Cependant, les résultats présentés montrent aussi que leur introduction est un exercice difficile demandant une connaissance approfondie du secteur résidentiel et des corrélations entre les variables manipulées. Les travaux présentés montrent par exemple que la présence de discrimination par les prix, si elle était avérée, changerait sensiblement les résultats du modèle par rapport à une situation où les prix proposés aux ménages sont indépendants d'autres variables. Ceci souligne la nécessité d'une étude complémentaire sur les corrélations éventuelles entre prix de vente d'un équipement, à performance donnée, et le revenu du client.

Bibliographie

Allibe, B., D. Osso, M-H. Laurent, 2010, "Modélisation thermique du chauffage individuel : d'un logement unique à l'ensemble du parc", Conférence IBPSA France, Moret-sur-Loing, 9-10 novembre 2010

Auffhammer, A., A.H. Sanstad, 2011, "Energy Efficiency in the Residential and Commercial Sectors", backgrounder paper, Resource For the Future, janvier 2011

Banfi S., M. Farsi, M. Filippini, M. Jakob, 2008, "Willingness to pay for energy-saving measures in residential buildings", *Energy Economics*, 30, 503-516

Berkovec, J., J. Hausman, J. Rust, 1983, "Heating System and Appliance Choice", Report Number MIT-EL 83-004WP, MIT Energy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge

Callonnec, G., 2011, Présentation orale de l'outil MENFILS au CSTB, Paris, 2011

Cayla, J-M., B. Allibe, M-H. Laurent, 2010, "From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption", *Proceedings of the ACEEE Summer Study on Buildings*, 15–20 août 2010, Pacific Grove, États-unis

Cayla, J-M., 2011, "Les ménages sous la contrainte carbone – Exercice de modélisation prospective des secteurs résidentiel et transports avec TIMES", thèse de doctorat soutenue le 3 mars 2011

Cayla J.-M., N. Maizi, C. Marchand, 2011, "The role of income in energy consumption behavior: Evidence from French households data", *Energy Policy*, 39, 7874-7883

[CEREN, 2007] : Ré-estimation en 2005 de la consommation d'électricité par usage final, CEREN, Ref FL/07.074, étude 6104, octobre 2007

Claudy, M.C., C. Michelsen, A. O'Driscoll, 2011, "The diffusion of microgeneration technologies – assessing the influence of perceived product characteristics on home owners' willingness to pay", *Energy Policy*, 39, 1459-1469

Déqué, F., F. Ollivier, A. Poblador, 2000, "Grey boxes used to represent buildings with a minimum number of geometric and thermal parameters", *Energy and Buildings*, 31, 29–35

Dietz, T., G.T. Gardner, J. Gilligan, P. C. Stern, M. P. Vandenberg, 2009, "Household actions can provide a behavioral wedge to rapidly reduce US carbon emissions". Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 106, 18452-18456

Dubin, J.A., D.L. McFadden, 1984, "An econometric analysis of residential electric appliance holdings and consumption", *Econometrica*, 52(2):345-362

[Enertech, 2008] Mesure de la consommation des usages domestiques de l'audiovisuel et de l'informatique - Projet REMODECE, Rapport Final, Enertech, pour EDF, ADEME et l'Union Européenne, projet européen n° EIE/05/124/SI2.419657, juillet 2008

[Finances, 2010] Loi n° 2010-1657 du 29 décembre 2010 de finances pour 2011

Giraudet L.-G., 2011, "Les instruments économiques de maîtrise de l'énergie : Une évaluation multidimensionnelle", Thèse de doctorat soutenue le 28 mars 2011, 283 p

Giraudet, L-G., C. Guivarch, P. Quirion, 2011, "Exploring the potential for energy conservation in French households through hybrid modeling", DT/WP No 2011-26

Hausman, J.A., 1979, "Individual discount rates and the purchase and utilization of energy-using durables", *The Bell Journal of Economics*, 10, 33-54

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

Jacques, A., 2009, *Chapitre 4: L'oligopole, Partie 2 : Concurrence à la Bertrand*, Université de la Réunion, 29 septembre 2009

Jaffe, A.B., R.N. Stavins, 1994, "The energy-efficiency gap. What does it mean?", *Energy Policy*, 22, 804-881

[JORF, 2010] Arrêté du 30 décembre 2010 pris pour l'application de l'article 200 quater du code général des impôts relatif au crédit d'impôt sur le revenu en faveur des dépenses d'équipement de l'habitation principale au titre des économies d'énergie et du développement durable et modifiant l'article 18 bis de l'annexe IV à ce code. Journal Officiel de la République Française n°0303 du 31 décembre 2010 page 23616 texte n° 145

Kelly, S., 2011, "Do homes that are more energy efficient consume less energy? A structural equation model for England's residential sector", EPRG Working Paper 1117, Cambridge Working Paper in Economics 1139, mai 2011

Koomey, J., 2002, "From My Perspective: Avoiding "The Big Mistake" in Forecasting Technology Adoption", *Technological Forecasting and Social Change*, 69, 511-518

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 2007 summer study, 571-581

Laurent, M-H., B. Allibe, D. Osso, 2011, "Energy efficient technologies for all! Testing the efficiency of an innovative conditional subsidy on refurbishment market", Proceedings of the ECEEE 2011 Summer Study, paper 2-231

Little, A.D., 1984, "Measuring the Impact of Residential Conservation Programs: An Econometric Analysis of Utility Data", Volume VIII, Final Report for RP1587, Electric Power Research Institute, Palo Alto

Marchand C., M.-H. Laurent, R. Rezakhanlou et Y. Bamberger, 2008, "Le bâtiment sans énergies fossiles ? Les bâtiments pourront-ils se passer des énergies fossiles en France à l'horizon 2050?", *Futuribles*, n° 343, juillet 2008, pp. 79-100

[MECSL, 2008] Ministère de l'Emploi, de la Cohésion Sociale et du Logement, Arrêté du 6 mai 2008 portant confirmation de l'approbation de diverses méthodes de calcul pour le diagnostic de performance énergétique en France métropolitaine, NOR DEVU0810970A, JORF n°0114 du 17 mai 2008, page 8063, 96p

Michelsen, C.C., R. Madlener, 2011, "Homeowners' Preferences for Adopting Residential Heating Systems: A Discrete Choice Analysis for Germany", Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN), FCN Working Paper No. 9/2011, mai 2011

[MURE, 1999] : MURE database tutorial—Household sector. <http://www.mure2.com/downloads/Muretut.pdf>

[OPEN, 2008a] Observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement, rapport final, Marché N°0604C0043, réalisé pour le compte de l'ADEME, 147 p., mars 2008

[OPEN, 2008b] Observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement, résultats de la campagne 2007, 28 p., décembre 2008

[OPEN, 2010] Observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement, campagne 2009, résultats 2006-2008, 28 p., avril 2010

Parti, M., C. Parti, 1980, "The Total and Appliance-Specific Conditional Demand for Electricity in the Household Sector", *The Bell Journal of Economics* 11(1), 309-321.

Polly, B., M. Gestwick, M. Bianchi, R. Anderson, S. Horowitz, C. Christensen, R. Judkoff, 2011, A Method for Determining Optimal Residential Energy Efficiency Retrofit Packages. DOE/GO-102011-3261. Golden, CO: U. S. Dept. of Energy/National Renewable Energy Laboratory. 79 pp

Revelt, D., K.E. Train, 1998, "Mixed Logit With Repeated Choices: Households' Choices Of Appliance Efficiency Level," *The Review of Economics and Statistics*, MIT Press, vol. 80(4), pages 647-657

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

Rye, C., 2010, The SPAB research report 1 - U-value report, octobre 2010

Scarpa, R., K. Willis, 2010, "Willingness-to-pay for renewable energy: Primary and discretionary choice of British households' for micro-generation technologies", *Energy Economics*, 32, 129-136

Schnieders, J., A. Hermelink, 2006, "CEPHEUS results: measurements and occupants' satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building", *Energy Policy*, 34(2), 151-171

Sopha, B.M., 2011, "Agent-Based Modeling and Simulation of Clean Heating System Adoption in Norway", thèse de doctorat, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, mars 2011

Train, K., 1985, "Discount rates in consumer's energy-related decisions: A review of the literature", *Energy*, 10(12), 1243-1253

Train, K., 2003, "Discrete Choice Methods with Simulation", Cambridge University Press

Van Oel, C.J., A. Bogerd, G.J. de Haas, 2009, "Occupant-owners preferences in decision making of low energy renovation concepts", Proceedings of the 2009 ECEEE Summer Study, France

Wittmann, T., R. Morrison, J. Richter, T. Bruckner, 2006, "A bounded rationality model of private energy investment decisions", Proceedings of the 29th IAEE International Conference: Securing Energy in Insecure Times, Potsdam

Woods, J., M. Moezzi, L. Lutzenhiser, 2010, commentaire oral lors de la présentation du poster "How Much Does Household Behavior Count", ACEEE Summer Study on Buildings, 15–20 août 2010, Pacific Grove, États-unis

Partie III

Modèles développés et applications prospectives

Chapitre 1 : Modèles développés

Introduction

L’objectif de ce chapitre est de présenter de manière détaillée les modèles développés dans le cadre de la thèse et mentionnés dans les chapitres de la partie II, ainsi que de proposer une discussion sur les choix techniques effectués, leurs limites et possibilités d’amélioration. L’objectif principal de cette thèse étant d’introduire des éléments de réalisme économique dans les modèles *bottom-up* ingénieur, les deux modèles développés sont basés sur une description technique du parc résidentiel français. Si la manière de représenter les consommations nationales (*bottom-up*) est commune aux deux modèles, ceux-ci ont été développés pour des objectifs différents et présentent donc des caractéristiques et un mode de fonctionnement qui leur sont propres.

Le premier modèle a été développé pour comparer les consommations de chauffage observées au sein des différents segments du parc résidentiel français et celle des consommations calculées de manière normée par un modèle de calcul thermique. Les résultats de ce modèle descriptif, présentés dans le premier chapitre de la partie précédente, ont permis de mettre en relief des écarts sensibles entre les consommations de chauffage calculées par un modèle thermique normé et les consommations observées, et de mettre en évidence une relation générique entre ces écarts, le prix des énergies de chauffage et la rigueur climatique. Ces résultats ont permis de définir de premiers éléments de réalisme économique dans un modèle *bottom-up* ingénieur en corrigeant les hypothèses faites sur les comportements quotidiens « normaux » de chauffage à l’aide de la relation trouvée.

Le second modèle, BEUS (Buildings Energy Use Simulation), a été développé pour permettre de simuler des trajectoires de consommation d’énergie à l’horizon 2050 en représentant explicitement l’évolution des déterminants directs des consommations énergétiques du secteur résidentiel. Il appartient donc à la catégorie des modèles *bottom-up* ingénieur. Son développement a été principalement focalisé sur les consommations de chauffage du fait de leur importance quantitative par rapport aux autres usages. La dynamique des consommations d’ECS est aussi traitée, mais avec un niveau de détail moindre, et celle des consommations de cuisson et d’électricité spécifique est traitée de manière exogène. Le réalisme économique a été introduit dans le modèle non seulement en ce qui concerne les comportements quotidiens de chauffage (grâce à l’introduction de l’intensité d’utilisation), mais aussi la représentation du marché de la rénovation thermique des logements (installation ou remplacement d’isolation et de systèmes de chauffage).

Ce marché y est décrit avec une attention particulière à la recomposition de son hétérogénéité, composée de celles de l’offre d’équipements et de leur demande (lors de travaux de rénovation thermique). L’introduction de ces hétérogénéités influence sensiblement les parts de marché des technologies représentées dans le modèle, et par conséquent la dynamique des consommations de chauffage. Or, ces hétérogénéités, représentant un paramètre central des modèles économétriques de type logit, ne sont généralement représentées que partiellement dans les modèles *bottom-up* ingénieur. A travers l’introduction des hétérogénéités « manquantes » dans le modèle développé (de type *bottom-up* ingénieur), le travail réalisé essaie de rapprocher les

modèles *bottom-up* ingénieur du réalisme des modèles économétriques de type logit en ce qui concerne la simulation des parts de marché des technologies liées à la rénovation thermique des logements. L'architecture développée permet en particulier de faciliter les échanges d'information entre ces deux types de modèles, ceux-ci proposant des représentations complémentaires du même objet d'étude.

Enfin, à titre exploratoire, un instrument innovant de politique énergétique a été développé et représenté au sein du modèle : une subvention dont le montant dépend du prix de vente des équipements décrit dans la section 2.3.

1. Analyse rétrospective des comportements de chauffage par segment du parc résidentiel

1.1. Objectifs

Ce premier modèle a été développé dans le but d'observer les différences entre les consommations de chauffage observées au sein des différents segments du parc résidentiel français et les consommations calculées de manière normée par un modèle de calcul thermique. Cette comparaison est apparue nécessaire pour questionner la validité des résultats de calculs thermiques normés lorsqu'ils sont utilisés pour estimer les consommations de chauffage des logements.

En effet, deux informations permettent de mettre en doute la validité de l'utilisation des modèles thermiques normés à des fins d'estimation réalistes de consommations énergétiques liées aux usages thermiques. La première est le constat que les consommations calculées avec les modèles thermiques normés pouvaient être sensiblement éloignées des consommations de chauffage réellement observées [Haas et al., 1998; Greening et al., 2000; Schuler et al., 2000 ; Desmedt, 2005 ; Sorrell et al., 2009]. D'autre part, d'après la littérature, les consommations d'énergie dans le secteur résidentiel présentent des élasticités à court terme non nulles au prix des énergies et à la rigueur climatique [Haas et Shipper, 1998, Dahl, 1993, Kristöm, 2008, Reiss et White, 2005; Penot-Antoniou et Têtu, 2010] qui peuvent être interprétées comme une sensibilité des comportements quotidiens des ménages à ces variables. Or ces comportements quotidiens sont le plus souvent définis de manière normée et constante dans les modèles thermiques normés (*bottom-up*) utilisés pour quantifier les scénarios de prospective des consommations de chauffage.

L'objectif du développement du modèle a donc été défini en trois étapes, détaillées dans les sections suivantes :

- la reconstitution des consommations normées de chauffage au sein du parc résidentiel français,
- la mesure des écarts à un instant donné entre ces consommations et celles réellement mesurées, en observant les corrélations avec ces écarts et des variables pouvant les expliquer (performance des équipements, rigueur du climat, prix des énergies, revenu des ménages),
- l'observation de la dynamique de ces écarts au cours du temps, en fonction des variables considérées comme explicatives des écarts observés.

1.2. Reconstitution des consommations théoriques de chauffage

Pour calculer les consommations de chauffage de chaque segment du parc résidentiel français à l'aide d'un modèle de calcul thermique, il est nécessaire de disposer d'une description physique des logements constituant ces segments. Cette description concerne le rendement de l'équipement de chauffage ainsi que les variables d'entrée des modèles de calcul thermique. Pour estimer les besoins de chauffage d'un logement (en énergie utile), ces modèles calculent principalement les quantités suivantes :

- les déperditions thermiques par l'enveloppe du logement : elles dépendent essentiellement de la résistance thermique des différents éléments du bâti (murs, toiture, fenêtres, sol), de la température intérieure du logement, de la température extérieure (rigueur du climat environnant le logement) et de la surface des éléments du bâti en contact avec l'environnement extérieur,
- les déperditions par le renouvellement d'air : elles dépendent essentiellement de l'étanchéité des ouvrants (fenêtres, portes) et de leur fréquence d'ouverture par les ménages, ainsi que du débit de renouvellement d'air mécanique et du rendement du système de ventilation mécanique si un tel système existe,
- les apports thermiques « gratuits » : dégagements de chaleur à l'intérieur du logement (chaleur humaine, équipements consommant de l'énergie), apports solaires. Ces apports étant négligeables au sein des logements faiblement isolés, ils peuvent être absents des modèles thermiques les moins fins.

Le modèle est structuré comme indiqué sur la Figure 87 : à partir d'une description qualitative du parc de logements, la description physique de ces logements est effectuée en se basant sur des tables de conversion synthétisant la connaissance « ingénieur » et réglementaire. Cette description physique, complétée par une quantification de la rigueur du climat, permet d'alimenter un modèle de calcul thermique déterminant les consommations théoriques de chauffage des différents éléments du parc de logements. Celles-ci sont ensuite comparées aux consommations estimées par le CEREN à partir de factures énergétiques de ménages (issues de leurs panels et d'enquêtes de l'INSEE).

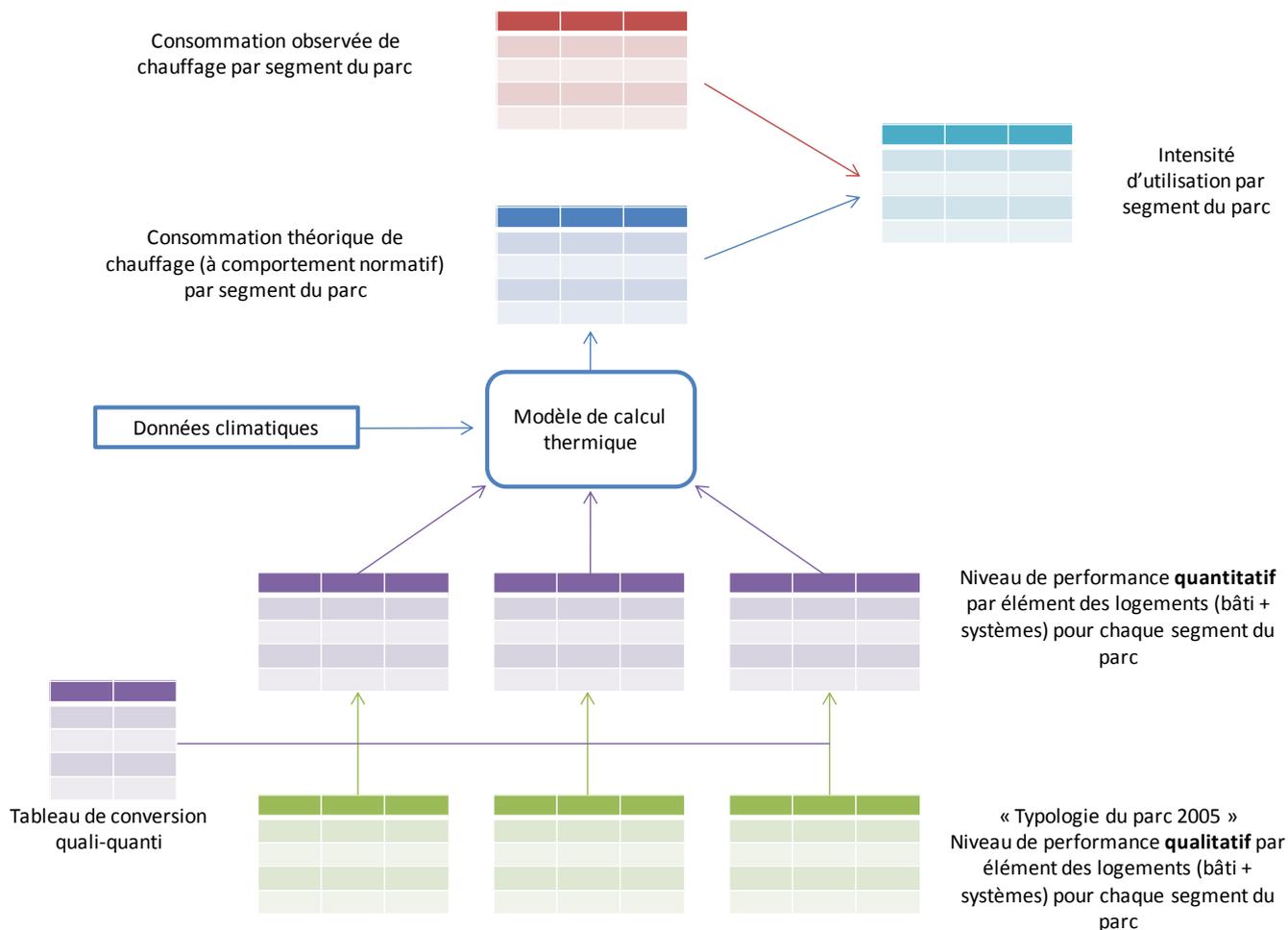


Figure 87 : Structure du modèle pour la comparaison statique des données 2005 (*illustration personnelle*)

1.3. Sources de données

La structure de ce modèle a été contrainte à la fois par celle des données observées de consommation de chauffage et celle des données décrivant la performance des logements. En ce qui concerne les consommations observées de chauffage en France, la source de données la plus détaillée est constituée des publications du CEREN (Groupement d'Intérêt Economique constitué de l'ADEME, GDF SUEZ, GRTgaz, GRDF, ERDF, RTE et EDF), accessibles uniquement¹⁴⁷ à ses membres. La thèse ayant été effectuée au sein d'EDF R&D, nous avons pu avoir accès à ces données détaillées. Ces données sont présentées sous la forme d'une segmentation du parc résidentiel réalisée à l'aide des variables suivantes : type de résidence (principales, secondaires, logements vacants), type de logement (immeuble, maison individuelle), période de construction des logements (avant 1975, 1975-1981, 1982-1989, 1990 et après), type de chauffage (appareils indépendants, central individuel, central collectif) et énergie principale de chauffage (gaz, fioul, électricité, bois, GPL, charbon, autres). Les valeurs présentées sont par ailleurs indiquées à climat normal et à climat réel. Les données retenues pour la construction du modèle ont été limitées aux logements construits avant 1988, et ayant comme énergie principale de chauffage le gaz, le fioul domestique ou l'électricité.

La seconde source de données concerne la description technologique (dont la performance) des logements existants, permettant le calcul des consommations théoriques de chauffage à l'aide

¹⁴⁷ Certaines données présentant un moindre niveau de détail sont cependant accessibles dans certaines publications de l'ADEME (e.g. [ADEME, 2010])

d'un modèle de calcul thermique. La description technologique du parc de logement utilisée dans le modèle est celle réalisée par EDF R&D sur le parc de logements français tel qu'il existait en 2005 [De Cacqueray et Piro, 2008]. Elle est basée sur une segmentation du parc résidentiel similaire à celle utilisée par le CEREN. Les informations caractéristiques de chaque segment sont :

- Une morphologie unique de logement, définie par le rapport entre la surface de chaque élément du bâti (murs, fenêtres, toiture, sol) et la surface habitable. L'estimation de ces surfaces, couplée à celle de la résistance thermique de chacun des éléments du bâti, permet de quantifier les déperditions thermiques par diffusion de la chaleur au travers de ces éléments.
- La description qualitative de la présence de différents niveaux de performance d'équipements pour chaque élément du bâti au sein de chaque segment. Par exemple, pour le segment des maisons individuelles construites avant 1975, le pourcentage de logements dont les murs ont été isolés est indiqué, ainsi que l'épaisseur et la résistance thermique de l'isolant.
- La description des différents systèmes de ventilation présents au sein de chaque segment, qualifiés par un taux de renouvellement d'air. Cette information permet de calculer les déperditions thermiques liées au fait que l'air chaud à l'intérieur du logement est remplacé par de l'air froid extérieur. Les systèmes de ventilation mécanique contrôlés réduisent le volume d'air renouvelé par rapport à l'hypothèse de volume d'air « normal » renouvelé par ventilation naturelle (non contrôlée), et réduisent donc les déperditions thermiques associées.
- La description des systèmes de chauffage présents au sein de chacun des segments, caractérisés par un rendement moyen par segment.

Le calcul des consommations théoriques de chauffage est réalisé à partir de ces données en faisant une hypothèse concernant une gestion spatio-temporelle « normale » de la température intérieure et du renouvellement d'air des logements, c'est-à-dire concernant l'usage du logement et des équipements de chauffage et de ventilation par ses habitants. C'est essentiellement cette hypothèse générique de comportement humain qui est remise en cause dans la comparaison des consommations de chauffage réelles et normées.

Des données non normées concernant la température intérieure des logements ont aussi été utilisées. Les températures intérieures déclarées par les ménages sur la période 1990-2005 sont publiées par le CEREN [CEREN, 2008a]. Nous avons cependant eu accès¹⁴⁸ à des données plus détaillées du CEREN, couvrant la période 1998-2005, sur lesquelles les travaux présentés se sont basés. Ce sont elles qui ont permis de réaliser la Figures 68b du premier chapitre de la deuxième partie (comparaison entre intensité d'utilisation déclarée et calculée).

La description technologique du parc de logements tel qu'il existait en 2005 permet une comparaison des consommations réelles et théoriques sur cette année. Cependant, pour savoir si les corrélations observées pour l'année 2005 entre ces deux types de consommations sont stables dans le temps, une étude rétrospective a été nécessaire. Celle-ci a donc nécessité l'estimation de la performance du parc de logement sur plusieurs années. Comme cette donnée n'était pas disponible en tant que telle, elle a été reconstruite en déduisant de la description technologique du parc de logements de 2005 les flux de rénovation observés sur les 12 années précédentes. Ceci a été réalisé à

¹⁴⁸ Nous tenons particulièrement à remercier F. Lecouvey du CEREN pour nous avoir transmis et permis d'utiliser des données plus précises que celles présentées dans les publications du CEREN.

partir d'une estimation du nombre de logements ayant effectué une isolation, estimation réalisée par le CEREN sur la période 1993-2005 [CEREN, 2008b]. Ainsi, dans chaque segment du parc, le pourcentage d'éléments du bâti isolés diminue lorsque l'on remonte dans le temps. L'évolution du rendement des systèmes de chauffage a fait l'objet d'une hypothèse en l'absence de données : le rendement des systèmes de chauffage utilisant l'électricité a été conservé constant et le rendement des systèmes de chauffage par chaudière à combustible fossile a été considéré comme augmentant de 1% par an¹⁴⁹, du fait du renouvellement des plus vieilles chaudières par des chaudières récentes. Par ailleurs, le calcul des consommations théoriques de chauffage nécessite aussi une estimation de la rigueur du climat, tirée des estimations de « climat réel » indiquées par le CEREN, et exprimée en degrés-jours unifiés (DJU).

La disponibilité des différentes sources de données permettant le calcul des consommations de chauffage a limité la comparaison entre les consommations calculées et observées à la période 1998-2005, soit une durée de 8 ans.

1.4. Modèle thermique utilisé

Le modèle thermique utilisé pour le calcul des consommations théoriques de chauffage est un modèle particulièrement simple basé sur une linéarisation des lois physiques de la diffusion de la chaleur en régime permanent. Ce modèle prend en compte les déperditions par diffusion thermique ainsi que par renouvellement d'air. Ce modèle étant appliqué aux logements les plus déperditifs, les apports thermiques gratuits intérieurs (chaleur humaine, équipements) et extérieurs (rayonnement solaire) ont été négligés. Le calcul est donc le suivant :

Equation 31

$$C_{ch} = \frac{(D_{surf} + D_{air}) \cdot DH}{\eta}$$

Avec C_{ch} la consommation annuelle de chauffage du logement (en W.h), D_{surf} les déperditions thermiques par diffusion de la chaleur (en W/K), D_{air} les déperditions par

Ce modèle est plus simple que celui du Diagnostic de Performance Energétique [MECSL, 2008] dans le sens où il ne prend en compte ni les apports thermiques gratuits (dégagement de chaleur à l'intérieur du logement et apports solaires) ni un facteur d'intermittence (permettant d'indiquer que la température intérieure des logements n'est pas constante dans le temps).

1.5. Etude de sensibilité au taux de respect de la réglementation thermique

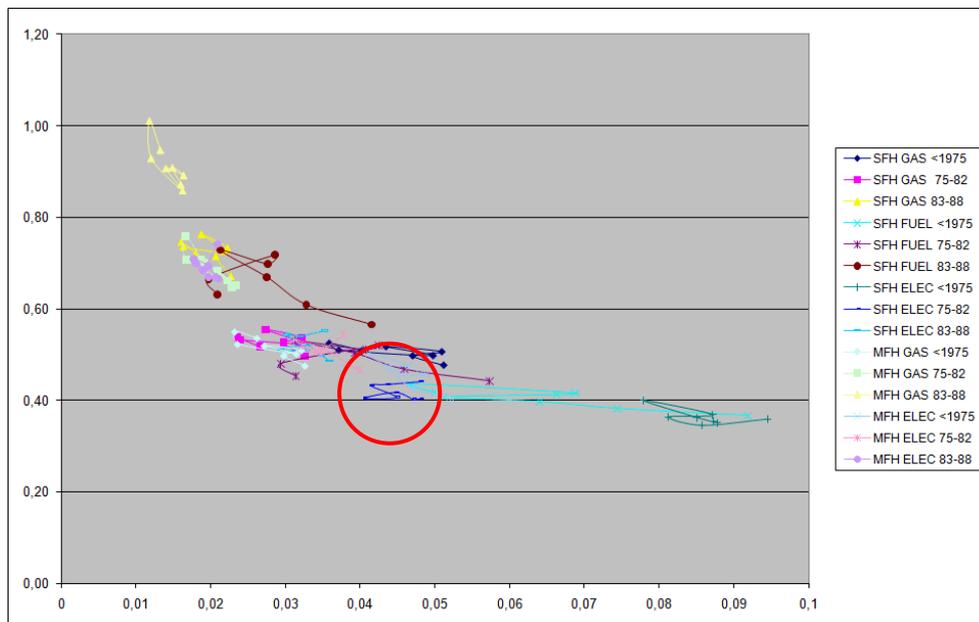
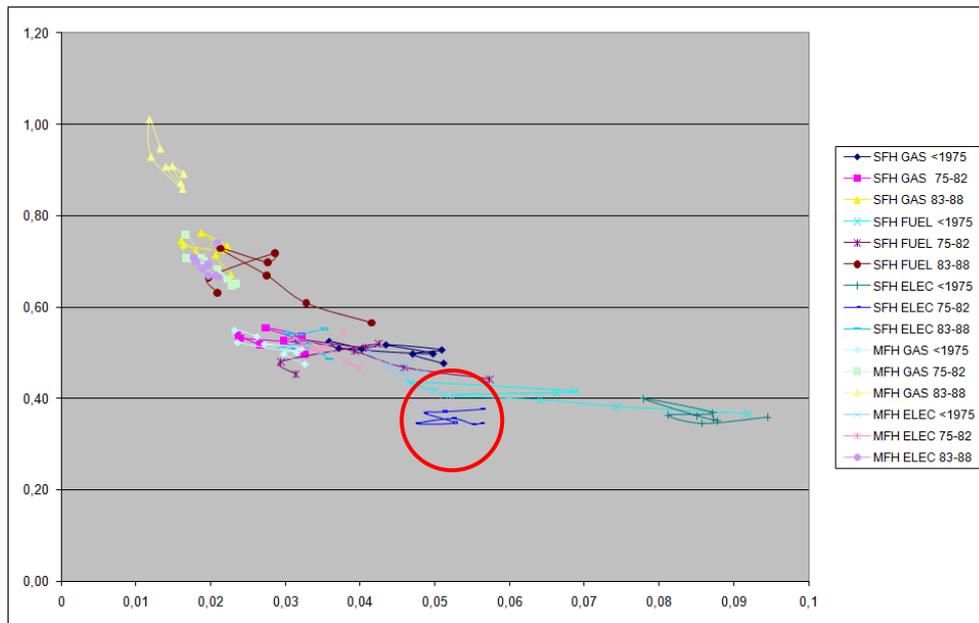
¹⁴⁹ Correspondant à une différence de 15% de rendement entre les chaudières les plus récentes et les plus anciennes sur le stock de logements à tout moment entre 1990 et 2005, et à une durée de vie de 15 ans. L'augmentation annuelle n'est pas de 1% du rendement moyen en valeur absolue mais en valeur relative, par rapport au rendement moyen des chaudières. Ainsi, si ce rendement moyen est de 60% à une année donnée, il sera de 60,6% l'année suivante, et pas 61%.

La possibilité de paramétrer le taux de respect de la réglementation thermique a permis de tester une hypothèse faite par jugement d'experts : celle que les maisons individuelles construites entre 1975 et 1982 et chauffées à l'électricité présentent un meilleur taux de respect de la réglementation thermique en vigueur que celles chauffées aux autres combustibles. Cette hypothèse se base sur le fait que l'installation du « chauffage électrique intégré » (alliant chauffage électrique, isolation et ventilation mécanique contrôlée) dans les logements neufs faisait l'objet de préconisations techniques relatives à l'isolation et au renouvellement d'air depuis 1971 [Laurent et Duforestel, 2006]. Ce n'est qu'à partir de la première réglementation thermique que ce type de contraintes a été appliqué aux logements neufs chauffés à l'aide d'une autre énergie. Pour valider cette hypothèse, nous avons testé les deux cas de figure suivants :

- 80% des maisons individuelles construites entre 1975 et 1982 respectent la réglementation thermique, quelle que soit leur énergie de chauffage. Les 20% restant ayant la performance des logements non isolés.
- 80% des maisons individuelles construites entre 1975 et 1982 respectent la réglementation thermique pour celles chauffées au gaz ou au fioul, 100% pour celles chauffées à l'électricité.

La simulation de ces deux cas de figure à l'aide du modèle développé donne les résultats présentés sur les Figures 88a et b. Leur observation montre que, si le taux de respect de la réglementation thermique est de 80% pour les maisons individuelles chauffées à l'électricité et construites entre 1975 et 1982 (SFH ELEC 75-82, indiqué par un cercle rouge sur les figures), alors ce segment présente des intensités d'utilisation inférieure ou égales à celles des maisons individuelles chauffées à l'électricité et construites avant 1975 (SFH ELEC <1975), sans contrainte d'isolation. On peut observer que, sous cette hypothèse, le segment MI ELEC 75-82 est légèrement détaché du faisceau formé par les suivi d'*intensité d'utilisation* des autres segments.

A l'inverse, sous l'hypothèse d'un taux de respect de la réglementation thermique de 100%, alors le segment MI ELEC 75-82 se trouve alors dans la continuité des autres segments et présente des intensités d'utilisation supérieures à celles du segment MI ELEC <1975. Ceci apparaît plus réaliste que le premier cas car le niveau de confort devrait a priori être plus important dans des logements isolés que peu ou pas isolés (cas des logements construits avant la première réglementation thermique). A défaut de pouvoir mesurer les taux de respect de manière physique, ces observations apportent du crédit à l'hypothèse réalisée à partir de jugements d'experts. C'est pourquoi le taux de respect à 100% pour le segment MI ELEC 1975-1982 a été retenu comme hypothèse de base du modèle.



Figures 88a et 88b : *Intensité d'utilisation* des segments du parc résidentiel français sur la période 1998-2005. En haut (figure a), avec une hypothèse de taux de respect de la réglementation thermique de 1975 de 80% pour les maisons construites entre 1975 et 1982 et chauffées à l'électricité (SFH ELEC-75-82). En bas (figure b) avec une hypothèse de 100%. *Les autres maisons construites sur cette période ont un taux de respect de la réglementation thermique de 80%*

2. BEUS (Buildings Energy Use Simulation) : un modèle de simulation prospective sur échantillon riche

2.1. Objectifs et architecture

2.1.1. Objectifs

Le développement de ce modèle technico-économique de simulation prospective des consommations énergétiques du secteur résidentiel français a eu pour objectif de répondre autant que possible aux limitations des modèles existants en France, évoquées dans la section 3 du second chapitre de la partie I. Les lignes directrices de son développement ont donc été les suivantes :

- représenter des comportements d'usage des équipements de chauffage n'étant pas normés,
- représenter le marché de la rénovation thermique des logements dans un formalisme permettant d'explorer les différences entre sa représentation technico-économique dans des modèles *bottom-up* ingénieur et sa représentation dans les modèles économétriques de type logit, prenant en particulier en compte l'hétérogénéité de ce marché,
- représenter l'information disponible dans un formalisme commun au plus grand nombre d'acteurs impliqués dans les consommations énergétiques du secteur résidentiel français, et compatible avec les modèles d'EDF R&D (description technologique) et du CIRED (module résidentiel d'Imaclim-R : RES-IRF),
- permettre la production de scénarios de natures différentes, comptabilité (évolutions temporelles des variables forcées par le modélisateur) ou simulation (évolutions temporelles de certaines variables calculées de manière endogène), pour tirer profit à la fois d'une description explicite des technologies et des possibilités offertes par la modélisation endogène des comportements d'usage des technologies et des comportements d'achat de ces technologies par les ménages,
- représenter la diversité des situations techniques et économiques existantes au sein du parc de logements français pour éviter les biais liés à l'utilisation de valeurs moyennes pour caractériser les logements,
- intégrer un modèle de calcul thermique, ce qui permet de calculer les gains énergétiques spécifiques à chaque technologie et à chaque contexte technique (performance des différents éléments du logement, rigueur du climat local) dans lequel elle est appliquée,
- cibler prioritairement les usages énergétiques les plus importants quantitativement et dont l'évolution temporelle se prête le mieux à la simulation technico-économique, c'est-à-dire essentiellement le chauffage individuel.

2.1.2. Architecture

Le modèle développé au cours de cette thèse, BEUS (*Buildings Energy Use Simulation*), est constitué d'un classeur Excel auquel est associé un programme écrit en VBA (*Visual Basic for*

Applications). Ce formalisme permet une compatibilité assez poussée avec les outils préexistants au sein du groupe « Résidentiel » d'EDF R&D. Il a en particulier permis d'utiliser directement le modèle développé par Jean-Michel Cayla pour calculer les consommations de chauffage avec la méthodologie du Diagnostic de Performance Energétique (DPE) correspondant aux différents logements décrits dans l'enquête qu'il a réalisée dans le cadre de sa thèse [Cayla, 2011 ; Cayla et al., 2011].

BEUS repose sur une description du système {ménages-environnement} dont les consommations de chauffage et d'eau chaude sanitaire sont calculées à l'aide du modèle de calcul thermique intégré, et celles de cuisson et d'électricité fixées de manière exogène (évolution imposée explicitement par le modélisateur, et non pas calculée par le modèle). L'évolution temporelle des comportements quotidiens de chauffage, de la performance des différents éléments techniques des logements (bâti et système de chauffage) et des prix des équipements peuvent être, au choix, déterminés de manière exogène (évolution imposée par le modélisateur) ou endogène (évolution calculée par le modèle en fonction d'autres variables). Les autres variables, telles que le prix des énergies, le revenu des ménages ou le climat, sont quant à elle déterminée de manière exogène.

Le modèle développé se compose des entités suivantes, représentées sur les Figures 89 et 90 :

- Une base de données descriptive d'un échantillon pondéré représentatif des ménages équipés de chauffage individuel, de leurs logements et de leurs équipements de chauffage (BDD-MLE).
- Une base de données « technique » permettant de traduire la description qualitative des logements et équipements en données d'entrées pour le modèle de calcul thermique du Diagnostic de Performance Energétique (BDD-PHYS).
- Une base de données des équipements disponibles sur le marché de la rénovation des logements (BDD-EQ), décrit par leur performance et la distribution de leur prix (caractérisée par une valeur moyenne et un écart-type).
- Un corps d'hypothèses exogènes, modifiables par l'utilisateur, décrivant l'environnement physique (climat) et économique (prix des énergies, revenus des ménages, politiques énergétiques basées sur des incitations économiques) (BDD-ENV).
- Un modèle de calcul thermique normé de consommations de chauffage et d'eau chaude sanitaire : le mode de calcul 3CL du Diagnostic de Performance Energétique (MOD-NORM).
- Un modèle de comportement d'usage des équipements de chauffage et de ventilation (MOD-COMP). Cette représentation du comportement est issue des travaux présentés dans le premier chapitre de la partie précédente et reprend le concept d'*intensité d'utilisation*.
- Un modèle d'investissement simulant les choix technologiques des ménages dans le cas d'une rénovation thermique du logement, pouvant porter sur l'ensemble ou une partie du bâti et des équipements de chauffage et d'ECS (MOD-INVEST).

Le modèle fonctionne de manière séquentielle, avec un pas de temps réglable. A chaque pas, la consommation de chauffage et d'eau chaude sanitaire (ECS) des logements représentés est calculée à partir de la description technique des logements, de l'*intensité d'utilisation* des équipements et des conditions climatiques. L'évolution du système {ménages-environnement} entre deux pas de temps est déterminée à partir d'hypothèses exogènes ou peut être calculé, si

l'utilisateur souhaite une détermination endogène, pour l'intensité d'utilisation des équipements, l'évolution technologique et le prix des équipements.

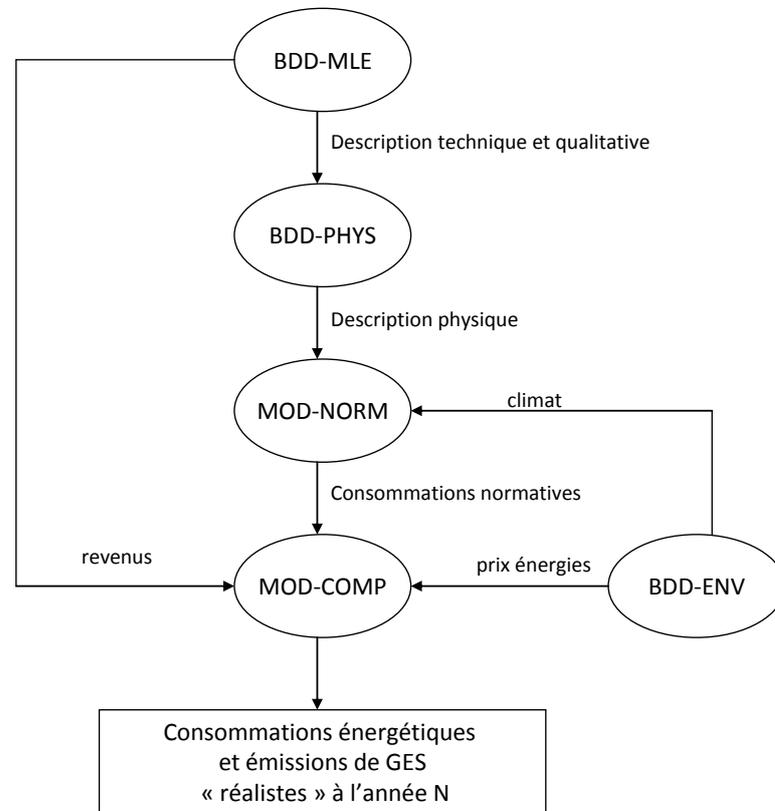


Figure 89 : Entités représentées à l'année N et calcul des consommations énergétiques

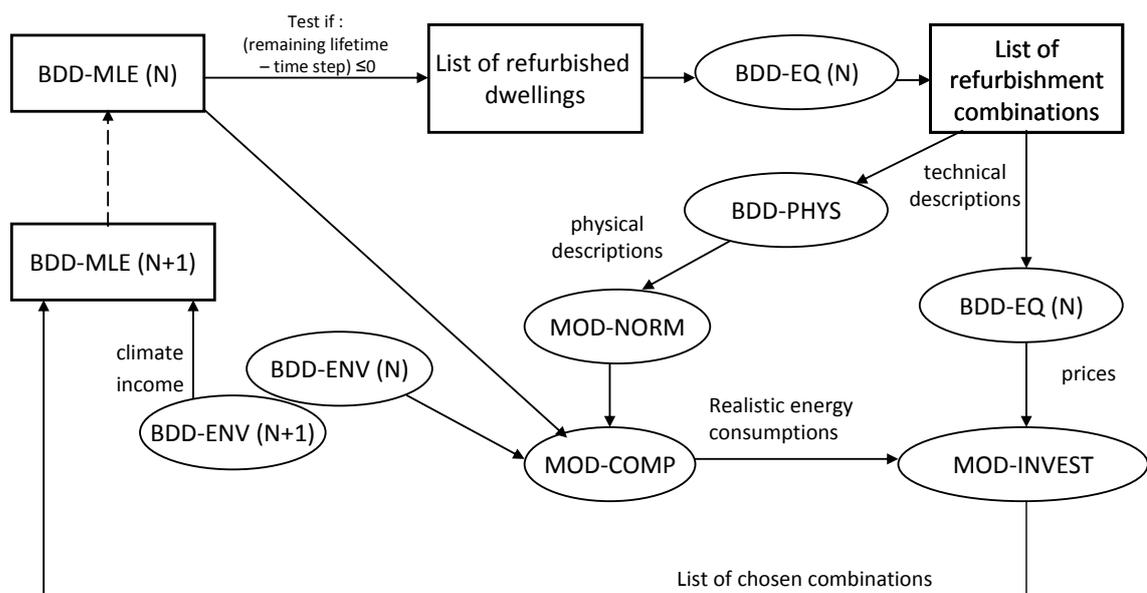


Figure 90 : Evolution du système {ménages-environnement} entre deux pas de temps

2.2. Modélisation du système {ménages-environnement} et de sa dynamique

2.2.1. Entités représentées

a) Le parc résidentiel français

Description de l'échantillon représentatif utilisé

Le parc de logements français est représenté dans BEUS par un échantillon très détaillé. Chaque logement de cet échantillon est en outre caractérisé par un poids permettant de déterminer la représentativité du logement à l'échelle nationale. Ces poids ont été calculés à l'aide de la méthodologie de calage sur marges proposée par l'INSEE¹⁵⁰, permettant de redresser l'échantillon pour le rendre représentatif de la population française vis-à-vis des variables suivantes : quintile de revenus, densité urbaine, type de famille, statut d'occupation du logement (propriétaire ou locataire), âge du représentant de la famille et période de construction du logement. Cet échantillon est issu de l'enquête réalisée par Jean-Michel Cayla auprès de 2012 ménages français en 2009 [Cayla, 2011]. Ont été retirés de l'ensemble des ménages enquêtés ceux qui étaient chauffés à l'aide d'un système de chauffage collectif, du fait de l'absence de factures de chauffage (et d'eau chaude dans certains cas). Cette restriction permet cependant de représenter les logements à l'origine de 80% des consommations de chauffage en France [CEREN, 2011]. Les questionnaires dans lesquels les factures énergétiques n'étaient pas renseignées n'ont pas été retenus pour la construction de l'échantillon, ainsi que ceux dans lesquels des consommations de chauffage estimées comme improbables par jugement d'expert¹⁵¹ étaient mentionnées. Ainsi, l'échantillon utilisé pour représenter le parc de logements français est constitué de 913 logements (703 maisons individuelles et 210 logements d'immeubles collectifs).

L'échantillon retenu est renseigné de manière particulièrement riche en ce qui concerne les ménages, les logements et leurs équipements. L'ensemble des variables descriptives est présenté dans le questionnaire de l'enquête de Jean-Michel Cayla [Cayla, 2010]. Cependant, seule une partie a été retenue dans l'objectif de ne calculer que les consommations de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Parmi les variables renseignées dans le questionnaire, certaines peuvent être utilisées directement comme données d'entrée du modèle de calcul 3CL du DPE. C'est le cas en particulier de la surface habitable du logement et de la morphologie des logements. Parmi les autres variables, certaines ont permis la détermination de données d'entrée du mode de calcul 3CL à partir de tables de correspondance proposées dans le descriptif officiel du DPE [MECSL, 2008]. Certaines variables d'entrée du calcul 3CL ont par ailleurs été déterminées par expertise EDF R&D en fonction des variables renseignées dans l'enquête. Enfin, chaque ménage est aussi décrit par une *intensité d'utilisation* des équipements de chauffage, dont le calcul est présenté dans la section 2.2.2 de ce chapitre.

¹⁵⁰ Sous la forme de la procédure CALMAR, fonctionnant sous le logiciel d'analyse de données SAS.

¹⁵¹ Soit celles non comprises dans l'intervalle entre 20 et 400 kWh/m².an, correspondant aux logements les plus performants actuellement et aux logements anciens n'ayant fait l'objet d'aucune amélioration particulière de leur performance énergétique.

L'échantillon à la base du modèle permet de représenter l'hétérogénéité du parc résidentiel par 39 variables caractérisant les logements et 9 variables caractérisant les systèmes de chauffage¹⁵². Les ménages, quant à eux, sont représentés dans le modèle développé uniquement par leurs revenus ainsi que le nombre et l'âge des personnes qui les constituent.

Pour simplifier la représentation technique des systèmes de chauffage, les ménages sont représentés comme n'étant chauffés qu'à l'aide d'une seule énergie de chauffage. Pour les ménages déclarant plusieurs énergies de chauffage dans l'enquête EDF R&D 2009, l'énergie de chauffage représentée dans le modèle est celle pour laquelle ces ménages ont déclaré les consommations les plus élevées. Cette hypothèse simplificatrice a pour principal défaut de ne pas faire apparaître les maisons chauffées au bois et à l'électricité, représentant environ 1 million de logements en France. Cependant, elle apparaît justifiée pour le reste du parc de logement du fait de la faible occurrence du chauffage bi-énergies.

Traitement des logements neufs

En ce qui concerne l'évolution temporelle de ce parc de logements, deux choix principaux de modélisation ont été effectués. Premièrement les logements construits après 2009 ne sont pas représentés. En effet, si ces logements respectent les réglementations thermiques et que leurs habitants ont un comportement de chauffage et de ventilation tel que celui décrit par les hypothèses normales du moteur de calcul de la réglementation thermique, alors leurs consommations de chauffage et d'ECS doivent être particulièrement faibles, de l'ordre de 20 à 40 kWh/m².an en énergie finale pour la période 2012-2020¹⁵³, et négligeables à partir de 2020 avec l'obligation de logements neufs à énergie positive (BEPOS)¹⁵⁴.

Ainsi, même si ces logements construits dans les prochaines décennies pourront représenter une part non négligeable du nombre de logements (estimée à environ 30% en 2050 [Traisnel et al., 2010, Giraudet, 2011]), leurs consommations de chauffage et d'ECS devraient quant à elles ne représenter qu'une part sensiblement plus faible des consommations totales du parc, même en cas de rénovation massive des logements existants¹⁵⁵. Dans une approche de simplification du système modélisé, ces logements ont donc été négligés. On retiendra cependant que cette hypothèse est

¹⁵² Pour le détail de ces variables, se référer au questionnaire de l'enquête réalisée, accessible en annexe de la thèse de Jean-Michel Cayla [Cayla, 2011].

¹⁵³ La réglementation thermique 2012 impose une contrainte de 50kWh/m².an en énergie primaire pour la somme des usages chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation, éclairage et auxiliaires (pompes de circulation dans les chaudières, ventilation...). Exprimée en énergie finale, la contrainte est d'environ 20 kWh/m².an pour l'électricité du fait du coefficient de conversion entre énergie finale et primaire qui lui est attribué (2,58). Cependant, il est important de garder à l'esprit que ces consommations sont théoriques, et peuvent donc être sensiblement inférieures aux consommations observées.

¹⁵⁴ Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, article 4.

¹⁵⁵ On peut faire l'hypothèse que si les réglementations thermiques sont respectées et que les ménages adoptent le comportement d'usage normatif tel que décrit dans les réglementations thermiques alors les logements construits entre 2012 et 2050 consommeront en moyenne 15 kWh/m².an de chauffage en énergie finale. Les logements actuels en consomment en moyenne 132 [CEREN, 2011]. Si les logements actuels ne sont pas rénovés, que les logements construits entre 2012 et 2050 sont conformes aux estimations normées des réglementations thermiques prévues et représentent 30% en effectif du parc résidentiel en 2050 alors leurs consommations de chauffage représenteraient 5% des consommations de chauffage du parc. Si les logements existants sont rénovés de telle sorte qu'ils ne consomment en moyenne que 60 kWh/m².an de chauffage en énergie finale, alors les logements construits entre 2012 et 2050 représenteraient 10% des consommations de chauffage en 2050, et 18% si les logements existants sont rénovés de telle sorte qu'ils ne consomment en moyenne que 30 kWh/m².an de chauffage en énergie finale (ce qui apparaît particulièrement optimiste).

forte (supposant le respect de la réglementation thermique et des comportements d'usage du chauffage tels que décrits dans le modèle de calcul thermique de la réglementation) et que les consommations réelles des logements neufs, partout en Europe, sont sensiblement plus élevées que celles imposées par les réglementations thermiques en vigueur [Enerdata, 2011].

L'absence de représentation des logements neufs dans le modèle a aussi pour conséquence de limiter l'influence des hypothèses concernant l'augmentation de la population, la décohabitation (diminution du nombre de personnes par logement), et l'évolution de la surface des logements. En effet, ces hypothèses influencent surtout le nombre et la taille des futurs logements construits, qui dépendent de l'augmentation du nombre de ménages au cours du temps.

Traitement de la démolition des logements existants

Le deuxième choix de modélisation qui a été effectué vis-à-vis de l'évolution temporelle du parc de logements concerne la destruction d'une partie des logements existants. Bien que le taux de renouvellement réel du parc résidentiel soit faible (cf premier chapitre de cette thèse), la démolition des logements peut cependant avoir une influence non négligeable sur les consommations de chauffage à un horizon lointain s'il est fait l'hypothèse que ce sont les logements les plus consommateurs d'énergie qui sont détruits, hypothèse qui a été retenue dans de nombreuses études prospectives (e.g. [Traisnel et al., 2001; Chambolle et Pouliquen, 2008; Sartori et al. 2009; Giraudet et al. 2010]). En poursuivant le rythme de destruction actuel, plus d'un million de logements seraient détruits d'ici 2050.

Cependant, la question de la corrélation entre la performance thermique d'un logement et sa propension à être détruit peut apparaître discutable. En effet, si les destructions de logements ont par le passé été plus nombreuses qu'actuellement, elles étaient majoritairement dues à des programmes politiques de réhabilitation de quartiers délabrés [Power, 2008]. Cependant, dans le cas de la France, le rythme de destruction a sensiblement baissé durant les dernières décennies [Traisnel et al., 2001] et on peut alors faire l'hypothèse qu'un des déterminants principaux de la démolition est aujourd'hui la pression foncière. Celle-ci ciblerait en particulier les terrains en tissu urbain dense sur lesquels la surface habitable pourrait être sensiblement augmentée. La cible principale des démolitions serait alors les maisons individuelles en tissu urbain dense, qui pourraient être remplacées par des immeubles collectifs de manière avantageuse pour un promoteur immobilier. Or, lorsqu'on étudie la consommation de chauffage des maisons individuelles, on peut observer qu'elle n'est que très faiblement corrélée à la densité urbaine.

Le Tableau 14 présente les implications énergétiques des hypothèses retenues concernant la performance énergétique des logements démolis à l'horizon 2050 et le mode de calcul des consommations de chauffage de ces logements. On peut ainsi observer que selon les hypothèses retenues, l'impact énergétique de la démolition à l'horizon 2050 passe d'une réduction sensible de la consommation actuelle en calculant la consommation normée de chauffage des logements les moins performants (87 TWh sur les 393 TWh actuels, soit 22%), à une influence assez négligeable (27 TWh, soit moins de 7%) lorsqu'on fait l'hypothèse que ce sont les logements en tissu urbain dense qui font l'objet d'une rénovation (sans critère de performance énergétique particulier, donc avec des consommations moyennes) et que l'on estime leur consommation de chauffage à partir de leurs factures d'énergie, donc avec des consommations réelles et non normées.

Le choix de modélisation réalisé pour le traitement de la démolition est donc de réduire la consommation nationale proportionnellement à la réduction du stock de logements consécutive aux démolitions, sans cibler particulièrement les logements les moins performants. Pour plus de détails sur les calculs réalisés ainsi que sur l'arbitrage entre démolition et rénovation, voir l'article

« *Demolition vs. refurbishment for the old houses: a regional cost-benefit analysis* » (en Annexe II), coécrit avec Dominique Osso et Marie-Hélène Laurent.

Cible de démolition	5% les moins performants du parc résidentiel actuel	5% les moins performants du parc résidentiel actuel	Maisons individuelles en tissu urbain dense	Maisons individuelles en tissu urbain dense
Mode de calcul des consommations de chauffage	Normé (mode de calcul 3CL du DPE)	Estimation sur facture	Normé (mode de calcul 3CL du DPE)	Estimation sur facture
Consommation de chauffage en énergie finale (en kWh/m ² .an)	621	224	305	177
Surface moyenne	100	100	109	109
Effectif démoli entre 2010 et 2050	5% du parc résidentiel soit environ 35000 logements par an			
Consommation de chauffage de l'effectif démoli (en TWh)	87	31	47	27
Réduction par rapport à la consommation actuelle des logements existants	22%	8%	12%	7%

Tableau 14 : Influence des hypothèses concernant la cible des démolitions de logements sur la période 2010-2050 et le mode de calcul des consommations de chauffage sur l'estimation de la réduction de consommation de chauffage que l'on peut attendre de ces démolitions

b) *Marché de la rénovation thermique des logements*

Une composante essentielle de la dynamique des consommations de chauffage et d'eau chaude sanitaire à l'échelle nationale est l'évolution temporelle de la performance technique des logements. Cette évolution résulte du remplacement d'une partie de l'infrastructure existante par de nouveaux équipements, généralement plus performants. Pour la simuler, il est donc nécessaire de décrire les options technologiques qui s'offrent aux ménages souhaitant remplacer leurs équipements. Trois caractéristiques des technologies sont fondamentales dans une approche technico-économique : la performance des équipements, leur prix et leur durée de vie. Ces trois informations permettent le calcul du coût d'une transition de performance sur une période donnée.

Comme cela a été relevé par Laurent et ses collaborateurs (2009), les données existantes concernant le prix des technologies indiquent des valeurs particulièrement disparates. D'autre part, les sources de données de prix ne concernent très généralement qu'une partie des options technologiques proposées aux ménages, en particulier celles de haute performance. Ces deux éléments ont fortement conditionné le choix de la base de données de prix dans le modèle. Ce choix s'est ainsi porté sur les prix observés lors des enquêtes OPEN¹⁵⁶ successives, réalisées par le bureau d'étude BIIS auprès de 30 000 ménages et 5 000 professionnels tous les deux ans depuis 2006. Cette source de données présente l'avantage de répertorier des prix peu biaisés¹⁵⁷, sur un large échantillon

¹⁵⁶ Observatoire Permanent de l'amélioration ENergétique du logement [OPEN, 2008 ; OPEN, 2010].

¹⁵⁷ Ces prix sont issus du marché global de la rénovation, et non pas d'opérations spécifiques (programme de maîtrise de la demande d'énergie) pour lesquelles les entreprises pourraient ajuster leurs prix au contexte particulier de ces programmes. De plus, BIIS est un bureau d'études indépendant. Ses résultats peuvent donc

et concernant une large gamme d'équipements : toiture, façade, parois intérieures, fenêtres et système de chauffage (voir Tableau 15). En particulier, les prix des équipements ayant la plus faible performance énergétique sur le marché sont répertoriés, ce qui permet un calcul aisé du surcoût que représente l'amélioration de la performance énergétique. Les données de prix de l'enquête OPEN ne sont cependant pas publiques. Leur accès nous a été autorisé par Régine Trotignon, en charge d'OPEN au sein de l'ADEME (commanditaire des enquêtes), que nous tenons à remercier. D'autre part, OPEN propose un formalisme simple du marché de rénovation, en présentant trois niveaux de performance par type de rénovation. Ceci permet de ne pas avoir à intégrer de description précise d'un trop grand nombre d'équipements, ce qui convient particulièrement bien à la dimension simplificatrice de la démarche de modélisation. Cependant, on pourra retenir un défaut de cette source de données, défaut partagé par conséquent avec le modèle développé : l'absence de représentation des technologies de ventilation. Cette absence limite la capacité du modèle à faire apparaître une partie du gisement d'efficacité énergétique existant, ce qui devra être corrigé dans des développements futurs.

Comme cela a été montré dans le second chapitre de la partie précédente, le prix moyen des équipements ne caractérise que partiellement le marché des technologies proposées aux ménages. En effet, l'hétérogénéité des prix pour une même technologie a une influence non négligeable sur les résultats de simulation des choix des ménages. C'est pourquoi la base de données décrivant les équipements dans le modèle développé intègre aussi une indication de l'hétérogénéité des prix pour chaque équipement, exprimée sous la forme du ratio entre l'écart-type et la moyenne des prix observés pour une technologie et un niveau de performance donné (par exemple la rénovation de la toiture avec isolation épaisse). Ce ratio a été renseigné à partir de l'expertise d'EDF R&D ainsi que de certaines données fournies par BIIIS. Les mesures pouvant diverger sensiblement entre les deux sources de données, on peut considérer que la précision de cette information reste à améliorer. Par conséquent, il a été choisi de représenter ce ratio de manière peu détaillée par technologie. Seules sont distingués les types de rénovation à dominante de main d'œuvre (isolation des murs et de la toiture), pour lesquels le ratio est fixé à 0,5, et ceux à dominante d'équipement (fenêtres et systèmes de chauffage), pour lesquels le ratio est fixé à 0,3. Ces valeurs se situent dans la marge basse des observations, certains ratios allant jusqu'à 1 (écart-type de prix égal au prix moyen, pour des équipements de même performance) dans les données EDF R&D.

Thermal insulation	Basic	Medium	Optimum
Wall insulation	1 surface (among walls, floor or ceiling)	2 surfaces	3 surfaces
Roof insulation	No insulation	/ (no medium case)	Thick insulation (20 cm)
Windows change	≤ Th7	Th8 to Th10	Th11
Heating system change	Basic	Medium	Optimum
Fossil fuels (oil, LPG, gas)	classical boiler	low-temperature boiler	condensing boiler
Biomass	Wood stove	Wood boiler or pellet stove	wood boiler + solar heating (*)
Electricity	electric heater (resistance, calorific fluid, bricks)	radiant electric heater or radiant electric floor	heat-pump (all kinds)

(*) not implemented in our model because of the unavailability of cost data

Tableau 15 : Description des options technologiques de rénovation proposées aux ménages d'après la typologie de l'Observatoire Permanent de l'amélioration ENergétique du logement (OPEN) [Laurent et al., 2011]

apparaître plus neutres que ceux d'entités pouvant défendre des intérêts particuliers (énergéticiens, établissements publics visant à promouvoir les économies d'énergie, associations...).

Pour pouvoir exploiter au mieux cette source de données dans le modèle, il est nécessaire de compléter les prix par niveaux de performance avec une description quantitative des niveaux de performance par type de rénovation, ainsi que la durée de vie des différents équipements pouvant être rénovés. Ainsi, pour chaque niveau de performance mentionné dans le Tableau 15, une seule technologie « représentative » a été retenue dans le modèle. Ces technologies ont été choisies de manière à être compatibles avec les données d'entrée du mode de calcul 3CL du DPE. Les technologies retenues dans le modèle sont présentées dans le Tableau 17.

Enfin, si la durée de vie des équipements n'est pas indiquée directement dans les données des enquêtes OPEN, celles-ci en donnent cependant une indication. En effet, l'enquête OPEN indique le nombre annuel de logements effectuant chacun des types de rénovation. En estimant le nombre de logements pouvant faire l'objet de rénovations, il est alors possible de déterminer une durée de vie « révélée » pour chaque équipement (Equation 32). Les résultats de ces estimations sont présentés dans le Tableau 16, ce qui permet d'observer qu'elles sont relativement proches des données utilisées dans les derniers travaux de Traisnel et de ses collaborateurs (2010) en ce qui concerne les systèmes de chauffage, les rénovations de toiture et les changements de fenêtres (seuls éléments dont la durée de vie est indiquée dans leur publication).

Il est important de noter que certaines rénovations peuvent être partielles, principalement en ce qui concerne le renouvellement des fenêtres et la rénovation des parois intérieures. Or, dans le modèle, les ménages appliquent la rénovation à l'intégralité du logement (changement de toutes les fenêtres, isolation de tous les murs). C'est pourquoi, dans la base de données du modèle, les durées de vie de ces deux technologies – isolation des murs et changement des fenêtres – ont été estimées à une durée supérieure à celles indiquées dans le Tableau 16. Cette augmentation de durée de vie est basée sur une estimation de la proportion du logement effectivement traitée lors des rénovations. Les durées de vie effectivement utilisées dans le modèle sont indiquées dans le Tableau 17.

Equation 32

$$\text{durée de vie révélée} = \frac{\text{flux de rénovation}}{\text{stock de logements pouvant être rénovés}}$$

Thermal insulation of building envelope	Revealed lifetimes
Same for single and multi family houses	
Roof	36 years
Wall (internal insulation)	26 years
Façade (external insulation)	68 years
Windows	16 years
Space heating equipment replacement	
Same for all heating systems	24 years

Tableau 16 : Durées de vie révélées des équipements pouvant être rénovés [Laurent et al., 2011].

Élément rénové et nom dans le modèle (entre parenthèses)	Caractéristiques	Niveau de performance		
		BASIC (perf 1)	MEDIUM (perf 2)	OPTIMUM (perf 3)
Toiture (toit)	Description (nom dans le modèle)	Pas d'isolation (toit1)	Isolant fin (toit2)	Isolant épais (toit3)
	Epaisseur d'isolant	aucune	2 cm	20 cm
	Durée de vie	36 ans		
	Hétérogénéité des prix (écart-type/moyenne)	0,5		
Isolation thermique par l'intérieur (ITI)	Description (nom dans le modèle)	Isolation des murs (ITI1)	Isolation « murs + plafond » ou « murs + plancher » (ITI2)	Isolation « murs + plafond + plancher » (ITI3)
	Epaisseur d'isolant	8 cm	8 cm	8 cm
	Durée de vie	43 ans		
	Hétérogénéité des prix (écart-type/moyenne)	0,5		
Isolation thermique par l'extérieur/la façade (ITE)	Description (nom dans le modèle)	Pas d'isolant (ITE1)	Isolation standard (ITE2)	Isolation épaisse (ITE3)
	Epaisseur d'isolant	0 cm	8 cm	20 cm
	Durée de vie	68 ans		
	Hétérogénéité des prix (écart-type/moyenne)	0,3		
Changement de fenêtres (fen)	Description (nom dans le modèle)	≤Th8 (fen1)	Th9 (fen2)	≥Th10 (fen3)
	U (en W/m ² .K)	1,9	1,7	1,5
	Durée de vie	32 ans		
	Hétérogénéité des prix (écart-type/moyenne)	0,3		
Système de chauffage à l'électricité (elec)	Description (nom dans le modèle)	Convecteur (elec1)	Plancher/plafond rayonnant (elec2)	Pompe à chaleur (elec3)
	Rendement (en %)	94	96	160
	Durée de vie	24 ans		
	Hétérogénéité des prix (écart-type/moyenne)	0,3		
Système de chauffage au gaz ou au fioul (comb)	Description (nom dans le modèle)	Chaudière standard (comb1)	Chaudière à basse température (comb2)	Chaudière à condensation (comb3)
	Rendement (en %)	68/63 (maison/appart.)	70/66 (maison/appart.)	73/70 (maison/appart.)
	Durée de vie	24 ans		
	Hétérogénéité des prix (écart-type/moyenne)	0,3		
Système de chauffage au bois (bois)	Description (nom dans le modèle)	Poêle (bois1)	Chaudière (bois2)	-
	Rendement (en %)	27	32/40 (maison/appart.)	-
	Durée de vie	24 ans		
	Hétérogénéité des prix (écart-type/moyenne)	0,3		

Tableau 17 : Description des options technologiques de rénovation étant proposées aux ménages dans le modèle BEUS (technologie « représentative », performance, durée de vie).

En ce qui concerne les systèmes de chauffage, certains coûts sont ajoutés à ceux mentionnés dans la base de données OPEN lorsque le ménage change d'énergie de chauffage (*fuel switch*). En effet, certains achats complémentaires sont nécessaires pour adapter l'infrastructure existante au système choisi. Par exemple, si un ménage est chauffé à l'aide de convecteurs électriques, il devra installer un conduit d'évacuation des fumées et une boucle d'eau (tuyaux et radiateurs) s'il s'équipe d'une chaudière, ou encore acheter une cuve s'il s'équipe d'un chauffage au fioul. Ces coûts, spécifiques au changement d'énergie, peuvent être interprétés comme une composante de l'élasticité de substitution entre énergies, paramètre central de certains modèles économétriques de demande. En effet, si le coût d'adaptation de l'infrastructure à une autre énergie est très élevé, alors les ménages auront tendance à conserver leur énergie de chauffage même si son prix augmente, ce qui se traduit par une capacité limitée de substitution entre énergies. Dans le modèle, les coûts de changement d'énergie ont été évalués plus grossièrement à partir de coûts élémentaires : cuve de fioul, réseau d'émetteur sur boucle d'eau chaude, conduit d'évacuation des fumées, cheminée et coûts spécifiques à l'installation d'une pompe à chaleur. La prise en compte de ces coûts a mené à la définition de la matrice de changement d'énergie de chauffage suivante :

	Energie de chauffage avant rénovation				
		Electricité	Gaz	Fioul	Bois
Energie de chauffage après rénovation	Electricité	10	10	10	40
	Gaz	40	0	0	40
	Fioul	50	10	0	50
	Bois	10	10	10	0

Tableau 18 : Coûts (en euros par m² de surface habitable) associés au changement d'énergie de chauffage

L'évolution du prix des équipements de chauffage au cours du temps peut être, au choix, soit intégralement déterminée par le modélisateur, soit déterminée de manière endogène par un mécanisme d'apprentissage technologique, ce qui est détaillé dans la section suivante (2.2.2)

Pour prendre en compte le fait que les coûts ressentis par le ménage pour changer d'énergie de chauffage ne sont pas uniquement techniques mais aussi psychologiques et organisationnels (recherche d'information, aversion au risque associé à un système que l'on ne connaît pas aussi bien que le système existant), les coûts présentés dans le tableau ci-dessus sont multipliés par un facteur appelé « viscosité » dans le modèle. Des valeurs sensiblement supérieures à 1 impliqueront de plus grands freins au changement d'énergie de chauffage, d'où le nom de ce facteur.

Le traitement des technologies de production d'eau chaude sanitaire (ECS) a été réalisé de manière plus sommaire. En effet, il a été choisi, dans une approche simplificatrice, de conserver le mode¹⁵⁸ de production d'ECS sur toute la période de simulation. Ainsi, la seule situation dans laquelle la performance de la production d'ECS peut évoluer est celle où l'ECS est produite par le système de chauffage (cas des chaudières dites « double service »). Dans ce cas, lorsque le système de chauffage est renouvelé, alors le changement de son rendement influence celui de la production d'ECS. Cette représentation de la dynamique des systèmes de production d'ECS est particulièrement simplificatrice mais se justifie par la faible importance actuelle des consommations d'ECS par rapport au chauffage dans les logements existants¹⁵⁹. Elle reflète aussi le fait que l'ECS a été introduite dans

¹⁵⁸ 6 modes de production d'ECS sont distingués : pas d'ECS, ECS par chaudière collective, ECS par chaudière individuelle, ballon électrique à accumulation, ECS par chauffe-eau instantané électrique, ECS par chauffe-eau instantané gaz.

¹⁵⁹ Comme cela est indiqué dans le premier chapitre de cette thèse, la consommation d'ECS représente environ 15% de la somme des consommations d'ECS et de chauffage dans les logements existants. La situation est cependant sensiblement différente dans les logements neufs.

le modèle dans le but principal de permettre le calcul des consommations d'énergie liées aux usages pris en compte dans les étiquettes du DPE (climatisation exceptée).

c) *Reste de l'environnement*

L'environnement propre aux ménages représentés (logement, équipements, climat local) est décrit de manière explicite dans le modèle à l'échelle de chaque logement. Cet environnement individuel est par ailleurs complété par des variables décrivant l'environnement dans lequel évolue l'intégralité des ménages. En dehors des caractéristiques des équipements proposés aux ménages, décrits précédemment, cet environnement est caractérisé dans le modèle développé par un climat moyen¹⁶⁰, exprimé en degrés-heures, le prix des énergies commerciales, le revenu moyen¹⁶¹ des ménages ainsi que certains instruments de politique énergétique en vigueur (CIDD ainsi que deux instruments présentés dans la section 2.3 de ce chapitre). Cet environnement est déterminé à l'année initiale par les variables mesurées en 2010, et son évolution temporelle est fixée de manière exogène par le modélisateur, à qui plusieurs scénarios par défaut sont proposés. Ces scénarios sont présentés dans le dernier chapitre de cette thèse, qui décrit les hypothèses des exercices prospectifs proposés.

2.2.2. *Modélisation de la dynamique des variables fondamentales*

La dynamique temporelle des entités décrites précédemment peut être intégralement déterminée par l'utilisateur du modèle, ce qui correspond à un fonctionnement en modèle de comptabilité (tel que défini au second chapitre de la première partie). Cependant, trois variables fondamentales de la dynamique des consommations de chauffage du système {ménages-environnement} ont fait l'objet d'une modélisation endogène : *intensité d'utilisation* des équipements de chauffage, choix technologique des ménages et prix des équipements. Ceci permettant de décrire leur évolution de manière endogène si l'utilisateur le souhaite, ce qui correspond alors à un modèle de type simulation, dans lequel la variable d'intérêt est calculée à partir d'autres variables et non pas déterminée directement par le modélisateur. Ce choix proposé pour chacune des trois variables permet au modélisateur de se déplacer dans un continuum entre modèle de comptabilité et modèle de simulation.

a) *Intensité d'utilisation*

L'*intensité d'utilisation* des équipements de chauffage est un facteur multiplicatif appliqué aux consommations normées de chauffage calculées avec le modèle de calcul 3CL du DPE, tel que décrit dans l'Equation 33 :

Equation 33

$$C_{mod} = I \cdot C_{3CL}$$

Avec C_{mod} la consommation de chauffage modélisée, telle que comptabilisée au sein du modèle, I l'*intensité d'utilisation* et C_{3CL} la consommation de chauffage telle que calculée avec le modèle de calcul 3CL du DPE.

¹⁶⁰ Ce climat moyen est calculé à l'année initiale comme la moyenne pondérée des climats associés à chacun des logements représentés dans le modèle. Si ce climat moyen évolue au cours du temps, alors l'évolution est reportée de manière proportionnelle sur le climat de chacun des logements.

¹⁶¹ Le revenu moyen des ménages est traité de manière analogue au climat : un revenu moyen est calculé à l'année initiale, peut évoluer dans le temps, et cette évolution est répercutée de manière proportionnelle sur chacun des ménages.

Le choix est laissé au modélisateur entre plusieurs formes d'*intensité d'utilisation*, au sein desquelles plusieurs options sont proposées :

- **Forme constante.** La constante peut être choisie égale à 1, représentant les résultats directs du modèle de calcul 3CL. Dans ce cas, les consommations de chauffage modélisées sur l'ensemble de l'échantillon ne sont pas égales aux consommations observées. Cette option n'est donc pas réaliste d'un point de vue énergétique mais présente l'intérêt de suivre une norme de calcul utilisée par de nombreux acteurs. Une deuxième option d'*intensité d'utilisation* constante est celle où un facteur correctif unique (0,61) est appliqué à tous les logements, calculé de manière à ce que les consommations modélisées de chauffage sur l'ensemble de l'échantillon soient égales à la somme des consommations observées. Ce facteur correctif unique peut évoluer au fil du temps selon un scénario déterminé par le modélisateur. Enfin, une troisième option consiste à fixer l'*intensité d'utilisation* de chaque logement à la valeur observée sur l'échantillon pour chacun de ces logements, qui est alors égale au ratio entre la consommation de chauffage estimée sur facture et la consommation calculée avec 3CL. Si cette option est choisie, l'*intensité d'utilisation* est fixée sur l'intégralité de la période de simulation à sa valeur initiale, et ce pour chaque logement de l'échantillon.
- **Forme variable.** Dans ce cas, l'*intensité d'utilisation* est calculée en fonction des variables retenues comme déterminantes d'après l'analyse proposée dans le premier chapitre de la partie précédente. L'*intensité d'utilisation* est déterminée dans le modèle uniquement en fonction de la part budgétaire théorique (PBT) que les ménages alloueraient au chauffage s'ils consommaient la quantité d'énergie calculée par le modèle 3CL. Deux formes fonctionnelles de l'*intensité d'utilisation* en fonction de la PBT sont proposées au modélisateur : fonctions puissance et logistique, telles que définies dans le premier chapitre de la partie précédente.

C'est sous la forme « variable » que l'*intensité d'utilisation* peut être considérée comme endogène. Cette modélisation permet de représenter à la fois la malfaçon technique et l'adaptation des comportements d'usage à l'environnement technico-économique (performance du logement, rigueur climatique, prix des énergies, revenu). Les deux phénomènes ne sont pas dissociés dans le modèle par manque de données suffisamment robustes concernant l'importance de la malfaçon technique. D'autre part, en déterminant l'*intensité d'utilisation* à partir de la part budgétaire théorique et non pas du coût du service unitaire (tel que défini dans le premier chapitre de la partie précédente), le modèle représente l'élasticité de la demande de service « chauffage » au revenu comme aussi importante que l'élasticité à la performance, au prix de l'énergie de chauffage ou au climat. Cependant, on pourra noter que l'évolution du revenu des ménages est très majoritairement considérée comme une hypothèse exogène dans les exercices de prospective du secteur résidentiel et ne fait pas l'objet d'étude de sensibilité. En fixant une seule trajectoire de revenus des ménages, cette variable n'explique donc pas la variété des trajectoires d'*intensité d'utilisation* que l'on peut observer sur une palette de scénarios, variété expliquée essentiellement par les évolutions de prix des énergies, de performance et de climat.

On notera enfin que l'introduction du revenu, en plus des variables définissant le prix du service de chauffage (performance, climat, prix des énergies), implique une réduction de l'impact de ces dernières variables. En effet, l'élasticité de l'intensité à la part budgétaire théorique est estimée à 0,33 d'après la Figure 91 ci-dessous, alors que l'élasticité au prix théorique du service a été estimée à 0,65 dans le premier chapitre de la partie précédente. Cette simplification, pouvant être considérée comme abusive, présente cependant l'avantage de modéliser des élasticité de la consommation de chauffage au prix des énergies, au nombre de degrés-jours et à la performance des équipements (effet rebond « ingénieur ») plus proches des valeurs trouvées dans la littérature (généralement entre 10% et 40% selon les variables). Ce choix de modélisation représente un compromis entre

fidélité aux observations, simplicité de la représentation et cohérence avec les résultats de la littérature.

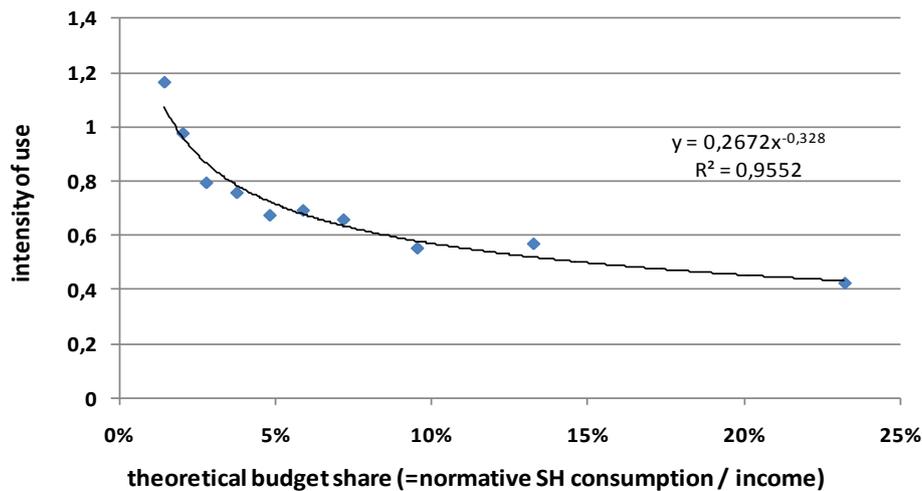


Figure 91 : Représentation de l'intensité d'utilisation en fonction de la part budgétaire théorique de chauffage, telle que modélisée dans BEUS (les points représentés sur la figure représentent l'intensité d'utilisation moyenne des déciles (environ 90 logements) de part budgétaire théorique de l'enquête EDF R&D 2009

Cette *intensité d'utilisation* représente un élément fondamental du rapprochement entre modèles d'ingénieurs et modèles d'économistes entrepris dans cette thèse. Elle permet en effet d'introduire une élasticité au prix des énergies, au revenu des ménages et à la performance des technologies dans des consommations calculées par un modèle purement technique. Elle permet d'autre part d'améliorer sensiblement le réalisme des modèles ingénieur en prenant en compte la restriction du niveau de service observable dans les logements les moins performants, ce que certains auteurs appellent « prebound effect » (e.g. [Galvin, 2012]). Cette dénomination reflète la situation de contrainte des comportements quotidiens avant une amélioration de la performance énergétique du logement, contrainte qui est partiellement relâchée après cette amélioration par la diminution du coût du service (effet rebond). Cette restriction est définie de manière dynamique et dépend en particulier du prix des énergies, ce qui représente une avancée importante par rapport aux modèles utilisant de manière plus ou moins explicite des coefficients correctifs fixes pour certains segments du parc de logements, comme par exemple Enerter [Houdant et Schram, 2009] ou MleL [Laurent et al., 2006].

L'*intensité d'utilisation* des équipements d'ECS est fixée à l'échelle de chaque logement à une constante égale au ratio entre la consommation d'ECS observée lors de l'enquête EDF R&D 2009 et la consommation calculée de manière normée avec le DPE. Il a été choisi de conserver cette *intensité d'utilisation* constante sur l'intégralité de la période de simulation. Ce choix est une simplification des hypothèses faites par Traisnel et ses collaborateurs (2010) concernant l'augmentation du taux de satisfaction des besoins d'ECS et la diffusion d'équipements limitant le débit d'eau chaude. Avec leurs hypothèses, on peut observer que les deux phénomènes se compensent approximativement en termes d'*intensité d'utilisation*.

b) Choix technologiques des ménages

L'obsolescence comme seul déclencheur des travaux de rénovations

La représentation du renouvellement des équipements dans BEUS est basée sur l'idée que, concernant les équipements de chauffage et l'isolation thermique des bâtis, il n'y a pas de réel marché de l'efficacité énergétique mais que celle-ci est une composante du marché de la rénovation des logements [Lagandré, 2010]. Ceci se traduit dans le modèle par le fait que les équipements sont rénovés uniquement à leur fin de vie, telle que décrite dans la base de données des équipements. Ce mécanisme de renouvellement en fin de vie de l'équipement implique ainsi qu'il n'y ait pas de perte de valeur résiduelle¹⁶² des équipements. Cette représentation du marché des équipements performants est simplifiée car elle ne prend pas en compte l'anticipation de la rénovation de certains équipements qui peut être observée lorsque des subventions importantes sont proposées. Cependant, elle permet de tenir compte des limitations de l'offre de rénovation : même si le contexte économique rend certaines rénovations thermiques particulièrement rentables, la filière d'entretien et rénovation des logements n'aura qu'une capacité limitée à répondre à une demande croissante de travaux. Certaines observations tendent à confirmer ce mécanisme : par exemple, entre 2006 et 2008, les prix du fioul domestique et du gaz ont augmenté d'environ 20% [PEGASE, 2012], le nombre de renouvellement de systèmes de chauffage n'a que peu varié (+4%) mais les équipements vendus présentaient une performance sensiblement supérieure¹⁶³ [OPEN, 2010].

En début de simulation, des durées de vie restantes sont attribuées à chaque équipement des logements de l'échantillon, tirées aléatoirement dans l'intervalle [1 ; durée de vie]. A chaque pas de temps de simulation, la durée de vie restante de chacun des équipements présents dans l'échantillon sont décrémentés de la durée du pas de temps. Tous les éléments ayant atteint une durée de vie restante nulle ou négative doivent être rénovés. Le tirage aléatoire des durées de vie restantes en début de simulation permet donc de simuler un flux constant de rénovations durant la simulation.

Un choix technologique porté sur le plus faible coût global actualisé

Pour chaque élément à rénover, les trois options de performance énergétique présentes dans la base de données des équipements (basic, medium et optimum) sont proposées au ménage. Les rénovations pouvant impliquer plusieurs équipements, toutes les combinaisons possibles des différents niveaux de performance de ces éléments sont proposées au ménage. Le ménage choisit alors l'équipement ou la combinaison d'équipements présentant le plus faible coût global actualisé (CGA), en faisant l'hypothèse d'une anticipation myope du prix des énergies et du climat. Comme cela a été précisé dans le second chapitre de la partie précédente, le CGA (Equation 34) prend en compte les coûts liés à l'achat de l'équipement, les coûts liés à la consommation d'énergie pendant la durée de vie de l'équipement, ainsi qu'un ensemble de coûts et bénéfices non énergétiques, détaillés dans la section suivante. Enfin, on notera que lorsqu'une combinaison de technologies est proposée à un ménage, la durée de vie prise en compte pour le calcul du CGA est celle de l'équipement présentant la plus faible durée de vie parmi l'ensemble des équipements rénovés.

¹⁶² Si un équipement est renouvelé avant la fin de sa durée de vie, on peut considérer qu'une partie de sa valeur, appelée « valeur résiduelle », est perdue.

¹⁶³ Dans la segmentation de performance des systèmes de chauffage utilisée par OPEN, les parts de marché des systèmes les moins performants (« BASIC ») étaient de 56% en 2006 contre 36% en 2008.

Equation 34

$$CGA = I_0 + \sum_{i=1}^N \frac{C_i - B_i}{(1 + TA)^i}$$

Avec TA le taux d'actualisation, N la durée de vie de l'équipement rénové, I_0 le coût initial des équipements rénovés, C_i et B_i les coûts et bénéfices de l'année i

Le modèle développé présente la particularité¹⁶⁴ de ne pas attribuer un coût unique à une technologie mais une distribution de coûts autour d'une moyenne. Ce choix de modélisation résulte en partie d'une volonté de fidélité par rapport aux observations, et d'autre part de la volonté de prendre en compte les différentes sources d'hétérogénéité du marché de la rénovation généralement non représentées dans les modèles ingénieur. Ainsi, pour chaque option technologique proposée au ménage lorsqu'un élément du logement doit être rénové, ce ménage tire aléatoirement un prix dans la distribution de prix de cet équipement. Ce tir aléatoire permet la prise en compte, dans le modèle, de l'hétérogénéité observée des prix des équipements pour une même performance. La Figure 92 illustre ce mécanisme dans le cas où un ménage doit renouveler un élément de son logement. Ce ménage a alors le choix entre trois options de performance énergétique différentes, caractérisées par un prix moyen différent et une distribution des prix possibles autour de ces prix moyens. Le ménage tirera aléatoirement un prix dans chacune des distributions pour calculer le CGA de chaque option de performance énergétique par la suite.

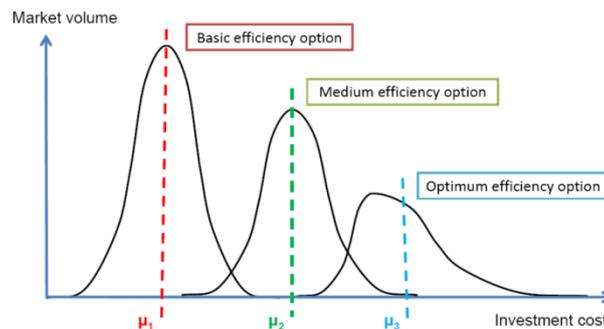


Figure 92 : Distribution de probabilité des prix correspondant à trois niveaux de performance pour un même type de rénovation [Laurent et al., 2011]

Pour calculer le CGA, un taux d'actualisation doit être déterminé. La littérature portant sur l'achat d'équipements énergétiquement performants révèle des taux d'actualisation implicites très variables, même en ce qui concerne uniquement les technologies liées au conditionnement thermique (isolation, systèmes de chauffage et climatisation), prenant des valeurs entre 9% et 77% [Jaccard et Dennis, 2006 ; Train, 1985 ; Ansar et Sparks, 2009]). Ces valeurs élevées sont expliquées par le fait que le taux d'actualisation implicite est utilisé pour représenter l'ensemble des barrières à l'efficacité énergétique. Or, dans le modèle développé, ces barrières sont représentées à l'aide de coûts initiaux non explicites (ou coûts intangibles, voir la partie « Représentation des coûts non explicites » de cette section). Il apparaît donc nécessaire de retenir un taux d'actualisation relativement bas, correspondant à la pure préférence des agents pour le présent et non pas aux barrières à l'efficacité énergétique. D'autre part, les études les plus récentes concernant les technologies de chauffage et d'isolation relèvent des taux d'actualisation déclarés (donc n'intégrant pas les obstacles qui existent entre l'intention et l'action) entre 9 et 20% [Jaccard et Dennis, 2006 ; Cayla, 2011]. C'est à partir de ces éléments que le taux d'actualisation moyen du modèle a été choisi à 12%.

¹⁶⁴ Aucun des modèles étudiés au cours de la thèse ne présentent cette spécificité.

D'autre part, il a été observé que le taux d'actualisation peut dépendre du revenu des ménages [Hausmann, 1979 ; Berkovec et al., 1983 ; Little, 1984]. Les mesures de taux d'actualisation implicites, réalisées à partir de l'analyse d'achats effectifs de ménages, montrent que ce taux d'actualisation augmente lorsque le revenu diminue, ce qui peut représenter à la fois une préférence pour le présent accrue pour les ménages les moins aisés, mais aussi de plus fortes contraintes d'accès au capital. Il est intéressant de noter que certaines mesures, en particulier celles de Cayla (2011) concernant les systèmes de chauffage en France, relèvent le phénomène inverse (taux d'actualisation croissants avec les revenus), interprétées comme une volonté croissante de rentabilité lorsqu'une rénovation est anticipée dans le but de faire des économies financières. Cependant, ces estimations reposent sur des préférences d'achat déclarées et non pas une mesure des achats réellement effectués, ce qui met en relief l'écart entre les intentions et les actions. Dans le modèle développé, le taux d'actualisation est fixé à une valeur constante (de 12%) pour les locataires, quel que soit leur revenu, car le revenu du décideur des investissements (le propriétaire) est inconnu. Dans le cas des ménages propriétaires occupants, le revenu du ménage décideur des rénovations est connu et le taux d'actualisation est déterminé, selon le quintile de revenu, d'après l'Equation 35 :

Equation 35

$$TA_i = 0,12 \cdot R^{i-3} \quad \text{Avec } TA_i \text{ le taux d'actualisation d'un ménage propriétaire occupant du quintile de revenu } i, \text{ et } R \text{ le ratio entre le taux d'actualisation de deux quintiles successifs.}$$

D'après cette formule, le taux d'actualisation des ménages croît dans le sens inverse de leurs revenus si R est inférieur à 1. En représentant les observations d'Hausmann (1979) sous ce formalisme, celles-ci mènent à une estimation de $R = 0,6$, ce qui a été retenu dans le modèle. Ainsi, un ménage du quintile central utilise un taux d'actualisation de 12%, alors que les ménages plus modestes (respectivement plus aisés) utilisent un taux plus élevé (respectivement plus faible).

Enfin, une approximation du calcul du CGA a été retenue pour plus de simplicité dans le calcul. Celle-ci a été proposée par Sadler (2003) et est présentée dans l'Equation 36. Elle n'est utilisable que dans le cas d'une anticipation myope des coûts annuels futurs, qui sont supposés constants d'une année à l'autre dans la formule, ce qui est le cas du modèle développé.

Equation 36

$$CGA = I_0 + \sum_{i=1}^N \frac{C_i - B_i}{(1+TA)^i} \approx I_0 \cdot \frac{TA}{1-(1+TA)^{-N}} + C_i - B_i \quad \text{Avec } I_0 \text{ le prix de l'équipement (issu du tirage aléatoire), } TA \text{ le taux d'actualisation, } N \text{ la durée de vie de l'équipement, } C_i \text{ et } B_i \text{ les coûts et bénéfices à l'année } i$$

Prise en compte des coûts et bénéfices non énergétiques dans le choix des ménages

Une particularité du calcul du CGA dans le modèle développé est que celui-ci ne prend pas uniquement en compte le coût d'investissement des équipements et les factures énergétiques futures. En effet, comme présenté dans le second chapitre de la partie précédente, les ménages ne perçoivent pas uniquement ces coûts mais aussi des coûts et bénéfices non énergétiques. Dans le modèle développé, les coûts et bénéfices non énergétiques peuvent être distingués en trois catégories :

- **Spécifiques à une technologie.** Ces coûts et bénéfices représentent la valorisation par les ménages de certaines caractéristiques des systèmes de chauffage : commodité d'usage, fiabilité, indépendance des énergies fossiles et impact environnemental. Chaque système de chauffage représenté dans le modèle est noté vis-à-vis de ces critères en se basant sur les observations de Sopa (2011) ainsi que celles de Michelsen et Madlener (2011) (Tableau 19). Pour pouvoir traduire l'influence de ces notes dans le choix technologique des ménages il est alors nécessaire d'attribuer une valeur monétaire à chacun de ces critères. Or, le formalisme dans lequel les résultats de deux sources mentionnées sont exprimés indique l'influence sur la probabilité de choix d'une solution par rapport à une autre, ce qu'il est difficile de traduire en valeur monétaire absolue, et qui n'a donc pas été réalisé dans cette thèse. D'autre part, on peut observer qu'une même caractéristique de technologie peut avoir des influences sensiblement différentes d'une technologie à une autre et peut n'être significative que pour une seule technologie [Claudy et al., 2011 ; Sopa, 2011]. C'est pourquoi la valorisation maximale des caractéristiques mentionnées (commodité d'usage, indépendance des énergies fossiles et impact environnemental) sont donc laissées en paramètre du modèle, sans valeur proposée par défaut. La prise en compte de ces éléments dans le modèle est réalisée par l'intermédiaire de l'Equation 37. Cette structure de calcul est suffisante pour la réalisation d'une étude de sensibilité mais la valorisation maximale des caractéristiques mentionnées (Tableau 19) a été fixée à une valeur nulle dans le cadre des simulations présentées dans le chapitre suivant. En effet, cette valorisation est encore peu renseignée dans la littérature et aucune étude spécifique à la France n'existe à notre connaissance.

		compatibilité avec les usages	fiabilité	Indépendance vis-à-vis des énergies fossiles	qualité environnementale
source des notations		Claudy + Michelsen + Sopa	Sopa	Claudy + Michelsen	Michelsen & Madlener
type de système de chauffage	elec1	0,11	0,85	0,03	-0,02
	elec2	0,11	0,85	0,03	-0,02
	elec3	0,32	0,72	0,03	-0,02
	comb1	0,37	0,8	-0,08	0
	comb2	0,37	0,8	-0,08	0
	comb3	0,37	0,8	-0,08	0
	bois1	0,57	0,61	0,12	0,02
	bois2	0,57	0,61	0,12	0,02
	bois3	0,57	0,61	0,12	0,02

Tableau 19 : Notation des systèmes de chauffage vis-à-vis de caractéristiques non énergétiques de l'efficacité énergétique

Equation 37

$$BNE_{ci} = VM_c \cdot \frac{n_i - n_{min}}{n_{max} - n_{min}}$$

Avec BNE_{ci} le bénéfice non-énergétique attaché à la caractéristique c d'une technologie i , VM_c la valorisation maximale de ce critère par les ménages, n_i la note attribuée à la technologie i vis-à-vis de la caractéristique c , n_{min} et n_{max} les notes minimales et maximales attribuées aux technologies existantes par les ménages vis-à-vis de la caractéristique c

- **Liés à une technologie et dépendant du contexte.** L'augmentation de confort consécutive à l'amélioration de la performance énergétique d'un logement, et en particulier en ce qui concerne l'isolation, est un élément particulièrement valorisé par les ménages [Jaccard et Dennis, 2006]. Or, *l'intensité d'utilisation* des équipements de chauffage, telle que définie précédemment, peut être considérée comme un estimateur du confort thermique dans le logement. Celui-ci ne dépend pas uniquement d'une technologie mais de la performance globale du logement, ainsi que de la rigueur du climat et du prix des énergies. La valorisation des gains de confort est calculée dans le modèle par la formule suivante :

Equation 38

$$\text{confort} = VCM \cdot (\min(I; 1,3) - 0,3)$$

Avec VCM la valorisation d'un confort maximal, soit environ 1000€/an d'après les travaux de Jaccard et Dennis (2006), *I l'intensité d'utilisation*. 1,3 et 0,3 ont été choisis comme bornes extrêmes de *l'intensité d'utilisation*, représentant les confort maximum et minimum.

Un autre coût non énergétique lié non seulement à une technologie mais aussi à son contexte est la perte partielle de l'usage du logement lors de certaines rénovations. Ce coût se réfère en particulier à deux conséquences de l'isolation par l'intérieur : la réduction de l'espace habitable et la perturbation liée aux travaux. Dans le modèle, ces coûts ont été représentés par une perte de loyer proportionnelle à la surface perdue et à la durée de cette perte. La valeur locative d'un mètre carré d'habitation n'a pas la même valeur selon la localisation du logement, ce qui peut être une des explications du peu d'isolation par l'intérieur observable au cœur de Paris. Dans le modèle, la valeur locative du m² dépend du type de tissu urbain dans lequel se situe le logement (trois types sont distingués : dense, périphérique ou à densité moyenne, rural ou périurbain ou peu dense, d'après la typologie définie par les travaux de Cayla (2011)). L'isolation par l'intérieur implique une perte permanente de l'espace perdu par l'épaisseur d'isolant, alors que la perturbation qu'impliquent les travaux mène à la perte de une à trois semaines de loyer selon le niveau de performance de l'isolation par l'intérieur¹⁶⁵. D'après les travaux de van Oel (2009), la perte d'usage momentanée d'un logement, consécutive à de lourdes rénovations intérieures, apparaît comme un frein fort à ces rénovations.

La rénovation du bâti d'un logement a par ailleurs des effets positifs sur la valeur patrimoniale de celui-ci, même si elle n'induit pas d'amélioration de la performance énergétique (par exemple un ravalement de façade sans isolation améliore l'aspect du logement, et donc sa valeur, sans en améliorer la performance). Pour représenter ces bénéfices, le modèle calcule une augmentation en pourcentage de la valeur du logement, en se basant sur les résultats des travaux de Banfi (2008), présentés dans le Tableau 20. La valeur du logement dépendant dans le modèle du type de tissu urbain dans lequel il se trouve, l'augmentation de valeur patrimoniale consécutive à des travaux de rénovation du bâti ne dépend donc pas uniquement de la technologie utilisée mais aussi du contexte dans lequel cette technologie est installée. On notera que les résultats utilisés ne concernent que la rénovation des façades (de la simple peinture à l'isolation thermique par l'extérieur) et le

¹⁶⁵ Dans la typologie de travaux OPEN, la performance de l'isolation par l'intérieur est exprimée en nombre de faces intérieures rénovées, incluant les murs, le plafond et le sol. Le terme de performance n'est donc pas très adapté sur ce poste de rénovation. Il a été considéré dans une première approche que les travaux durent une semaine par type de paroi rénovée (plancher, plafond, murs), d'où l'hypothèse d'une perte d'une à trois semaines de loyer en cas de rénovation par l'intérieur.

changement des fenêtres (installation de double ou triple vitrage). Le modèle pourrait être amélioré en intégrant des éléments liés à la toiture et à l'isolation des murs par l'intérieur.

Type de rénovation	Augmentation de la valeur patrimoniale (en %)
ITE1	3
ITE2	9
ITE3	12
Fen1	13
Fen2	14
Fen3	14

Tableau 20 : Augmentation de la valeur patrimoniale d'un logement (en pourcentage) consécutive à des rénovations du bâti, d'après [Banfi et al., 2006]

- **Spécifiques à un instrument de politique énergétique.** Ceci concerne uniquement la perception des subventions par les ménages. Comme cela a été présenté dans le second chapitre de la partie précédente, plusieurs études révèlent que les ménages tendent à survaloriser les subventions qu'ils peuvent recevoir. Ceci a été traduit dans le modèle par la représentation d'un « effet d'annonce », augmentant de 60% la valeur des éventuelles subventions dans le calcul du CGA à l'échelle du ménage, comme indiqué dans l'Equation 39. Cette valeur se situe dans la marge basse des (rares) résultats de la littérature.

Equation 39

$$I_o = P_{HS} - PrctSubv \cdot P_{HS} \cdot EffetAnnonce$$

$$= P_{HS} \cdot (1 - 1,6 \cdot PrctSubv)$$

Avec I_o le prix de l'équipement perçu par le ménage, P_{HS} le prix de l'équipement hors subventions, $PrctSubv$ le pourcentage de réduction sur le prix offert par la subvention, et $EffetAnnonce$ l'effet d'annonce, exprimé en facteur multiplicatif de la subvention reçue (égal à 1,6 pour refléter la survalorisation de 60% relevée dans la littérature)

Par ailleurs, pour une même technologie, sa perception peut varier d'un ménage à l'autre. Ceci est traduit dans le modèle développé par l'ajout au CGA d'un terme aléatoire d'espérance nulle et dont la variance est un paramètre réglable par le modélisateur. Ce terme permet de représenter l'hétérogénéité des préférences des ménages indépendamment des critères énergétiques des technologies (par exemple le fait que certaines personnes préfèrent une énergie de chauffage plutôt qu'une autre, indépendamment du prix de celles-ci). Elle permet ainsi de compléter l'hétérogénéité du marché, reconstituée par celle de la performance des logements (représentée dans les modèles *bottom-up* ingénieur), celle du prix des équipements (jamais prise en compte dans les modèles *bottom-up* ingénieur à notre connaissance) et celle des logiques d'achat (représentée par des taux d'actualisation différents par tranche de revenu), par un terme représentant le reste des hétérogénéités de marché existantes. Sa valeur peut ainsi servir de paramètre d'ajustement pour simuler l'hétérogénéité réelle du marché de la rénovation thermique des logements. On notera cependant que cette hétérogénéité réelle du marché est difficilement mesurable. Elle est par exemple estimée à partir de préférences déclarées et non révélées dans le modèle CIMS [Jaccard et Dennis, 2006], reflétant ainsi l'hétérogénéité des déclarations des ménages et non celle du marché réel.

Représentation des coûts non explicites

L'ensemble des paramètres mentionnés précédemment ne permet pas de simuler les parts de marché des différents équipements observées actuellement sur le marché. Pour calibrer le modèle développé sur la base de ces observations, des coûts additionnels ont été introduits concernant les technologies les plus performantes (medium et optimum). Ces coûts peuvent être interprétés comme des barrières à l'efficacité énergétique, en particulier celles liées à l'accès à l'information concernant les technologies les moins présentes sur le marché. Elles ont été conceptualisées dans la littérature consacrée à l'efficacité énergétique sous le terme d' « effet de voisinage » (*neighbor effect* [Mau et al., 2009]) et d' « apprentissage par interaction » (*learning-by-interacting* [Lundvall, 1992]), et également dans la littérature liée à la diffusion des innovation par l'importance de l'observabilité des technologie dans leur processus de diffusion [Rogers, 2003]. Ces termes reflètent l'idée qu'un ménage est moins enclin à acheter une technologie qu'il connaît peu, cette connaissance pouvant s'acquérir principalement par interaction avec ses proches ou par l'observation directe de la technologie (par exemple dans le cas des voitures hybrides, au design reconnaissable, ou dans celui des panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques). Ces coûts supplémentaires peuvent par ailleurs être aussi interprétés comme des coûts de transaction plus élevés pour les technologies les moins connues, nécessitant une recherche d'information et de contractants plus importante que pour les technologies les plus communes, de performance énergétique standard.

Dans le modèle développé, les coûts non explicites, ou coûts intangibles, ont été fixés à une valeur nulle pour les options technologiques de performance standard, qui reflètent le fait qu'elles sont les plus connues, et prennent des valeurs positives pour les technologies les plus performantes. Concernant les options technologiques performantes (niveau de performance medium et optimum), les coûts non explicites ont été déterminés par une procédure de calibrage présentée dans la section 2.4 de ce chapitre. Les coûts additionnels ainsi déterminés sont considérés constants pour l'intégralité de la période simulée, ce qui constitue un défaut du modèle vis-à-vis de la représentation de la dynamique de diffusion des technologies. En effet, si une technologie performante est largement choisie par les ménages, on peut alors considérer que le manque de visibilité et plus généralement d'information s'estompe, ce qui devrait impliquer une diminution des coûts additionnels associés à cette technologie (ce qui est par exemple fait dans le modèle RES-IRF). Ce défaut peut être partiellement compensé par la possibilité laissée au modélisateur de déterminer un scénario d'évolution temporelle des coûts intangibles pour chaque technologie.

c) Apprentissage technologique

Si les coûts non explicites ne font pas l'objet d'une modélisation dynamique dans le modèle BEUS, c'est cependant le cas des coûts d'investissement des technologies. La modélisation de leur dynamique est basée sur le concept d'apprentissage technologique, et plus particulièrement celui de « *learning-by-doing* » [Arrow, 1962] : le coût d'une technologie diminue avec la quantité installée de cette technologie. Ce mécanisme est fréquemment utilisé dans les modèles prospectifs s'attachant aux technologies de production d'électricité (par exemple dans le modèle POLES [Criqui, 2005]), mais sensiblement moins en ce qui concerne les technologies de la demande d'énergie (isolation, systèmes de chauffage...). Le paramètre principal de la modélisation de ce mécanisme est le pourcentage de réduction de prix lié à un doublement de la capacité installée, appelé taux d'apprentissage A . Le prix des technologies, par niveau de performance, est ainsi déterminé dans le modèle par la fonction suivante :

Equation 40

$$P_i = P_0 \cdot \left((1 - A)^{\frac{\log\left(\frac{capa_i}{capa_0}\right)}{\log(2)}} \right)$$

Avec P_i le prix à l'année i , P_0 le prix à l'année initiale, A le taux d'apprentissage, $capa_0$ la quantité installée à l'année initiale et $capa_i$ la quantité installée à l'année i

Dans le modèle, les capacités installées à l'année initiale sont mesurées sur la base de données représentative des ménages, de leurs logements et équipements. Les taux d'apprentissage ont été déterminés à partir de la revue de littérature proposée par Weiss et ses collaborateurs (2008). Les valeurs retenues sont présentées dans le Tableau 21.

	TAUX D'APPRENTISSAGE
ITI1	0,15
ITI2	0,15
ITI3	0,15
ITE1	0,2
ITE2	0,2
ITE3	0,2
toit1	0,15
toit2	0,15
toit3	0,15
fen1	0,2
fen2	0,2
fen3	0,2
elec1	0,1
elec2	0,1
elec3	0,3
comb1	0,1
comb2	0,1
comb3	0,1
bois1	0,2
bois2	0,2
bois3	0,2

Tableau 21 : Taux d'apprentissage des technologies représentées dans le modèle

2.3. Instruments exploratoires d'efficacité énergétique modélisés

A partir du modèle développé, un instrument innovant de politique énergétique a été imaginé et son effet sur la dynamique des consommations énergétiques simulé : la subvention conditionnelle. La conception de cet instrument a été motivée par le constat que les instruments proposés actuellement (CIDD, éco-prêt à taux zéro, réglementation thermique sur les logements existants) ne semblent pas suffisants pour l'atteinte des objectifs nationaux à horizon 2020 et 2050 [Giraudet, 2011].

2.3.1. Subvention conditionnelle

Ce premier instrument a été développé à partir du constat que, dans le cas d'un marché dans lequel les prix des équipements d'une même performance sont très hétérogènes, alors, si ces équipements sont subventionnés en pourcentage du prix d'achat, une quantité sensiblement supérieure de subventions peut être allouée aux équipements les plus chers par rapport aux équipements les moins onéreux (alors que leurs performances sont identiques). Cette situation peut apparaître problématique comme cela a été développé dans le second chapitre de la partie précédente. Pour augmenter le caractère coût-efficace d'une subvention attribuée en pourcentage du prix d'achat, un mécanisme de *subvention conditionnelle* (SC) a été modélisé à titre exploratoire.

Celui-ci consiste à attribuer un pourcentage de subvention décroissant avec le prix de vente d'un type d'équipement donné, à une performance donnée. Par exemple, une pompe à chaleur vendue à 5 000€ ayant la même performance qu'une autre vendue à un prix deux fois plus élevé recevrait une subvention supérieure (en pourcentage) à la deuxième.

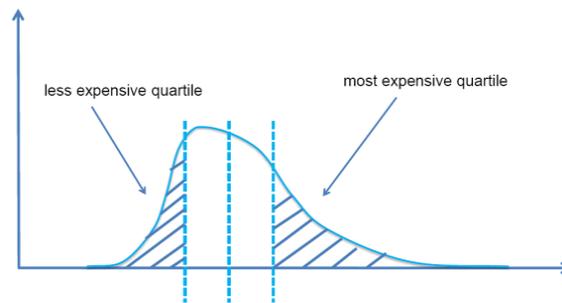


Figure 93 : Quartiles de la distribution de prix

Pour modéliser ce mécanisme, la distribution de prix des équipements pour un niveau de performance donné est divisée en quartiles auxquels sont affectés des pourcentages de subvention spécifiques : plus le prix est élevé, plus le pourcentage est faible. Ceci permet, pour un même budget total dédié à la subvention d'un équipement, de proposer un pourcentage de réduction plus intéressant pour les prix les plus faibles, les rendant ainsi plus accessibles aux ménages les moins aisés. Le budget additionnel nécessaire à l'augmentation de la subvention pour les équipements les moins chers est compensé par une diminution de la subvention pour les équipements les plus chers. Ce mécanisme a été modélisé dans BEUS de la manière suivante, en se basant sur le cas où l'équipement est initialement subventionné à $x\%$ en moyenne :

Equation 41

$$SC(P_{eq}) = x \cdot (1 + Asym_i)$$

Avec SC le pourcentage de subvention conditionnelle, x le pourcentage de subvention moyen, P_{eq} le prix de l'équipement, $i \in [1,4]$ le numéro du quartile de prix auquel appartient P_{eq} , $Asym_i = 0$ si $i=2$ ou $i=3$, $Asym_1 \in [0,1]$ et $Asym_4 = -Asym_1$

Cette formulation permet, grâce au paramètre $Asym$, de représenter les variantes allant de la subvention classique quand $Asym$ est nul (les équipements sont tous subventionnés de la même manière) à une situation où la subvention pour le premier quartile de prix est doublée et celle du dernier quartile rendue nulle ($Asym_1=1$). L'impact de cette subvention conditionnelle sur le coût des subventions pour une même efficacité est évalué dans le dernier chapitre de cette thèse.

2.4. Calibration

Le modèle développé est calibré sur des données observées en ce qui concerne deux variables : la consommation d'énergie et les parts de marché des technologies de rénovation thermique des logements. La première calibration est nécessaire car l'intensité d'utilisation implémentée dans le modèle est déterminée à partir d'une régression par segments du parc¹⁶⁶ dont l'application à chaque logement de l'échantillon ne garantit pas de reconstituer exactement la consommation nationale de chauffage. Cette calibration, effectuée en appliquant un coefficient

¹⁶⁶ Voir section 2.2.2.a de ce chapitre.

multiplicatif à la consommation de chaque logement du modèle, est cependant minime, de l'ordre de quelques pourcents.

La deuxième calibration du modèle consiste à attribuer des coûts intangibles aux différentes options technologiques de manière à ce que les parts de marché simulées soient semblables à celles observées à une année de référence. L'année de calibration prise pour référence est 2008 car c'est la date la plus récente des mesures de l'enquête OPEN [OPEN, 2010]. La simulation a donc été réalisée en prenant en compte le prix des énergies en 2008 ainsi que les montants de crédits d'impôts proposés cette année¹⁶⁷. Comme cela a été présenté dans le second chapitre de la partie précédente, les parts de marché des différentes technologies dépendent essentiellement du CGA de chacune des technologies et de l'hétérogénéité du marché. Le CGA lui-même dépend des coûts « classiques » (investissement initial, consommations énergétiques), des coûts et bénéfices non énergétiques (valeur patrimoniale, valorisation du confort), des coûts intangibles et du taux d'actualisation. Pour permettre la calibration des parts de marché du modèle à partir des coûts intangibles, il est nécessaire de fixer un taux d'actualisation et une hétérogénéité du marché. Au sein du modèle, le taux d'actualisation a été fixé tel que décrit dans la section 2.2.2.b.

L'hétérogénéité du marché, quant à elle, n'est pas fixée de manière agrégée¹⁶⁸ mais est la somme des hétérogénéités représentées de manière explicite, c'est-à-dire celles de la performance initiale, de l'environnement physique, de la logique d'achat (au travers de taux d'actualisation différents par classe de revenu) et du prix des équipements de même performance. Le modèle développé laisse aussi la possibilité d'introduire l'hétérogénéité des préférences des ménages au travers d'un terme aléatoire (cf section 2.2.2.b). Mais, sans mesure connue de cette hétérogénéité, elle a été considérée comme nulle pour la calibration.

De même, la valorisation par les ménages des caractéristiques propres aux équipements de chauffage (fiabilité, impact environnemental, indépendance des énergies fossiles) étant mal connue, celle-ci a aussi été considérée comme nulle pour réaliser la calibration. A l'opposé, les autres coûts et bénéfices non énergétiques (gain de confort, gain ou perte de valeur patrimoniale) ont été pris en compte.

La calibration du modèle sur les parts de marché observées a été réalisée en effectuant une étude de sensibilité sur le paramètre x de l'Equation 42. La valeur de x pour l'option basic étant fixée à 0 pour signifier l'absence de barrières pour la technologie de référence sur un marché:

Equation 42

$$PEQ_{mod} = PEQ_{tech} \cdot (1 + x)$$

Avec PEQ_{mod} le prix d'équipement modélisé tel que pris en compte dans le calcul du CGA, PEQ_{tech} le prix d'équipement moyen tel que défini dans la base de données, x le pourcentage du coût d'investissement que représentent les coûts non techniques perçus par les ménages.

Pour chaque simulation de parts de marché, l'indicateur suivant a été calculé au sein de chaque type de rénovation :

¹⁶⁷ Le crédit d'impôts s'appliquant dans le modèle à l'intégralité du prix payé par les ménages, le pourcentage de réduction proposé aux ménages a été réduit d'un facteur 2 pour prendre en compte le fait que ce crédit d'impôts n'était appliqué en 2008 qu'aux coûts d'équipements et non aux coûts de main d'œuvre, de coûts secondaires (tuyauterie, réservoirs...) et coûts cachés (nettoyage, traitement des déchets...).

¹⁶⁸ Comme cela peut être le cas dans les modèles économétriques, comme par exemple RES-IRF [Giraudet, 2011].

Equation 43

$$distance = \sum_{i=1}^3 (PDM_{sim\ i,k} - PDM_{obs\ i,k})^2$$

Avec PDM_{sim} la part de marché simulée de la technologie k avec le niveau de performance i, et PDM_{obs} la part de marché observée dans l'enquête OPEN de la technologie k avec le niveau de performance i. Les valeurs de i, entre 1 et 3, correspondent aux performances basic, medium et optimum de la base de données des équipements.

La calibration a donc consisté à retenir au sein des différentes simulations de l'étude de sensibilité les valeurs de x minimisant cette distance. Les calculs ont été réalisés en simulant, pour chaque type de rénovation, la rénovation de l'intégralité des équipements de ce type et en laissant inchangés les autres éléments des logements.

Pour l'isolation des murs par l'extérieur et de la toiture, les observations de l'enquête OPEN n'indiquent que la part de marché agrégée des niveaux de performance 2 et 3. Dans ce cas, les parts de marché observées de ces niveaux de performance ont été considérées comme identiques, égales à la moitié de la part agrégée observée. Cette hypothèse simplificatrice pourrait être améliorée à l'aide d'observations plus précises. Par ailleurs, dans les résultats de l'enquête OPEN, il est expliqué que la moitié des cas où la toiture n'est pas rénovée en ajoutant de l'isolation est expliquée par la présence d'isolation préexistante. C'est pourquoi, pour la calibration des coûts intangibles des rénovations de toiture, il a été considéré que la part de marché du niveau de performance basic (sans isolation) était deux fois moindre que celle présentée dans les résultats.

En ce qui concerne la calibration des coûts intangibles des systèmes de chauffage, celle-ci a été réalisée dans un premier temps en cherchant à déterminer les parts de marché observées par niveau de performance, en fixant le coût intangible du niveau basic à une valeur nulle, comme pour les autres technologies. Dans un deuxième temps, une recherche par dichotomie a permis de s'approcher des parts de marché observées par niveau de performance et par énergie de chauffage. Les résultats du processus de calibration sont présentés dans le Tableau 22 ci-dessous.

Type de rénovation	Niveau de performance	Coût intangible
Isolation des parois par l'intérieur	ITI1	0
	ITI2	-20%
	ITI3	60%
Isolation des murs par l'extérieur	ITE1	0
	ITE2	160%
	ITE3	150%
Isolation de la toiture	toit1	0
	toit2	60%
	toit3	90%
Changement de fenêtres	fen1	0
	fen2	-10%
	fen3	10%
Système de chauffage à l'électricité	elec1	0
	elec2	-13%
	elec3	47%
Système de chauffage à combustible (gaz ou fioul)	comb1	38%
	comb2	33%
	comb3	40%
Système de chauffage au bois	bois1	52%

	bois2	25%
	bois3	-

Tableau 22 : Coûts intangibles déterminés par la procédure de calibration

Les résultats de calibration permettent ainsi de quantifier, au sein d'une même technologie, l'ordre de grandeur des barrières à l'efficacité énergétique concernant les variantes les plus performantes de cette technologie (portant l'indice 2 ou 3) par rapport à la référence de marché (indice 1). Alors que les barrières à l'efficacité énergétique sont généralement représentées dans la littérature à l'aide d'un taux d'actualisation implicite élevé qu'il est difficile d'interpréter en termes concrets, la procédure de calibration utilisée ici fait apparaître les mêmes barrières en termes de coût additionnel ressenti par les ménages, exprimé en pourcentage du prix d'achat de l'équipement. Si un équipement est associé à un coût intangible de $x\%$, cela signifie que sa diffusion technologique observée correspond à celle qui aurait eu lieu si son coût « ressenti » en moyenne par les ménages était égal à son prix observé sur le marché $+x\%$.

On peut suggérer les interprétations suivantes des résultats par technologie :

- **isolation du bâti par l'intérieur** : lors d'une rénovation par l'intérieur intégrant au moins l'isolation par l'intérieur des murs, on observe que l'isolation des murs et du plafond (IT12) présente un coût intangible négatif. Ceci peut être interprété comme par un faible dérangement supplémentaire lorsque le plafond est rénové en plus des murs, ce qui remettrait en partie en cause les hypothèses relatives à la durée du dérangement lors des rénovations par l'intérieur. Le coût intangible élevé (60%) associé à l'isolation du plancher en plus des murs et du plafond (IT13) peut être expliqué par une durée de vie des planchers sensiblement supérieure à celles des murs intérieurs et des plafonds. Il apparaît en effet, à dire d'experts, que le nombre annuel des rénovations de planchers est sensiblement inférieur à celui des rénovations des murs intérieurs ou du plafond.
- **isolation des murs par l'extérieur** : les coûts intangibles des niveaux de performance 2 et 3, correspondant à de l'isolation thermique des murs par l'extérieur, sont les plus élevés des technologies observées (160% et 150%). Ceci peut provenir du fait que l'ajout d'isolation des murs lors de ravalements de façades n'est pas encore rentré dans les habitudes (ni des ménages, ni des artisans). Cette suggestion d'interprétation est en partie confirmée par les données de l'enquête OPEN [OPEN, 2010] qui indiquent que, parmi les raisons de non-réalisation d'amélioration de la performance énergétique avancées par les installateurs, la réponse « ni moi ni le client ne l'a proposé » est la plus importante (derrière l'existence préalable d'isolation).
- **rénovation de la toiture** : on peut observer que les coûts intangibles associés aux options énergétiquement performantes (2 et 3) sont ici aussi assez élevés (respectivement 60% et 90%), même s'ils n'atteignent pas les valeurs trouvées pour l'isolation par l'extérieur. On peut observer ici aussi que les résultats de l'enquête OPEN indiquent que l'isolation de la toiture, lors de la rénovation de celle-ci, est encore souvent non proposée par l'installateur et le ménage. On peut aussi émettre l'hypothèse que la perte de volume associée à l'installation d'une isolation épaisse sous la toiture implique une perte de valeur ressentie par le ménage comme plus importante que celle prise comme hypothèse dans les calculs de CGA.
- **changement de fenêtres** : les coûts intangibles associés à cette filière de rénovation sont très semblables d'un niveau de performance à l'autre, et en moyenne très faibles. Ceci peut s'expliquer par le fait que les trois niveaux de performance représentés dans le modèle

correspondent à des niveaux assez poussés d'isolation thermique et phonique. On observe par ailleurs que le niveau de performance 2 bénéficie d'un coût intangible légèrement négatif ce qui pourrait être interprété comme le fait qu'il corresponde plus à l'option proposée par défaut (référence de marché) que le niveau de performance 1.

- **systèmes de chauffage** : les résultats obtenus permettent de confirmer la pertinence d'avoir pris pour référence de marché le système le moins performant fonctionnant à l'électricité. En effet, tous les autres coûts intangibles sont positifs, excepté le niveau de performance 2 des systèmes de chauffage à l'électricité. Cette exception peut s'expliquer par le fait que ce type de système de chauffage électrique (par le plafond ou par le sol) est généralement perçu par les ménages comme apportant un confort thermique supérieur aux systèmes plus classiques. Or cette composante n'est que peu prise en compte dans le modèle thermique utilisé¹⁶⁹. Ce coût intangible négatif pourrait donc refléter une valorisation du confort thermique par les ménages. En ce qui concerne les systèmes de chauffage utilisant d'autres énergies, les résultats de calibration indiquent des coûts intangibles moyens de 37% pour les systèmes à combustible fossile (gaz et fioul) et de 38,5% pour le bois. Ces valeurs peuvent être interprétées comme une sous-estimation des coûts de « fuel switch » vers le gaz et le fioul ou une aversion à ces énergies (si cette hypothèse apparaît cohérente pour le fioul¹⁷⁰, elle apparaît cependant moins pertinente pour le gaz). En ce qui concerne le bois, le coût intangible observé peut être interprété comme reflétant la pénibilité associée à la manipulation du bois (ce qui correspondrait à la faible note de commodité d'usage pour cette énergie révélée par les travaux de Sopha (2011)). Les résultats concernant les systèmes à combustible fossile indiquent que les coûts intangibles associés aux différents niveaux de performance sont assez proches. A l'inverse, les coûts intangibles des systèmes au bois les moins performants sont sensiblement inférieurs à ceux des plus performants (25% contre 52%), ce qui pourrait s'expliquer par le fait que les systèmes les plus performants fonctionnant au bois (chaudières) sont encore relativement peu connus des ménages ou peu proposés par défaut par les installateurs.

Conclusion : éléments non traités et perspectives d'amélioration

Le modèle présenté dans la section précédente a permis d'utiliser les résultats de la partie II de cette thèse dans le cadre d'un modèle de dynamique des consommations de chauffage individuel du parc de logements existants. Cependant, dans un souci de transparence, il apparaît important d'en souligner les limitations.

Une première limite de ce modèle réside dans le fait qu'il ne représente que partiellement la dynamique des consommations énergétiques du secteur résidentiel, en considérant les consommations de cuisson et d'électricité spécifique comme constantes dans le temps. Ce choix de modélisation résulte du constat présenté dans le premier chapitre de cette thèse, indiquant que les consommations de cuisson sont relativement stables dans le temps, et qu'il est assez hasardeux de prévoir l'évolution des consommations d'électricité spécifique en dehors des usages pour lesquels l'énergie est elle-même un service (éclairage, froid alimentaire). Or, même pour ces usages il apparaît

¹⁶⁹ Les panneaux rayonnants bénéficient d'un rendement d'émission supérieur de 2% à celui des convecteurs électriques classiques dans la base de données associée au mode de calcul 3CL du DPE.

¹⁷⁰ D'après le CEREN, le pourcentage des ménages déclarant le fioul comme « énergie idéale de chauffage » est passé de plus de 65% en 1995 à environ 20% en 2007 [CEREN, 2008a]

que l'évolution des consommations est plus influencée par les réglementations interdisant les équipements les moins performants que par l'attrait économique des options technologiques les plus efficaces. En effet, les taux d'actualisation implicites concernant ces technologies sont généralement sensiblement plus élevés pour les équipements électriques que pour les technologies de chauffage, et peuvent atteindre plusieurs centaines de pourcents (e.g. [Gately,1980] pour les réfrigérateurs). Leur modélisation prospective relève alors plus de modèles de comptabilité que de modèles de simulation technico-économique. Une amélioration à apporter au modèle développé serait donc de proposer un ensemble de scénarios concernant l'usage « électricité spécifique » (et la cuisson dans une moindre mesure), réalisés par des modèles *bottom-up* spécialisés. Une revue de littérature ciblant particulièrement l'électricité spécifique est nécessaire pour mieux détailler les possibles évolutions de ce poste, et aller au-delà des trajectoires extrêmes représentées par la prolongation de la croissance tendancielle des consommations et, à l'opposé, la division par deux à l'horizon 2050 (e.g. [négaWatt, 2011]).

Le modèle développé reste par ailleurs assez frustré dans sa représentation des technologies liées à la production d'eau chaude sanitaire ainsi que dans la représentation des critères du choix technologique. L'ECS a été introduite dans le modèle essentiellement pour permettre le calcul des étiquettes DPE, mais la représentation des déterminants de la consommation d'énergie de cet usage, ainsi que ceux de sa dynamique peuvent être sensiblement améliorés. En particulier, il apparaît nécessaire d'introduire les chauffe-eau solaires et les chauffe-eau thermodynamiques. D'autre part, le choix du système d'ECS pourrait être réalisé de manière indépendante de celui du système de chauffage, en particulier en ce qui concerne les ballons électriques et les chauffe-eau solaires.

Enfin, les panneaux solaires photovoltaïques pourraient eux aussi faire l'objet d'une simulation de diffusion. Ceci ne changerait pas strictement la demande d'énergie mais modifierait le bilan énergétique à l'échelle des logements. Leur intégration semble par ailleurs incontournable dans le cas où il serait nécessaire de représenter des logements d'étiquette DPE A en énergie primaire.

La représentation des technologies de chauffage, même si elle est assez détaillée, est cependant incomplète. En particulier, les technologies de chauffage collectif (dont urbain) et de cogénération ne sont pas représentées. L'absence de la première s'explique par la limitation du modèle au chauffage individuel, alors que celle de la seconde s'explique par le choix de ne se baser que sur une seule source de données de coûts par technologie (OPEN) dans laquelle le prix des systèmes à cogénération n'est pas indiqué. Un développement nécessaire du modèle serait d'intégrer les technologies de cogénération en réalisant une étude de sensibilité concernant l'évolution des performances et des coûts associés, ces variables étant encore peu connues.

Par ailleurs, la calibration du modèle a permis de définir des coûts intangibles associés aux technologies les plus performantes. Dans le modèle, ces coûts sont considérés fixes alors qu'il apparaît impératif que les meilleures technologies soient diffusées massivement au sein du parc résidentiel pour pouvoir atteindre les cibles nationales de politique énergétiques (Grenelle 2020 et Facteur 4). Dans ce contexte, ces coûts devraient faire l'objet d'une baisse sensible, comme représenté par exemple dans le modèle RES-IRF [Giraudet et al., 2011]. La représentation de cette dynamique des coûts intangibles est prioritaire parmi les possibilités d'amélioration du modèle.

Un autre point faible du modèle réside dans l'absence de la représentation de la dynamique démographique. Si l'impact de celle-ci sur les consommations de chauffage dépend essentiellement de la façon dont les prochaines réglementations thermiques ciblant les logements neufs seront respectées, et pourrait donc être négligeable, ce n'est pas le cas les consommations d'électricité spécifique, qui ne sont incluses qu'en très faible partie dans les calculs de ces réglementations. Un autre élément lié à la démographie a été négligé : celui de la mobilité des ménages au sein du parc de logements. En effet, dans le modèle, les ménages restent dans leur logement sur toute la durée de la simulation, ce qui est loin d'être réaliste. Ainsi, si un logement est habité par un ménage très peu

aisé, il est peu probable qu'il bénéficie de rénovations très performantes. Se pose alors la question de savoir si, dans le cas où le ménage quitterait ce logement, un ménage plus aisé le remplacerait et serait alors plus en capacité d'investir dans des équipements performants. L'étude de cette problématique n'a pu être réalisée au cours de la thèse et constitue par conséquent une voie d'amélioration vers une représentation plus dynamique du parc de logements.

Enfin, une étude de sensibilité exhaustive des nombreux paramètres utilisés dans le modèle apparaît nécessaire. Son absence limite la robustesse des résultats présentés en ne permettant pas d'y attacher de mesure d'incertitude. Celle-ci n'a pu être réalisée dans le temps imparti par la thèse, du fait notamment du temps de calcul important requis pour chaque simulation réalisée avec le modèle développé. Une optimisation opérationnelle de celui-ci semble nécessaire pour permettre cet exercice.

Bibliographie

[ADEME, 2010] : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), *Les chiffres clés du bâtiment*, 2010

[AIE, 2011] World Energy Outlook, Agence Internationale de l'Energie, 2011, 659p

Ansar, J., R. Sparks, 2009, "The experience curve, option value, and the energy paradox", *Energy Policy*, 37(3), 1012-1020

Arrow, K., 1962, "The economic implications of learning by doing", *Review of economic studies*, 29, 155-173

Banfi S., M. Farsi, M. Filippini, M. Jakob, 2008, "Willingness to pay for energy-saving measures in residential buildings", *Energy Economics*, 30 (2), mars 2008, Pages 503-516

Berkovec, J., J. Hausman, J. Rust, 1983, "Heating System and Appliance Choice", Report Number MIT-EL 83-004WP, MIT Energy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge

De Cacqueray D., M. Piro, 2008, Performance du parc résidentiel français en 2005, base de données interne EDF R&D, 2008

Cayla, J-M., 2011, "Les ménages sous la contrainte carbone – Exercice de modélisation prospective des secteurs résidentiel et transports avec TIMES", thèse de doctorat soutenue le 3 mars 2011

Cayla J.-M., N. Maizi, C. Marchand, 2011, "The role of income in energy consumption behavior: Evidence from French households data", *Energy Policy*, 39, 7874-7883

[CEREN, 2008a] Suivi annuel du comportement des ménages en matière de chauffage, Résultats sur la période 1990-2007, CEREN, étude 8108, octobre 2008

[CEREN, 2008b] « Effets de l'isolation du bâti et de la rénovation de l'installation de chauffage sur les consommations d'énergie dans les logements construits avant 1975 », CEREN, étude 7152, mai 2008

[CEREN, 2011] : Analyse rétrospective du parc et des flux de logements de 1973 à 2009, CEREN, référence : RES/11.001, étude 0102, janvier 2011

Chambolle, T., H. Pouliquen, 2008, "Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050, Partie 5 – scénarios énergétiques", centre d'Analyse Stratégique, n°12, la documentation française, 170p

Criqui, P., 2005, « Energie-Environnement et technologies de l'offre : prospective 2050 avec le modèle POLES », Programme Energie du CNRS, Nogent, 20 janvier 2005

Dahl, C., 1993, "A survey of energy demand elasticities in support of the development of the NEMs", Contract DE-AP01-93EI23499, Washington, DC, October

Desmedt, J., 2005, "Practical experiences and effective tools to implement the European Energy Building Directive in Belgium", dans "Proceedings of the 4th International Conference Climate Change - Energy Awareness - Energy Efficiency", 8-10 juin 2005, Visegrád, Hongrie

[Enerdata, 2011] : Quantitative evaluation of explanatory factors of the lower energy efficiency performance of France for space heating compared to European benchmarks, rapport prepare par Enerdata pour l'ADEME, août 2011

Galvin, R., 2012, présentation orale, réunion de travail sur la modélisation des comportements quotidiens de chauffage entre EDF R&D, University College of London, Energy Research Center of Netherlands, et Ray Galvin, Amsterdam, 26 janvier 2012

Gately, D., 1980, "Individual discount rates and the purchase and utilization of energy-using durables: comment", Bell Journal of Economics, 11 (1), 373–374

Giraudet, L.-G., C. Guivarch, P. Quirion, 2010, "Do proposed policies meet French energy conservation targets? Insights from prospective modelling", International Energy Workshop (IEW), Stockholm, Suède, 21-23 juin 2010

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

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

Houdant, N., J. Schram, 2009, "ENERTER: a tool to simulate housing energy consumption", Proceedings of the 2009 ECEEE Summer Study, France

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

Kemp, R., 1997, "Environmental Policy and Technical Change: a comparison of the technological impact of policy instruments", Wallace E. Oates.

Kristöm, B., 2008, "Residential Energy Demand" in "Household Behaviour and the Environment: Reviewing the Evidence", p. 95-115, OECD Paris, www.oecd.org/dataoecd/19/22/42183878.pdf

Lagandré, E., 2010, réunion du groupe de travail « socio-économie » du PREBAT

Lai J., N. DeForest, S. Kiliccote, M. Stadler, C. Marnay, J. Donadee, 2011, "Evaluation of evolving residential electricity tariffs", poster presented at the ECEEE 2011 Summer Study 6–11 June 2011 Belambra Presqu'île de Giens, France; LBNL-4496E-Poster, <http://eetd.lbl.gov/EA/EMP/emp-pubs.html>

Laurent, M-H, T. Duforestel, 2006, « 30 ans de chauffage électrique : Histoire mouvementée d'une innovation », note interne EDF R&D, référence H-E12-2006-03088-FR, 5 octobre 2006

Laurent M-H., D. Osso, P. Mandrou, H. Bouia, 2006, "*Scénarios de rénovation du parc résidentiel à 2030 en France dans un contexte « MDE »*", IBPSA France 2006 à La Réunion – 2 et 3 novembre 2006

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

Little, A.D., 1984, "Measuring the Impact of Residential Conservation Programs: An Econometric Analysis of Utility Data", Volume VIII, Final Report for RP1587, Electric Power Research Institute, Palo Alto

Lundvall, B.A., 1992, "National Systems of Innovations - Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning", Printer Publisher, London

Marchand C., M.-H. Laurent, R. Rezakhanlou et Y. Bamberger, 2008, "Le bâtiment sans énergies fossiles ? Les bâtiments pourront-ils se passer des énergies fossiles en France à l'horizon 2050?", Futuribles, n° 343, juillet 2008, 79-100

Mathy, S., M. Fink, R. Bibas, 2011, « Quel rôle pour les scénarios Facteur 4 dans la construction de la décision publique ? », Revue développement durable et territoires », 2(1), mars 2011

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, 504-516

[MECSL, 2008] Ministère de l'Emploi, de la Cohésion Sociale et du Logement, Arrêté du 6 mai 2008 portant confirmation de l'approbation de diverses méthodes de calcul pour le diagnostic de performance énergétique en France métropolitaine, NOR DEVU0810970A, JORF n°0114 du 17 mai 2008, page 8063, 96p

Michelsen, C.C., R. Madlener, 2011, "Homeowners' Preferences for Adopting Residential Heating Systems: A Discrete Choice Analysis for Germany", Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN), FCN Working Paper No. 9/2011, mai 2011

[négaWatt, 2011] Dossier de présentation conférence de presse / réunion publique, « Scénario négaWatt 2011 », association négaWatt, 29 septembre 2011

[OPEN, 2008] Observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement, résultats de la campagne 2007, 28 p., décembre 2008

[OPEN, 2010] Observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement, campagne 2009, résultats 2006-2008, 28 p., avril 2010

Osso, D., B. Allibe, M-H. Laurent, 2011, "Demolition vs. refurbishment for the old homes: a local cost-benefit analysis", Proceedings of the ECEEE 2011 summer study, paper 5-226

[PEGASE, 2012] : consultation de la base de données en ligne PEGASE du MEDDTL en janvier 2012

Penot-Antoniou L., P.Têtu, 2010, *Modélisation économétrique des consommations de chauffage en France*, CGDD, Eudes et documents n°21, mai 2010

Power, A., 2008, "Does demolition or refurbishment of old inefficient homes help to increase our environmental, social and economic viability?", *Energy Policy*, 38, 4487-4501

Reiss, P., M. White, 2005, "Household Electricity Demand, Revisited", *Review of Economic Studies*, 72, 853-883

Roger, E.M., 2003, *Diffusion of Innovations*, 5ème édition, Free Press, New York

Sadler, M., 2003, "Home energy preferences & policy: Applying stated choice modeling to a hybrid energy economic model", Master Thesis, Simon Fraser University

Sartori, I., B.-J. Wachenfeldt, A.-G. Hestnes, 2009, "Energy demand in the Norwegian building stock : Scenarios on potential reduction", *Energy Policy*, 37, 1614-162

Schuler, A., C. Weber and U. Fahl, 2000, "Energy consumption for space heating of West-German households: empirical evidence, scenario projections and policy implications", *Energy Policy*, 28, 2000, p. 877-894

Sopha, B.M., 2011, "Agent-Based Modeling and Simulation of Clean Heating System Adoption in Norway", thèse de doctorat, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, mars 2011

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

Train, K., 1985, "Discount rates in consumer's energy-related decisions: a review of the literature", *Energy*, 10, 1243-1253

Traisnel J-P., B. Peuportier, A. Bornarel, 2001, *Habitat et développement durable – bilan rétrospectif et prospectif*, Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement (CLIP), Les cahiers du CLIP, n°13, avril 2001, 104 p.

Traisnel J-P., D.Joliton, M-H. Laurent, S. Caffiaux, A. Mazzenga, 2010, *Habitat Facteur 4 Étude d'une réduction des émissions de CO₂ liées au confort thermique dans l'habitat à l'horizon 2050*, Les Cahiers du CLIP n°20, novembre 2010, 104p

Van Oel, C.J., A. Bogerd, G.J. de Haas, 2009, "Occupant-owners preferences in decision making of low energy renovation concepts", Proceedings of the 2009 ECEEE Summer Study, France

Weiss, M., M. Junginger, M. Patel, 2008, "Learning energy efficiency - Experience curves for household appliances and space heating, cooling, and lighting technologies", Report NWS-E-2008-26, Utrecht University

Wilhite H., J.S. Norgard, 2003, "A case for self-deception in energy policy", Proceedings of the 2003 ECEEE Summer Study on Energy, 249-257

*« Demain ne sera pas comme hier.
Il sera nouveau et il dépendra de nous.
Il est moins à découvrir qu'à inventer »
Gaston Berger*

Chapitre 2 : Application du modèle développé (BEUS) à quelques exercices prospectifs

Résumé

Ce chapitre présente des applications du modèle BEUS, présenté dans le chapitre précédent, à différents scénarios prospectifs. Les résultats montrent tout d'abord que, même avec un scénario technologique particulièrement volontariste (pénétration maximale d'équipements énergétiquement efficaces et de systèmes peu émetteurs de carbone), il apparaît difficile d'atteindre un facteur 4 sur ces émissions dès lors qu'une représentation réaliste de l'*intensité d'utilisation* des équipements de

chauffage et de la malfaçon technique est utilisée. D'autre part, les simulations de scénarios volontaristes vis-à-vis de politiques énergétiques et climatiques mises en place (subventions et taxe carbone) ont montré que les résultats de celles-ci sont sensibles aux hypothèses faites sur l'hétérogénéité du marché de la rénovation thermique. L'introduction de l'ensemble des hétérogénéités évoquées dans le second chapitre de la partie II diminue sensiblement la réduction des consommations énergétiques qui peut être attendue d'une politique énergétique donnée par rapport au cas où seules les hétérogénéités techniques (c'est-à-dire celle de l'environnement physique des logements et celle des performances des équipements existants) sont représentées dans le modèle. Les résultats montrent donc qu'une représentation plus fine des comportements d'achat et d'usage des technologies par les ménages mène pour chacun de ces comportements à des estimations plus modestes des gains énergétiques qui peuvent être attendus de politiques énergétiques, aussi bien économiques (subventions, taxes) que réglementaires (interdiction des équipements les moins performants).

Avertissement

Les travaux présentés dans ce chapitre illustrent les utilisations possibles du modèle développé dans le cadre de la thèse (BEUS). Même si ce modèle représente un progrès dans la représentation des comportements d'usage des équipements de chauffage par les ménages et du marché de la rénovation thermique, les travaux présentés ne permettent pas de représenter l'applicabilité réelle des instruments proposés dans les dispositions actuelles du marché de l'énergie. Les instruments présentés ne constituent pas les positions des organismes impliqués dans le suivi de cette thèse.

Les résultats de ce chapitre reprennent en partie ceux des communications suivantes :

- Allibe, B., M-H. Laurent, D. Osso, 2011, "Bind the rebound! How the combination of progressive energy tariffs and adapted soft loans can curb rebound effect and promote energy sufficiency", Proceedings of the 2011 ECEEE Summer Study, Paper 1-234
- Allibe, B., 2010, Norm vs observations of residential space heating energy consumptions: Analysis of a gap and its consequences for long-term simulation, EURO XXIV Conference, July 2010, Lisbon, Portugal. (présentation orale)

Introduction

Ce chapitre propose d'appliquer les éléments développés dans la partie II à la quantification énergétique de scénarios prospectifs volontaristes, à l'aide du modèle présenté dans le chapitre précédent. En raison de la nature des éléments développés dans les chapitres précédents, l'intérêt principal de leur application à la prospective ne réside pas dans la construction de nouveaux scénarios mais dans l'observation, pour un scénario donné, de l'influence que peut avoir l'introduction des deux variables centrales de cette thèse : *l'intensité d'utilisation* des équipements de chauffage et l'hétérogénéité du marché de la rénovation des logements.

Tout d'abord, la section I présente les hypothèses de cadrage communes à tous les scénarios étudiés, concernant principalement l'évolution du revenu des ménages, celle du prix des énergies et de la rigueur du climat. La section II présente l'effet de l'introduction des variables étudiées dans I partie II. Dans un premier temps, un scénario technologique volontariste est proposé. A partir de la trajectoire technologique ainsi définie, plusieurs formulations de l'*intensité d'utilisation* des équipements de chauffage sont testées. La deuxième partie de la section II propose l'étude d'un scénario volontariste du point de vue des politiques énergétiques mises en œuvre pour atteindre les objectifs de réduction des consommations et des émissions de GES. A partir d'un même corps d'hypothèses concernant ces instruments, l'influence de l'hétérogénéité du marché sur la trajectoire de consommation énergétique est étudiée au travers de l'introduction de l'hétérogénéité du prix des équipements, des logiques d'investissement et des préférences individuelles.

1. Hypothèses communes aux simulations

Comme présenté dans le chapitre précédent, plusieurs scénarios sont proposés dans le modèle développé pour de nombreuses variables relatives à l'environnement économique et physique des simulations prospective. Dans le cadre de l'application des éléments présentés dans la partie II à des exercices prospectifs, un seul scénario a été retenu pour les variables communes aux simulations, c'est-à-dire le prix des énergies, le revenu des ménages, la rigueur du climat ainsi que les caractéristiques technico-économiques (performance, prix et durée de vie) des technologies disponibles sur le marché.

Le scénario d'évolution du prix des énergies fossiles est basé sur le scénario « New Policies » du World Energy Outlook 2011 de l'Agence Internationale de l'Energie [AIE, 2011]. Pour convertir ces projections, concernant le prix des énergies sur les marchés internationaux, en projections de prix pour les consommateurs, la méthodologie retenue est celle de Marchand et ses collaborateurs (2008), c'est-à-dire une décomposition du prix hors taxes des énergies aux consommateurs en une part fixe et une part variable indexée sur les variations de prix de l'énergie sur le marché international. La part variable retenue ici est de 70% pour le gaz et 90% pour le fioul domestique. Le prix du bois est considéré constant jusqu'en 2050, en continuité de ce qui a été observé sur les dernières décennies (voir le premier chapitre de cette thèse). Le scénario d'évolution de prix de l'électricité aux consommateurs est quant à lui basé sur le scénario « 50% nucléaire en 2030 » de l'Union Française de l'Electricité [UFE, 2011]. Les valeurs retenues dans les scénarios évoqués sont celles des prix en 2030. L'évolution des prix est supposée linéaire entre 2010 et cette date. Les projections de l'AIE et de l'UFE n'étant effectuées qu'à l'horizon 2030, le taux de croissance moyen sur cette période est utilisé pour prolonger ces projections sur la période 2030-2050.

Cette méthode très simplifiée de projection des prix des énergies pour les ménages ne prend pas en compte les interactions possibles entre le niveau de demande et le prix des énergies. D'une part, les variations de la seule demande du secteur résidentiel français sont trop faibles pour influencer sensiblement le prix des énergies mondialisées (gaz, pétrole), mais, à l'inverse, des scénarios contrastés de prix des énergies induiraient des réactions sensiblement différentes des ménages vis-à-vis de leurs choix technologiques. L'étude de cette dépendance, déjà réalisée par exemple par Cayla (2011), ne fait pas partie des priorités du travail de thèse présenté ici, ce qui justifie le fait de ne prendre qu'un seul scénario « moyen » d'évolution des prix des énergies, à partir duquel l'effet d'autres variables sur la consommations énergétique des ménages est étudié. Enfin, concernant le prix du bois, certains scénarios étudiés sont construits autour d'une forte mobilisation des ressources nationales de bois-énergie, ce qui peut remettre en cause la validité de l'hypothèse

de prix constant au cours du temps. Un récapitulatif du prix des énergies à différents horizons de temps est proposé dans le Tableau 23.

Prix des énergies (en €/MWh)	2010	2020	2030	2040	2050
électricité	119	154	189	224	259
gaz	61	78	85	94	103
fioul domestique	72	97	104	112	120
bois	37	37	37	37	37

Tableau 23 : Récapitulatif des hypothèses simplificatrices de prix des énergies sur la période 2010-2050

Le choix du scénario d'évolution du revenu des ménages est basé sur l'hypothèse la plus utilisée dans les exercices prospectifs récents, c'est-à-dire une augmentation de 1,5% par an [Mathy et al., 2011]. Ce taux de croissance est considéré constant jusqu'à 2050 et est appliqué au revenu de chaque ménage représenté dans le modèle.

Le scénario retenu concernant l'évolution du climat est celui d'une augmentation de 1,5°C de la température moyenne française en période de chauffage à l'horizon 2050. Cette valeur est interpolée à partir des résultats régionalisés du scénario A2 du GIEC, indiquant une augmentation de 2 à 3°C de la température hivernale française à l'horizon 2100 [Planton et Durand, 2011], sensiblement inférieure à l'augmentation de la température estivale. Cette augmentation de la température moyenne est considérée linéaire dans le modèle au cours de la période simulée, traduite par une réduction de 200 degrés-heure du climat moyen à chaque année de simulation. Cette augmentation est reportée en pourcentage sur le climat local de chaque logement représenté dans le modèle.

Les caractéristiques techniques des équipements de chauffage et de production d'ECS (performance et durée de vie) au sein de chaque catégorie de performance sont considérées constantes sur la période 2010-2050. Cette hypothèse ne prend pas en compte les effets d'apprentissage qui pourraient avoir lieu en matière de performance des équipements, ce qui est une faiblesse du modèle développé (l'apprentissage technologique n'ayant un impact que sur le prix de ces équipements). Si cette hypothèse présente l'avantage évident d'être simple, elle entraîne cependant la sous-estimation a priori de la performance future des équipements les moins présents parmi le stock d'équipements actuels, pour lesquels la marge d'amélioration de rendement est plus importante que celle des systèmes déjà installés en grand nombre. Un autre défaut de cette hypothèse est de ne pas introduire de nouvelles technologies durant les prochaines décennies. En particulier, les systèmes de chauffage permettant une production d'électricité en cogénération (par exemple grâce à l'emploi d'un moteur Stirling couplé à une chaudière classique à combustible) n'ont pas été intégrés dans le modèle. On notera enfin que seuls les équipements de chauffage et d'ECS sont représentés, la modélisation ne tient donc pas compte de l'augmentation probable des besoins et du taux d'équipement en climatisation. Cela se justifie par l'existence de travaux récents spécifiques à cette question [Grignon-Massé, 2010], pouvant être pris comme référence.

L'évolution du prix des équipements est modélisée dans toutes les simulations à l'aide de la fonction d'apprentissage technologique définie dans le chapitre précédent. Ce choix se justifie par la transparence du mécanisme, son réalisme dynamique et le fait que les valeurs utilisées soient basées sur la littérature internationale. Ce choix de scénarisation diffère de celui concernant le prix des énergies car l'interaction entre la demande nationale d'équipements et le prix de ceux-ci apparaît comme plus importante et les influences plus réciproques que dans le cas de la demande nationale

d'énergie et des prix des énergies, comme cela a été évoqué dans le deuxième chapitre de cette thèse. Ce choix de modélisation a cependant le défaut d'impliquer des trajectoires de prix des équipements différentes d'une simulation à l'autre.

En l'absence d'un couplage du modèle de demande à un modèle détaillé de l'offre énergétique (en particulier du parc de production électrique), il est difficile de connaître l'influence des évolutions de la demande sur le contenu carbone de la production d'énergie correspondante. D'autre part, pour une même demande annuelle d'électricité, son contenu carbone peut varier sensiblement selon le moment de la journée ou de l'année où elle a lieu, les périodes de pics de demande nécessitant l'appel à des moyens de production d'électricité généralement plus carbonés qu'en production de base. L'évolution future du contenu carbone de l'électricité dépendra donc autant des choix de politique énergétique nationale concernant la production (par exemple sur la pénétration de moyens de production d'électricité d'origine renouvelable ou sur l'ampleur et le timing d'une réduction de la part nucléaire dans la production d'électricité) que de la façon dont la consommation électrique résidentielle pourra limiter les pics de demande (par exemple grâce au stockage thermique). Devant les fortes incertitudes concernant ces éléments, il a donc été choisi de conserver le contenu carbone actuel des énergies, et en particulier celui de l'électricité par usage (180 gCO₂/kWh pour le chauffage, 40 gCO₂/kWh pour la production d'eau chaude sanitaire et 80 gCO₂/kWh pour les autres usages).

Enfin, en ce qui concerne les subventions accordées aux équipements performants, les simulations présentées sont basées sur un prolongement jusqu'en 2020 du CIDD, tel qu'actuellement en vigueur.

2. Application de BEUS à la simulation de scénarios prospectifs volontaristes

2.1. Scénario volontariste sur les déterminants directs des consommations de chauffage

2.1.1. Description du scénario et de ses variantes

L'objectif de cette section est d'estimer dans quelle mesure l'introduction d'une modélisation fine des comportements d'usage des équipements de chauffage peut modifier les résultats d'exercices prospectifs « de comptabilité¹⁷¹ » réalisés avec un modèle *bottom-up* ingénieur. Pour ce faire, un scénario volontariste de diffusion technologique est défini dans le modèle (choix technologiques exogènes) et différentes représentations des comportements d'usage et de leurs évolutions sont simulées. Seules les consommations de chauffage sont représentées dans l'étude des variantes autour de ce scénario.

Le scénario technologique choisi est construit autour d'un rythme continu de rénovation des éléments des logements, en conservant les durées de vie révélées déterminées à partir des flux de rénovation actuels. Les rénovations effectuées n'intègrent que les options technologiques de plus

¹⁷¹ C'est-à-dire dans lesquels la trajectoire technologique est entièrement déterminée par le modélisateur, comme cela a été décrit dans le deuxième chapitre de la partie I.

haute performance énergétique (*optimum*) et les systèmes de chauffage installés sont répartis de manière égale entre chauffage par chaudière bois performantes et par pompes à chaleur. Ce scénario s'apparente ainsi à un intermédiaire entre les deux scénarios permettant l'atteinte du Facteur 4 dans les travaux de Traisnel et de ses collaborateurs (2010).

Les variantes de représentation des comportements d'usage des équipements de chauffage sont les suivantes :

- **Exogène constante « DPE » (EXNORM)** : *l'intensité d'utilisation* de tous les logements est fixée à 1 pour l'intégralité de la simulation. Ceci implique en particulier une surestimation de la consommation initiale ainsi que l'absence de dépendance de *l'intensité d'utilisation* au prix des énergies, à la performance des équipements et à la rigueur climatique. A partir de cette variante, trois alternatives sont proposées : celle de déduire les gains énergétiques normés à des consommations initiales normées (EXNORM), celle de déduire les gains énergétiques normés aux consommations énergétiques réelles (EXNORM - non homogène) et celle d'appliquer aux consommations énergétiques actuelles le pourcentage de réduction de consommation calculé dans la variante EXNORM (EXNORM – relatif).
- **Exogène constante observée (EXOBS)** : dans cette variante, *l'intensité d'utilisation* est aussi fixée constante pour l'intégralité de la période de simulation à l'échelle de chaque logement du modèle. Pour chaque logement, elle est déterminée par le ratio entre la consommation de chauffage estimée pour ce logement lors de l'enquête EDF R&D 2009 et celle calculée par le DPE. Cette représentation des comportements est semblable à celle utilisée pour les scénarios Facteur 4 de Traisnel et ses collaborateurs (2010) dans le sens où la consommation nationale modélisée à l'année initiale correspond à la consommation effectivement observée, et que *l'intensité d'utilisation* est gardée constante durant la simulation. Cependant, dans le modèle utilisé pour les scénarios de Traisnel (Enerter), *l'intensité d'utilisation* initiale n'est pas déterminée par logement mais par segment du parc de logement (énergie de chauffage, période de construction).
- **Exogène volontariste (EVOL)** : l'intensité initiale est fixée de manière similaire au scénario précédent, assurant la cohérence entre les consommations simulées et observées. Cependant, dans cette variante, *l'intensité d'utilisation* n'est pas conservée constante sur la période de simulation mais diminue progressivement au cours du temps. Cette diminution a pour objectif de simuler l'effet qu'aurait une diffusion de gestes de sobriété dans l'usage quotidien des systèmes de chauffage, de manière semblable au scénario négaWatt. Deux variantes sont proposées : baisses de 7% et de 15% de *l'intensité d'utilisation* sur la période simulée (EVOL7 et EVOL15). Ces valeurs sont sensiblement équivalentes à des baisses de 1°C et 2°C de température moyenne de chauffage.
- **Endogène (ENDO)** : dans cette variante, *l'intensité d'utilisation* est calculée de manière endogène à chaque pas de temps de la simulation. Ceci est effectué en appliquant à chaque logement représenté *l'intensité d'utilisation* telle que décrite dans la section 2.2.2 du chapitre précédent. Cette représentation des comportements intègre donc une élasticité de la demande au prix des énergies, à la performance énergétique du logement, à la rigueur du climat et au revenu des ménages.

Il est important de noter que dans les trois premières variantes, il est fait l'hypothèse que les équipements sont installés sans mal façon. La spécificité de la dernière variante est donc d'apporter deux éléments non normés : les comportements d'usage et la performance réelle des équipements installés.

2.1.2. Résultats et discussion

Les simulations des variantes comportementales proposées, dont les résultats sont présentés sur la Figure 94 en énergie finale et sur la Figure 95 en émissions de GES, indiquent dans quelle mesure les hypothèses adoptées pour les comportements quotidiens de consommation (ainsi que sur la performance réelle des équipements) peuvent influencer quantitativement l'évaluation des gisements d'économie d'énergie que l'on peut attendre d'un scénario technologique donné.

Tout d'abord, on peut observer que la consommation d'énergie finale en 2050 varie d'un facteur supérieur à 2 suivant la représentation des comportements et de leur évolution temporelle, et que le gisement d'économies d'énergie finale varie, lui, d'un facteur 3 en valeur absolue. Comme cela avait déjà été noté dans le premier chapitre de la partie II, l'utilisation de valeurs absolues de réduction des émissions de GES pour les soustraire aux émissions réelles peut entraîner l'obtention de valeurs négatives, ce que l'on observe d'ailleurs dans la variante EXNORM-non homogène. On peut par ailleurs observer que la variante donnant les réductions de consommation énergétique ou d'émissions de GES les plus faibles est systématiquement la variante endogène, prenant en compte l'effet rebond et la malfaçon. Cependant, on peut observer que l'écart avec les autres variantes est inférieur aux 40% présentés dans le premier chapitre de la partie II. Ceci est dû au fait que le prix des énergies augmente fortement sur la période simulée, ce qui contribue à compenser la baisse du prix du service de chauffage engendré par l'amélioration technologique. Seul un scénario intégrant des prix de l'énergie constants aurait impliqué un écart de 40% entre les gains énergétiques de la variante à comportements constants et de la variante à comportements endogènes (intégrant aussi les malfaçons). Il est aussi intéressant de noter que la variante EXOBS basée sur les comportements observés et gardés constants dans le temps donne des résultats relativement pessimistes quant au potentiel de réduction des consommations et émissions, et que ces résultats sont sensiblement différents de la variante EXNORM – relatif. Cette différence s'explique par le fait que la variante EXOBS prend en compte la surestimation initiale des consommations par le modèle normé du DPE, ce qui limite fortement les gains énergétiques pouvant être effectués dans ces logements.

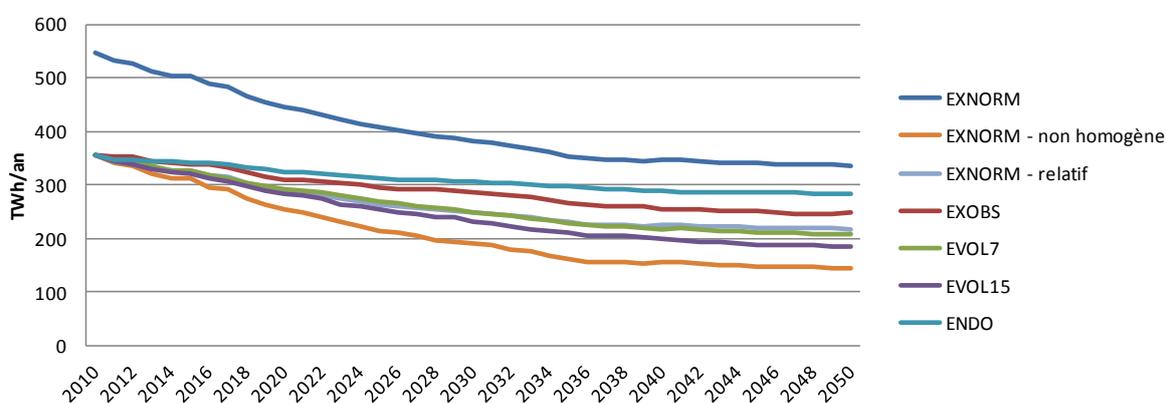


Figure 94 : Trajectoires des consommations de chauffage en énergie finale, calculées pour un scénario technique volontariste, en fonction de la représentation des comportements d'usage des technologies.

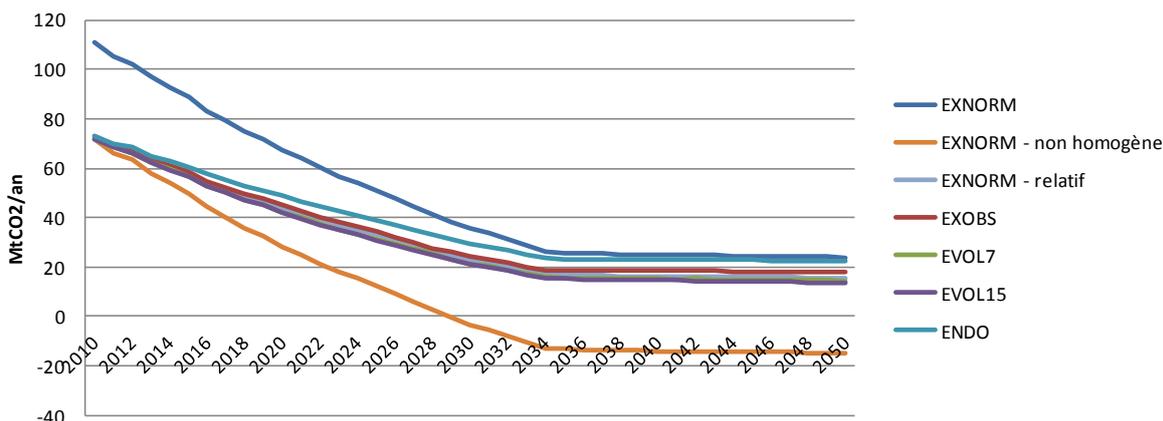


Figure 95 : Trajectoires des émissions de CO₂ dues au chauffage, calculées pour un scénario technique volontariste, en fonction de la représentation des comportements d'usage des technologies.

En ce qui concerne l'évolution des émissions de GES, on peut observer que la trajectoire peut être décomposée en deux temps : les premiers 25 ans durant lesquels tous les systèmes de chauffage sont changés pour des énergies à faible contenu carbone, et accompagnés par la rénovation thermique d'une grande partie du parc de logements, et dans les 15 dernières années une réduction sensiblement moins forte des émissions due au fait que les parts de marché des systèmes de chauffage ne changent plus et que le gisement d'économies d'énergie par isolation des logements est presque entièrement consommé.

Il est important de noter qu'on peut observer ici quelques défauts du modèle développé. Tout d'abord, l'option technologique la plus performante concernant l'isolation par l'intérieur est de traiter toutes les parois. Une fois ce geste fait, l'ajout d'isolation par l'extérieur ou par la toiture n'apporte plus que des gains énergétiques marginaux. Un autre défaut réside dans le fait que les technologies liées à la ventilation ne sont pas représentées, ce qui empêche de réduire encore la consommation d'énergie finale. Enfin, la performance des technologies ne s'améliore pas au cours du temps (seul leur prix fait l'objet d'apprentissage technologique). Ces éléments expliquent en partie pourquoi la consommation de chauffage et les émissions de GES associées en 2050 sont sensiblement supérieures à celles présentées dans les scénarios électricité/bois/gaz et bois/électricité/gaz des travaux de Traisnel et de ses collaborateurs (2010).

D'autre part, on peut observer que les différences entre les variantes sont sensiblement plus faibles en valeurs relatives concernant les baisses d'émissions de GES qu'en ce qui concerne les consommations d'énergie finale. Ceci est dû au fait que la baisse des émissions provient essentiellement de celle du contenu carbone moyen des énergies de chauffage. Comme ce contenu est particulièrement faible pour le bois, la baisse des émissions est très forte lors du renouvellement des systèmes. Une fois les systèmes remplacés, les différentes variantes de comportements ne peuvent plus faire évoluer sensiblement les émissions en valeur absolue, celles-ci étant cantonnées à une valeur très basse.

A partir des résultats présentés, on peut estimer que l'introduction d'éléments de réalisme comportemental ainsi que de malfaçon (qui peut être interprétée comme du « réalisme comportemental des installateurs ») rend difficile l'atteinte d'une forte réduction des consommations d'énergie finale de chauffage, et ce même si l'augmentation du prix des énergies compense en partie la baisse du prix du service chauffage provoquée par la diffusion massive de technologies performantes. Pour atteindre un facteur 4 en émissions de GES, les résultats soulignent le besoin d'un recours massif aux systèmes de chauffage émettant sensiblement moins de GES que la moyenne actuelle. Ceci vient renforcer les conclusions de l'étude de Traisnel et de ses collaborateurs (2010) : l'isolation des logements n'est pas suffisante et doit être complétée par un recours

prioritaire aux équipements de chauffage au bois (et aux pompes à chaleur lorsque le bois ne peut être installé) pour espérer atteindre l'objectif du Facteur 4 dans le chauffage résidentiel à l'horizon 2050. Du fait de la contrainte existante sur les gisements de bois-énergie en France¹⁷² et sur l'installation d'équipements individuels de chauffage au bois dans les zones urbaines¹⁷³, il apparaît nécessaire de privilégier les équipements au bois à très bon rendement énergétique pour pouvoir couvrir les besoins de chaleur d'un maximum de ménages avec le gisement existant.

Enfin, on peut noter que les variantes intégrant une plus grande sobriété des comportements d'usage sont les plus optimistes (à l'exception du cas EXNORM qui n'est présenté que pour illustrer les conséquences d'une erreur de calcul qui peut être observée dans la littérature) et les plus éloignées de la trajectoire de consommation obtenue en représentant les comportements de manière endogène (ENDO). Rien ne garantit que les comportements observés par le passé conservent leur forme dans le futur, une diffusion de pratiques sobres de gestion des consommations d'énergie de chauffage ne peut être rejetée a priori. Cependant, il apparaît que le maintien des comportements quotidiens de chauffage à l'intensité d'utilisation observée actuellement peut déjà être considérée comme une trajectoire énergétiquement « sobre » (ou volontariste vis-à-vis des économies d'énergies) lorsqu'on la compare à l'évolution de la variante endogène.

2.2. Scénario volontariste d'instruments économiques : effet de l'intégration des hétérogénéités du marché de la rénovation

2.2.1. Description du scénario et de ses variantes

L'objectif de cette sous-section est d'estimer dans quelle mesure l'introduction d'une modélisation des hétérogénéités présentes dans le marché de la rénovation thermique des logements peut modifier les résultats d'exercices prospectifs de type « simulation¹⁷⁴ » réalisés avec un modèle *bottom-up* ingénieur. Pour ce faire, un scénario volontariste d'instruments économiques est défini et différentes représentations du marché de la rénovation sont simulées. Les choix technologiques des ménages, leurs comportements d'usage du chauffage et le prix des équipements sont calculés de manière endogène dans le modèle. Seules les consommations de chauffage sont présentées dans l'étude des variantes de représentation du marché de la rénovation.

Le scénario volontariste d'instruments économiques choisi comme référence intègre les instruments suivants :

- Une prolongation jusqu'en 2020 du CIDD avec les cibles et les montants de subvention existants en 2011,
- Une taxe carbone augmentant linéairement d'une valeur de 200€/tCO₂ en 2010 à une valeur de 1000€/tCO₂ en 2050. Ces valeurs ont été choisies volontairement très élevées pour représenter un environnement économique favorable à la baisse des émissions de GES.

¹⁷² Voir en particulier l'étude « Evaluation du potentiel bois-énergie » [Ruscassie et Bélouard, 2005].

¹⁷³ En raison des problèmes environnementaux locaux que pose la combustion du bois pour des appareils non équipés des systèmes anti pollution adéquat.

¹⁷⁴ C'est-à-dire dans lequel certains déterminants des consommations ne sont pas déterminés directement par le modélisateur mais calculés de manière endogène dans le modèle.

Comme cela a été discuté dans le second chapitre de la partie précédente, l'augmentation de l'hétérogénéité d'un marché est d'autant plus visible que ce marché favorise un groupe de technologies en particulier. C'est pourquoi un marché favorable à la réduction des émissions des CO₂ a été choisi pour pouvoir observer au mieux l'effet de l'introduction d'hétérogénéités dans le marché. D'autre part, les résultats de simulation de Giraudet (2011) montrent que de tels niveaux de taxe carbone semblent nécessaires à l'atteinte du Facteur 4 dans le secteur résidentiel.

A partir de ce scénario de référence, plusieurs représentations du marché de la rénovation thermique des logements sont testées, qui diffèrent entre elles par les hétérogénéités qu'elles intègrent. Ainsi, les variantes proposées prennent en compte les composantes suivantes de l'hétérogénéité du marché :

- **Technique et climatique (TC).** Dans cette variante, les seules sources d'hétérogénéité du marché proviennent du fait que les logements n'ont pas tous la même performance à l'année initiale de simulation et que ceux-ci sont situés dans des zones climatiques différentes. Cette représentation correspond aux sources d'hétérogénéité du marché les plus élémentaires qui peuvent être représentées avec un modèle *bottom-up* ingénieur. Les hétérogénéités de taux d'actualisation, de prix des équipements et de préférences des ménages ne sont pas prises en compte.
- **Technique, climatique et logique d'achat (TCL).** Dans cette variante, le taux d'actualisation des ménages n'est pas identique parmi la population mais dépend du revenu, tel que décrit dans le chapitre précédent. L'ensemble de ces trois hétérogénéités correspond à celles prises en compte dans des modèles *bottom-up* ingénieur plus détaillés vis-à-vis des ménages, comme celui de Cayla (2011).
- **Technique, climatique, logique d'achat et prix des équipements pour une même performance (TCLP).** Aux hétérogénéités de la variante précédente est ajoutée celle du prix des équipements pour un même niveau de performance. Les ménages tirent aléatoirement un prix dans une distribution de prix proposés, déterminée par le prix moyen et son écart-type estimé, tel que précisé dans le chapitre précédent.
- **Technique, climatique, logique d'achat, prix des équipements pour une même performance, préférence des ménages (TCLPP).** Aux hétérogénéités de la variante précédente est ajoutée celle des préférences des ménages. Cette hétérogénéité n'étant pas connue a priori, plusieurs options sont proposées, et diffèrent par l'écart-type du terme aléatoire ajouté au CGA des choix technologiques, tel que précisé dans le chapitre précédent. On distingue ainsi trois options caractérisées par les écarts-types de la distribution normale des préférences : 100, 200 et 500€ (TCLPP100, TCLPP200 et TCLPP500).

2.2.2. Résultats et discussion

Les simulations des variantes proposées, dont les résultats sont présentés sur la Figure 96 en énergie finale et sur la Figure 97 en émissions de GES, indiquent dans quelle mesure l'intégration des différentes composantes de l'hétérogénéité du marché de la rénovation dans un modèle *bottom-up* ingénieur peut influencer la trajectoire de consommation d'énergie et d'émissions de GES simulées à partir d'un même scénario d'instruments économiques.

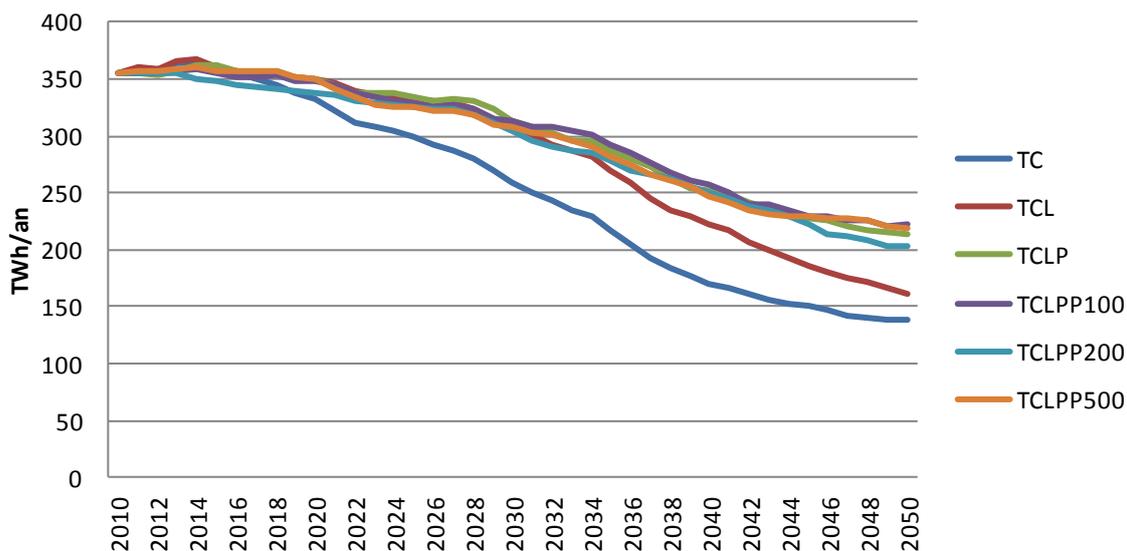


Figure 96 : Trajectoires des consommations de chauffage en énergie finale, calculées pour un scénario économique volontariste, en fonction de la représentation des hétérogénéités du marché de la rénovation.

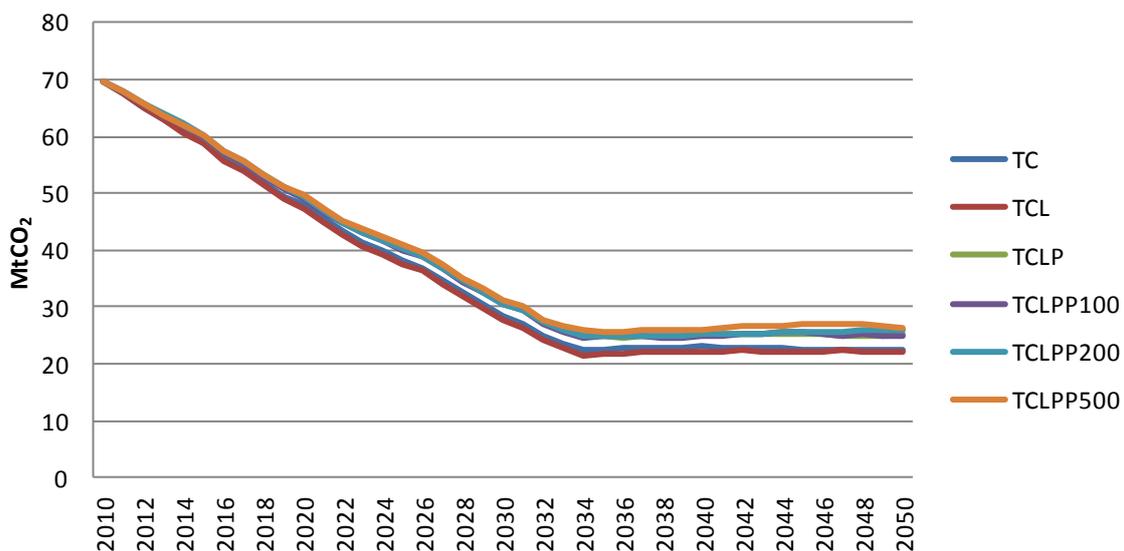


Figure 97 : Trajectoires des émissions de CO₂ dues chauffage, calculées pour un scénario économique volontariste, en fonction de la représentation des hétérogénéités du marché de la rénovation

Comme cela a été décrit dans le second chapitre de la partie II, l'introduction d'hétérogénéités supplémentaires dans un marché a pour conséquence des parts de marché plus équilibrées entre les différentes options technologiques. Ceci implique que, pour un scénario volontariste donné d'instruments économiques visant une diffusion massive des technologies les plus performantes en rendant leur CGA inférieur à celui des technologies standard, cette diffusion sera d'autant moins marquée que le marché est hétérogène.

L'application numérique de cette propriété révèle que, pour le scénario défini, la consommation d'énergie finale de chauffage en 2050 peut varier de manière importante selon les hétérogénéités prises en compte : la consommation en 2050 de la variante prenant en compte le plus d'hétérogénéité est supérieure de 60% à celle de la variante ne prenant en compte que les hétérogénéités technique et climatique. En termes d'émissions de GES, l'écart entre les variantes présentées est cependant moins important, de l'ordre de 20%. L'explication de la différence de

l'impact de l'hétérogénéité sur les consommations d'énergie finale et d'émissions de GES tient principalement au fait que les variantes les moins hétérogènes, le marché du renouvellement de systèmes est essentiellement composé de pompes à chaleur (et complété par des systèmes de chauffage au bois). Ceci entraîne une forte réduction des consommations d'énergie finale du fait de leur rendement élevé. Lorsque l'hétérogénéité du marché augmente, la part de marché des pompes à chaleur diminue au profit des systèmes au bois mais aussi d'autres systèmes, dont certains utilisent des combustibles fossiles. Les émissions de GES de ces derniers compensent la réduction des émissions apportée par les systèmes de chauffage au bois, ce qui explique l'augmentation des émissions de GES. D'autre part, le rendement moyen des systèmes qui entrent dans le marché est inférieur à celui des pompes à chaleur ce qui explique l'augmentation de la consommation nationale d'énergie finale de chauffage lorsque l'hétérogénéité augmente. On peut ainsi observer que les simulations *bottom-up* ingénieur les plus élémentaires, ne prenant en compte qu'un nombre restreint d'hétérogénéités du marché, sont celles qui simulent les consommations et émissions les plus basses en 2050. Ces résultats illustrent en ordre de grandeur dans quelle mesure la représentation des hétérogénéités peut mener à surestimer l'impact que peuvent avoir les politiques énergétiques visant la baisse des consommations énergétiques et émissions de GES.

La forme de la trajectoire des émissions de GES présente une forte cassure autour de 2035. Celle-ci correspond à la fin de la durée de vie des systèmes de chauffage qui équipaient le parc de logement en début de simulation. En effet, durant la période 2010-2035, l'intégralité des systèmes de chauffage sont remplacés par des pompes à chaleur ou du chauffage au bois. Ceci entraîne une forte réduction des émissions de GES dues au chauffage. Durant les 15 dernières années, les pompes à chaleur sont plus compétitives qu'en début de simulation du fait de l'apprentissage technologique, et prennent par conséquent des parts de marché encore plus importantes que sur la période 2010-2035 et remplacent donc certains chauffage au bois installés durant la première période. Ce mécanisme, combiné à une amélioration continue de l'isolation des logements, entraîne une stagnation des émissions de GES (mais la prolongation de la baisse de la consommation d'énergie finale).

On peut cependant noter qu'aucune des variantes représentées, même celles n'intégrant que peu d'hétérogénéité, n'atteint le facteur 4, ce qui révèle ici-aussi quelques défauts du modèle. En premier lieu, la fonction d'apprentissage technologique implémentée à partir d'une revue de la bibliographie internationale, a pour effet une très forte diminution du coût des pompes à chaleur du fait de leurs importantes parts de marché. D'autre part, les coûts intangibles ont été calibrés sur l'année 2008, pour laquelle les subventions sur les équipements de chauffage au bois étaient sensiblement plus élevées qu'en 2011, date à partir de laquelle les subventions sont considérées constantes. Ceci a pour effet de limiter la pénétration des chauffages au bois, et en particulier des plus performants, et par conséquent d'empêcher un fort apprentissage technologique sur ces équipements. La résultante est une stagnation des émissions de GES au niveau correspondant aux émissions des pompes à chaleur et non pas celui des systèmes de chauffage au bois, qui auraient permis l'atteinte du facteur 4. Ces constats révèlent la nécessité de prolonger l'effort de recherche sur la représentation de l'offre technologique dans les modèles technologiquement explicites, à la fois concernant la dynamique des coûts techniques, mais aussi celle de la performance des équipements et des coûts intangibles. Ces recherches n'ayant pu être réalisées au cours de la thèse, les résultats présentés ici comportent les défauts énoncés et doivent par conséquent être analysés en valeurs relatives et non pas absolues.

Conclusion

Ce chapitre a présenté les résultats de simulations de scénarios prospectifs à l'aide du modèle BEUS présenté dans le chapitre précédent. Les résultats obtenus ont permis de quantifier l'impact, toutes choses égales par ailleurs, du choix de représentation des comportements d'usage quotidien des équipements de chauffage ainsi que celui du marché de la rénovation thermique des logements. Ainsi, même avec un scénario technologique particulièrement volontariste vis-à-vis de la réduction des émissions de GES liées au chauffage résidentiel, il apparaît difficile d'atteindre un facteur 4 sur ces émissions dès lors qu'une représentation réaliste de l'*intensité d'utilisation* des équipements de chauffage et de la malfaçon technique est utilisée. Cependant, les résultats ont permis d'observer que l'augmentation future des prix des énergies, prise comme hypothèse, permettait de limiter sensiblement l'impact de l'effet rebond sur les consommations de chauffage. D'autre part, les simulations de scénarios volontaristes vis-à-vis de politiques économiques mises en place ont montré que les résultats de ceux-ci étaient sensibles aux hypothèses faites sur l'hétérogénéité du marché de la rénovation thermique. L'introduction de l'ensemble des hétérogénéités évoquées dans le second chapitre de la partie II diminue sensiblement la réduction des consommations énergétiques et émissions de GES modélisées pour une même politique énergétique par rapport au cas où seules les hétérogénéités techniques et climatiques sont représentées dans le modèle.

Du point de vue de la modélisation des consommations énergétiques du secteur résidentiel français, l'intérêt premier des résultats obtenus est de donner des ordres de grandeur de l'impact de la prise en compte de variables comportementales (relatives à l'usage quotidien des technologies et à l'achat d'équipements) qui sont généralement négligées, voire ignorées, dans les modèles *bottom-up* ingénieur. L'application du modèle développé dans cette thèse à l'évaluation *ex ante* de politiques énergétiques a révélé que les simulations *bottom-up* ingénieur les plus élémentaires surestiment fortement les bénéfices énergétiques que l'on peut attendre des politiques énergétiques simulées, qu'elles soient technologiques (réglementation) ou économiques (subventions et taxe carbone).

Bibliographie

[AIE, 2011] World Energy Outlook, Agence Internationale de l'Énergie, 2011, 659p

Allcott H., 2011, "Social norms and energy conservation", Journal of Public Economics, 95, 1082-1095

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

Borenstein S., 2008, "Equity Effects of Increasing-Block Electricity Pricing", Working Paper 180, University of California Energy institute, pour le Center for the Study of Energy Market (CSEM), novembre 2008

Borenstein S., 2009, "To What Electricity Price Do Consumers Respond? Residential Demand Elasticity Under Increasing-Block Pricing," Working paper, July 2009

Borenstein S., 2011, "The Redistributive Impact of Non-Linear Electricity Pricing", Energy Institute at Haas Working Paper, Working Paper 204R, Avril 2011, à paraître dans American Economic Journal: Economic Policy

Cayla J-M., 2011, "Les ménages sous la contrainte carbone – Exercice de modélisation prospective des secteurs résidentiel et transports avec TIMES", thèse de doctorat soutenue le 3 mars 2011

[Chubu Electric Power Company, 1988] "Electricity Rates", Chubu Electric Power Company, Japon, 1988

Cialdini, R., W. Schultz, 2004, "Understanding and motivating energy conservation via social norms", Rapport final préparé pour la fondation William and Flora Hewlett, grant number: 2001-7396

[CRE, 2012] Commission de Régulation de l'Énergie, dossier « La contribution au service public de l'électricité (CSPE) », <http://www.cre.fr/dossiers/la-cspe>, consulté le 15 mars 2012

Grandjean A., et membres du groupe de travail Terra nova sur la politique énergétique, 2011, « Maitriser l'énergie - Un projet énergétique pour une société responsable et innovante », Rapport du groupe de travail Terra nova sur la politique énergétique présidé par Alain Grandjean, http://www.tnova.fr/sites/default/files/Maitriser_l_energie.pdf, 11 juillet 2011

Grignon-Massé, L., 2010, "Développement d'une méthodologie d'analyse coût-bénéfice en vue d'évaluer le potentiel de réduction des impacts environnementaux liés au confort d'été : cas des climatiseurs individuels fixes en France métropolitaine", thèse de doctorat, soutenue le 20 mai 2010 à Paris, France

Haas, R., L. Schipper, 1998, "Residential energy demand in OECD-countries and the role of irreversible efficiency improvements", Energy Economics, 20(4): 421-442

Hong S.H., T. Oreszczyn, I. Ridley, the Warm Front Study Group, 2006, "The impact of energy efficient refurbishment on the space heating fuel consumption in English dwellings", Energy and Buildings, Volume 38, Issue 10, October 2006, Pages 1171-1181

Lai J., N. DeForest, S. Kiliccote, M. Stadler, C. Marnay, J. Donadee, 2011, "Evaluation of evolving residential electricity tariffs", poster presented at the ECEEE 2011 Summer Study 6–11 June 2011 Belambra Presqu'île de Giens, France; LBNL-4496E-Poster, <http://eetd.lbl.gov/EA/EMP/emp-pubs.html>

Mathy, S., M. Fink, R. Bibas, 2011, « Quel rôle pour les scénarios Facteur 4 dans la construction de la décision publique ? », Revue développement durable et territoires », 2(1), mars 2011

[MEDDTL, 2012] "Le tarif de première nécessité (TPN)", site du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-tarif-de-premiere-necessite-TPN.html>, consulté le 23 mars 2012

Meran G., C. von Hirschhausen, 2009, "Increasing Block Tariffs in the Water Sector: A Semi-Welfarist Approach", DIW Berlin Discussion Paper No. 902, 1^{er} juin 2009

[NégaWatt, 2011] dossier de présentation conférence de presse / réunion publique, « Scénario négaWatt 2011 », associaton négaWatt, 29 septembre 2011

Planton S., J-L. Durand, 2011, « Quel climat régional à l'horizon 2020 et 2050 ? », présentation au lancement SRCAE, Toulouse, 24 février 2011

[Rate System Committee, 1987] "Seasonal/Time-of-Use Rate System, Increasing Rate System and Management of Nuclear Back-End Cost in Rate Cost Account", The Electric Utility Industry Council, Japan.

Reiss P., M. White, 2005, "Household Electricity Demand, Revisited", Review of Economic Studies, 72, 853–883

Ruscassie C., T. Bélouard, 2005, « Évaluation du potentiel Bois Energie », étude réalisée par SOLAGRO en partenariat avec l'ADEME, l'IFN et RBM

Schultz P.W., J.M. Nolan, R.B. Cialdini, N.J. Goldstein, V. Griskevicius, 2007, "The constructive, destructive, and reconstructive power of social norms", Psychological Science, 18, p 429–34

Traisnel J-P., D.Joliton, M-H. Laurent, S. Caffiaux, A. Mazzenga, 2010, Habitat Facteur 4 Étude d'une réduction des émissions de CO₂ liées au confort thermique dans l'habitat à l'horizon 2050, Les Cahiers du CLIP n°20, novembre 2010, 104p

[UFE, 2011] « Electricité 2030: quels choix pour la France? », Union Française de l'Electricité, Dossier de Presse de la conférence de presse du 7 novembre 2011

Wilhite H., J.S. Norgard, 2003, "A case for self-deception in energy policy", Proceedings of the 2003 ECEEE Summer Study on Energy, 249-257

Conclusion générale et perspectives

Les enseignements de la modélisation des comportements quotidiens de chauffage

L'étude des divergences entre consommations de chauffage observées sur facture et consommations théoriques calculées à l'aide de modèles thermiques normés¹⁷⁵ a permis de tirer des enseignements dont les implications apparaissent importantes dans le contexte de la modélisation prospective des consommations d'énergie du secteur résidentiel français et en particulier pour l'évaluation des marges de manœuvre des politiques climatiques et énergétiques relatives à ce secteur. Tout d'abord, l'étude réalisée à partir de deux sources de données distinctes¹⁷⁶ a mis en relief une surestimation moyenne significative (supérieure à 60%) des consommations de chauffage individuel en France par le modèle de calcul thermiques normé le plus utilisé aujourd'hui : le mode de calcul 3CL du Diagnostic de Performance Énergétique, outil réglementaire devenu le langage commun des acteurs de la rénovation thermique des logements français. Au-delà des biais inhérents à tout modèle, cette surestimation est due à la fois à une surévaluation du confort thermique effectif des logements, tel que choisi par les occupants, et à la présence de malfaçons ou mauvais fonctionnements techniques non pris en compte dans le calcul thermique, qui est basé sur des conditions « normales » à la fois de d'usage des technologies par les ménages et de fonctionnement de ces technologies.

Il apparaît ainsi que les ménages français exploitent déjà largement le gisement d'économies d'énergie associé à la sobriété énergétique (réduction du niveau de confort thermique), gisement « comportemental » sur lequel plusieurs études comptent pour réduire les consommations et émissions de GES du secteur résidentiel. L'ampleur de l'écart observé souligne le besoin de recourir à une double échelle lors de la communication d'informations concernant les gisements techniques d'économie d'énergie concernant le chauffage résidentiel, pour bien distinguer le calcul « normal » (comme les étiquettes du DPE) d'une estimation plus réaliste des consommations. Le premier serait alors un indicateur qualitatif de la performance intrinsèque du logement, et la seconde serait nécessaire dès lors que les résultats manipulés sont destinés à un usage quantitatif, comme par exemple l'évaluation de la rentabilité financière de travaux de rénovation thermique de logements ou l'évaluation de l'efficacité de politiques énergétiques visant une réduction des consommations d'énergie.

Si la surestimation en moyenne de la consommation des logements grève sensiblement le gisement d'économies d'énergie vis-à-vis du chauffage, l'étude des comportements quotidiens de chauffage a aussi révélé que la demande de confort thermique est élastique au prix de ce service, c'est-à-dire à la fois au prix des énergies (élasticité prix), à la performance thermique du logement

¹⁷⁵ L'appellation « modèles thermiques normés » se réfère dans cette thèse à des modèles physiques de calcul de consommation énergétique basés sur des hypothèses d'utilisation « normale » des équipements par les ménages (par exemple un chauffage à 19°C en permanence dans tout le logement) et de performance « normale » de ces équipements (par exemple un respect total des réglementations thermiques en vigueur à la date de construction des logements). Les normes choisies peuvent différer sensiblement des comportements et performances réelles, ce qui est détaillé dans la suite de cette section.

¹⁷⁶ D'une part les consommations de chauffage par segment du parc résidentiel, entre 1998 et 2005, issues du CEREN, et d'autres part les consommations énergétiques d'un échantillon de 913 ménages, issues d'une enquête EDF R&D en 2009.

(effet rebond) et à la rigueur climatique. Il en résulte que l'augmentation de confort thermique consécutive à l'amélioration de la performance énergétique du parc de logements, combinée à la présence de malfaçons, aurait pour conséquence une réduction de l'ordre de 40% des gains énergétiques de ces améliorations technologiques, calculés de manière non normée mais à comportement constant. L'implication la plus importante de ce résultat est liée à l'évaluation de l'efficacité des instruments de politique énergétique : pour un même instrument, les économies réelles d'énergie sont sensiblement inférieures à celles estimées par un calcul thermique utilisant la norme du DPE. Ceci a en particulier pour conséquence l'augmentation de l'effort nécessaire, en termes de politique énergétique, pour atteindre des objectifs chiffrés d'économie d'énergie, comme par exemple la cible du Grenelle de l'environnement à l'horizon 2020 (-38% sur la consommation d'énergie primaire). La deuxième implication concerne l'évaluation de la rentabilité des améliorations de la performance énergétique des logements du point de vue des ménages. D'un point de vue strictement financier, cette rentabilité diminue d'autant plus que les gains énergétiques sont faibles. Les résultats présentés indiqueraient donc que cette rentabilité serait sensiblement inférieure à celle calculée par la norme de calcul du DPE. Cependant, l'écart entre la norme et les observations relève en partie d'une augmentation du confort thermique des ménages, qu'il convient de valoriser pour représenter l'utilité que les ménages en retirent. En effet, les ménages arbitrent entre l'utilisation des gains énergétiques pour une amélioration de leur confort et pour une réduction de leur facture énergétique. La rentabilité de l'efficacité énergétique pour les ménages n'est ainsi pénalisée que par la malfaçon, dont l'ampleur est malheureusement mal connue.

Les enseignements de l'étude des hétérogénéités au sein des variables manipulées

La deuxième étude menée dans le cadre de cette thèse est centrée sur l'analyse du biais d'agrégation touchant les variables manipulées par les modèles technico-économiques. Ce biais d'agrégation se réfère ici à la différence qui peut être observée entre les résultats de simulation lorsque le modèle représente les variables manipulées par leur distribution réelle au sein de la population et lorsque le modèle n'utilise que des valeurs moyennes concernant ces variables. L'étude de ce biais est particulièrement importante pour analyser les divergences entre les résultats d'un modèle représentant le parc de logements à l'aide de segments décrits par des valeurs moyennes (ce qui est le cas de la majorité des modèles *bottom-up* ingénieur utilisés actuellement en France) et ceux d'un modèle représentant ce parc à l'aide d'un échantillon de logements (choix qui a été réalisé dans cette thèse et par certains modèles développés récemment, comme par exemple Enerter).

L'analyse du biais d'agrégation porte d'une part sur l'estimation de la consommation énergétique à un instant t et d'autre part sur celle des parts de marché technologiques (et par conséquent sur la dynamique des consommations d'énergie). En ce qui concerne le premier point, les travaux ont permis de tirer deux enseignements principaux. Tout d'abord, nos résultats montrent que l'estimation à un instant t de la consommation nationale de chauffage individuel (réaliste ou normée) peut être réalisée avec un intervalle de confiance satisfaisant en calculant la consommation moyenne de seulement 200 logements tirés au hasard dans un échantillon représentatif de la population. Ce résultat présente à la fois un intérêt pour les modèles sur échantillon (en permettant de dimensionner la base de données suffisante pour estimer la consommation de chauffage d'une population) et pour les modèles sur segments (en déterminant le nombre maximal de segments qui peuvent être construits à partir de la description d'un grand nombre de logements¹⁷⁷).

¹⁷⁷ Comme par exemple dans l'enquête Logement, l'enquête Budget des Familles ou le Recensement Général de la Population de l'INSEE.

Le deuxième enseignement réside dans le constat que l'estimation de la consommation énergétique d'un ensemble de logements est sujette au biais d'agrégation si la fonction reliant la consommation d'énergie et les variables utilisées pour son estimation n'est pas linéaire. C'est en particulier le cas de la majorité des variables intervenant dans le calcul des besoins de chauffage (en énergie utile), celui-ci relevant des lois de la thermique, non linéaires. En l'absence d'un échantillon renseigné avec suffisamment de précision concernant les variables nécessaires au calcul thermique, l'évaluation du biais d'agrégation n'a pu être réalisée sur l'ensemble des variables manipulées dans le cadre de cette thèse¹⁷⁸ mais serait de l'ordre de la dizaine de pourcents d'après les résultats obtenus sur certaines variables liées à la performance du bâti et d'après une des rares sources de la littérature concernant cette problématique¹⁷⁹. Il importe de retenir que l'estimation de la consommation énergétique d'un ensemble de logements est d'autant plus précise que cet ensemble est représenté de manière désagrégée.

En ce qui concerne le marché de la rénovation thermique des logements, les travaux effectués ont montré qu'une différence fondamentale entre les représentations qui en sont faites dans les modèles ingénieur et les modèles économiques (de choix discret) réside dans la prise en compte de l'hétérogénéité de ce marché. Les modèles les plus élémentaires de simulation des investissements en efficacité énergétique par les ménages n'intègrent structurellement que l'hétérogénéité de la performance des logements, par exemple au travers de classes énergétiques, alors que l'analyse des différentes variables intervenant dans le calcul du critère d'investissement généralement retenu (valeur actualisée nette ou coût global actualisé) révèle que de nombreuses autres variables peuvent être hétérogènes au sein de l'offre et de la demande de rénovation thermique des logements. Il en résulte une sous-estimation de l'hétérogénéité de ce marché par les modèles ingénieur, dont la conséquence est une surestimation de la performance énergétique choisie par les ménages dans le contexte d'un environnement technico-économique favorable aux investissements énergétiquement performants.

Les différences entre les observations de parts de marché réelles et celles calculées par les modèles d'ingénieur ne résultent pas uniquement de la présence d'hétérogénéités non techniques dans le marché. En effet, comme cela a été rappelé dans le deuxième chapitre de la partie I, il existe d'autres obstacles et barrières à l'efficacité énergétique qui peuvent être représentés par des coûts non techniques perçus par les ménages (ou par des taux d'actualisation implicites élevés) en ce qui concerne l'achat d'équipements énergétiquement performants. L'étude spécifique du marché français de la rénovation thermique des logements, réalisée en calibrant le modèle développé sur les parts de marché observées lors de l'enquête OPEN¹⁸⁰ 2008, a ainsi confirmé que les coûts non techniques pouvaient être d'un ordre de grandeur similaire aux coûts techniques. La valeur relative de ces coûts additionnels par rapport au coût d'achat des équipements varie sensiblement entre les différentes filières technologiques, de négligeables dans le cas des fenêtres à un niveau supérieur au prix d'achat dans le cas de l'isolation des murs par l'extérieur. Ces résultats permettent d'évaluer en ordre de grandeur l'importance des barrières existantes s'opposant au choix des technologies d'efficacité énergétique les plus performantes. Les valeurs obtenues sont assez importantes pour

¹⁷⁸ L'estimation précise des valeurs prises réellement par les variables physique nécessiterait la mesure *in situ* de la température intérieure dans les différentes pièces des logements, du taux de renouvellement d'air, de la résistance thermique des parois et du rendement du système de chauffage. L'ensemble de ces mesures serait particulièrement coûteux, surtout à l'échelle d'un échantillon de taille suffisante pour être représentatif de la population française.

¹⁷⁹ Woods, J., M. Moezzi, L. Lutzenhiser, 2010, commentaire oral lors de la présentation du poster "How Much Does Household Behavior Count", ACEEE Summer Study on Buildings, 15–20 août 2010, Pacific Grove, Californie, États-unis

¹⁸⁰ Enquête réalisée par le bureau d'étude BIIS pour le compte de l'ADEME, portant sur le marché de la rénovation des logements en France.

souligner le besoin d'une analyse plus approfondie de la nature de ces barrières et des voies par lesquelles les réduire.

Les enseignements des exercices prospectifs

A l'aide du modèle technico-économique développé (BEUS), les simulations prospectives effectuées ont permis d'illustrer les effets combinés de l'introduction d'une représentation de comportements quotidiens de chauffage réalistes, des malfaçons techniques et des hétérogénéités caractéristiques du marché de la rénovation thermique des logements. Dans le cadre de la simulation de politiques énergétiques visant la baisse des consommations de chauffage ainsi que celle des émissions des GES qui leurs sont liées, les simulations montrent que ces éléments mènent chacun à des trajectoires de consommations plus élevées que lorsqu'ils ne sont pas représentés. L'enseignement principal que l'on peut retirer de ces résultats est que l'atteinte des objectifs de la politique énergétique nationale, que ce soit la réduction de 38% des consommations d'énergie primaire à l'horizon 2020 ou la réduction d'un facteur 4 des émissions de GES à l'horizon 2050, va requérir une amélioration de la performance énergétique et environnementale des logements sensiblement plus importante que celle estimée dans les scénarios purement technologiques ou les modèles technico-économiques les plus élémentaires. Cette amélioration devra par conséquent être poussée par des politiques énergétiques sensiblement plus contraignantes que celles issues du Grenelle de l'environnement et d'une taxe carbone telle que proposée dans le rapport Quinet.

Ce constat nécessite une réflexion sur la répartition de la contrainte au sein de la population. En effet, la mise en place de politiques énergétiques et climatiques plus contraignantes, quelle que soit leur forme (taxe, subvention, norme, information), se heurte elle-même à des contraintes de financement, de capacité de mise en œuvre et de vulnérabilité de certaines populations. L'état des finances publiques et le nombre de ménages actuellement en situation de précarité énergétique indiquent qu'il pourrait être très difficile d'augmenter la contrainte énergétique de manière généralisée. Cette difficulté ouvre un champ d'investigation particulièrement intéressant, d'une part vis-à-vis de l'étude de la répartition de la contrainte au sein de la population et d'autre part en ce qui concerne la conception d'instruments innovants de politique énergétique ou climatique à même de répartir cet effort. La combinaison des deux champs d'investigation permet de mettre en relief des actions plus ciblées, alliant un moindre coût pour l'Etat et des cibles pouvant supporter la contrainte énergétique supplémentaire.

Limites du travail réalisé et perspectives de travaux futurs

L'ensemble des travaux présentés dans cette thèse a naturellement ses limites et présente de multiples voies d'amélioration. Tout d'abord, les comportements quotidiens sont modélisés dans BEUS comme seuls « responsables » des écarts entre consommations normées et réalistes alors qu'il conviendrait de distinguer les comportements de la malfaçon technique, ce qui n'a pas été fait faute de données jugées suffisamment solides concernant à la fois l'occurrence des malfaçons et leur impact sur les consommations énergétiques. Du fait de l'ampleur potentielle de son impact sur les gains énergétique que l'on peut attendre d'améliorations de la performance énergétique des logements, des travaux approfondis sur la malfaçon technique permettraient d'une part d'en construire une représentation réaliste dans les modèles d'évaluation de politiques énergétiques mais aussi de discerner quels seraient les moyens d'action les plus appropriés pour la réduire.

D'autre part, si le modèle BEUS intègre bien un mécanisme d'apprentissage (*learning-by-doing*) concernant le prix des technologies représentées, les coûts non techniques (ou coûts intangibles) sont quant à eux constants au cours du temps. La représentation de phénomènes d'apprentissage propres aux coûts non techniques (*learning-by-interacting, neighbor effect*), permettant de mieux représenter le fait que les technologies les plus performantes, si elles sont installées en nombre suffisant, peuvent devenir « communes » et rentrer ainsi dans les habitudes à la fois de l'offre et de la demande de rénovations thermiques des logements, est donc une voie d'amélioration importante du modèle développé. Au-delà de la question des coûts non techniques, l'offre technologique dans son ensemble souffre d'un important déficit de détail dans sa représentation par rapport à celui de la demande. La modélisation d'une distribution de prix pour un même équipement à la place d'un prix unique représente un premier pas dans la direction d'une représentation plus fidèle des différentes filières technologiques dans un modèle technico-économique. Les travaux présentés ont montré que, si l'introduction de cet élément modifie les résultats de simulation de manière non négligeable, celle-ci est encore réalisée de manière frustrée, ne prenant par exemple pas en compte la probable présence de discrimination par les prix dans le marché de la rénovation thermique des logements. La prolongation des travaux initiés dans ce sens semblerait donc pertinente pour améliorer le réalisme des simulations.

Une problématique relativement peu traitée dans cette thèse est la question de la validation rétrospective du modèle utilisé. En effet, seule la représentation des comportements quotidiens de chauffage a été testée rétrospectivement (sur la période 1998-2005). La calibration des coûts non techniques a été quant à elle effectuée sur une seule année (2008) et ces coûts ont été intégrés au modèle prospectifs comme constants au cours du temps. Cependant, comme cela a été présenté dans le premier chapitre de cette thèse, les données publiques traitant de la diffusion des technologies de la demande au cours des dernières décennies et ayant un niveau de détail satisfaisant sont rares et parcellaires. L'apport fondamental que représenterait une validation rétrospective du modèle développé révèle donc en creux un manque de données publiques structurées sur lesquelles la baser. Un travail spécifique à la construction de ces données représenterait une forte valeur ajoutée pour les différents acteurs souhaitant améliorer la robustesse de leurs modèles technico-économiques de dynamique de la demande d'énergie du secteur résidentiel français (MEDDTL, ADEME, CIRED, CMA, LEPII, IREGE, EDF, GDF-Suez, Enerdata, Energies-Demain, CEREN, négaWatt...).

Enfin, il est important de souligner que les résultats quantitatifs proposés en partie III sont issus du modèle développé au cours de la thèse et dont le processus de validation est en cours. Si certaines coquilles peuvent encore y être présentes, son défaut principal consiste en l'absence d'étude de sensibilité sur les paramètres utilisés. Ceci est en partie dû au fait que le modèle a été développé dans un langage de programmation largement répandu mais peu performant (Visual Basic for Applications). Ce choix rend possible l'usage du modèle sur tout poste informatique et a facilité l'utilisation des bases de données existantes au sein d'EDF R&D mais limite fortement la rapidité d'exécution et rend particulièrement longue la simulation du grand nombre d'alternatives nécessaire à une étude de sensibilité complète. D'autre part, ce modèle est basé sur un échantillon de logements relativement réduit. Cette taille lui permet d'estimer correctement la consommation énergétique nationale à un instant t mais présente quelques divergences d'une simulation à l'autre dès lors que le niveau d'observation ne concerne qu'un segment particulier, et donc un nombre sensiblement inférieur de logements. Le choix d'avoir conservé ce « petit » échantillon vient d'une part de la richesse de celui-ci mais aussi de la contrainte temporelle qu'aurait impliquée l'usage d'une base de données sensiblement plus grande. Une amélioration de la performance du modèle apparaît donc comme pouvant bénéficier à la fois à la précision de celui-ci et à la possibilité d'y appliquer une étude de sensibilité. Enfin, il convient de rappeler qu'il a été choisi de ne représenter que la dynamique des consommations de chauffage et d'eau chaude sanitaire des logements

existants actuellement. L'introduction d'autres usages, et en particulier des usages spécifiques de l'électricité, améliorerait le réalisme dynamique du modèle mais pose la question de la pertinence de la rationalité économique comme moteur des comportements d'usage et d'achat des équipements électriques.

A leur humble échelle, les travaux présentés dans cette thèse ont permis un dialogue et une meilleure compréhension mutuelle entre ingénieurs et économistes concernant la modélisation de la dynamique des consommations énergétiques du secteur résidentiel français. A l'issue de cette thèse, les perspectives de recherche sur ce sujet restent nombreuses et nous espérons qu'elles sauront susciter l'intérêt de futurs chercheurs.

Annexes

Annexe I : Preuve de l'Equation 21

Avec la forme fonctionnelle de l'intensité d'utilisation de l'Equation 16, les effets « rebond, malfaçon et biais de modèle » (RMB) et « surestimation initiale » (SI) peuvent être définis de la façon suivante à partir des consommations (C) et intensités d'utilisations (I) avant travaux (*init*) et après travaux (*fin*) :

$$\text{Effet RMB} = \frac{\text{surconsommation due à l'augmentation de l'intensité d'utilisation}}{\text{gain énergétique normatif}}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{C_{fin\ 3CL+SI+RMB} - C_{fin\ 3CL+SI}}{C_{init\ 3CL} - C_{fin\ 3CL}} \\ &= \frac{C_{fin\ 3CL} \cdot I_{final} - C_{fin\ 3CL} \cdot I_{init}}{C_{init\ 3CL} - \frac{C_{init\ 3CL}}{F}} \\ &= \frac{\frac{C_{init\ 3CL}}{F} \cdot I_{final} - \frac{C_{init\ 3CL}}{F} \cdot I_{init}}{C_{init\ 3CL} - \frac{C_{init\ 3CL}}{F}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{C_{init} \text{ 3CL}}{F} (I_{final} - I_{init}) \\
&= \frac{C_{init} \text{ 3CL}}{F} \cdot (F - 1) \\
&= \frac{k \cdot CSN_{final}^\theta - k \cdot CSN_{init}^\theta}{F - 1} \\
&= \frac{k \cdot \left(\frac{CSN_{init}}{F}\right)^\theta - k \cdot CSN_{init}^\theta}{F - 1} \\
&= \frac{k \cdot CSN_{init}^\theta \cdot (F^{-\theta} - 1)}{F - 1} \\
&= I_{init} \cdot \frac{F^{-\theta} - 1}{F - 1}
\end{aligned}$$

Annexe II : Communications écrites au cours de cette thèse

Liste des communications écrites effectuées au cours de cette thèse :

- 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, 2009, November 16, Washington, D.C. (Non présenté dans cette annexe pour cause d'incompatibilité de format)
- Cayla, J-M., B. Allibe, M-H. Laurent, 2010, "From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption", Proceedings of the ACEEE Summer Study on Buildings, 15–20 août 2010, Pacific Grove, Etats-unis
- Allibe, B., D. Osso, M-H. Laurent, 2010, "*Modélisation thermique du chauffage individuel : d'un logement unique à l'ensemble du parc*", Conférence IBPSA France, Moret-sur-Loing, 9-10 novembre 2010
- Allibe, B., M-H. Laurent, D. Osso, 2011, "Bind the rebound! How the combination of progressive energy tariffs and adapted soft loans can curb rebound effect and promote energy sufficiency", Proceedings of the 2011 ECEEE Summer Study, Paper 1-234

- 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 2011 ECEEE Summer Study, Paper 7-277
- Laurent, M-H., B. Allibe, D. Osso, 2011, "Energy efficient technologies for all! Testing the efficiency of an innovative conditional subsidy on refurbishment market", Proceedings of the ECEEE 2011 Summer Study, paper 2-231
- Osso, D., B. Allibe, M-H. Laurent, 2011, "Demolition vs. refurbishment for the old homes: a local cost-benefit analysis", Proceedings of the ECEEE 2011 summer study, paper 5-226
- Allibe, B., 2011, « Eléments de réflexion sur la création d'un modèle technico-économique de dynamique des consommations énergétiques et émissions de GES associées au secteur résidentiel français », note réalisée pour le groupe de travail « socio-économie » du PREBAT, juillet 2011, à la base de la présentation orale « Modéliser la dynamique des consommations : du normatif au réaliste, Illustration par le DPE: écueil et pistes de solutions », Journée PREBAT « Atteindre le facteur 4 dans l'habitat : enseignements et incertitudes des travaux d'étude et de modélisation », 22 juin 2012

From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption

*Jean-Michel Cayla, Centre de Mathématiques Appliquées (Mines Paristech) - EDF R&D
Benoit Allibe, CIRED (CNRS, EHES, ENPC, Agro Paristech) - EDF R&D*

ABSTRACT

Energy consumption in residential buildings is a complex phenomenon that stems from the combination of technical features and practices of occupants. Despite the central role occupants play, long-term modeling exercises at large scale often lack behavioral realism and explicitness. This study shall focus on the integration of conservation behaviors in the long-term modeling of space heating energy consumption in the residential sector. Based on a recent survey on 2,012 French households, we shall compare three energy demand models: an engineering model with normative behavior, an engineering model that includes several space heating practices, and a statistical model that captures the impact of all variables (technical, practices and socio-demographic). Our results confirm the importance of behavior in the explanation of energy consumption and quantify the role played by explicit practices on one hand and socio-demographic variables on the other. Nevertheless significant differences can be observed between calculated and actual energy consumptions, suggesting several potential uncertainties in the calculations. Consequently, we investigate how these uncertainties might impact the results of a forward-looking study focused on behavioral changes.

Introduction

Residential space heating is responsible for about 20% of energy consumption and 15% of greenhouse gases emissions in France [CEREN, 2007; CEREN, 2009 DGEMP, 2008]. Many technical solutions to reduce energy consumption are well known, well developed and may lead to long-term financial benefits [Laurent et al., 2009]. This makes this sector very attractive for national long-term energy policies [Levine, 2009].

Many models aim at quantifying the energy savings that can be achieved through technological, economical or behavioral changes. However, large-scale long-term studies tend to focus either on technical potential or on the purchase decision of energy-efficient equipment. In fact, very few large-scale studies have explicitly considered the impact of conservation behaviors per se (i.e. without technical change) until recently [BC Hydro, 2007; Dietz et al., 2009; Gardner and Stern, 2009]. Given the importance of possible behavioral changes on mid- and long-term scales, our paper focuses on the implementation of conservation behaviors in a forward-looking model on a national scale.

Conservation behaviors regarding residential space heating mainly consist of the following practices:

- Temperature management: lowering the internal temperature and heating only when and where occupants are at home,
- Ventilation rate management: reducing the amount of time when windows are open

It has been shown that behavior may affect residential energy use to the same extent as do more efficient equipment and appliances [Linden et al., 2006]. In terms of space heating more specifically, thermal simulations have shown that the energy consumption of a dwelling may differ by a factor of 3 depending only on temperature and ventilation rate management (with the same technical context) [Allibe, 2009].

Based on these observations, we tried to integrate these behaviors into different models in order to have a more comprehensive view of conservation behaviors. Thus, we made a complete survey of 2,012 French households to quantify to what extent space heating energy consumption is due to behavioral or technical attributes (see Section 2). The questionnaires gave information on the technical performance of the dwelling (shell and equipment) as well as on the household's heating practices and their socio-demographic attributes. The statistical analysis of energy consumption confirms the importance of behavior and allows us to distinguish practices from socio-demographic impact. Statistics also suggest several sources of uncertainty. Therefore we shall investigate the way these uncertainties might impact the results of our forward-looking model.

The first section of the paper shall review some demand models and their ability to simulate long-term behavioral changes. The survey shall be presented in the second section, followed by model results in Section 3. Finally, uncertainties and their consequences on long-term forward-looking model results shall be investigated in Section 4.

1. A review of space heating energy consumption models and their ability to model long-term behavioral changes

Many models aim at calculating the space heating energy consumption of dwellings. They are applied on different scales, from a single house to the world housing stock. They also reveal different views with regard to the factors that determine energy consumption, with emphasis either on direct factors (for instance technical features or explicit practices) or on more indirect ones (for instance income or energy price). Technically speaking there are two main groups of energy consumption models: *top-down* and *bottom-up* [Hourcade et al., 2005;

Swan et al., 2009]. *Top-down* models offer an aggregate view of energy consumption and are mainly used in economic forward-looking studies. They generally have a good macroeconomic and microeconomic realism but lack technological and non-purchase behavioral explicitness. These features make them unable to represent the disaggregate effect of single practices, which is why we had chosen not to use them. Conversely *bottom-up* models aggregate individual energy consumption to provide a global one. Furthermore, some of them can be used without any historical data, thereby allowing them to represent future trends independently of past ones, a significant advantage for a forward-looking study. Their ability to depict energy demand in a comprehensive and explicit way makes them an adequate tool for the objectives of our study.

Bottom-up models can be categorized into two main groups: statistical and engineering models [Swan et al., 2009, Kavgic et al., 2010]. Statistical models are based on an analysis of the actual energy consumption of households depicted by a group of variables whose level of detail can vary. Statistical analysis then estimates the impact of each variable on energy consumption. These models fit quite well with actual consumption data but contain some inexplicit energy consumption that may not remain constant in the long-term (for instance, the constant in a linear regression). The engineering models are not based on actual energy consumption but on an engineering description of the technical infrastructure: shell and systems performances, and their use by households: mean internal temperature and ventilation rate (that are often normative through the use of heating degree hours and standard ventilation rate for each ventilation technology). This description of the energy consumption determinants provides a physical realism that is crucial for long-term models (whose resulting physical coherence must be checked due to the magnitude of changes that can be modeled in the long-term). This kind of model allows for great technical and behavioral flexibility in the long-term. However, such models are not able to represent the impact of non-technical and non-practice variables (like income or energy prices) if they are not directly correlated with practices or technical variables.

The representation of human behavior in long-term energy consumption models is often limited to purchase behavior [Moezzi, 2009], which models households as more or less rational economic actors. Conservation behaviors can be present in models in the form of short-term elasticity [Haas and Schipper, 1998] or the utilization intensity factor [Schuler et al., 2000], but are seldom tackled explicitly, with the exception of some rare studies like the BC Hydro Conservation Potential Review [BC Hydro, 2007].

Space heating practices in the residential sector are numerous and variable, which makes them difficult to measure on a large scale. In the survey we designed and used, we asked about practices that are measurable by the household, like the mean internal temperature during the space heating period, the frequency and duration of windows being left open, or the presence of a little- or non-heated room in the house. As presented above, such a high level of detail requires a *bottom-up* model. Consequently, we used the two types of *bottom-up* models (engineering and statistical) and compared their results. The statistical model provides a quantifiable and realistic impact of separate practices whereas the engineering model provides physical explicitness and theoretical impact.

2. Presentation of the survey

In order to be able to integrate behavioral aspects into the thermal simulation engineering model we launched a self-administered paper survey among 2,012 French households in June 2009 and asked them to fill out both technical items and consumption practices.

Table 1. Type of items asked in the paper survey

Type of information	Housing characteristics	Space heating system	Environment	Socio-demographic	Practices	Energy consumption
Number of survey items	39	9	4	16	12	5

In order to get representative results on a national scale, respondent households were then weighted according to income quintile, urban density of the geographical location, type of family, ownership status, type of housing, age of the head of family and age of the housing. The annual energy bills declared by households in the survey for 2008 were then collected, but the space heating part (SH) had to be separated from the overall fuel bill. We then used a regression methodology developed by CEREN¹⁸¹ [CEREN, 2007] for domestic hot water (DHW) and cooking end-uses. For other specific electricity end-uses¹⁸² we ran a multi-linear regression ($R^2=0.53$) among the households (N=348) that employ electricity only for these uses. We then deduced the space heating energy consumption SH for each fuel type i.

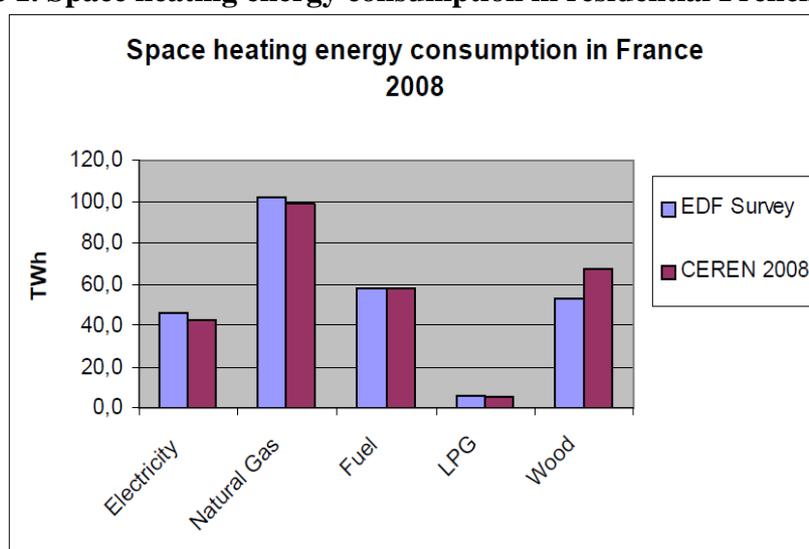
STEP BY STEP

a: estimated with CEREN methodology

b: Estimated with a multi-linear regression ran on survey panel

We then compared the space heating energy consumption obtained from the survey results with the residential space heating energy consumption data provided by CEREN in 2008.

Figure 1. Space heating energy consumption in residential French sector



These results suggest that our sample is representative of space heating energy consumption: we observe very slight differences in overall space heating energy consumption and in the comparison by fuel type.

3. Statistical model and engineering model results

¹⁸¹ CEREN is a French research centre on energy economics and provides reference national data on energy consumption by domestic end-use.

¹⁸² This includes lighting, cooling, cleaning and multimedia end-uses for instance.

Statistical results

The size of the sample was first reduced to N=923 respondents. This is due to the fact that some respondents do not have energy bills, either because their rent includes space heating (especially in apartments) or because they have not declared any. We also excluded about 100 households for whom the final space heating energy consumption does not fall between 20 and 400 kWh/m² ¹⁸³. Then we ran various multi-linear regressions on the sample of respondents in order to explain the variation in total household space heating consumption. Our goal here is not to build a model that may be reused to predict energy consumption, but rather to show the weight of the different types of determinants.

We first built a quite complex model with a multi-linear regression approach that takes into account the whole bundle of variables mentioned in the survey (about 150 degrees of freedom). This model (model 1) allows us to explain about 57% of the variance in space heating consumption. This first model is interesting because it gives an upper bound to the variance that may be explained with the help of these variables. That is, this 57% of variance explained will be useful when comparing the accuracy of the statistical model and the engineering model.

Then we built a second model (model 2) which is easier to manipulate and understand with only 17 variables (28 degrees of freedom). We considered the variables that are quite significant with a (Pr>F) <0.2. This means that there is a more than 4/5 chance that the variable is useful in explaining the variance in consumption.

The following results show that thanks to the different variables we can explain nearly 50% of the total variance in space heating energy consumption. We can further observe that the regression model is reliable as the global Pr>F value is <0.0001.

Table 2. results for multi-linear regression : model 2

Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of squares	Mean square	Value F	Pr > F
Model	28	13601	485.734388	32.43	<.0001
Error	858.99	12866	14.978248		
Corrected Total	886.99	26467			
Model Fit Statistics					
R-Square	0.5139	Adj R-Sq	0.4980		
AIC	2431.9433	BIC	2435.8992		
SBC	2570.8231	C(p)	29.0000		

Here we detail the types of variables used in the regression. The degree of freedom and Pr>F values given for each variable explain the level of disaggregation used and the level of contingency of the variables.

Table 3. Definition of variables used in the regression

Variable definition ¹⁸⁴	Degrees of freedom	Pr > F
Technical and weather variables		
Useful living area	1	<0.0001
Construction year	5	<0.0001
Type of housing +	1	<0.0001

¹⁸³ These values correspond to lower and upper bounds for very old and poorly insulated housing and for recent housing that follows the latest thermal regulation [DGHHC,2006].

¹⁸⁴ Some variables are relevant only for individual houses, others only for apartments; we have thus added respectively the term IH or CH in the variable definition.

Number of rooms	1	<0.0001
Existence of thermostat	1	0.0087
Heating degree hours *	1	<0.0001
Surface heat loss**	1	0.0002
Efficiency of heating system	1	0.0070
Practices variables		
T°C in the main room	1	<0.0001
Global T°C management***	1	0.0001
Length of ventilation per week	1	0.1785
Part of house not heated	1	0.1091
Days spent outside home	1	0.0344
Socio-demographic variables		
Income	1	0.0195
Type of housing +	1	<0.0001
Age of head of household	3	0.1550
Size of family	6	0.0602
Space heating energy price	1	<0.0001

+ : Type of housing is also considered as a socio-demographic variable¹⁸⁵ *: HDH is a calculated variable
 : Surface heat loss is a calculated variable *: Global T°C management is a global mark that reflect the fact that the household is reducing the temperature during nights and vacancies (half-days, week-end and weeks).

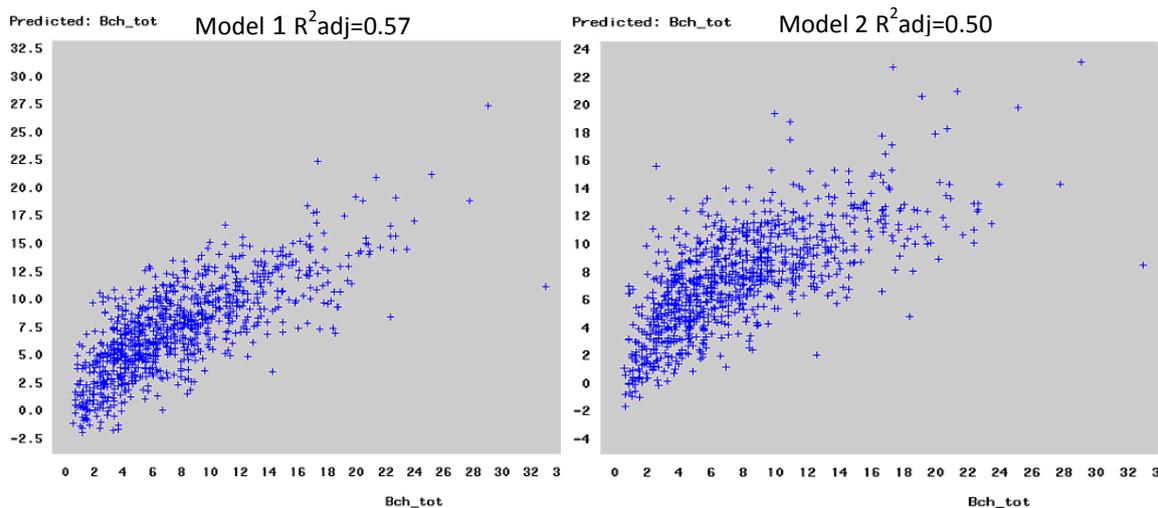
The following table provides details about the size and the sign of the effect the different variables have on space heating useful energy consumption.

Table 4. Effect of the variables in the model 2

Variable definition	Estimate	Pr > t
Intercept	-15.80	<0.0001
Useful living area (m2)	0.048	<0.0001
Construction year < 1914	1.27	<0.0001
Construction year 1915-1948	0.64	0.0673
Construction year 1949-1974	0.83	0.0039
Construction year 1975-1988	-0.33	0.2576
Construction year 1989-2000	-0.71	0.0603
Type of housing - Individual house	0.79	<0.0001
Number of rooms	0.62	<0.0001
Existence of thermostat	-0.34	0.0087
Heating degree hours * (K.h)	0.000061	<0.0001
Surface heat loss** (W/Km2)	1.08	0.0002
Efficiency of heating system	-0.58	0.0070
T°C in the main room (°C)	0.40	<0.0001
Global T°C management***	0.14	0.0001
Length of ventilation per week (min)	0.0028	0.1785
Part of house not heated	-1.39	0.1091
Days spent outside home	-0.19	0.0344
Income (keuros)	0.024	0.0195
Age of head of household - <30 y.o	0.10	0.6967
Age of head of household - 30-45 y.o	-0.34	0.1708
Age of head of household - 46-60 y.o	-0.26	0.2376
Size of family - 1 person	1.95	0.0128
Size of family - 2 persons	1.49	0.0373
Size of family - 3 persons	0.81	0.2706
Size of family - 4 persons	0.89	0.2218
Size of family - 5 persons	0.90	0.3193
Size of family - >5 persons	3.01	0.1061
Space heating energy price (euros/kWh)	0.20	<0.0001

¹⁸⁵ Type of housing implies thermal characteristics but it also implies a certain way of life and it is linked to the type of urban area.

Figure 2. Space heating energy consumption predicted by the two models



We also crossed regressions that include only technical variables or only socio-demographic and practices variables to show the relative relevance of these variables groups in explaining the variance in space heating consumption.

Table 5. Importance of the different types of variables in space heating consumption

Type of variables	R ² adjusted	Part
Total	0.50	100%
Technical + Environment	0.33	66%
Socio-demographic¹⁸⁶ + Practices	0.17	33%
of which socio-demographic	0.13	75%
of which practices	0.04	25%
Technical + Environment + Practices	0.37	74%

We found that technical variables seem to explain 33% of total consumption variance in the second model and 37% in the first one. This is quite in line with what Santin, Itard and Visscher (2009) found¹⁸⁷ in a similar exercise conducted with data on German households. But unlike them we also found that socio-demographic attributes and behavior play a strong role in space heating energy consumption: an additional 17% of the variance is explained (21% in the first model). Afterwards we analyzed separately the role of explicit practices and socio-demographic variables. It may be surprising to note that the role played by explicit energy practices seems quite modest (4% of the total 17%). In fact socio-demographic attributes such as age, income or size of family are relevant variables to draw social classes that are consistent with a certain way of life. These ways of life imply different arbitrations between budget items, different kinds of practices and different levels of intensity in these practices [Bartiaux 2006, Moussaoui 2005]. This demonstrate why these general socio-demographic attributes play such a great role in space heating energy consumption: they are excellent proxy variables for the intensity of space heating practices that are very difficult to capture with a paper survey. Indeed it is difficult to ask households about more than their habits. It would have required us to have them fill in a logbook with such data as how long they reduce temperature, by how much, in which room, and for how many days.

186 Socio-demographic variables also includes economic variables as income and energy price.

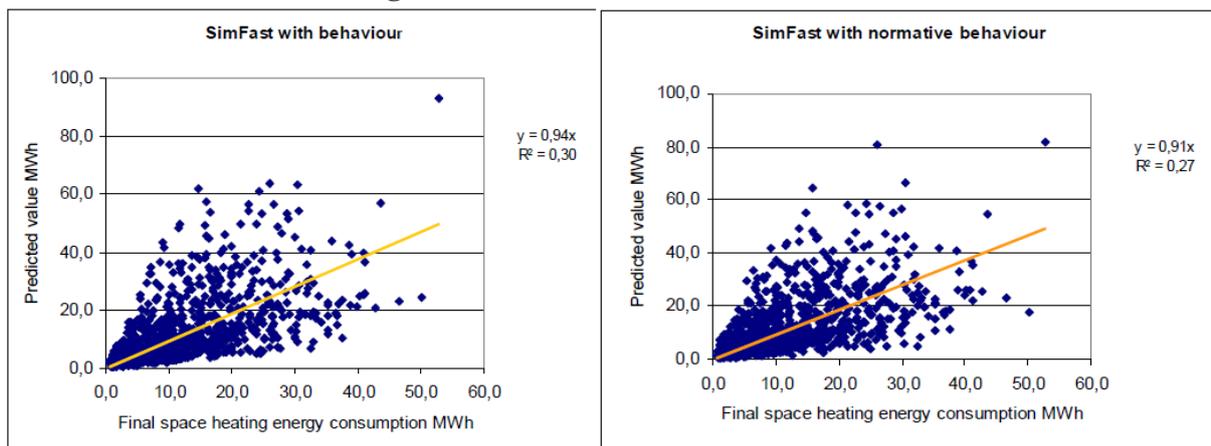
187 In their paper Santin & alii [2009] found R²=0.42 for technical attributes and an additional R²=0.04 for sociodemographic and practices variables.

Thermal simulation engineering model including the behavioral components

As we have previously seen a lot of classical engineering models can be found, but they often predict biased energy consumption, as only a few of them include behavioral components. Moreover with the regressions we have seen that variables such as temperature of the main room, space (between rooms) and time (during vacancies and nights) management of the temperature in the home, or else duration of manual ventilation during the week are far from negligible. But even if such a behavior module were to be designed, modelers would often face a dramatic lack of data to cross building shell characteristics and household practices.

In our study we are able to provide data about main space heating consumption practices and to include them in the SimFast model, a dynamic thermal simulation model developed by EDF R&D [Deque et al., 2000]. We shall present here the results obtained with SimFast, which we will then compare to actual household space heating energy consumption. In order to assess the importance of the behavioral part in one case we ran simulations considering the practices declared by the respondents in the survey, and in the other case we took into account a normative and uniform behavior.

Figure 3. Results with SimFast model



The values predicted by SimFast improve slightly when we include some behavioral components, as the R^2 is better. The technical, meteorological and practices variables together seem to explain 37% (and 42% in the first model) of the variance in space heating consumption according to Table 5. As our model reaches $R^2=0.3$ we consider ourselves to have succeeded in capturing most of the actual weight of these variables in the engineering model. The quality of the thermal model and its behavior module are confirmed by the experimental values. In the context of prospective studies multi-linear regression models would not be very helpful as we do not know how the different coefficients would change over time. In fact these statistical models are generally used to predict energy consumption in the short-term. This is why this engineering model would be very useful in quantifying the impact of different behavior scenarios: with an engineering model we know how consumption would vary with different inputs.

4. Impact of uncertainties on long-term energy consumption forward-looking models focused on behavioral changes

What are the uncertainty sources in our models?

As presented in Section 3 only 57% of space heating energy consumption variance in the sample is explained with the statistical model using all the variables, which is built to fit best with the data. The unexplained variance is due to various sources of uncertainty, including the inputs and the statistical method. Since the data were collected via a self-administrated paper survey we may of course face a declarative bias as people might not have actually acted as they declare and this is especially true of qualitative items and practices. Thus people may not be able to answer particular items; for instance, a respondent may not be able to know the thickness and the type of insulation material of his walls or he may not remember the amount of time and the exact number of rooms that are heated less than the rest of the house during the cold season. Note that it is normal for even a statistical model to not provide a perfect explanation of individual energy consumption. This is due to the human dimension of the observed phenomenon: even if a household is characterized by numerous attributes (income, professional activity, age, etc) its behavior is not totally determined by them. The engineering model fits less with actual space heating energy consumption ($R^2=0.3$), which is due to the same input uncertainties, but also to the physical database quality that is a bias specific to engineering models. In fact, engineering models use physical variables that are not directly mentioned in the questionnaire. The values of these attributes come from the model database that indicates the values corresponding to attributes that can be indicated by households (for example, the shell performance can depend on the localization and the age of a building). Thus, the quality of an engineering model strongly depends on the quality of its database.

We present here four types of uncertainty that affect our statistical and engineering models.

Table 6: Uncertainties and their impact on the models

Type of uncertainty	Statistical model	Engineering model
Questionnaire bias	Declared values can be false or approximate averages (e.g. length and frequency of windows opening, internal temperature). Errors on actual energy consumption affect only the statistical model.	
Database quality	Not concerned (No database is used)	Physical database values based on regulation or expert judgment may be unrealistic (e.g. actual ventilation rates [APUR, 2007])
Heterogeneity of real values for the same answer (intra-segment heterogeneity)	If there is heterogeneity in values for a same attribute or combination of attributes (e.g. for the same dwelling age and region, many different thermal resistances are observed [Cantin et al., 2010]; or for the same income and activity, many different behaviors are observed), then the regression will be mathematically weaker.	
End-use extraction	Heating is one of the many end-uses in a household. Its amount is deduced from the energy bill thanks to an algorithm that induces errors at an individual scale (and then a weaker R^2 than with end-use metering)	Not concerned (end-use “heating” is the direct output of the model)

Impact of behavioral uncertainties on long-term energy forward-looking studies using an engineering model

In a long-term forward-looking study based on an engineering model dedicated to space heating, the parameters presented below are crucial and require an adequate modeling of behaviors.

Maximum and minimum levels of heating intensity: These boundaries are chosen by the modeler and considered as stable in time. The upper value should correspond to the maximum internal temperature without conservation behavior and the lower value should correspond to the lower internal temperature with all conservation behaviors considered in the model. They provide part of the physical realism of the engineering model as they introduce limits of energy consumption results that are due to behavioral considerations. This kind of realism is absent in a linear regression model. For instance, a very strong income growth will lead to very high energy consumption in a linear regression model. When converting this consumption into physical values, it can lead to internal temperatures higher than the maximum temperature observed today in homes where the service level is considered as saturated by the modeler. A realistic choice of extreme levels of heating intensity is then necessary to avoid such incoherent results. Thus, forward-looking results are very sensitive to the modeler's choice of these values, especially in the context of extreme scenario simulations.

Technical infrastructure performance for the reference year: Performance estimates have a direct impact on the technical potential but also on the conservation potential of energy consumption reduction. In fact the impact of a practice can vary greatly depending on the building's technical performance. Moreover, the magnitude of the rebound effect (an increase in service heating intensity after an improvement of building performance) seems to be correlated to initial building performance [Haas et al., 2000]. Thus, a good estimate of the initial dwelling stock technical performance is needed to correctly estimate the impact of behavioral changes. As explained previously, the technical performance of a dwelling is given in the engineering model database that is based on expert judgment, norms or measurements. However, thermal performance of the shell of buildings, and especially for old ones, is very heterogeneous and very few field assessments are available [Cantin et al, 2010]. Thus, an easy way to estimate their performance is to calculate their thermal performance empirically from their heating energy consumption, environment variables and declared behavior if data are available (Schüler, Weber and Fahl (2000) had a similar approach but they did not take comprehensive behaviors into account). If old building performance is estimated in this way, the quality of the estimate depends directly on the quality of the behavioral impact estimate.

Energy efficiency market heterogeneity: The heterogeneity of the heating equipment and shell insulation markets is a fundamental parameter of forward-looking models in the residential sector [Jaccard and Dennis, 2006] because of its crucial influence on the evolution of dwelling stock performance. This heterogeneity is formed by demand and supply heterogeneities. The demand for energy efficient improvements is basically determined by the current dwelling stock performance, space heating intensity and energy price. As heating intensity depends directly on households heating behavior then market heterogeneity depends on a correct estimate of this behavior.

Number and type of behaviors considered: almost every potential study dedicated to behavioral changes considers a different portfolio of conservation behaviors. This choice is not trivial as it reveals the opinion of the modeler on the kind of behavior that can change over time. Note that curtailment behaviors (which substantially reduce energy service, e.g., reducing internal temperature during the occupants' presence) can be voluntarily ignored (e.g., in BC Hydro Conservation Potential Review). As a consequence of the modeler's choice regarding the number and type of behaviors considered in the study, the difference between behaviorally contrasted scenarios in terms of energy consumption can vary greatly. As the impact of these behaviors depends on the building performance, the accuracy of the

calculation is partly determined by the quality of the engineering model database. Moreover, the savings potential of a practice depends on the initial number of household that already do it. A bias in the questionnaire regarding the declaration of a certain practice has a direct impact on the energy saving potential estimate regarding this practice.

Behavior status: Behaviors can be modeled as independent or influenced by other variables. Various significant relationships between certain behaviors and other variables can be found in literature but there is no case where a behavior is fully determined by another variable or a group of variables. Thus, the modeler has to decide what type of status he wants to give to the modeled behavior, based on his understanding of this behavior and the available data. Depending on this status the most appropriate type of forward-looking model will differ. If behaviors are considered as independent of other variables then the forward-looking study can be exploratory (the proportion of households that will adopt a certain behavior and the magnitude of this behavior are left to the modeler's choice). On the contrary, if they are considered as linked to other variables then future behavioral changes can be seen as a result of the other variables' evolution in the forward-looking study. In this case, the range of behavioral changes will be smaller than in an exploratory study.

Conclusion

First we have been able to statistically explain almost 60% of the residential space heating energy consumption, the remaining unexplained consumption may be due to many factors. As the data were collected via a self-administrated paper survey we may of course face a declarative bias as people do not act in reality as they declare, and this is especially true for qualitative items and practices. This has therefore led us to ask rather technically basic and general questions that may encompass only a part of the useful information needed about space heating. This statistical study shows that technical attributes are responsible for almost 2/3 of the explained variance in space heating energy consumption while attributes linked to the household explain the remaining 1/3 of the explained variance.

Furthermore, thanks to our engineering model and its behavior module we have been able to explicitly explain the impact of the technical, weather and practices variables on space heating energy consumption. In other words, we are able to estimate more accurately the energy efficiency potential and to quantify the impact of technical and behavioral scenarios. Both are very useful for prospective studies. But we can see that the explicit energy practices in our survey do very little to explain the observed variance. For instance the impact of socio-demographic attributes is four times higher as shown by Table 4. This means that further work is needed in order to better capture the diversity and complexity of the energy practices in the different household segments and to be able to better link socio-demographic attributes with explicit energy practices. It also means that the behavioral potential of energy consumption reduction in the residential sector could be far greater than that calculated only with explicit practices.

Acknowledgements

Special thanks to J. Gallet for his advices on statistical analysis, and to M-H. Laurent, D. Oso, G. Binet, J-C. Hourcade, D. Marchio and J. Adnot for their insightful comments.

References

- Allibe, B. 2009. "Impact of comfort level on dwelling space heating energy demand: a retrospective and prospective study", Behavior Energy and Climate Change Conference, Washington DC, poster session.
- [APUR] Atelier Parisien d'Urbanisme. 2007. *Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes*.
- Barr, S. , A. Gilg and N. Ford. 2005. "The household energy gap: examining the divide between habitual and purchase-related conservation behaviours" *Energy Policy*, 33, 2005, p. 1425-1444.
- Bartiaux, F., G. Vekemans and K. Gram-Hanssen. 2006. "Sociotechnical factors influencing residential energy consumption", SPSDII, SEREC.
- [BC Hydro] British Columbia Hydro and Power Authority. 2007. *Conservation Potential Review*, by Marbek Resource Consultants Ltd.
- Boonekamp, P. 2007. "Price elasticities, policy measures and actual developments in household energy consumption- A bottom-up analysis for the Netherlands" *Energy Economics*, 29, 2007, p. 133-157
- Cantin, R., J. Burgholzer, G. Guarracino, B. Moujalled, S. Tamelikecht and B.G. Royet. 2010. "Field assessment of thermal behaviour of historical dwellings in France" *Building and Environment*, 45, 2010, p. 473-484.
- [CEREN] Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie. 2007. *Estimation des consommations de gaz à usage eau chaude sanitaire et cuisson*.
- . 2009. *Suivi du parc et des consommations d'énergie*.
- Deque, F., F. Ollivier and A. Poblador. 2000. "Grey boxes used to represent buildings with a minimum number of geometric and thermal parameters" *Energy and Buildings*, 31, issue 1, 2000, p. 29-35.
- [DGEMP] Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières. 2008. *Bilan énergétique de la France pour 2007*.
- [DGUHC] Direction Générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction. 2006. *Décret relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions*. Décret n° 2006-592.
- Dietz, T., G.T. Gardner, J. Gilligan, P.C. Stern and M. P. Vandenberg. 2009. "Household actions can provide a behavioral wedge to rapidly reduce US carbon emissions" *PNAS*, no. 44, vol. 106, November 3, 2009, p. 18452-18456.
- Gardner G.T. and P.C. Stern. 2008. "The short list: The most effective actions U.S. households can take to curb climate change" *Environment*, 50, 2008, p. 12–23.
- Haas, R. and P. Biermayr. 2000. "The rebound effect for space heating. Empirical evidence from Austria" *Energy Policy*, 28, 2000, p. 403-410.

- Haas, R. and L. Schipper. 1998. "Residential energy demand in OECD-countries and the role of irreversible efficiency improvements" *Energy Economics*, 20, 1998, p. 421-442.
- Hourcade, J.-C., M. Jaccard, C. Bataille and F. Gherzi. 2005. "Hybrid modeling : New answers to old challenges, Introduction to the special issue of The Energy Journal", Special Issue "Hybrid modelling of energy-environment policies: reconciling *bottom-up* and *top-down*", International Association for Energy Economics.
- Jaccard, M. and M. Dennis. 2006. "Estimating home energy decision parameters for a hybrid energy-economy policy model", *Environmental Modeling and Assessment*, 11, 2006, p. 91-100.
- Kavgic, M., A. Mavrogianni, D. Mumovic, A. Summerfield, Z. Stevanovic and M. Djurovic-Petrovic. 2010. "A review of *bottom-up* building stock models for energy consumption in the residential sector", *Building and Environment*, 45, 2010, p. 1683-1697.
- Laurent, M.-H., D. Osso and E. Cayre. 2009. "Energy savings and costs of energy efficiency measures: A gap from policy to reality?", ECEEE 2009 summer study, La Colle sur Loup, France, p. 571-582.
- Levine, M., D. Ürge-Vorsatz, K. Blok, L. Geng, D. Harvey, S. Lang, G. Levermore, A. Mongameli Mehlwana, S. Mirasgedis, A. Novikova, J. Rilling and 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.
- Linden, A.-L., A. Carlsson-Kanyama and B. Eriksson. 2006. "Efficient and inefficient aspects of residential energy behaviour: What are the policy instruments for change?" *Energy Policy*, 34, 2006, p. 1918-1927.
- Moezzi, M., M. Iyer, L. Lutzenhiser, and J. Woods. 2009. *Behavioral Assumptions in Energy Efficiency Potential Studies*. Oakland, Calif.: California Institute for Energy and the Environment. 2009.
- Moussaoui, I. 2005. "Maîtriser son confort, rendre confortable sa maîtrise: gestion des flux domestiques, maîtrise de l'énergie et valeurs de modération, chez les familles propriétaires" *EDF R&D*, 2005.
- Santin, O., L. Itard and H. Visscher. 2009. "The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock", *Energy and Buildings*, 41, 2009, p. 1223-1232.
- Schuler, A., C. Weber and U. Fahl. 2000. "Energy consumption for space heating of West-German households: empirical evidence, scenario projections and policy implications" *Energy Policy*, 28, 2000, p. 877-894.
- Schwartz, S. 1992. "Universals in the content and structure of values: theoretical advances and empirical test in 20 countries" *Advances in Experimental Social Psychology*, 10, 1992, p. 221-279.

Swan, L. G. and V. I. Ugursal. 2009. "Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2009, p. 1819-1835.

Modélisation thermique de l'habitat : d'un logement unique à l'ensemble du parc

Benoît Allibe, Dominique Osso, Marie-Hélène Laurent
EDF-R&D, route des Renardières 77818 Moret sur Loing
marie-helene.laurent@edf.fr

RESUME

Les évolutions du contexte énergétique, en particulier pour le secteur des bâtiments, vont nécessiter des études prospective ou de politique énergétique, embarquant des outils capables de simuler finement la thermique d'un bâtiment tout en réalisant une modélisation globale pour un parc donné (quartier, ville, département, région...).

La modélisation thermique d'un logement est aujourd'hui usuelle avec un ensemble d'outils allant du plus détaillé au plus simple. Par contre l'utilisation de ces outils pour simuler les consommations réelles d'un logement particulier et de ses habitants, en dehors d'un calcul normatif, reste difficile.

A l'opposé, même avec des outils très simplifiés, l'estimation des consommations d'un parc de logements (plusieurs millions) est réalisable avec une erreur acceptable (moins 10%). Entre les deux échelles (de 10 à quelques milliers de logements), il est beaucoup plus difficile, d'atteindre un résultat correct en l'absence d'une compensation suffisante des erreurs.

Différents types de simulations simplifiés (modèle thermique, régression multilinéaire) ont été utilisés pour estimer la consommation de chauffage d'un ensemble de logements. Ce travail se base sur des données réelles issues d'enquête auprès des ménages. La simulation est réalisée à partir de données techniques, socio-économiques et comportementales. Les erreurs

issues de la modélisation et leur évolution en fonction du nombre de logements ont été étudiées. Pour estimer ces écarts un tirage aléatoire des différents groupes de logements a été réalisé.

Les résultats montrent que le taux d'erreur diminue rapidement et qu'à partir d'une cinquantaine de logements il est possible d'avoir une modélisation avec un niveau d'erreur acceptable. Par ailleurs, les écarts entre les différentes méthodes testées, même pour un ensemble de logements important (>200) restent stables.

1. INTRODUCTION

L'estimation des consommations d'énergie, à l'échelle d'un parc de logements, peut reposer sur différents types de modèles allant des plus détaillés physiquement (thermiques ou statistiques) aux plus globaux (économétriques). Cependant, les modèles les plus précis ne peuvent être utilisés pour un nombre important de calculs unitaires par manque de données détaillées et une lourdeur de modélisation. A l'opposé les modèles simplifiés [i,ii], utilisables pour un grand nombre de logements ne permettent pas d'estimer les consommations de manière satisfaisante avec un taux d'erreur minimal.

En France, les modèles de parc résidentiel, tels que Enerter [iii], celui de l'ANAH [iv] ou recourant à un calcul thermique utilisent des modèles thermiques simplifiés (généralement basés sur la RT88 [v] ou la méthode 3CL du Diagnostic de Performance Energétique (DPE [i])). D'autres tels que celui du CIRED [vi] reposent sur une modélisation encore plus synthétique.

Ces modèles prennent bien en compte la performance énergétique du bâtiment même si l'évaluation de celle-ci repose souvent sur des hypothèses normatives. Par exemple : le taux de ventilation en fonction du type de menuiserie et du système de ventilation, la performance des parois opaques en fonction de la période de construction et de la zone climatique ; qui sont directement inspirées des réglementations thermiques (en considérant que la RT est scrupuleusement respectée). Le comportement de chauffage des habitants est, la plupart du temps, normatif et déterminé par une température homogène dans le logement, changeant éventuellement au cours de la journée.

Lorsqu'on compare les résultats de ces modèles normatifs aux consommations réelles (observées ou estimées), on note des écarts importants à l'échelle unitaire du logement. Ceci peut être du, en dehors de la méthode de calcul elle-même, à de nombreux facteurs :

- la mauvaise estimation de la performance (rendement des équipements, résistance thermique des parois...),
- l'environnement physique non pris en compte (effets de masque, îlot de chaleur, température extérieure réelle...),
- l'usage du bâtiment non renseigné (hétérogénéité spatio-temporelle de la température intérieure, ouverture des fenêtres...).

Cependant, on observe qu'en augmentant le nombre de logements simulés, les erreurs peuvent se compenser. Nous avons donc étudié dans quelle mesure ces erreurs se compensaient sur un échantillon d'environ 1000 logements ayant fait l'objet d'une enquête préalable. Ces ménages ont fourni des informations concernant diverses caractéristiques techniques de leur logement et de leurs équipements ainsi que leurs pratiques de chauffage au

quotidien et certaines de leurs caractéristiques sociodémographiques (âge, nombre de personnes, revenu...).

Nous avons comparé différents modèles de calcul des consommations de chauffage (modèles thermiques ou statistiques) avec différents modes de calibrations (comportementale, part budgétaire théorique) avec les résultats de l'enquête. Ces différents résultats ont été étudiés avec deux critères :

- L'erreur moyenne par segment de logements. Les politiques énergétiques pouvant être appliquées différemment selon ces segments. Le calcul des gains énergétiques potentiels dépend des modèles et des bases de données utilisés.
- L'écart-type : dans le cadre d'une modélisation *bottom-up* des logements français, il est nécessaire de modéliser un nombre minimum de logements différents pour représenter l'hétérogénéité inter et intra-segments de l'ensemble du parc.

2 Bases de données utilisées

2-1 L'enquête "2000 ménages"

Pour intégrer les aspects comportementaux dans la modélisation des consommations d'énergie, des données sur trois familles de variables (socio-économiques, pratiques quotidiennes et pratiques en matière d'achat) sont nécessaires. Mais les pratiques énergétiques dans le cadre du logement sont quasi-absentes de la statistique publique. Il n'existe pas non plus en France d'enquête ou d'étude récente sur ces sujets. Contrairement à d'autres pays européens [vii], il n'existe pas non plus de recherche publiée récemment sur ces thèmes. Il a donc été nécessaire de réaliser une enquête spécifique auprès de 2012 ménages en juin 2009 [viii]. Les questions portaient sur les pratiques des ménages, mais également sur les caractéristiques techniques de leurs logements.

Tableau 1. Répartition par thèmes des recueillies auprès de 2012 ménages français représentatifs (Juin 2009).

Thème abordé	Caractéristiques du logement	Système de chauffage	Environnement du logement	Données socio-économiques	Pratiques	Consommations d'énergie (factures)
Nombre de questions	39	9	4	16	12	5

2-2 données techniques du DPE

Pour renseigner les modèles thermiques physiques nous avons utilisé la base de données associée à la méthode 3CL du DPE notamment pour les déperditions thermiques de différentes parois et le rendement des systèmes énergétiques de chauffage. On notera que pour les systèmes de chauffage au bois les rendements ont été modifiés à la hausse par rapport à ceux du DPE.

3 Modèles utilisés

3.1 Diagnostic de Performance Energétique

Le DPE reprend pour le calcul des consommations de chauffage l'approche développée pour la RT88 [i]. Même si le DPE est une méthode normative dont les résultats peuvent se trouver éloignés des consommations réelles, ils sont importants car ils servent de référence pour la politique publique en ce qui concerne la rénovation des logements français. Il donne aux

différents acteurs une norme commune basée sur un étiquetage énergétique. Il convient néanmoins de garder à l'esprit que les consommations calculées sont normatives et ne doivent pas être assimilées aux consommations réelles des ménages.

3.1-a Modélisation standard

Pour le DPE dans sa version standard (appelé ici DPET), le comportement n'est directement pas pris en compte mais implicitement décrit sur la base d'un besoin de chaleur (énergie utile) corrélé à des degrés-heures (DH) qui dépendent uniquement de la localisation géographique. Il fait l'hypothèse d'un comportement uniforme et normé pour l'ensemble des ménages. La température de consigne pour le chauffage est alors implicite dans les valeurs des DH.

3.1-b Comportement simplifié déclaré

Dans ce modèle (appelé ici DPET+c), les pratiques déclarées des ménages ont été introduites par la modification de deux variables :

- le nombre de degrés-heures est modifié à partir de la température intérieure déclarée par le ménage, ainsi que de sa gestion (baisse ou coupure du chauffage lors des absences ou pendant la nuit).
- un coefficient a été appliqué à la surface chauffée pour prendre en compte le fait que certains ménages déclarent des pièces moins chauffées. Ce coefficient est issu d'une équation multilinéaire résultante d'un plan d'expérience sur la base de simulations thermiques dynamiques avec le modèle thermique PAPTER permettant une modélisation multizone à la différence de Simfast [ix].

3-1.c Comportement différencié par facteur d'intensité

Les résultats du calcul avec le DPET ont été corrigés d'un facteur d'intensité (I) de l'usage chauffage (appelé ici DPEs). Ce facteur d'intensité représente le ratio entre la consommation réelle et la consommation normative (telle que décrite dans le DPE). Ainsi, en multipliant le résultat du calcul DPET par ce facteur, la consommation finale se rapproche de la consommation réelle. Des travaux précédents [x] ont montré que ce facteur dépendait de la part budgétaire du chauffage si le ménage se chauffait de manière normative. Nous avons choisi de le représenter sous la forme fonctionnelle d'une loi logistique (de forme sigmoïde) comprise entre une intensité minimale (min) et maximale (max) :

$$I = \min + \frac{(\max - \min)}{1 + a \exp(bx + c)}$$

x est la part budgétaire annuelle théorique de chauffage, soit le ratio entre la facture énergétique correspondant à la consommation théorique et le revenu du ménage.

Pour déterminer les paramètres de cet ajustement, la régression logistique a été réalisée sur les consommations des ménages de notre enquête.

3.2 Modélisation thermique dynamique

Le modèle thermique de simulation dynamique des consommations d'énergie, SimFast développé par EDF-R&D, est basé sur une modélisation par boîtes semblables à partir d'une réduction d'un modèle complexe [xi]. Ce logiciel permet avec seulement 20 paramètres (type de logement, pertes thermiques (GV), surface habitable, surface de fenêtre, orientation...) d'évaluer les consommations énergétiques [xii].

3.2-a Comportement par défaut

Le comportement par défaut dans Simfast (SFt) est déterminé à partir de quatre températures de consigne : température de confort de jour (19°C), de réduit de jour (17°C) de réduit de nuit (17°C) et hors-gel (8°C). La période de sommeil est déterminée par défaut de 22h à 7h. La période d'absence de jour est comprise entre 8h00 et 18h00 les jours ouvrés. Les périodes d'absence sont définies sur la base de une semaine en février, une en avril en période de chauffe.

3.2-b Comportement variable

Pour le calcul intégrant le comportement (SFt+c), la température intérieure déclarée par les ménages ainsi que leur gestion de la température pendant la nuit et les absences (journée, week-end) ont été renseignées dans le modèle SimFast.

3.3 Régression multilinéaire

La taille de l'échantillon enquêté a d'abord été réduite à 923 logements par élimination des ménages n'ayant pas renseigné (ou estimé pour le bois) la totalité de leurs factures énergétiques liées au logement ou les valeurs aberrantes.

Un modèle basé sur une régression multi-linéaire (RML) simple a été construit à partir des données de l'enquête et de données publiques avec le logiciel SAS [xiii]. Il comporte 17 variables jugées les plus significatives ((Pr>F)< 0,2) Ce modèle permet d'expliquer 50% de la variance totale pour la consommation de chauffage des ménages français. Avec un rapport (Pr>F) inférieur à 10⁻⁴, il se révèle fiable (**Tableau 24**).

Tableau 24 : Définition des variables utilisées dans la régression RML [viii]

Définition	Degrés de liberté	Pr > F
Données techniques et météo		
Surface habitable	1	<0.0001
Année de construction	5	<0.0001
Type de logement (MI/LC) ⁽¹⁾	1	<0.0001
Nombre de pièces	1	<0.0001
Présence d'un thermostat d'ambiance	1	0.0087
Degrès-jours de chauffage ⁽²⁾	1	<0.0001
Surface déperditives (murs, planchers, plafonds, ouvrants) ⁽⁴⁾	1	0.0002
Rendement du système de chauffage ⁽⁵⁾	1	0.0070
Pratiques déclarées		
Température de la pièce principale	1	<0.0001
Température de consigne générale ⁽³⁾	1	0.0001
Durée d'aération manuelle hebdomadaire	1	0.1785
Proportion non chauffée du logement	1	0.1091
Jours d'absence du domicile ⁽⁶⁾	1	0.0344
Variables socio-démographiques		
Revenu direct du ménage	1	0.0195
Type de logement (MI/LC)	1	<0.0001
Age du chef de famille	3	0.1550
Taille du ménage	6	0.0602
Prix de l'énergie de chauffage (€TTC/kWh) ⁽⁷⁾	1	<0.0001

(1) Le type de logement est une variable technique et socio-économique qui apparaît donc deux fois.

(2) Variable calculée à partir de la zone climatique et de la température déclarée par les ménages.

- (3) Variable calculée à partir du type de logement.
- (4) La température de consigne générale rend compte des réduits de confort programmés par les ménages pendant la nuit et leurs absences (demi-journées, fins de semaine et semaines).
- (5) Variable calculée à partir des données DPE.
- (6) Variable calculée à partir de l'Enquête de veille sanitaire (INSEE).
- (7) Variable calculée à partir des prix de la base PEGASE (SOeS).

4. Résultats et discussion

Les résultats des différents modèles utilisés (**Tableau 25**) montrent globalement que seuls les modèles DPEt et DPEt+c ne permettent pas une estimation correcte pour un parc de logements (**Figure 98**). Même si les autres modèles présentent de fortes erreurs à l'échelle d'un logement, ils permettent néanmoins d'estimer très correctement (erreur < 10%) la consommation de chauffage du parc (si supérieur à quelques centaines).

Tableau 25 : description des différents modèles et modes de calculs étudiés.

Code du calcul	Description de la modélisation
SFt	Simfast avec comportement par défaut
SFt+c	Simfast avec comportement renseigné par données de l'enquête
DPEt	DPE avec comportement par défaut
DPEt+c	DPE avec comportement renseigné par données de l'enquête
DPEs	DPE corrigé par un facteur d'intensité
RML	Régression multilinéaire estimée sur les données de l'enquête

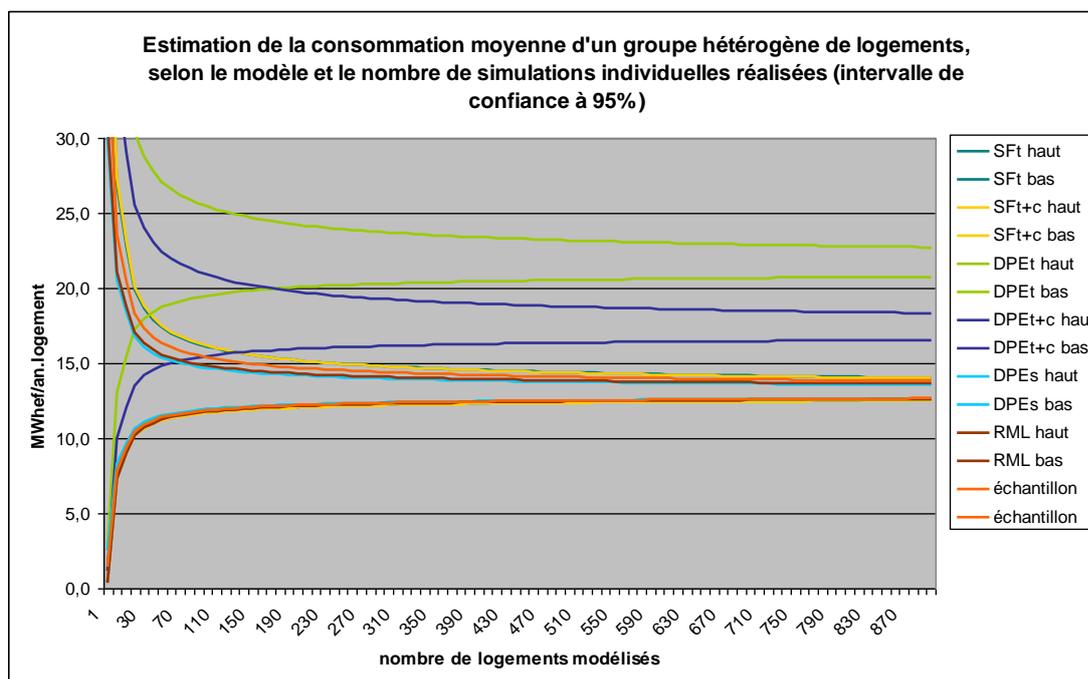


Figure 98 : consommation moyenne par logement calculés pour différents modèles et modes de calculs en fonction du nombre de logements simulés.

4.1. Erreur moyenne

Estimation globale de l'échantillon

Pour l'ensemble des logements enquêtés, les simulations de la consommation moyenne de chauffage montrent que les modèles RML et DPEs, donnent comme attendu les meilleurs

résultats car construit à partir de l'échantillon. Pour les modèles physiques, par nature non calibrés sur l'échantillon, nous observons de forts écarts entre Simfast (erreur <3%) et le DPE (erreur de 65%) malgré le fait qu'ils utilisent la même base de données de performances techniques. Avec la prise en compte des comportements déclarés des ménages, le DPE est sensiblement amélioré mais présente toujours une erreur significative (30%).

Tableau 26 : consommation moyenne (μ) modélisée et écart-type (σ)(en MWh/an.logement)

Modèle	SFt	SFt+c	DPEt	DPEt+c	DPEs	RML	échantillon
μ	13,5	13,3	21,6	17,0	13,4	13,1	13,1
σ	10,9	11,2	14,8	13,4	6,9	7,7	8,8

Estimation à partir d'une segmentation de l'échantillon

Même si certains modèles déterminent correctement les consommations de chauffage à l'échelle globale, cela n'implique pas qu'ils soient performants à l'échelle d'un segment car les erreurs peuvent se compenser. Nous avons alors modélisé les consommations de chauffage pour différents segments de l'échantillon : par énergie (5 énergies), par type de logement (maison, appartement), par âge du bâti (6 catégories).

Pour classer les résultats des 6 modèles pour les 13 segments, nous les avons classés (du 1^{er} au 6^{ème}) par segment et avons calculé un rang global en pondérant les classements obtenus dans un segment par le poids en effectifs du segment. La comparaison s'effectue sur la consommation moyenne calculée de chaque segment avec la consommation réelle de l'échantillon.

Les résultats montrent que, tout comme à l'échelle globale, les modèles calibrés sur l'échantillon sont les plus performants, suivis de SimFast. Pour le DPE, il apparaît que l'erreur à l'échelle globale se retrouve également au niveau désagrégé, sauf pour le segment particulier des logements construits entre 1982 et 1989. Cela pourrait s'expliquer par le fait que son cœur de calcul est similaire à celui de la réglementation thermique de 1988 [i].

Tableau 27 : classement des modèles selon l'erreur commise sur l'estimation de la consommation moyenne des 13 segments. (la note 1 correspond au meilleur modèle)

		SFt	SFt+c	DPEt	DPEt+c	DPEs	RML
modèles non calibrés	classement sur l'estimation de la consommation unitaire des différents segments	3,6	3,2	5,9	4,6	2,8	1,0
modèles calibrés sur consommation totale de l'échantillon	classement sur l'estimation de la consommation unitaire des différents segments	5,2	4,8	3,2	3,0	3,6	1,2

Calibration des modèles

Pour améliorer l'estimation de la consommation moyenne, nous avons calibré les modèles physiques (DPE et Simfast) grâce à un coefficient multiplicatif spécifique. Ce coefficient est calculé comme le ratio entre la consommation observée de l'échantillon et la consommation modélisée. Cette calibration affecte particulièrement les résultats des modèles DPEt et DPEt+c qui présentaient les plus grands écarts à la consommation observée.

On observe que la calibration à l'échelle de l'échantillon global ne garantit pas forcément une meilleure pertinence à l'échelle des segments. En effet, les écarts peuvent encore aller jusqu'à

plus de 40% après cette calibration (en particulier les modèles physiques utilisés, même calibrés, ne sont pas suffisamment précis pour la modélisation des logements collectifs et des logements les plus récents). A l’opposé, on observe que la modélisation des consommations segmenté par énergie est relativement proche des observations, à l’exception des consommations de bois.

Tableau 28 : Consommation unitaire moyenne des différents segments de logements calculées à partir des modèles calibrés.

Consommation unitaire moyenne calculée par les modèles calibrés sur l'échantillon (en MWhef/an.logement)	segment	SFt	SFt+c	DPEt	DPEt+c	DPEs	RML	échantillon
énergies	gaz	15,3	15,2	13,7	13,3	14,9	13,6	13,7
	fioul	19,1	19,3	18,3	20,3	16,5	19,8	19,8
	GPL	15,5	14,9	15,3	14,6	14,4	16,4	16,7
	bois	14,5	14,9	24,4	24,1	17,6	20,0	20,4
	élec	14,0	14,1	14,6	15,0	13,8	15,1	15,1
type logement	MI	6,3	6,3	6,8	7,1	7,4	7,4	7,3
	LC	8,2	7,8	7,5	6,9	8,8	6,1	6,1
année de construction	<1918	19,1	19,0	19,0	19,7	16,4	18,4	18,4
	1919-1948	16,0	16,4	14,2	14,6	13,9	13,0	13,5
	1949-1974	18,1	17,8	16,6	16,3	15,3	14,4	14,5
	1975-1982	8,5	8,6	10,4	10,7	11,1	11,5	11,6
	1983-1989	5,6	5,8	7,5	7,4	9,3	10,0	9,9
	1990 et +	3,6	4,0	4,4	4,9	6,6	6,9	6,8

4.2. Analyse de l'écart-type

Dans le cadre d'une modélisation d'un parc de logements exhaustif (où chaque logement est décrit unitairement, comme par exemple dans le recensement général de la population ou l'enquête logement de l'INSEE [xiv]), la consommation d'un segment quelconque est calculée par la somme des consommations unitaires des logements du segment. Or, si le nombre de logements représentés s'avère trop faible pour un segment particulier, l'estimation de la consommation sera obtenue avec une forte incertitude. Il est donc nécessaire de déterminer le nombre minimum de logements à représenter pour un segment quelconque et un modèle particulier. Cette erreur est déterminée par l'écart-type obtenu sur un ensemble de calculs unitaires. En effet, l'intervalle de confiance à 95% de la consommation moyenne estimée à partir de n calculs unitaires, suit une décroissance dont la vitesse dépend de l'écart-type initial (Figure 2).

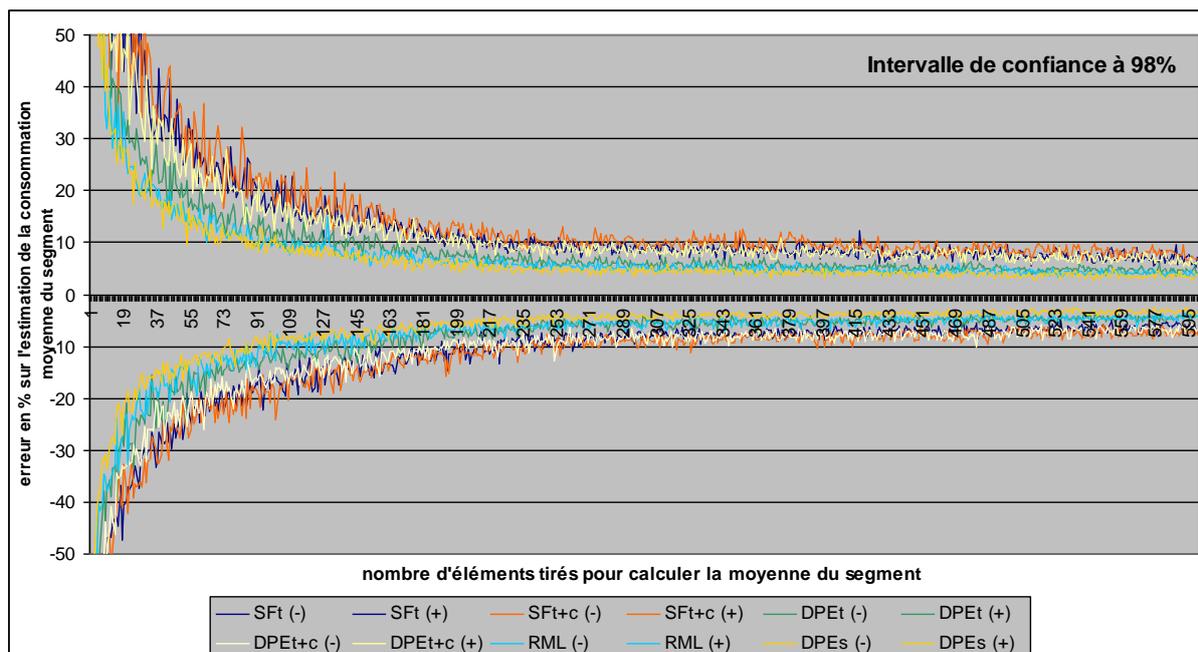


Figure 99 : intervalle de confiance à 98% de l'estimation de la consommation moyenne d'un segment en fonction du nombre de simulations unitaires réalisées et du modèle calibré utilisé.

On observe que les modèles RML et DPEs permettent d'estimer correctement (erreur <10%) la consommation moyenne d'un segment avec un nombre de simulations de l'ordre d'une centaine de logements tandis que les modèles physiques calibrés nécessitent a minima la simulation de 200 logements. Il est intéressant de noter que les deux « meilleurs » modèles prennent en compte des informations sociodémographiques comme le revenu des ménages.

D'autre part, on observe qu'après calibration, le DPE standard (DPEt) présente un écart-type inférieur à celui du DPE intégrant le comportement qui introduit une variation supplémentaire. De plus, le DPE calibré, dans ses deux versions, présente un écart-type inférieur à celui de Simfast calibré. Cela ouvre la possibilité d'une simulation simplifiée avec un nombre de logements réduits. De plus, le temps de calcul unitaire du DPE (modèle linéaire) est très inférieur à celui de Simfast (modèle dynamique).

5. Conclusion / Perspectives

L'analyse des résultats montre que l'ensemble des modèles est capable d'estimer la consommation d'un grand nombre de logements avec une erreur limitée, mais à condition d'un calibrage (sur données réelles) pour le cas particulier du DPE. De plus, pour chaque modèle, nous observons bien que l'erreur moyenne diminue quand la taille du groupe de logements simulés augmente, mais que cette diminution n'est pas la même selon les modèles. On soulignera que les modèles purement physiques nécessitent une information fine à la fois sur la performance technique (bâti, systèmes, climat) et l'usage (gestion spatio-temporelle de la température et de du renouvellement d'air). Or il est souvent difficile d'accéder à ces informations de manière précise. Dans ce cas, il apparaît que certaines variables sociodémographiques telles que le revenu ou le type de ménage (célibataire, présence d'enfants, âge...) sont plus facilement accessibles et sont corrélées aux variables physiques recherchées. Cela explique qu'un modèle linéaire tel que la RML permette d'estimer plus précisément les consommations qu'un modèle physique (linéaire ou dynamique).

Le DPE, qui est la référence pour évaluer la performance énergétique des logements sous la forme d'une double étiquette (énergie primaire et CO₂), ne doit donc pas être utilisé dans sa version non calibrée pour estimer les évolutions potentielles de consommations de chauffage résultantes d'une politique énergétique de rénovation du parc résidentiel. En effet, la surestimation très importante des consommations de chauffage mène de facto à une surestimation des économies d'énergie potentielles et de la rentabilité économique des travaux de rénovation énergétique.

Dans le cas où le DPE serait utilisé dans sa version calibrée (à l'échelle nationale ou celle d'un segment particulier ciblé par une politique) il serait nécessaire de vérifier que les coefficients de calibration sont constants dans le temps. En effet, les évolutions du parc de logements résidentiels sont particulièrement lentes ce qui nécessite des études à long terme pour simuler l'impact de ces politiques, d'où l'importance de vérifier la validité des calibrations dans le temps. Dans le cas où une calibration n'est pas possible ou pas désirée alors le modèle Simfast semble être le plus pertinent car il permet une estimation des consommations correcte sans nécessiter de recalage. D'autre part, ce modèle modélise également la courbe de charge correspondant au logement modélisé (sans toutefois intégrer le foisonnement à grande échelle).

Il faut noter que le modèle RML construit à partir des informations de l'enquête, même s'il propose une très bonne estimation des consommations et un écart-type très faible, ne permet pas de simuler finement des politiques énergétiques de nature technologiques. En effet, ce type de modèle nécessite une information observable et accessible pour en estimer l'effet, ce qui n'intègre pas par exemple la performance des parois opaques ou celles de systèmes énergétiques futurs. A l'opposé, ce type de modèle permet de prendre en compte aisément l'impact de variables sociodémographiques prépondérantes comme le revenu ou le type de ménage.

Il nous semblerait donc intéressant de développer un modèle hybride où un modèle thermique serait utilisé pour le calcul de la performance énergétique et un modèle statistique pour le calcul l'*intensité d'utilisation* de l'infrastructure technique (bâti et systèmes) permettant de prendre aussi en compte des variables sociodémographiques.

Bibliographie

ⁱ Ministère de l'Emploi, de la Cohésion Sociale et du Logement (2008), Arrêté du 6 mai 2008 portant confirmation de l'approbation de diverses méthodes de calcul pour le diagnostic de performance énergétique en France métropolitaine, NOR DEVU0810970A, JORF n°0114 du 17 mai 2008 page 8063, 96p

ⁱⁱ D.Bonneau, F-X.Rongère, D.Covalet, GB.Gautier, CLIM 2000, Modular software for energy simulation in buildings, IBPSA 3rd International Conference on Building Simulation, University of Adelaide Australia, Août 1993, 85-91

ⁱⁱⁱ Energie demain,

^{iv} J.Marchal, Modélisation des performances énergétique du parc existant, ANAH, (2008) <http://www.anah.fr/nos-publications/etudes/pdf/rapport_performances_energetiques.pdf>

^v Promotelec (1995), Residential buildings, thermal study and insulation [*Locaux d'habitation, étude thermique et isolation*], 4th edition (1995) 144p

^{vi} Louis-Gaëtan Giraudet , Céline Guivarch, Philippe Quirion, A model of the french residential demand for heating energy to evaluate the prospective impact of policy instruments,

^{vii} Schuler, Energy consumption for space heating of West german households empirical evidence, scenario projections and policy implications, Energy Policy (2000)

- ^{viii} J-M.Cayla B.Allibe M-H.Laurent From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption, ACEEE 2010
- ^{ix} Estève, 2009, modelisation xxxx
- ^x B.Allibe, *Impact of comfort level on dwelling space heating energy demand: a retrospective and prospective study* (2009) Behavior Energy and Climate Change Conference - BECC 2009 – Washington DC, November 2009
- ^{xi} F. Deque, F. Ollivier, A. Poblador, Grey boxes used to represent buildings with a minimum number of geometric and thermal parameters, *Energy and Buildings* 31 (2000) 29–35
- ^{xii} F.Déqué, L.Catusse, S.Castanet, Residential SIM-FAST : software for rapid technicals appraisals, IBPSA 6th International Conference on Building Simulation, Kyoto, Japan September 13-15, 1999
- ^{xiii} <http://www.sas.com/offices/europe/france/software/technologies/statistics.html>
- ^{xiv} INSEE, Détail...Logements – France métropolitaine, (2001) CD-ROM

Paper 1 – 234 - ALLIBE

Bound the rebound! How the combination of progressive energy tariffs and adapted soft loans can curb rebound effect and promote energy sufficiency

Benoit Allibe^{a,b}, Marie-Hélène Laurent^a, Dominique Osso^a

^a : EDF R&D - ENERBAT Dpt
Site des Renardières – Avenue des Renardières
Ecuelles
77818 Moret-sur-Loing cedex
FRANCE
Telephone: (+33) 1 60 73 73 02
Fax: (+33) 160 73 73 15
E-mail: benoit.allibe@edf.fr

^b : CIRED
Campus du Jardin Tropical
45 bis, avenue de la Belle Gabrielle

ABSTRACT

For decades, energy policies in the residential sector have been dedicated to energy efficiency. However, these policies have not been sufficient to reduce overall energy consumption enough to meet European targets. Therefore, new types of energy policies, more oriented to sufficiency, have to be designed and implemented.

We have developed an innovative model of residential space heating demand based on an engineering approach coupled with the modelling of household behaviour. The household's daily use of space heating has been modelled as depending on the perceived cost of the space heating service. Using this model, we have evaluated the theoretical impact of two measures that aim to limit the rebound effect for residential space heating.

Firstly, we tested a well-known policy: a progressive energy tariff that makes energy price increase with the amount of energy consumed, introducing a "double-reward" for sufficiency. Secondly, we tested a utility's incentive adapted to this tariff structure: when a refurbishment occurs, a soft loan can be offered by the utility if the household agrees to keep the energy tariff at the pre-refurbishment level until the tariff difference (with the virtual post-refurbishment tariff) fully repays the loan.

Our results show that these mechanisms are able to significantly decrease energy consumption and carbon emissions. Moreover, this approach reflects a different way of thinking regarding energy consumption that promotes lower-consumption ways of life for all, and not just for people that are already interested in reducing their environmental impact. In this way, these mechanisms could play a major role in the evolution of social norms regarding energy consumption.

Introduction

Energy consumption is still increasing in Europe, despite numerous energy policies dedicated to efficiency. In fact, most of these policies targeted efficiency successfully but associated potential energy savings have been partly offset by increases in the number and the size of equipments or by an increase of the intensity of energy services (in the case of space heating, this could be illustrated by an increase in average dwellings size or an increase in internal temperature) as well as the emergence of new end-uses [Calwell, 2010]. Thus, new policy tools have to be developed to complement efficiency based policies with elements of sufficiency. In this paper, the concept of sufficiency is derived from the definition of environmental impact developed by Calwell (IPALUCEMD formula [Calwell, 2010]). Then, sufficiency is defined here by two distinct components referring to two kind of households choices that impact energy consumption and carbon emissions: one is about technological choices and the other one is about how households use these technologies. Regarding technologies, sufficiency is here understood as the limitation of the number of equipments per person ("acquisitiveness" factor in Calwell definition) and the size of equipments ("luxury" factor in the Calwell definition). Regarding usage, sufficiency refers to the limitation concerning the use of available technologies by the households ("use" factor in the Calwell definition). Indeed, energy consumption can differ by a factor two or more for the same equipment depending only on how households use it (e.g. [Hackett and Lutzenhiser, 1991], [Socolow, 1978]). Moreover, a proper management of energy consumption when an energy service is not needed (e.g. reduced space heating during night or when nobody is at home) can lead simultaneously to low energy consumption levels and satisfying level of energy service [Allibe, 2009]. As this paper tackles the rebound effect it is mainly focused on sufficiency of use.

There are many difficulties in modelling sufficiency using classical technical or economic models of energy consumption. On the one hand, classical micro-economic models of energy demand are based on the assumption that the utility obtained from a service increases with the quantity that is consumed and that this quantity increases when the cost of this service decreases (negative energy service price elasticity of energy demand). In the case of space heating, the energy service is the internal temperature that is provided by space heating equipments. Consequently, a high service intensity refers to a high internal temperature. It should be noted that elasticities are almost always considered constant because of the kind of energy demand functional form (double log) of classical micro-economic models [Sorrell, 2009]. This means that even though a high level of comfort is already achieved by a household (e.g. a satisfying internal temperature), its intensity of service will still increase if the service price decreases. Consequently, such models of energy service intensity structurally exclude the modelling of a maximum level of service intensity and even more the modelling of sufficiency. On the other hand, classical engineering models of energy consumption are frequently based on a conventional

consumption behaviour (reflecting a certain view of “standard” comfort) that rarely depends on external factors such as energy prices, household income, family type/size or energy performance. Such a standardised view of energy consumption behaviour may lead to inaccurate estimates of energy consumption as well as potential energy savings resulting from energy efficiency measures. A major and well studied bias of classical technical models is the rebound effect [Haas and Biermayr, 2000]. This effect consists in an increase in the intensity of use of an energy service following an energy efficiency improvement. It can also be more broadly considered as the increase of service use following a decrease of service price [Sorrell, 2008], a definition that meets the classical micro-economic approach. Consequently, the modelling of sufficiency forces us to alter both classical engineering and economic models. An attempt at such modelling in the context of residential space heating is proposed in section II of this paper.

Based on a model of French residential space heating energy consumption, simulations of two policies targeting sufficiency and the limitation of rebound effect have been carried out and their results are presented in this paper. The first policy tool is progressive energy tariffs, consisting in a marginal price of energy that increases with the quantity consumed. This structure provides households with a “double-reward” for sufficiency: when lowering the quantity of energy consumed, households benefit from a bill reduction not only due to a lower quantity of kWh consumed but also from a lower price per kWh. Furthermore, such a tariff structure has also demonstrated effects on sufficiency regarding technological choices (as defined before): in the late 1980’s, these tariffs affected sales of electric appliances in Japan [Wilhite, 2003]. Such a tariff structure has been implemented in some countries (Japan, California). Using our model, we tested the impact on space-heating energy consumption of such a tariff structure applied to electricity, gas and fuel oil.

The second policy tool is a utility soft loan based on tariff structure. When a refurbishment occurs, a soft loan is offered by the utility if the household agrees to pay a part of its energy consumption (including its potential rebound effect) at the highest pre-refurbishment block price until the tariff difference from the normal structure fully repays the loan. If energy savings resulting from energy efficiency improvements are actually made, then the household will both save money (energy savings offset average energy price increase) and reimburse the loan to the utility (with a higher average energy price). However, if the potential energy gain is compensated by a strong rebound effect that offsets energy gains, then the household will continue to reimburse the loan and can have a total energy bill (consumed energy and loan reimbursement) higher than the pre-improvement level, which provides an incentive to curb rebound effect. To our knowledge, this kind of loan does not exist today.

The model that is used to simulate policy impacts is presented in section II. The two policies and their impacts on space-heating energy consumption are presented in detail in section III and IV. Finally, a discussion of the results and their implications is offered in section V with underlying energy saving potentials as well as practical obstacles to the implementation of such policies.

Methodology

Residential space-heating model

Building stock representation

The residential space heating (SH) energy consumption model that is used in this paper was developed recently by EDF R&D [Allibe, 2009; Allibe, 2010; Cayre et al., 2011; Laurent et al., 2011]. It consists in a representation of housing stock (6 construction periods, 2 dwelling types, 4 main heating energy sources) coupled with a description of households (12 income categories) and their environment (city-scale outside temperatures). Description data are based on a self-reported questionnaire of a survey made by EDF R&D in 2009 of more than 2000 French households [Cayla et al., 2010]. The model consists of 923 households and their dwellings that were selected from the 2000 on the criterion of full and plausible answers to the questionnaire. For the sake of simplicity, the households modelled use only one space heating energy source (corresponding to the “main space heating energy source” declared in the survey).

Space heating energy consumption estimation

The calculation of SH energy consumption requires an engineering database (building envelope and systems performance are attributed to dwellings depending on certain attributes such as age, location or type) and an energy requirements calculation method (using performance and volume units to estimate SH energy consumption). Both can be sources of inaccurate SH energy consumption estimates. In order to produce repeatable results based on public values and methods, the engineering database and theoretical energy

consumption calculation method are those of French Energy Performance Certificate [MOE, 2006]. A more comprehensive description of our building stock model can be found in [Cayre et al., 2011].

As said before, a major drawback of classical engineering calculations is their standardised representation of human behaviour. Regarding residential space heating, the two main daily behaviours are internal temperature management and ventilation rate management. In a real dwelling, if these two behaviours had standardised values (e.g. 19°C constantly in the whole house and a ventilation rate of one volume per hour) then real SH energy consumption should be not far from engineering method estimates. However, comparing these estimates against real consumptions revealed significant differences [Allibe, 2010], which were too high to be explained by database errors or engineering calculation methods [Cayre et al., 2011]. It therefore seems that only significant differences between standardised and “real” household behaviours could explain the gap between engineering estimates and real consumption data.

Consequently an indicator of households heating intensity has been developed, using the concept of “intensity factor” ([Haas, 2000], [Schuler, 2000]). This intensity is the ratio between observed energy consumption and engineering theoretical energy consumption.

$$(1) \quad I_{\text{obs}} = \frac{C_{\text{obs}}}{C_{\text{eng}}}$$

with I_{obs} the observed intensity factor, C_{obs} the effective SH energy consumption and C_{eng} the theoretical SH energy consumption based on conventional engineering calculations

A first objective of modelling was to endogenise the intensity factor in order to model a more realistic energy consumption estimation as compared with purely engineering calculations. The endogenisation led to the calculation of a theoretical intensity (I_{th}) factor for each household of our model:

$$(1') \quad C_{\text{mod}} = C_{\text{eng}} \cdot I_{\text{th}}$$

with C_{mod} the modelled energy consumption

Based on panel and cross-sectional data, a correlation has been found between intensity of space heating use and the theoretical budget share dedicated to space heating (TBS, see equation 2), the household budget share dedicated to space heating if the dwelling had been heated following the standardised definition of heating behaviour (specific to engineering methods). This correlation can be regressed using various functional forms that reflect different understandings of consumption behaviour. The most common one, especially in econometrics (e.g. [Haas,2000]), is the power function (see equation 3) but sufficiency cannot be modelled with this form, as the intensity factor value increases sharply for small values of TBS (for instance, following highly efficient refurbishments). Thus, this functional form does not appear to model sufficiency correctly. Another type of functional form is the logistic function (see equation 4 and Figure 1). This form allows the representation of maximal and minimal intensity, which can represent limits of physiological comfort (such as those presented by [Peeters, 2008]). This functional form provides a fairly simple framework for modelling daily use sufficiency as it simply consists in reducing the maximum service intensity that is reached when the energy service becomes inexpensive (using parameter b of equation 4).

$$(2) \quad \text{TBS} = C_{\text{eng}} \cdot P_{\epsilon} \cdot Y^{-1}$$

with P_{ϵ} the energy price and Y the household income

$$(3) \quad I_{\text{th}} = K \cdot \text{TBS}^{-\beta}$$

with K a constant, TBS the theoretical budget share and β the elasticity parameter.

$$(4) \quad I_{\text{th}} = a + \frac{b}{1 + c \cdot e^{(\text{TBS} - d)}}$$

with a , b , c and d the parameters of a logistic function

The modelling of the intensity factor plays a major role in representing rebound effect. As rebound effect is an increase in comfort (or intensity of use) after an improvement in equipment or shell performance. It can thus be depicted as show in Figure 1. In this framework, rebound effect (RE) can be expressed as follows:

$$(5) \quad RE = \frac{C_{th \text{ post-refurbishment}} \cdot (I_{final} - I_{init})}{C_{th \text{ pre-refurbishment}} \cdot I_{init}}$$

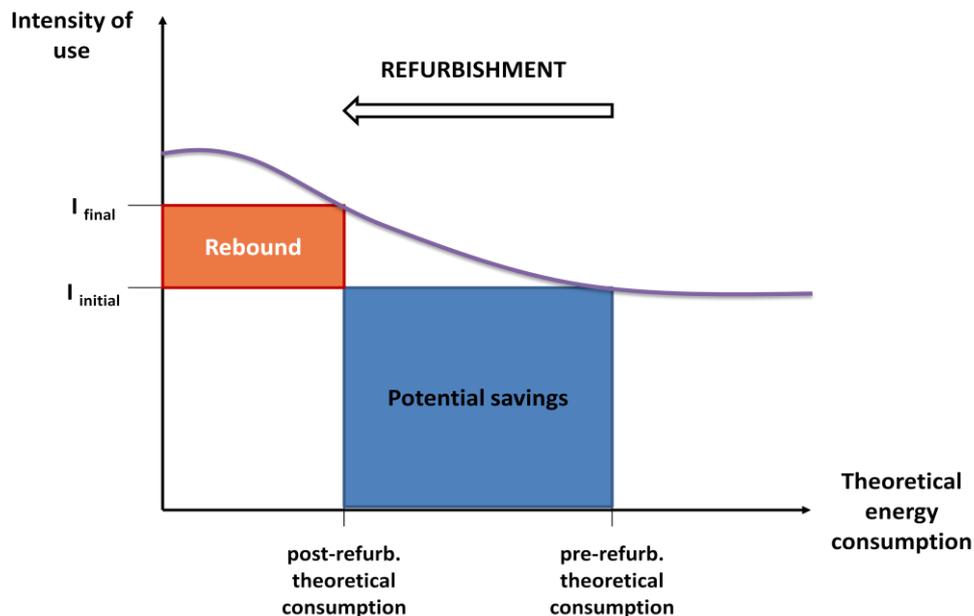


Figure 1: Rebound effect modelling using logistic functional forms for intensity factor.

Model dynamic

The rationale of energy efficiency investment is another modelling topic where classical engineering and economic approaches are noticeably different. According to the former, refurbishment occurs at the end of the technical lifetime whereas, in the latter approach, an investment is made when it leads to a financial benefit. Our modelling takes a middle position; in place of technical lifetime, we use averaged observed lifetimes of each part of the dwelling that could be refurbished (external and internal walls, windows, roof and heating system).

Refurbishments are opportunities to implement energy efficiency but households face a refurbishment market where various performances and prices (including poorly efficient options) are on offer. In the model, 3 options are proposed for each type of refurbishment: reference, medium and optimum level of energy efficiency. Options prices are adapted from the OPEN survey [ADEME, 2008; Laurent et al., 2011]. The household's choice of refurbishment performance is made by comparing the net present values (NPV) of these options. Using NPV permits the representation of household preferences at present or in the future (using a discount rate) as well as the anticipation of future movements in energy prices and energy consumption. In the model, the discount rate has been set at 11 %, within the range of literature dedicated to behaviourally realistic technical choices (e.g. [Sadler, 2003]). With this model, a household's technological choices among various energy performance options can be simulated, as can their impact on national SH energy consumption.

Sufficiency-oriented policies

Progressive energy tariff (PT)

Progressive energy tariffs (PT) allocate an increasing price to successive blocks of energy consumed. The initial units are inexpensive but, when the consumption exceeds the block limit, the subsequent units are charged at a higher price. It worth noting that the indicator used to define the limits between blocks will change the distributional effect of PT. In this paper we choose the total space heating final energy consumption of the

household but it could also be defined per person instead of for the whole household. Thus, our modeling choice has to be seen as one among other possibilities.

This tariff structure provides consequently a “double reward” for sufficiency (not only less kWh paid for but also a lower price per kWh). Tariff block width and block price are the main parameters of a PT structure, and they vary between countries that currently use PT structures (mainly Japan and California). In order to model a simple representation of this policy tool, we designed a progressive tariff with blocks are representative of a sixth of the current space heating energy consumption of French households. Thus, block width is not a parameter of our model. The only parameter of our progressive tariff representation is the ratio α between consecutive block prices (Figure 2).

$$(6) \quad \alpha = \frac{\text{tariff (block } n+1)}{\text{tariff (block } n)}$$

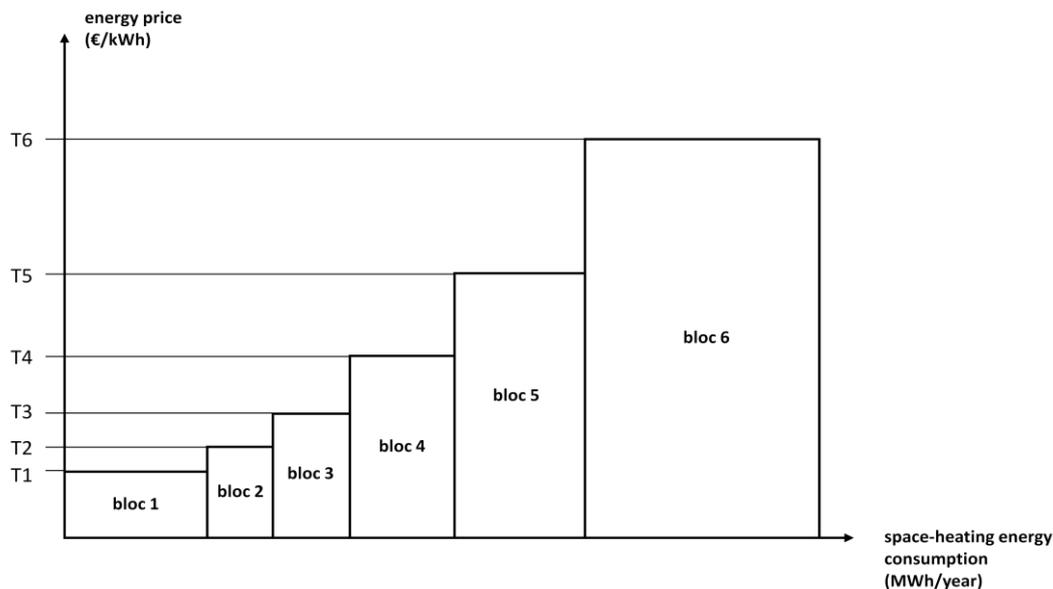


Figure 2: Progressive tariff price structure.

The impact of a PT structure on national SH energy consumption has been tested using the two forms of intensity factor and various levels of tariff progressivity (α). Moreover, the impact of PT has been tested with two *views* of progressive tariffs. Firstly, we tested a structural deformation (through variation of the ratio α) that does not affect the median price. In this version, the second block (of six) is set at the current average energy price. In this way, as the ratio between block tariffs is constant, a household with median consumption will experience the same average energy price as before the introduction of the PT structure. This price structure deformation can be seen as an “*equilibrated bonus-malus*” (*EBM*). Secondly, we tested a price structure that penalizes households whose consumption is above a given level (lower than current median consumption). In our numerical example, we tested a level that is at the boundary between the second and third blocks. Such a structural deformation increases the average price of energy if energy consumptions do not change. It is then called “*non-equilibrated bonus-malus*” (*NEBM*). However, such a PT structure is intended to make consumption change and this change could partly compensate average energy price difference. Moreover, NEBM provides a reference point that could become a visible target for households.

Soft loan mechanism adapted to progressive tariff structures

The basic idea of this mechanism is to combine a soft loan with an incentive aimed at limiting the rebound effect. In the case of progressive tariffs, it can be applied by increasing the prices of the higher tariff blocks after refurbishments (see Figure 3). In this way the over-priced energy repays the loan and this high price may tend to limit rebound effect. The main difference between “classical” on-bill-financing (OBF) and this mechanism lies in the fact that the soft loan provides an additional disincentive for rebound effect. Indeed, the marginal energy price above expected post-refurbishment energy consumption (without rebound effect) is higher than in the context of classical OBF (see Figure 3)). Thus, the proposed loan mechanism takes advantage of the progressivity of the tariff structure to curb rebound effect by making it more expensive.

Design of this mechanism involves a choice of the number of modified blocks and of the amount of tariff increase. Regarding the number of blocks of which the prices are modified after a refurbishment, if only the last post-refurbishment block price is modified then the amount of over-priced energy can be very small in the case of a post-refurbishment energy consumption that is at the very start of a tariff block. In this case, the utility would have to put an extreme price per kWh on this block to have an acceptable rate of reimbursement. Therefore, we tested a block pricing mechanism involving the switch of two energy price blocks to pre-refurbishment final block energy price. These two “modified” blocks are the block corresponding to post-refurbishment energy consumption and the block before (Figure 3). In this way, even if the post-refurbishment energy consumption is situated at the start of a price block, the energy price difference of the previous block generates loan reimbursement. This mechanism will be named “2-block soft loan” (2BSL) in the rest of this paper.

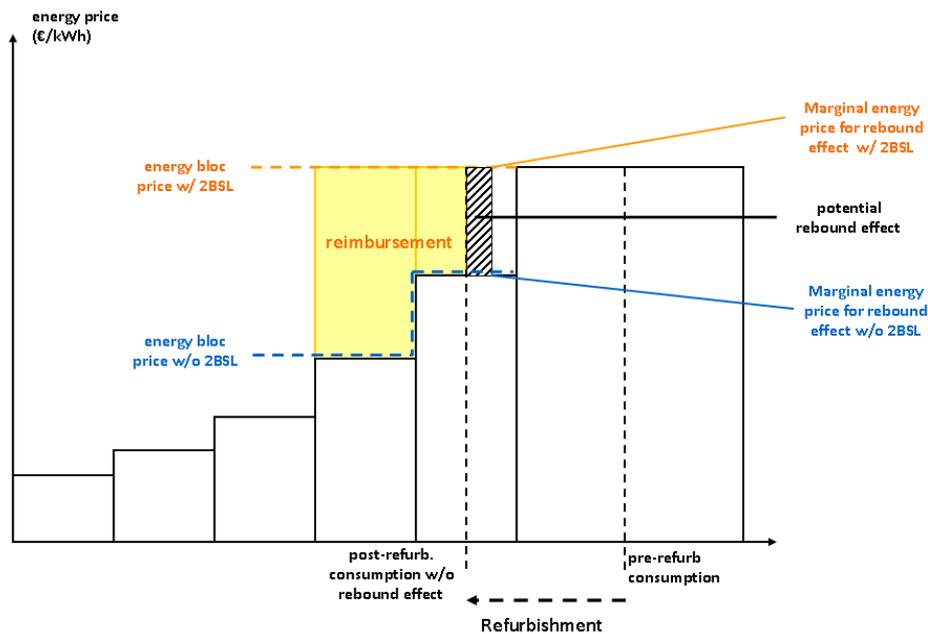


Figure 3: 2-block soft loan (2BSL) mechanism.

The second point that has to be designed is the choice of overpriced blocks, which is directly linked with the expected energy savings following a refurbishment. These energy gains can be calculated using various methods:

- Technically standardised: in the context of French standard calculations tools regarding existing buildings (e.g. [MOE, 2006]), such a method can lead to expected energy gains that are higher than actual consumption in the case of ambitious renovations in lower performance dwellings. When using such tool, dwellings built before the first thermal regulations have an intensity factor of about 0.4 [Allibe, 2009; Cayre et al., 2011]. When using this method, expected energy gains from an ambitious refurbishment (more than 40% of savings) will be higher than actual pre-refurbishment energy consumption, which is absurd. Since the estimate seems unrealistic in the case of old dwellings, we decided not to use this method.
- Technically standardised with fixed intensity factor: In this case, technically standardised energy gains are multiplied by dwelling intensity factor before refurbishment. This leads to more realistic expected gains as they are bounded by effective consumption. This method follows the above-presented representation of energy savings without rebound effect (Figure 3).
- Technically standardised with variable intensity factor : In this case, technically standardised energy gains are first multiplied by the intensity factor before refurbishment and then reduced by a certain amount of accepted rebound effect. This method leads to lower energy gain estimates and its results depend on the way that intensity factor and rebound are modelled. Three kinds of rebound have been tested: 20 %, 40 % and a rebound that follows the logistic intensity factor.

The impacts of 2BSL on rebound effect limitation have been tested on modelled dwellings that theoretically consume (with the DPE method) between 25 and 80 MWh per year for space heating purposes (representing 8 % of housing stock and 17 % of national SH consumption i.e. a stock segment that should be a main residential energy policy target). On these dwellings, major refurbishments (between 20 % and 50 % energy savings) have been simulated, and the household’s reaction in terms of energy consumption has been simulated.

Simulation results

- *Progressive tariffs*

Progressive energy tariffs have been applied to the three main space heating energy sources using our model of French residential building stock. As average energy prices change, depending on the consumed quantity, the implementation of a progressive tariff structure leads to an energy consumption adjustment by households. This energy consumption adjustment reflects only variations of average intensity factor (Table 1).

Table 1: national SH consumption variation (in %) compared to the reference case ($\alpha=1$) depending on tariff progressivity and type of tariff constraint (EBM - NEBM)

α	EBM	NEBM
1.1	-1,8%	-3,5%
1.2	-3,1%	-6,2%
1.3	-4,0%	-8,3%
1.4	-4,7%	-9,9%

Results show that a progressive tariff can have significant effects on space heating energy consumption, ranging from 1.5 % to about 10 % (or higher for more progressive tariffs). Regarding space heating in a country such as France, such a range of potential reductions is significantly higher than current annual SH energy consumption reduction, which is approximately 1% [CEREN, 2010]. As expected, NEBM has a stronger impact than EBM (as the average energy price is higher). In the NEBM form that we used, its impact is about twice as high as that of EBM.

- *Utility soft loans adapted to PT*

Simulation results are presented in Table 2. These show that a significant reduction of rebound effect can be expected from a 2BSL mechanism when applied to most energy consuming dwellings. Depending on the theoretical energy gain calculation method and on the tariff progressivity, average rebound effect reductions range from almost nothing to a complete offset. On the one hand, regarding the single effect of tariff progressivity, the higher it is the higher the rebound reduction when using 2BSL. On the other hand, regarding energy gains calculation method, the higher the expected gains, the higher is the rebound reduction. The combination of an estimated energy gain without rebound effect and a highly progressive tariff can even lead to average rebound reduction above 80 %. It is certainly of interest as a policy that targets rebound effect but such an average value implies that some households will have an intensity factor that is smaller after refurbishment than before, which means a comfort loss and probable dissatisfaction. In order to limit the occurrence of such cases within the framework of highly progressive tariffs, expected energy gains have to be lowered by using less optimistic calculation methods. On the other hand, results show that if energy gains estimated without rebound effect are lowered by more than 40 % then 2BSL no longer leads to a reduction of rebound effect.

Table 2: Rebound effect reduction thanks to 2BSL compared with the rebound effect that would occur when EE investments are made without 2BSL

alpha	No rebound	Fixed 20 % rebound	Fixed 40 % rebound	Logistic intensity factor
1.1	24 %	18 %	3 %	18 %
1.2	53 %	34 %	5 %	42 %
1.3	71 %	48 %	8 %	57 %
1.4	84 %	61 %	12 %	70 %

At the same time, households that have chosen 2BSL manage to combine reduced energy bills (excepting for very small energy gains and/or $\alpha > 1.4$) and annual loan reimbursements that range from 100 € to 1500 €, depending on the tariff progressivity, their energy consumption before and after refurbishment and the average price of space heating energy.

Discussion

- *Progressive tariffs*

The results presented show that a progressive energy tariff could lead to a major energy consumption reduction in the residential sector that is mainly due to a reduction of intensity of use by households. However, such optimistic results have to be balanced against application difficulties. Progressive tariffs have been applied, in practice, only to electricity, which results partly from a problem of consumption measurability. Indeed, “network energies” such as gas or electricity are operated using meters. Conversely, fuel oil or wood consumptions are far more difficult to track and bills do not correspond to the real energy consumption between bills as stocks can be piled up. On the other hand, if PT is not applied to all energies then a fuel switch can occur for most consuming households as they will have no disincentive for a high level of consumption if they use a space-heating energy not subject to PT. Therefore, if a strongly progressive (high α values) tariff is applied exclusively to electricity (or to electricity and gas) then there will be a switch to gas, fuel oil and wood (or only fuel oil and wood) as the source of space-heating energy. In a country where electricity has a high carbon content, this might be seen as a good decision. However in France, electricity carbon content is lower than that for gas and fuel [ADEME, 2005] due to the high contribution of nuclear and hydroelectric powers in the national energy mix. Therefore, if a progressive energy tariff is applied in France in order to reduce energy consumption and carbon emissions, it should be applied to all heating energy sources (excepting wood) and not only to electricity in order to avoid a massive fuel switch to carbon intensive space heating energy sources. The first option is certainly desirable but leads to another kind of difficulty. In the model developed here, households use a single energy source for space heating. However, many millions of French households use two or more energy sources, and for usages other than space-heating. Thus, a progressive tariff that includes all carbon-based energy sources requires agreements on the way that a kWh of energy from each source will be priced regarding progressivity. Finally, we would like to highlight that the progressive structure itself is very symbolic and could be a strong medium for communication on sufficiency policies. Moreover, efficiency policies that push households to purchase more energy efficient equipment are, in some cases, limited to wealthy and/or environmentally friendly households (due to the initial cost barrier to energy efficient investments), whereas a tool like the progressive tariff could be effectively applied to everyone in a country. Thus, such tool could be a significant change regarding the type and scope of energy-environment-climate oriented policies in France or Europe.

- *Utility subsidy*

From the household’s point of view, our simulation results for 2BSL shown an average win-win situation. On the one hand, post-refurbishment energy bills are mainly (>95 %) lower than pre-refurbishment bills, thanks a limitation of rebound effect. On the other hand, 2BSL could significantly reduce the initial cost barrier, which is recognised as one of the main market barriers to energy efficiency investments, especially with regard to building shell refurbishments. However, our results also highlight that the trade-off between household energy bill reduction and the amount of loan reimbursement depends largely on the method of calculating expected energy savings.

From a financial point of view, the maximum reimbursement period will be an important parameter, especially in the case of building shell refurbishment, which is very capital intensive and requires a long payback time to compensate initial cost. Such shell refurbishments have to be tackled now because of their life-time. If 2BSL is applied to shell operations with an ambitious target for initial cost reduction then the length of loan could be far higher than the average stay of a household in a dwelling (7 years in France). Thus, the loan could be attached to the house and its energy meters rather than the household. Such a type of loan is currently under discussion in France [CLIP conference] and could be a way to align household and societal benefits. Moreover, if the loan is attached to meters or dwellings then it could be an interesting way to limit the principal-agent dilemma in the case of cost-effective refurbishments. Indeed, the loan could be obligatory for tenants when major refurbishment occurs, leading to lower average energy bills for rental occupiers (including loan reimbursement) and increased estate value for the landlord. However, such obligations have to be carefully designed and limited to refurbishments that are proven to be cost-effective on the average or for specific target building stocks (cost-effectiveness depend partly on pre-refurbishment energy consumption).

When considering the social point of view, by reducing or even fully offsetting the initial cost barrier of energy efficiency integration when a refurbishment occurs, such a loan (requiring progressive energy tariffs) could make energy efficiency less restricted to wealthy or environmentally concerned households. These two types of household have the highest propensity to make energy efficiency investments because either they have enough money to consider energy efficiency as a good investment or they make energy efficiency investments instead of others because of their preference for environmentally friendly items. However, not all households are ready to

choose to invest their money in energy efficiency. If the loan period is long enough to offset additional cost then the rationale of energy efficiency investment could switch from “additional costs with uncertain savings” to “no additional cost and average money loss if it is not made”. Such a paradigm switch could be a major lever to increase the penetration rate of energy efficiency in residential refurbishments.

Conclusion

This paper presents two policy tools aiming to promote sufficiency and limit rebound effect: progressive energy tariffs (applied to all carbon-based space heating energy sources) and a soft loan structure, the efficiency of which increases with tariff progressivity. Simulations of these potential future energy policy tools have been made using an innovative model for household daily use of space heating that includes the modelling of rebound effect and allows the easy representation of daily use sufficiency.

Results show that the mechanisms presented can make energy consumption (and consequently carbon emissions) decrease significantly and can largely curb rebound effect. As progressive tariffs could induce market deformations if not uniformly applied, they have to be imposed on a wide scale by policy-makers. In this way, this energy policy measure will affect not just wealthy or environmentally friendly households (which can be the case for some efficiency-oriented policies) but everyone within a wide perimeter. By doing this, progressive tariffs could be a visible medium for the official promotion of less energy-consuming lifestyles.

Finally, the combination of progressive tariffs with the soft loan mechanism presented in this paper provides an interesting way to limit the initial cost barrier for energy-efficient investments. In particular, the possibility of long term loans attached to dwellings or energy meters instead of dwelling owner or occupier could trigger high-performance investments in rented accommodation where the principal-agent dilemma is crucial.

Glossary

SH: Space heating

PT: progressive tariff

2BSL: 2-blocs soft loan

TBS: Theoretical budget share

NPV: Net present value

EBM: Equilibrated bonus-malus

NEBM: Non-equilibrated bonus-malus

OBF: On-bill financing

EPC: Energy Performance Certificate

I: Intensity factor

C: Energy consumption

Bibliography

[ADEME, 2005] Note de cadrage du 14/01/2005 sur le contenu CO₂ du kWh par usage en France.

[ADEME, 2008] OPEN Observatoire Permanent de l'amélioration Energétique du Logement, Résultats de la campagne 2007, ADEME, BIIS, CAH, 28 p.

Allibe, B. (2009), Impact of comfort on residential space heating energy consumptions, a retrospective and prospective study, BECC, Washington, 2009.

Allibe B., M-H.Laurent, D.Osso (2010), Modélisation thermique de l'habitat : d'un logement unique à l'ensemble du parc, International Building Performance Simulation Association – IBPSA, 9-10 November 2010, Moret sur Loing France, 8p.

Cayla J.-M., B. Allibe and M.-H. Laurent (2010), From practices to behaviors: Estimating the impact of household behaviour on space heating energy consumption, in proceedings of the 2010 ACEEE Summer Study.

Cayla J.-M., N. Maizi and C. Marchand, The Role of Income in Energy Consumption Behaviour: Evidence from French Households data; Energy Policy (submitted 2010).

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 in proceedings of the ECEEE 2011 summer study, paper 7-277.

Calwell C., (2010), Is efficient sufficient? The case for shifting our emphasis in energy specifications to progressive efficiency and sufficiency, Calwell (ECOS), prepared for the ECEEE, 22 March 2010

[CEREN, 2010] Suivi du parc et des consommations, Centre d'Etudes et de Recherche sur l'Énergie, 2010.

Osso D., B. Allibe, M.-H. Laurent (2011): Demolition vs. refurbishment for the least efficient homes: a regional cost-benefit analysis in proceedings of the ECEEE Summer Study 2011.

Haas R., P. Biermayr (2000), The Rebound Effect for Space Heating. Empirical Evidence from Austria, *Energy Policy*, 28, 403-410.

Hackett, B. and Lutzenhiser, L. 1991. "Social Structures and Economic Conduct: Interpreting Variations in Household Energy Consumption." *Sociological Forum* 6 (3):449-470.

Laurent M.-H., B. Allibe, D. Osso (2011), Energy efficiency for all! How could an innovative conditional subsidy on refurbishment lead to enhanced efficient technologies accessibility; in proceedings of the ECEEE Summer Study 2011.

[MOE, 2006] Ministry of Employment, Social Cohesion and Housing, Decree giving approval on various methodologies for energy performance certificate in metropolitan France [Arrêté portant approbation de diverses méthodes de calcul pour le diagnostic de performance énergétique en France métropolitaine] 96p.

Peeters L., De Dear R., Hensen J., D'haeseleer W. (2009), Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation, *Applied Energy*, 86, 772-780.

Sadler, M. (2003), Home energy preferences & policy. Applying stated choice modelling to a hybrid energy economy model, Research project for the degree of Master of Resource Management, Simon Fraser University.

Schuler A. (2000), Energy consumption for space heating of west German households empirical evidence, scenario projections and policy implications, *Energy Policy*, 28, 877-894.

Socolow, R. H. (1978). "The twin rivers program on energy conservation in housing: Highlights and conclusions." *Energy and Buildings* 1(3): 207-242.

Sorrel S., J. Dimitropoulos (2008), The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions, *Ecological Economics*, 65, 636-649.

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

Wilhite, H. & Norgard, J. S. (2003), A case for self-deception in energy policy. Proceedings of the European Council for an Energy Efficient Economy, Summer Study 2003. ECEEE, Stockholm.

paper 7-277 - CAYRE

There are people in the house!: How the results of purely technical analysis of residential energy consumption are misleading for energy policies

Emmanuelle CAYRE^a, Benoit ALLIBE^{a,b}, Marie-Hélène LAURENT^a, Dominique OSSO^a

^a : EDF-R&D, ENERBAT Dpt.
Site des Renardières – Avenue des Renardières
77818 Moret-sur-Loing cedex
FRANCE
Phone: 01 60 73 61 45
Fax: 01 60 73 73 15
Emmanuelle.cayre@edf.fr

^b : CIRED
Campus du Jardin Tropical
45 bis, avenue de la Belle Gabrielle
94736 Nogent-sur-Marne Cedex
Tél : 01 43 94 73 73

Keywords

Energy savings, residential building, retrofitting

Abstract

In France, *bottom-up* models of national space heating energy consumption aiming at orienting energy policies are mostly based on the same basic framework modelling, derived from the 1988 French thermal regulation, like this used for the Energy Performance Certificate (EPC). However, empirical evidence suggests significant differences between observed consumptions and those calculated with such a basic model like EPC. The purpose of this paper is to analyze the factors that could explain these differences and especially the role of the daily management of space heating (temperature and ventilation rate) by occupants, which is standardised in this basic model.

Based on an analysis of time-series (1998-2005) and cross-sectional data (2009 survey), we quantified the impact of this daily behaviour on energy consumption and implemented this “behavioural factor” in the EPC basic model. Our results suggest that this factor depends on the theoretical budget share of space heating, calculated as the income share dedicated to the theoretical space heating bill. Thus, this factor makes it possible to depict rebound effect as well as price and income elasticities. It is worth noting that the impact of this factor on energy consumption is comparable to the impact of average technical improvements.

As our focus is on long-term modelling, implications for long-term policy decisions have been studied. Thus, simulations of French residential space heating demand have been carried out over the 2010-2030 period using 2 variants of the EPC basic model: calibration in the first year of simulation on national energy consumption estimated from energy bills, and integration of the behavioural factor. These two variants are compared with the results from the EPC model without any modification (no calibration).

Results show that standard calculations (basic model), even if calibrated, strongly overestimate space heating consumption in older housing as well as their energy savings potential. Therefore, using evaluations based on standard calculations that neglect behaviours may lead to a significant overestimation of the energy savings achievable in the residential sector.

Introduction

The assessment of the energy consumption of a building stock can rely on different modelling, from the physically detailed (thermally or statistically) to the more general, such as econometric models (Swan et al. 2009). However, the detailed models, like this used for the current French thermal regulation, could not be used for a large building stock due to the increase of computer time and the lack of detailed data. Conversely, simplified models like this used for Energy Performance in France (EPC) (Ministry of Employment 2006, Bonneau et al.1993), could be used for a large number of buildings but cannot lead to an accurate assessment of energy consumption without a minimal rate of error.

In France, the models used for the modelling of the residential building stock, like Enerter (Energie Demain 2010) or one from ANAH (Marchal 2008), rely on simplified thermal modelling; generally based on the 1988 thermal regulation formulae (RT88) (Promotelec 1995) or the French EPC (Energy Performance Certificate) as promoted by the EPBD directive (EPBD 2002). The French EPC is based on 3CL methodology described in a section below (see “the EPC model”) (Ministry of employment 2006).

These models take into account the energy efficiency of the building even if this is based on standard assumptions. For example, the ventilation rate in relation to window types or ventilation system, wall thermal resistance in relation to building vintage and climatic zone are taken directly from the thermal regulation rules or building codes assuming proper compliance with them. Most of the time, household behaviour is typically described and translated by a homogenous set temperature in the dwelling, possibly changing during the day. One can conclude that the studies dedicated to the French residential building stock are generally based on

bottom-up models with only technical consideration (see e.g. Traisnel 2001; Traisnel et al. 2010; Marchand 2008; Laurent et al. 2006; Osso et al. 2007; Houdant and Schram 2009). These reviewed studies are mainly based on methodologies similar to the one used by EPC.

By comparing the energy consumption estimated by these models with real consumptions (measured or assessed), a large difference is noticed at the level of one building. This deviation or gap, apart from the calculation methodology, could be explained by various points:

- Behavioural patterns of energy use,
- Inaccurate assessment of technological energy performance (efficiency of equipments, thermal resistance of building envelope, etc.),
- Lack of building environment consideration (shadows, heat island effect, real outside temperature...),
- Building occupant-use not being explicitly described and addressed (time-space variation of internal temperature, opening of windows...).

However, with a large amount of a building's energy consumption simulated, the errors could be compensated. In this case, we have studied the accuracy of different models relative to cross-sectional data from a survey of 1000 dwellings. These households have answered questions about their dwelling (technical description and appliances), as well as their daily practices and socio-demographic characteristics (age, number of inhabitant in the dwelling, wages, etc.).

To that end, a model, based on the French EPC, was used to assess the space heating consumption of a building stock with different kinds of enhancement based on detailed behaviour description or budget share dedicated to space heating considerations. These enhancements were made using cross-sectional and time series data.

As described in the next sections, the differences between these calculations were studied in order to test the hypothesis that energy consumption assessment based on a purely technical description, like the EPC, could lead to overestimation of energy savings. Therefore, we will argue that modelling space-heating of existing buildings with behavioural aspects is a crucial point for long-term simulation (from now to year 2035) of residential energy consumption in France.

In this context, we present a two-step study, firstly presenting the modelling of the difference between EPC and observed historical space heating consumption on a sample to build a double metric: standard vs. observed and, in a second step, using both metrics for long-term simulation of space heating energy demand at the national scale.

Methodology: Model, modelling approach and main assumptions

2. 2000 households survey (cross sectional data)

In order to take into account the behavioural aspect in the modelling pattern for space heating consumption, data regarding three kinds of variables (socio-economical, daily and purchase practices) are necessary. Unfortunately, in France, energy use behavioural considerations are not available (e.g. through the public statistic agency). Moreover, as opposed to other European countries no studies on the subject have recently been published (Schuler 2000). Therefore, in 2009, we carried out a specific survey on 2012 representative French households with enquiries about their behaviours and the technical description of their housing (see Table 1). No further details will be provided in this paper as the survey was already presented in previous papers (Cayla et al. 2010; Cayla 2011).

Table: 1 Number of questions per topic put to 2012 representative French households (June 2009).

Topic	Dwelling characteristics	Space heating system	Dwelling environment	Socio-economical data	Behaviour	Energy consumption (bills)
Number of questions	39	9	4	16	12	5

In order to be able to extrapolate to the national level, each household was weighted for its representativeness of the French population. This weighting is determined, for each household considering the following variables: income, urban density and location of the dwelling, family type, age of the reference person, occupational status and the type of dwelling. Even if various energy fuels are concerned, the energy data gathered from the

households represents the whole energy bill for the year 2008. This energy consumption needs to be broken down by end-uses:

- for lighting and appliances, a multi-linear regression analysis ($R^2=0.53$), based on 348 households using only electricity for these end-uses, is used to assess the consumption,
- for cooking and sanitary hot water, we used a regression model determined by the CEREN (CEREN 2007),
- space heating consumption is evaluated from the difference from the overall consumption.

Finally, the enquiry sample is reduced to 923 dwellings by the elimination of households with an incomplete date set, absurd data¹⁸⁸ or using a collective space heating system¹⁸⁹. With the exception of wood consumption, our results are in good agreement with CEREN data, allowing us to conclude that this panel is representative of space heating consumption in France (Cayla et al. 2010).

To complete the energy consumption data at a national level, we rely on time-series figures provided by CEREN (CEREN 2009). These consumptions were assessed from 1998 to 2005 on the basis of panel samples but the data are only available at an aggregated level. Nevertheless, energy consumptions are available by building segment broken-down by: energy for space heating, type of heating system, type of dwelling, building vintage, etc. allowing fine and accurate studies.

The EPC model

The 3CL methodology, developed for the French EPC¹⁹⁰, relies on the former thermal regulation calculation method (RT88) (Promotelec 1995). The 3CL calculation is based on a simplified annual static method depending on the thermal losses and the air flow of the space heated volume, the efficiency of the equipment used, the heating degree-day related to the location and an intermittency factor that takes into account the inertia of the building envelope, the scenario of energy management. The core model uses a calculation method that is relatively simple (Ministry of employment 2006):

$$C_{ch} = B_{ch} \times I_{ch} \quad \text{eq. 1}$$

with: C_{ch} : space heating consumption
 I_{ch} : coefficient of heating (yield)
 B_{ch} : Need heating (kWh/year), equal to:

$$B_{ch} = ENV.SH.INT.METEO \quad \text{eq. 2}$$

with: ENV: losses of housing per square.
 SH: area of housing.
 INT: intermittency factor (independent of type of energy).
 METEO: weather correction (heating-degree-day – HDD).

Although the EPC is a standardised methodology, leading to an assessed energy consumption that can be wide of the reality, it is an inescapable tool as it is used as a reference tool for French policy on the retrofitting of building stock. Moreover, it provides stakeholders with a common reference base for energy labelling. We have to keep in mind that energy consumption calculated by the EPC method is standardised and should not be regarded as true consumption.

The technical figures used in the modelling are taken from the EPC database linked to the 3CL methodology, especially for the building's thermal performance and the efficiency of space heating systems but with the exception of wood boiler efficiency, which is considered too low.

Standard modelling (EPCs)

The standard EPC calculation, called, in this paper, EPCs, do not take direct account of the household behaviour but this is implicitly described on the basis of a heating need correlated to heating-degree-day (HDD), depending only on the dwelling location. It is thus assumed that there is a sole and standard behaviour for all households. The set temperature is therefore implicitly included in the HDD value.

¹⁸⁸ Extreme values : higher than 400 kWh/(y.m²) or below 20 kWh/(y.m²) (expressed in final energy)

¹⁸⁹ 18.8% of main dwellings and 17% of space heating consumption (source: CEREN 2005).

¹⁹⁰ In French: DPE for energy performance diagnosis.

Simplified behaviour (EPCb)

In order to take into account the household's declared behaviour, we have modified the EPCs methodology by altering two variables (so called EPCb in this paper):

- The value of HDD is modified considering the set temperature and also the temperature management (lowering of set temperature, or space heating shut off during the night or absence) declared by the household in the survey.
- A specific coefficient is applied to the heated dwelling's floor area to take into account that some households do not heat all the rooms, as stated in the enquiry. This coefficient was calculated using a multi-linear equation on the basis of dynamic thermal calculations with PAPTER software (Castet and Sivadier 2003), allowing multi-zone modelling.

Intensity factor (EPCi)

In order to better reflect behaviours related to energy consumption, we can determine a intensity factor (I) of space heating use as already proposed by Haas et al., 1998 & 2000, and Schuler, 2000. The intensity factor is calculated as following:

$$I = \frac{C_{obs}}{C_{EPC}} \quad \text{eq. 3}$$

with: C_{obs} the observed space heating energy consumption.
 C_{EPC} the theoretical space heating energy consumption based on conventional engineering calculations such as EPC.

The first objective of this intensity factor is to complete engineering calculations with more realistic behaviours. Eq (3) allows measuring the intensity factor of any building if theoretical consumption and energy bill are available. However, this can be achieved only on a sample and not on a national building stock model. Thus, a major modelling challenge lies in the endogenization of the intensity factor. If intensity can be explained by variables that are available now and that can be forecasted then it will be possible to give a better assessment of space heating consumption (C_{EPCi}) in comparison with normative engineering calculations (C_{EPCs}) now and in forecasting studies supporting energy policies:

$$C_{EPCi} = C_{EPCs} \cdot I \quad \text{eq. 4}$$

Three main determinants of this intensity can be found economic and engineering literature: energy price, income and building performance. Relationships between intensity factor and these variables are mainly expressed in terms of price and income elasticities and rebound effect (elasticity of demand for energy service with respect to energy efficiency). These elasticities can be estimated using a standard dynamic constant elasticity function of demand (e.g. Haas and Biermayr, 2000) which can be reformulated as following:

$$I = K \cdot P^\alpha \cdot Y^{-\beta} \cdot C_{theo}^\gamma \quad \text{eq. 5}$$

with: P the energy price and the elasticity to price.
 Y the household income and the elasticity to income.
 C_{theo} the theoretical consumption (as behaviour is constant, C_{theo} is an indicator of efficiency).
 K a constant.
 α, β, γ the parameters of the constant elasticity function.

The literature provides various estimates for these elasticities:

- Value from 0 to 0.5 for α the price elasticity (Haas and Schipper 1998).
- Value from 0 to 1 for β the income elasticity (Haas and Schipper 1998).
- Value from 0.1 to 0.3 for γ the efficiency elasticity (Sorrel et al. 2009).

In the case of France, the elasticities, calculated with an econometric analysis of time-series data of building segments, are in the same order: from 0.2 to 0.3 for the price elasticity and from 0.44 to 0.75 for the income elasticity (CGDD 2010). As these estimates are variable over time but stay in the same range, and in order to allow an easy graphical representation (see Figure 1), they are approximated as being equal in this study. In this way, (eq. 5) can be simplified in (eq. 7) with the introduction of the Theoretical Budget Share (TBS) (eq. 6) i.e. the budget share that a household should pay if its space heating behaviour were the same as in the engineering model ($I=1$). An additional advantage of using TBS instead of three different elasticities as above in (eq. 5), is

that is the energy budget share is one of the main indicator for the definition of fuel poverty (Healy and Clinch 2000).

$$TBS = C_{EPCs} \cdot P \cdot Y^{-1} \quad \text{eq. 6}$$

with: TBS: theoretical budget share.
P: the energy price.
Y: the household income.

$$I = K \cdot TBS^{-\alpha} \quad \text{eq. 7}$$

with: K: constant.
TBS: theoretical budget share.
 α : parameter of the constant elasticity function.

Based on panel and cross-sectional data, a correlation has been found between intensity factor (I) and the Theoretical Budget Share (TBS) (Allibe 2009). In order to endogenize the intensity factor by using the TBS, the correlation has to be regressed.

The first regression that we tested is the constant elasticity demand function of (eq. 7). The advantage of this approach is that results can be compared to literature values using the same functional form. The drawbacks lie in the hypothesis of a constant elasticity whatever the budget share dedicated to space-heating, neglecting the fact that, above a certain point, more heating does not lead to increased comfort (Peeters 2008).

The second type of functional form that we tested for the regression of observed correlation is a logistic function.

$$I_{th} = a + \frac{b}{1 + c \cdot e^{(TBS-d)}} \quad \text{eq. 8}$$

with: TBS: theoretical budget share.
a, b, c and d the parameters of a logistic function.

The main advantage of this functional form is that a maximum level of energy service demand exists. This is consistent with the fact that, above a certain level of temperature increase, there is more comfort loss than comfort enhancement (Peeters 2008). This maximum level of energy service (comfort saturation) can be modified to model the impact of daily sufficiency behaviours (i.e. maximum energy service level is lowered). The associated drawbacks are the inelastic energy consumption for households with the highest budget share, which is in conflict with some research on rebound effect amongst the fuel-poor population (Milne and Boardman 2000). This functional form is unused in the literature, which makes the pertinence of results difficult to evaluate.

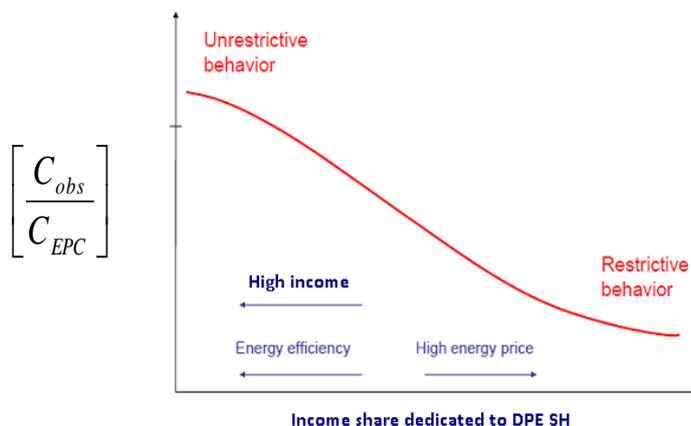


Figure 1: Sketch of the intensity factor I (C_{obs}/C_{EPCs}) depending on the theoretical budget share dedicated to space heating.

On the whole, this intensity factor combines modelling of price elasticity, income elasticity and rebound effect into a Theoretical Budget Share (TBS)¹⁹¹ elasticity to be representative of service saturation. Finally, to determine the level of this adjustment (intensity factor), the logistical regression (S-curve) was carried out with the space heating consumption of the households in the survey. The values of the intensity factor were then validated against time-series data.

Building stock representation

Technical features of buildings are based on the self-reporting questionnaire of a survey made by EDF R&D in 2009 of more than 2000 French households (Cayla et al 2011; Cayla et al. 2010; Allibe et al. 2010). 923 of these households were selected (on the criterion of full and plausible questionnaire answers) and form the building stock. They are weighted to be representative of the French building stock and households. This weight is determined, for each household, from their income, the urban density and location of the dwelling, the family type, the age of the reference person, occupational status, the type of building and the date of construction (see Cayla 2011; Cayla et al 2011 for details).

As our model is focused on existing building stock (where energy efficiency measures are the most profitable), it does not represent dwellings that will be built during the coming decades. Moreover, future French residential thermal regulations for new buildings (2012 and, possibly, 2020) will have very stringent performance requirements (respectively 50 kWh_{pe}/m².year of primary energy and net zero energy building (NZEB)¹⁹² (Grenelle 2009)), making their energy consumption far lower than the average pre-1990 dwelling (more than 150 kWh/m².year, only for space heating).

In the long term, it is expected that existing dwellings will be gradually replaced by new ones. The number of demolished dwellings per year has been estimated at 30,000 (Traisnel et al. 2010). Each year, a share of the housing stock is demolished randomly, without correlation to energy performance. The hypothesis of “worst efficiency – first out” (Sartori 2009; Giraudet 2009; Traisnel 2001) does not seem to hold in France (Osso et al. 2011).

Simulation of refurbishment

Our refurbishment modelling is based on renovation rates and a detailed explanation can be found in Laurent et al. (2011). We consider that each part of the building envelope and energy equipment has a limited lifetime and, however that may be, is replaced by new one.

At the beginning of the simulation, remaining lifetimes are randomly attributed to each part of every dwelling in the stock. Due to the lack of any figures about the age distribution of the space heating equipment in France, a flat distribution, spanning from 1 to lifetime years, is used for the random attribution. If the remaining lifetime is lower than zero then household has to refurbish it. This mechanism leads to a constant refurbishment flow over time, which equals currently observed refurbishment flow in the French market. For every retrofit, a household has to make an investment decision. It has the choice between three kinds of options (including low-efficiency ones), representative of the current retrofitting market (ADEME 2008). The efficiency of heating equipment and thermal insulation actions remains constant during the projection as there is no autonomous progress modelled.

Investment model

The investment model is based on a basic micro-economic approach. When a building part or the space heating equipment has to be refurbished, households choose between 3 technological options (differentiated by their energy efficiency and their cost) by comparing their Net Present Value¹⁹³ (NPV). From households’ point of view, the calculation is made with a myopic anticipation of energy prices.

For the long-term simulation presented in section “Results”, we have chosen the energy prices according to the evolution assumption proposed by IEA (2010) and an invariable discount rate set at 11% (in the low range of the

¹⁹¹ Theoretical budget Share is cost relative to the income (perceived service cost).

¹⁹² Also called in France : positive energy building.

¹⁹³ Net Present Value (NPV) is the total present value (Euro) of a time series (n) of discounted (a) net cash flows

$$(CF_i): NPV = \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+a)^i}.$$

literature on implicit discount rates (Train 1985)). In this simulation, the diversity of retrofitting costs is taken into account with a distribution function of retrofitting price that does not change in the future (no technological learning (Weiss et al. 2008)). No sensitivity analysis has been carried out yet on these variables because our focus is more on the use of space heating technologies than on the investment.

Results

Intensity factor I

Calculations of intensity factors have been carried out on the French dwelling stock constructed before 1988. This stock is divided into segments which are characterised by vintage (<1975, 1975-1982, 1982-1988), dwelling type (single family housing, multi-family housing) and space heating energy (electricity, gas, domestic fuel). Theoretical energy consumptions (EPCs) have been calculated on the basis of thermal regulation requirements corrected by expert judgments (EDF R&D) in order to take into account a partial compliance with respect to these regulations. Calculations have been made for each year on the 1998-2005 period. Results for the year 2005 are presented in Figure 2 and Table 2 whereas the evolution of intensity factor on the 1998-2005 period is depicted in Figure 3. Variations of theoretical budget shares (TBS) in Figure 3 are mainly due to energy price and climate variations. It is to note that the effective energy consumptions that we used for the intensity factor calculations are not corrected from climate.

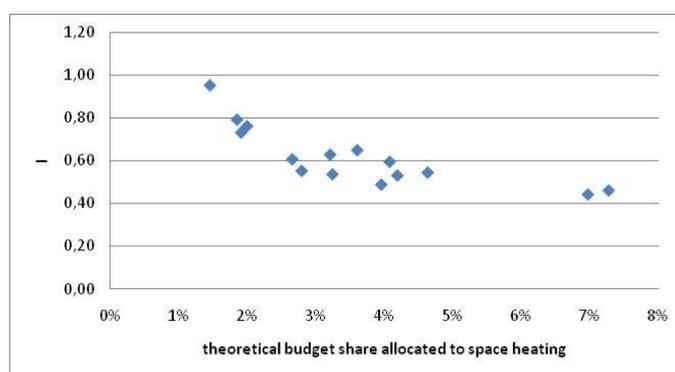


Figure 2: Intensity factor I depending on the theoretical income share for space heating.

Table 2: Space heating intensity of use in the French building stock in 2005.

age of building stock	Single Family House (SFH)			Multi-Family House (MFH)	
	Electricity	Gas	Fuel oil	Electricity	Gas
<75	0.44	0.60	0.46	0.53	0.55
75-81	0.42	0.61	0.55	0.58	0.79
82-88	0.54	0.76	0.65	0.73	0.95

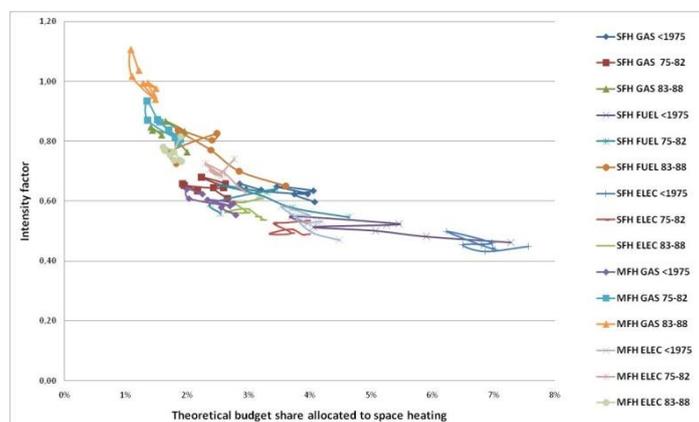


Figure 3. Intensity factor I broken down by segment of building (type, energy, age) from 1998 to 2005.

SFH: single family house, MFH: multifamily house. Example: “SFH FUEL 75-82” is corresponding to the segment of SFH buildings heated with fuel oil and built between years 1975 and 1982.

Results show that the intensity factor (I) is generally lower than one, leading us to conclude that the EPC model (EPCs) have systematically overestimated the space heating consumption for dwellings built before 1988. Moreover, Figure 3 and Table 2 seem indicating that the intensity factor depends more on the TBS than on the dwelling type, the space heating energy or the vintage of dwelling stock segments. A consequence is that a single model of intensity could be applied to the whole individual space heating building stock whatever building type, age or space heating energy.

Space heating consumption calculated using the various EPC methodologies

We have calculated the energy consumption of the 923 households in the enquiry using the three different methodologies (EPCs, EPCb, EPCi) and then compared them with the space heating consumption assessed from the energy bill (see Table 3). The EPCi model presents an assessed consumption close to the average consumption observed in the survey and also the lowest dispersion of data (low standard deviation) similar to that measured in the survey. For the EPCs and EPCb calculations, the average consumption and the dispersion of data are by far higher.

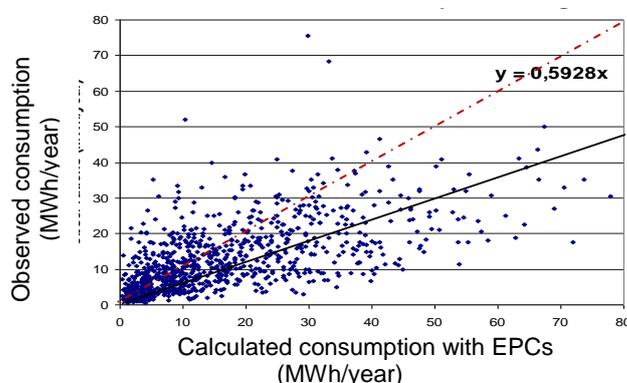


Figure 4: Space heating consumption calculated with EPCs vs. Consumption assessed from the energy bill (cross sectional survey). The scatter of points is shifted below the bisecting line (dotted line) indicating that the calculated consumption with EPCs model is higher than the observed consumption in the survey. This is revealed by the data’s linear regression (solid line) which is far below the bisecting line.

For the dwellings surveyed, the EPCi modelling provides the lowest estimate error (error <3%) of the space heating consumption compared to the household sample. This is very understandable as the intensity factor (I) was calculated from the energy bills of the survey. We must note that the standard EPCs calculation provides the worst assessment of space heating consumption (error >65%) but could be enhanced by including the declared daily practices (EPCb with an error of 30%).

Table 3: Average space heating consumption (μ) and standard deviation (σ) (MWh/dw of final energy).

Methodology	EPCs	EPCb	EPCi	Survey
μ	21.6	17.0	13.4	13.1
σ	14.8	13.4	6.9	8.8

Even if the results are correct at the national level with the EPCi, this does not imply that the model is accurate at a desegregated level as the errors could compensate. To this end, we have calculated the energy consumption of different segments of building stock, broken down by: energy for space heating (5 modes), dwelling type (2 modes), and building vintage (6 modes). Results show that the conclusion at the national level stays the same at a desegregated level (Table 4), with the exception of buildings built between 1982 and 1989 where the EPCs provides accurate evaluations. This could be explained by the fact that the EPC methodology is based on the RT88 methodology.

Table 4: Average space heating consumption for different type of dwellings with the three EPC models.

Average space heating consumption (MWh/dw.y)	Segmentation	EPCs	EPCb	EPCi	Survey
Space heating energy	gas	22.6	21.9	14.9	13.7
	Fuel oil	30.2	33.5	16.5	19.8

	LPG	25.2	24.1	14.4	16.7
	wood	40.2	39.7	17.6	20.4
	electricity	24.1	24.7	13.8	15.1
Age band building stock	<1918	31.3	32.5	16.4	18.4
	1919-1948	23.4	24.1	13.9	13.5
	1949-1974	27.4	26.9	15.3	14.5
	1975-1982	17.1	17.6	11.1	11.6
	1983-1989	12.4	12.2	9.3	9.9
	>1990	7.3	8.1	6.6	6.8

Space heating projection

Comparison of EPCs and EPCi methods for space heating consumption projections up to year 2035 confirms that EPCs calculations overestimate not only dwelling space heating energy consumption but also energy decrease with retrofitting actions as compared with EPCi estimations.

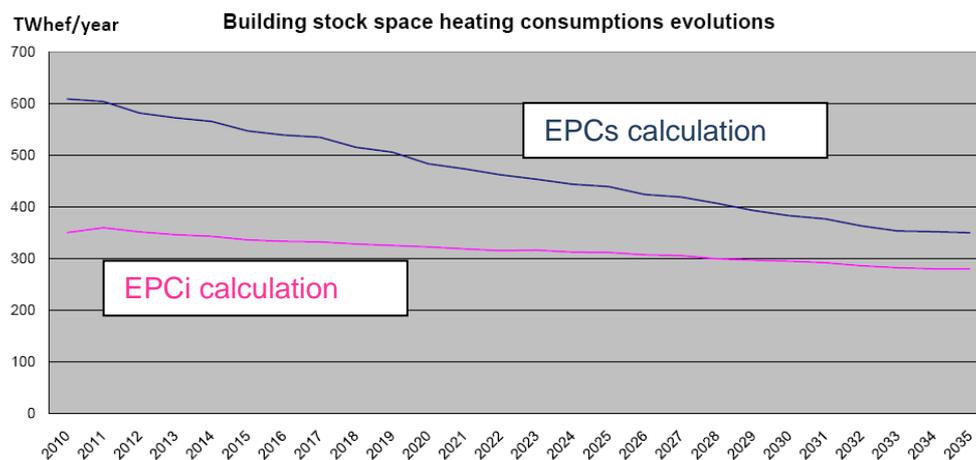


Figure 5: Space heating projection by 2035 regarding EPCs and EPCi calculation methods.

However, we note that 2035 projections with the two different methods are close. The reason lies in the homogeneity of the methods used: if all simulations are conducted with EPCs (initial space heating consumptions and energy gains after refurbishment action). However, 2035 consumptions depend on a lot of variable factors and such a result by 2035 could not be found again for another study.

Conclusion

The objective of the paper was to address, with due to limitations, behavioural patterns of energy use based on income and price effects in relation to space heating. We found that modelling exercises that do not include this important aspect tend to overestimate energy savings. In our study, results of long-term simulations using our model of daily use of space heating (intensity factor) reduce potential energy gains by 40% in comparison to the EPC. An average calibration is at least needed to use standard EPC space heating results at a national scale. The intensity factor that we have modelled provides a better -albeit still simple- behavioural realism by integrating income, energy price and rebound effects as well as service saturation levels in space heating consumption evaluation. The use of socio-economic variables on top of technical analysis seems to be necessary to evaluate long-term residential energy policies in a more realistic way. The intensity factor is a first attempt to overcome the lack of microeconomic realism of prospective engineering *bottom-up* models.

Glossary

- C: space heating consumption
- Dw: dwelling
- EPC: Energy Performance Certificate
- EPCs: calculation method evolution based on EPC standard model

EPCb: calculation method evolution based on EPC model integrating household's declared behaviour
 EPCi: calculation method evolution based on EPC model integrating intensity factor (*I*) of space heating use (including "behavioural S-curve")
 HDD: heating-degree-day
 I: intensity factor
 NPV: Net Present Value
 R²: coefficient of determination
 RT88: former French thermal regulation calculation method (year 1988)
 TBS: theoretical budget share
 P: energy price
 Y: household income

Acknowledgments

This work was carried out with the support of ECLEER (European Centre and Laboratories for Energy Efficiency Research). J-M.Cayla (EDF-R&D) is gratefully acknowledged for providing the household survey as well as for fruitful discussions and remarks. The authors also thank G.Giraudet (CIRED) for his insightful comments.

References

- ADEME (2008), Observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement – OPEN, 147p
- Allibe B. (2009), Impact of comfort level on dwelling space heating energy demand: a retrospective and prospective study, Behavior Energy and Climate Change Conference - BECC 2009 – Washington DC, November 2009
- Allibe B., M-H.Laurent, D.Osso (2010), Modélisation thermique de l'habitat : d'un logement unique à l'ensemble du parc, International Building Performance Simulation Association – IBPSA, 9-10 November 2010, Moret sur Loing France, 8p
- Bonneau D., Rongère F-X., Covalet D., Gautier G.B. (1993), CLIM 2000, Modular software for energy simulation in buildings, IBPSA 3rd International Conference on Building Simulation, University of Adelaide Australia, Août 1993, 85-91
- Castet H., Sivadier C. (2003), PAPTER v4.1 : programme d'aide à un projet tertiaire. Outil d'avant projet sommaire, Etude PUCA Les systèmes énergétiques des bâtiments résidentiels de demain 19p
- Cayla J-M., Allibe B., Laurent M-H. (2010), From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption, ACEEE 2010, 15–20 août 2010, Pacific Grove – United States
- Cayla J-M., Maizi N., Marchand C. (2011), The role of income in energy consumption behaviour: evidence from french households data, Energy Policy, submitted
- Cayla J-M. (2011), Les ménages sous la contrainte carbone. Exercice de modélisation prospective des secteurs résidentiel et transport avec TIMES, Thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris
- CEREN (2007), Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie, Estimation des consommations de gaz à usage eau chaude sanitaire et cuisson, étude 7107, 21p
- CEREN (2009), Centre d'études et de recherches économiques sur l'énergie, suivi du parc et des consommations en 2008, étude 9102
- CGDD (2010), Modélisation économétrique des consommations de chauffage des logements en France, Commissariat Général au Développement Durable, Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable, Études & Documents, ISSN: 2102-4723, n°21, 22p
- Energie Demain (2010), <http://www.energies-demain.com>
- EPBD (2002), Directive 2002/91/EC on the energy performance of buildings
- Grenelle (2009), Environmental round table of the Ministry of Ecology and Sustainable Planning and Development, <http://www.legrenelle-environnement.fr/-Version-anglaise-.html?rubrique33>
- Giraudet L-G., Guivarch C., Quirion P. (2009), A model of the french residential demand for heating energy to evaluate the prospective impact of policy instruments, Austrian Association for Energy Economics 27p

- Haas R., Auer H., Biermayr B. (1998), The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating, *Energy and Buildings*, 27, 195-205
- Haas R., Schipper L. (1998), Residential energy demand in OECD-countries and the role of irreversible efficiency improvements, *Energy Economics*, 20, 421-442
- Haas R., P. Biermayr (2000), The Rebound Effect for Space Heating. Empirical Evidence from Austria, *Energy Policy*, 28, 403-410
- Healy J. D., Clinch J. P. (2004), Quantifying the severity of fuel poverty, its relationship with poor housing and reasons for non-investment in energy-saving measures in Ireland, *Energy Policy*, 32, 207–220
- Houdant N., Schram J. (2009), ENERTER: a tool to simulate housing energy consumption, European Council for an Energy Efficiency Economy - ECEEE 2009 summer study - Act! Innovate! Deliver! Reducing energy demand sustainably, 1-6 June 2009, Nice - France, 739-750
- IEA (2010), *World Energy Outlook 2010*
- Laurent M.H., Osso D., Mandrou P., Bouia H. (2006), Scénarios de rénovation du parc résidentiel à 2030 en France dans un contexte MDE, International Building Performance Simulation Association – IBPSA, 2-3 november 2006, La réunion - France (2006) 8p
- Laurent M-H., Allibe B., Osso D. (2011), Energy efficient technologies for all!: Testing the efficiency of an innovative conditional subsidy on refurbishment market, ECEEE 2011 submitted paper, 2-231
- Marchal J. (2008), Modélisation des performances énergétique du parc existant, ANAH, http://www.anah.fr/nos-publications/etudes/pdf/rapport_performances_energetiques.pdf
- Marchand C., Laurent M-H., Rezakhanlou R., Bamberger Y. (2008), Le bâtiment sans énergies fossiles ? Les bâtiments pourront-ils se passer des énergies fossiles en France à l'horizon 2050 ?, *Futuribles*, n°343, DOI : 10.1051/futur:200834379, 79-100
- Milne G., Boardman B. (2000), Making cold homes warmer: the effect of energy efficiency improvements in low-income homes, *Energy Policy*, 28, 411-424
- Ministry of Employment (2006), Ministry of Employment, Social Cohesion and Housing, Arrêté du 19 juillet 2006 portant approbation de la méthode de calcul Th-C-E prévue aux articles 4 et 5 de l'arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments, NOR SOC061626A
- Osso D., Bouia H., Mandrou P., Laurent M-H. (2007), Energy efficiency and CO₂ mitigation scenarios for French dwellings based on retrofitting and best energy demand technologies, European Council for an Energy Efficiency Economy – ECEEE'07 summer study - saving energy – just do it, 4-8 June 2007, Nice - France, 813-816
- Osso D., Allibe B., Laurent M-H. (2011), Demolition vs. refurbishment for the old homes: a regional cost-benefit analysis, European Council for an Energy Efficiency Economy – ECEEE 2011 - Energy efficiency first: The foundation of a low-carbon society, 6–11 June 2011, Presqu'île de Giens - France, submitted paper, 5-226
- Peeters L., De Dear R., Hensen J., D'haeseleer W. (2009), Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation, *Applied Energy*, 86, 772-780
- Promotelec (1995), *Locaux d'habitation, étude thermique et isolation*, 4th edition (1995) 144p
- Schuler A. (2000), Energy consumption for space heating of west German households empirical evidence, scenario projections and policy implications, *Energy Policy*, 28, 877-894
- Train K. (1985), Discount rates in consumers' energy-related decisions - a review of the literature, *Energy*, 10, 1243–1253
- Traisnel J-P. (2001), Habitat et développement durable – consommation de chauffage, bilan rétrospectif et prospectif, *Cahier du CLIP*, n°13, 5-71
- Traisnel J-P., Joliton D., Laurent M-H., Caffiaux S., Mazzenga A. (2010), Habitat Facteur 4 Étude d'une réduction des émissions de CO₂ liées au confort thermique dans l'habitat à l'horizon 2050, *Les Cahiers du CLIP* n°20, 104p
- Sorrell S., Dimitropoulos J., Sommerville M. (2009), Empirical estimates of the direct rebound effect : A review, *Energy Policy*, 37, 1356-1371
- Swan L.G., Ismet Ugursal V. (2009), Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1819-1835

Weiss, M., Junginger, M., & Patel, M. (2008). Learning energy efficiency—Experience curves for household appliances and space heating, cooling, and lighting technologies. Utrecht: Utrecht University.

Paper 2 - 231 - LAURENT

Energy efficiency for all! How an innovative conditional subsidy on refurbishment could lead to enhanced access to efficient technologies

Marie-Hélène LAURENT^a, Benoit ALLIBE^{a,b}, Dominique OSSO^a

^a : EDF-R&D, ENERBAT Dpt.
Site des Renardières – Avenue des Renardières
77818 Moret-sur-Loing cedex
FRANCE
Phone: 01 60 73 69 06
Fax: 01 60 73 73 15
marie-helene.laurent@edf.fr

^b : CIRED
Campus du Jardin Tropical
45 bis, avenue de la Belle Gabrielle

Keywords

Energy savings, residential building, retrofitting, energy policy, financial mechanism

Abstract

Many energy policies targeting the residential sector aim at transforming the energy efficiency market for housing refurbishment and new construction. As a consequence, the markets for high efficiency technologies are expected to shift their balance from “high price – low volume” to “low price – high volume”. There has been success with some refurbishment actions in terms of penetration rate but not, currently, in terms of lower prices. Most retrofitting actions have evolved in a different way: prices did not decrease and/or volume remained quite low, mainly limiting the access to energy efficiency to wealthy households. Therefore, such a market can be considered as globally energy inefficient: despite the high efficiency of installed technologies; the total amount of energy savings remains low due to the limited volume. Considering the inertia of building stock and the ambitious European targets for energy conservation, new kinds of measures have to be quickly found and implemented to stimulate this specific market.

In this paper, an innovative mechanism is proposed, based on a conditional subsidy (technology specific) depending on the sale price: for the same efficiency, the higher the price, the lower the level of subsidy. The impact of this incentive is studied by simulating French households’ choices between refurbishment options with an investment model that includes a capital cost limit depending on household income.

Results show that the conditional subsidy can lead to a rise in global efficiency of this market due to an increase in the penetration of energy efficiency retrofitting actions. The mechanism makes energy efficiency retrofitting actions more affordable for low and middle-income households while decreasing the amount of current subsidy. As it forces the market to lower prices, it could be a powerful tool to accelerate the transition from the existing subsidies targeting early adopters to the “no-subsidy” situation of technical norms (market reference). This study highlights the importance of considering the penetration potential of a technology (in a broad view, not only with respect to technology) and not just its unitary energy efficiency (per household or per equipment) to evaluate the energy benefits of a technology-specific energy policy.

Introduction

“The energy efficiency retrofitting market for housing doesn’t really exist today” Eric Langandré (Lagandré 2011)

In our “old countries” of Western Europe it is now assumed that the key to the energy efficiency of buildings is the energy refurbishment of existing stock, especially dwellings (Traisnel 2001). The retrofitting and maintenance of French housing represents an annual turnover of 62 billion Euro (inc. VAT, 2007) and business firms took up 60% of total volume (the remainder is Do It Yourself). Although the corresponding turnover is now close to that for the construction of new dwellings, this market is growing only slowly – no faster than national GDP (CAH 2004) over the period 1988-2007.

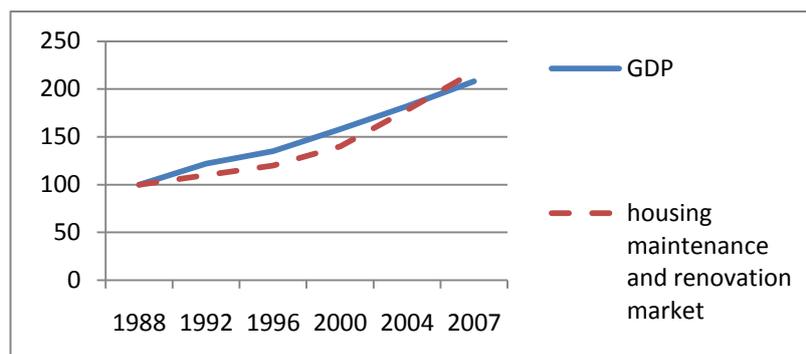


Figure 1: Comparison of growth in French housing maintenance and retrofitting market and national GDP over the period 1988-2007 (million of Euro ex. VAT) source: (CAH 2008). GDP: INSEE, housing maintenance and retrofitting market 1988-2004: MEEDAT-DAEI, housing maintenance and retrofitting market 2007: CAH.

In the overall housing retrofitting and maintenance market, actions with a potential impact on housing energy efficiency represent 10% to 30% of total turnover (according to various studies and their specific boundaries). Most retrofitting actions potentially improving housing energy efficiency are not (yet?) decided on for energy efficiency reasons (INSEE 2002). “The energy efficiency retrofitting market for housing doesn’t really exist today” (Lagandré 2011), it is only a “side effect” of the dwellings refurbishment market.

Depending on the kind and year of study, 3 to 3.7 million French households declared at least one retrofitting action with (potential) impact on energy efficiency (3.7 million in 2002 (ANAH 2004), 2.9 million in 2004 (CAH 2008), 2.5 million in 2007, but with specific OPEN study boundary (ADEME 2007)).

Corresponding market value estimates also vary depending on the kind and year of study (6 to 9 billion Euro in 2002 (ADEME 2001, INSEE 2002), 9 billion Euro in 2004 (CAH 2008), 13 billion Euro in 2006 (ADEME 2007), 15 billion Euro ex. VAT in 2008 (ADEME 2008)). This market turnover is growing. The periodic OPEN survey has been conducted twice with same boundaries; the change between the two studies (2006 and 2008) reveals that this increase is rather due to increasing unitary quality and action costs than to higher numbers of activities, but this conclusion is limited to this period.

Many barriers impeding the emergence of energy efficiency have been identified (SPRU 2000). Among these, information and availability of Best Available Technologies (BATs) as well as limited accessibility to capital seem to be the most important ones.

In order to help investment in efficient solutions and increase market volume, national and local financial incentives have been implemented during recent years:

- for more than 10 years: subsidies from national agencies¹⁹⁴ or local authorities,
- during the last decade: tax credit,
- more recently (2 years): a loan with a zero credit rate (soft loans with government bonus) called PTZ (Prêt à Taux Zéro = Loan with Zero Credit rate).

Tax credit is a percentage of investment cost, depending on the nature and efficiency of the retrofitting action considered. The psychological (and financial) impact of tax credit on the retrofitting market is real, especially for the French mentality. Unfortunately values of discount and conditions of award vary nearly every year (Figure 2), giving low visibility to households and players in the retrofitting market. Some examples of values available on January 2011 are listed in Table 1.

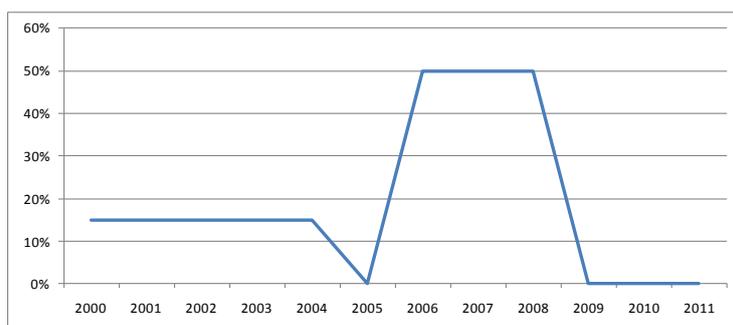


Figure 2: Changes in tax credit for air-to-air heat pumps during the last decade.

Table 1: Examples of conditions and rates of tax credit for refurbishment operations and the installation of efficient equipment by January 2011 (Ministry of Ecology, Sustainable Development, Transport and Housing 2011)

Thermal insulation	Tax credit	Conditions
Front and side walls	25%	$R \geq 2.8$ (m ² .°K)/W, existing housing, investment + installation
Floors with basement (all kinds)	25%	$R \geq 2.8$ (m ² .°K)/W, existing housing, investment + installation
Flat roofs	25%	$R \geq 3$ (m ² .°K)/W, existing housing, investment + installation
Roofs and (virgin or not) lofts	25%	$R \geq 5$ (m ² .°K)/W, existing housing, investment + installation

¹⁹⁴ ADEME: Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Energie, ANAH: Agence Nationale pour l’Amélioration de l’Habitat.

Windows	15%	wood frame: $U_w \leq 1,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, plastic frame: $U_w \leq 1,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, metallic frame/ $U_w \leq 1,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, existing housing, investment only
Heating and Domestic Hot Water (DHW) systems	Tax credit	Conditions
solar heating for DHW generation	50%	certification, existing and new housing, investment only
DHW heat pumps	40%	COP > 2.2, DHW generation only, existing and new housing
condensing boiler (all fuels)	15%	space heating and DHW generation equipment, existing housing, investment only
biomass	25% to 40%	efficiency $\geq 70\%$ (80% to 85 for wood-fired boilers), existing and new housing, investment only
air-to-water heat pumps	25%	COP > 3.4, space heating and DHW generation equipment, existing and new housing, investment only
geothermal heat pumps	40%	COP > 3.4, space heating and DHW generation equipment, existing and new housing, investment only
low temperature boilers and air-to-air heat pumps	0%	/

In the case of subsidies, amounts are fixed, but the basic philosophy is the same: these two first measures are dedicated to “step by step” refurbishment (single actions). It is now well known that global refurbishment has a better efficiency from both technical and financial points of view. It is the aim of the PTZ provision to encourage global refurbishments with at least two retrofitting actions at the same time. Since its launch, PTZ has been a real success but we are still a long way from national goals.

These three measures are not the only ones in the global French array dedicated to increasing energy efficiency in existing housing but they are important. Independently of how long they have been in existence, these schemes have led to an increase of market volume (cf. Fig. 1) but have not succeeded in decreasing costs. Surveys show that, during the last decade, prices in the retrofitting and maintenance market increased at 4% to 5% annually during the period 1998-2008 (Lagandré 2011). Inequality of access to this market for different households is obvious: 40% of turnover is realized with only 20% of wealthier households (60% of turnover with 40% of wealthier ones). Energy efficiency is a “luxury product”. The Figure 3 below shows that housing retrofitting and maintenance prices increased during the period 2000-2007 period, unlike national consumption prices.

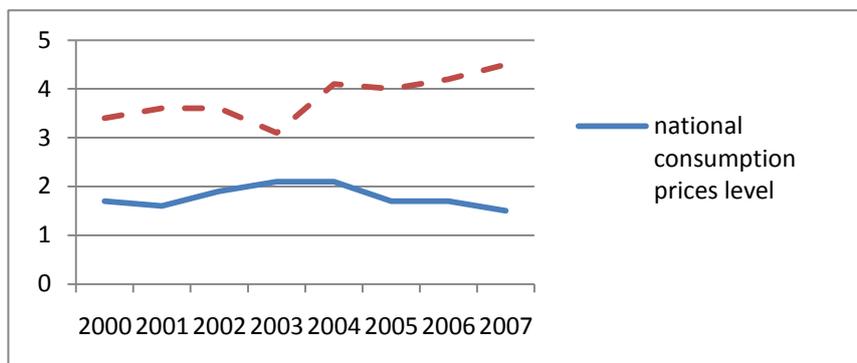


Figure 3: Comparison of growth in French housing maintenance and retrofitting prices and national consumption price indicators (values annual rates) over the period 2000-2008 (CAH 2008). French housing maintenance and retrofitting prices: MEEDDAT-DAEI, national consumption prices: INSEE.

We do not have figures on the specific energy efficiency retrofitting market but all surveys have noted that unitary prices increased significantly. As an example, average cost for solar thermal equipment (single family house, for people, 50 % needs coverage) rose from 4000 Euro in 2004 to more than 8000 Euro in 2008 (Enerzine 2008). It is obvious that part of the subsidies and tax credits were captured by market players.

Considering the very low rate of building stock renewal (especially for housing: less than 0.2% per year (Traisnel 2001)), retrofitting is the only way to sufficiently decrease residential energy consumption in order to meet the European and national targets for energy efficiency, decrease GHG emissions and increase renewable energy use by 2020. Existing measures are not sufficient and more innovative mechanisms have to be implemented. Until energy efficiency remains a “luxury product” for mass market, it will not be possible to achieve ambitious energy consumption decrease targets.

The subject of this paper is to propose and study the effects of a variable tax credit level depending on the unitary price of retrofitting actions. For a given efficiency, the higher the price, the smaller the percentage of tax

credit. This idea comes from direct taxes system: the higher the income, the higher the percentage of taxes. The idea is to force decrease of prices of the energy efficiency market for existing housing, and consequently to make possible access to efficient technologies for middle and low income households. For the same amount of public money (tax credit), impact on average costs and efficiency of retrofitting actions should be positive, increasing level of energy conservation compared to the existing system.

Nearly 2/3 of current energy consumption (CEREN 2009) in French housing (as in other European countries) is for space heating. Despite ambitious regulations for energy efficiency in future new dwellings and with no rise in current rates and efficiency of retrofitting, space heating will remain a major energy end-use in future housing due to the very low stock renewal rate. Consequently, this paper's work is limited to the study of space heating. The retrofitting actions considered are thermal insulation and space heating equipment replacement.

Current energy efficiency technologies and markets in the residential sector

Our description of technical actions is based on analysis of the OPEN survey, 2007 and 2009, that considered four kinds of retrofitting actions: roof insulation, windows and doors replacement, thermal insulation of walls, ceilings, floors and lofts, replacement of heating system. For each kind of action, three efficiency levels are available: basic, medium, optimum. Basic options mainly consist in equipment replacement with same kind of equipment and without improvement in energy efficiency. Household actions are packages (one action at least), but unitary actions can have various efficiency levels. Existing equipment before refurbishment is not described; consequently, it is not possible to know if heating system is replaced (or not) with same fuel. Fuel switching is possible but available data do not count it. The Table 2 below gives details of the assumed technical actions considered in our retrofitting market description.

Market rates and cost data assumptions are deduced from public OPEN reports. According to this survey, more than 2.5 million households declared that their housing had been energetically retrofitted (one or more actions) during the year 2007, representing more than 3.6 million actions of varying efficiency for that period (1.44 actions per retrofitted housing unit). Most of them (58%) had a poor (zero or basic) improvement in energy efficiency. Fortunately, the second survey (2009) shows that the unitary efficiency of retrofitting actions is improving, but the 2007 survey study is not presented in the same way as the 2007 results and it was not possible to build the same Table from the 2009 survey public data. The next Table 3 is a summary of ratios calculated from the 2007 data.

Table 2: Unitary refurbishment options according to OPEN classification (Erreur ! Signet non défini. & 2008)

(NB: "ThX" refers to performance levels according to French classification (Guide de la Fenêtre (2011))

Thermal insulation	Basic	Medium	Optimum
Wall insulation	1 surface (among walls, floor or ceiling)	2 surfaces	3 surfaces
Roof insulation	No insulation	/ (no medium case)	Thick insulation (20 cm)
Windows change	≤ Th7	Th8 to Th10	Th11
Heating system change	Basic	Medium	Optimum
Fossil fuels (oil, LPG, gas)	classical boiler	low-temperature boiler	condensing boiler
Biomass	Wood stove	Wood boiler or pellet stove	wood boiler + solar heating (*)
Electricity	electric heater (resistance, calorific fluid, bricks)	radiant electric heater or radiant electric floor	heat-pump (all kinds)

(*) not implemented in our model because of the unavailability of cost data

Table 3: Assumptions on technical actions, source: combination of OPEN public data, 2007 and 2009 surveys (ADEME 2007 & 2008). (*) optimum action cost only

2007	Roofs	Windows and doors	Walls, ceilings, floors and lofts	Heating system changing
Retrofitting actions (yearly total volume)	577,000	1,394,000	800,000	863,000
Basic (%)	72 %	48 %	68 %	56 %
Medium (%)	0 %	44 %	22 %	31 %
Optimum (%)	28 %	8 %	10 %	13 %
Total cost per action (million € without taxes)	/ (*)	5880	1640	3920
Unitary cost (€ without taxes)	8235 (*)	4218	2050	4542

3. How can the energy efficiency market in housing and the impacts of policy measures be modelled?

An accurate model must describe the existing situation, retrofitting market commercial offers and household decisions in a realistic way. Aspects to consider for these two points are listed in the Table 4 below.

Table 4: Energy efficiency housing retrofitting market ingredients

Commercial offers characteristics	Household responses
Annual rates	Energy service and equipment needs
Unitary costs	Investment choices
Efficiency	Daily behaviour changes after retrofitting

Current modelling of the impact of policy measures uses either *top-down* (e.g. for carbon tax, ETS¹⁹⁵) or techno-economical *bottom-up* (e.g. for tax credit, PTZ) models. It seems to us that *top-down* models, based on past market observation are not well adapted to precisely describing the transformation of such a market and its response to new policy measures. We are convinced that techno-economical *bottom-up* models are more appropriate. Most of these are based on the famous “households’ rational economic choice”, even if various financial indicators (BET, NPV, IRR)¹⁹⁶ are used. According to these models, households choose between technological options that are characterized by average price and unique performance factors (per action or per m² for thermal insulation). However, such a mechanism lacks realism regarding two aspects (at least):

- **capital constraints for low or middle-income households:** even if an energy-efficient investment is more valuable than the reference technological option, it is possible that a low-income household cannot afford such a high investment because the additional initial cost is too high compared to the reference choice.
- **technology price heterogeneity:** in most policy simulation models¹⁹⁷ there is a single price for a given technology. However, on-site studies (such as conducted by EDF R&D (Suerkemper et al. 2011)) show that there is a significant heterogeneity of prices for a given technology and a given performance level.

Consequently, we have tried to take (at least) these two points into account in our model.

We are only interested in housing stock existing in 2010. Even if new construction will represent 10 million more principal residences by 2050, these will have very low energy consumption, especially for space heating. Many studies have now demonstrated that the bulk of energy savings in the buildings segment are to be made in the existing stock. Thus, this paper is focused on currently existing buildings (Traisnel 2001). By 2050, a small part of the stock existing in 2005 (1 million) will be demolished. Renewal is very low and only 20,000 to 30,000 principal residences are yearly leaving the stock. Re-affectation rates (tertiary to housing, holiday home to principal residence and so on) are supposed balanced, which is close to the current reality in France.

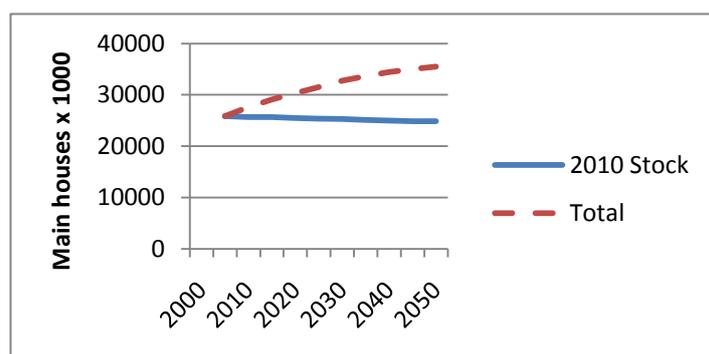


Figure 4: Projected demography of French main housings 2005-2050 (Traisnel et al. 2010).

Annual retrofitting action rates

The last part of dwellings will be (partly) renovated. Our simulation is based on refurbishment rates. We consider that each part of the building envelope and the energy equipment has a limited life. Each action lifetime

¹⁹⁵ Emission Trading Scheme.

¹⁹⁶ BET: Break Even Time, NPV: Net Present Value, IRR: Internal Rate of Return.

¹⁹⁷ except the CIMS model (Canadian Integrated Modelling System) where price heterogeneity contributes in a non-explicit way to the market heterogeneity variable, see Van Oel et al. (2009).

is determined using empirical data from OPEN (ADEME 2007 & 2008). These are “revealed” lifetimes, deducted from market rates, and not theoretical ones. They are mainly in accordance with the lifetimes chosen in the French ESC (Energy Saving Certificates) scheme¹⁹⁸. They are compatible with current French refurbishment activity. For instance, roof thermal insulation has to be (even in part) refurbished every 36 years, boiler (and other space heating equipment) lifetime is 24 years. For thermal insulation actions, calculated lifetimes seem to be smaller than real envelope lifetimes (for example, we calculated the realised lifetime of a window to be 16 years, even if it would actually last at least 30 years). This is an effect of the incompleteness of retrofitting actions. Only a part of all windows are replaced at any one time (about 50%?). This limitation of the “depth” of observed retrofitting actions is taken into account in the model. On the other hand, space heating equipment replacements – that cannot be done partially – are credited with quite a long “revealed lifetime” of 24 years, compared with the equipment lifetimes declared by manufacturers, which are closer to 20 years for boilers and heat pumps.

OPEN data are better available for single family housing than for multi-family houses. However, in order to limit computing time, we consider that lifetimes are the same for single and multi-family houses and for all kinds of heating equipment and systems (individual or collective ones).

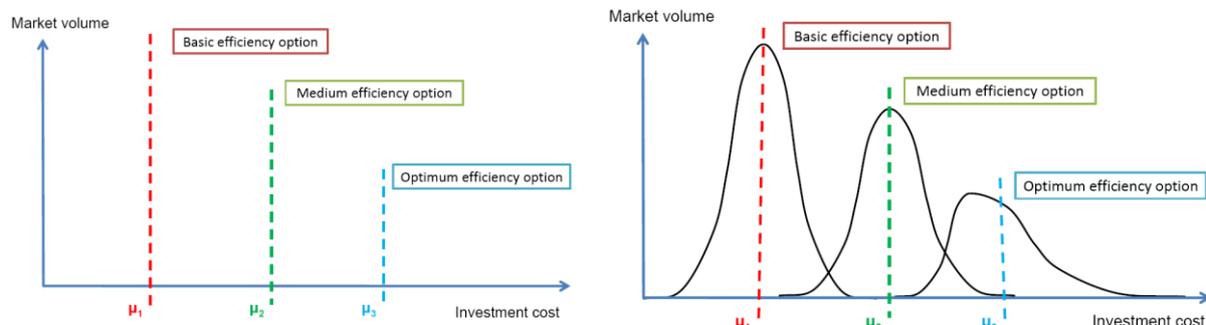
Table 5: “Revealed lifetimes” of retrofitting actions, authors’ calculations from (ADEME 2007 & 2008)

Thermal insulation of building envelope	Revealed lifetimes
Same for single and multi family houses	
Roof	36 years
Wall (internal insulation)	26 years
Façade (external insulation)	68 years
Windows	16 years
Space heating equipment replacement	
Same for all heating systems	24 years

At the beginning of the simulation, remaining lifetimes are randomly attributed to each part of every dwelling in the stock. Then, at each time step of the projection, the time step is deducted from the remaining lifetime. If this new remaining lifetime is less than 0 then the “dead” part of the building (envelope and systems) has to be refurbished. Optimized investment models favour very efficient retrofitting actions and lead to decreasing annual retrofitting rates that are not compatible with actual building retrofitting activity and not realistic. In contrast to this, our model leads to a constant refurbishment flow over time, which equals currently observed refurbishment flows. Every time the lifetime of a component comes to its end, the “occupant-household” (or “owner-renter”) has to make an investment decision. They have the choice of the three OPEN efficiency options (including poor efficiency ones).

Unitary costs

Average costs per energy efficiency option are taken from OPEN data (ADEME 2007 & 2008). In most current modelling, there is only one cost considered per energy efficiency option as described in Figure 5 (left). In our model, diversity of retrofitting costs is taken into account in the way described in Figure 5 (right).



¹⁹⁸ French ESC system: obligation addressed to electricity, gas, fuel, heat and cooling suppliers on the domestic and non-domestic market (excluding industry) to organize energy savings programs for energy consumers; or to buy certificates from programs organized by others players. The “white certificate” is the proof of the action.

Figure 5: Classical way of representing offer costs (left) and assumptions for the representation of cost diversity of three investment options (right) in paper study, μ : average cost value of each option.

Among the three energy efficiency levels, high-efficiency commercial offers (BATs) are the best studied because they are composed of actions opening rights to subsidies, tax credits and Energy Saving Certificates (ESC: “white certificates”). For a given level of (high) energy efficiency, cost dispersion is important, dissymmetric and organized with log-normal curve (cf. Figure 6). It is also very varied, and we observe a “dispersion indicator” (σ/μ) varying from 0.3 to 1, according to different retrofitting actions.

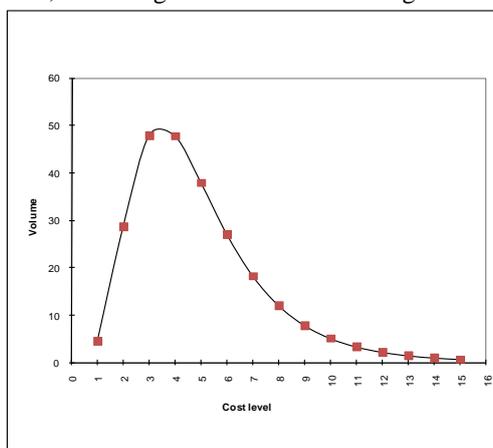


Figure 6: Histogram of observed costs of efficient retrofitting actions (source: EDF R&D).

Table 6: Assumptions for relative levels of cost offers and dispersion (σ : standard deviation, μ : average)

Energy efficiency option level	μ relative level	dispersion: σ / μ (absolute values)	dissymmetry
basic	1	0.1	no
medium	1.2	0.2	no
optimum	1.5	0.3 to 1	yes

For this study, average costs and cost distribution do not change with time: there are no learning curve effects. This assumption is obviously unrealistic, but we do not realize an energy demand forecasting study but a work focused on the impact of modeling of the heterogeneity of the energy efficiency market price on evolution of energy demand. A loop mechanisms will be introduced in future versions of the model in order to integrate average costs and cost distribution change.

Energy efficiency of heating equipments and thermal insulation actions

Equipment and thermal insulation efficiencies are based on the French Energy Performance Certificate (EPC) physical model and data. But housing energy consumption decrease after retrofitting does not rely only on physical and normative calculation as EPC ones. Current EPC energy consumption calculations for space heating are quite different from the reality, especially for existing dwellings, and have to be improved. In previous works (Allibe et al. 2010), we have highlighted a relationship between “intensity of use” of space heating equipment (ratio between space heating consumption calculated by the standard method and the real consumption) and the percentage of annual income of households concerned dedicated to the “theoretical space heating annual bill” (calculated with standardised consumption from EPC estimation). The construction of this relationship is based on a detailed behavioural description or a budget share dedicated to space heating considerations. These enhancements were made by using cross-sectional and time series data. They allow account to be taken of behavioural aspects such as “rebound effect”. The relationship is unchanged throughout the period of projected calculations (2010-2035).

For the same reasons as for the evolution of average costs and cost distribution do not change, there is no “natural technical progress”. Energy efficiency actions remain the same from 2010 to 2035.

Investment model

Although many approaches have been attempted to model energy efficiency investment, none appears currently really satisfactory. Bibliography reveals that the attempts to model household investment behaviour are made at a general or individual level.

At a general level, the only possibility is to observe past trends:

- either at household level, by calculating long-term elasticity (Vielle 2007), i.e. by connecting the variation in an installation rate (or the sales flow) of a certain type of energy equipment with the variation in macro-economic parameters (energy prices, wealth of households, subsidy rate)
- or by using past distribution curves (Weiss et al. 2009; Singh et al. 2010) of equipment that we think was in the same situation as that we intend to model.

However, this method does not explain household motivations and suffers from the same defects as *top-down* models that are based on past observation. A more explicit method would be better suited to our needs. A sum of individual behaviours (*bottom-up* approach) is probably more advisable. We are therefore interested in modelling individual purchasing behaviour.

At the individual level, the preference of a household can be evaluated by three different methods (Van Oel et al. 2009):

- the preferences already observed in the past (studies on past actions) – but we have already said that methods based on past observation are not suited to modelling transformation of observed phenomena,
- preferences stated during surveys during which investment suggestions are made (Bataille et al. 2006) – but studies have shown important gaps between declared behaviours and real ones (Cayla et al. 2010).
- and finally, theoretical preferences represented by an economic calculation considering that the purchase of equipment and refurbishment are financial investments, which is more a premise than an observation (Wittmann et al. 2006).

Many studies confirm the disconnection between the “merit order” of purely financial profitability indicators and household choices in terms of equipment and energy refurbishment (Jaffe et Stavins 1994; Laurent et al. 2009). It is necessary to use “impure” or limited financial indicators or to combine them with a diversified representation of households (by choosing different indicators depending on the type of household or by giving different values to certain variables used to calculate a single financial indicator, always depending on the type of household). Applying these conditions made it possible to obtain interesting projection results that are significantly different, detailed and pertinent compared to those obtained using representative averages from the same households studied (Cayla et al. 2007).

Among many existing proposals for financial indicators: *annual global cost* (Journi 2010), *limited minimum NPV* (Van Aerchot and Glanchant 2009), *limited capital cost* (WBCSD 2009), *added hidden costs* (Amann 2006; Urge-Vorsatz et al. 2009), we have currently chosen an “NPV model” with limited “authorized” capital cost. The Net Present Value (NPV) is the total present value (Euro) of a time series (n) of discounted (a) net cash flows (CF_i):

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{CF_i}{(1+a)^i} \quad (\text{eq. 1})$$

NPV is able to compare different investments projects on basis of volume of expected profit. As NPV gives the level of magnitude of the profit indicator, it avoids calculation of global annual cost. Ranking of retrofitting actions should be the same with NPV calculated without discounting and global annual cost. NPV is a better indicator than payback time because of its monetary unit (versus time) and it allows the representation of household preferences for the present or future (using a discount rate) as well as its intuitive anticipation of future evolution of energy prices and energy consumption.

Parameters of economic calculations applied to household technical choices have been the subject of debate for decades (for instance regarding implicit discount rate and how it explains the energy efficiency gap). Ours are described in next paragraphs.

Growth rates of oil and natural gas prices are calculated according to the fossil fuel price assumptions in the *Current Policies Scenario of the World Energy Outlook 2010 for the year 2035* (IEA 2010a). As there is no appropriate study available in which future electricity prices in France are estimated, it is assumed that future electricity prices will follow the development of electricity prices in France between 1990 and 2009 (IEA 2010b). For wood, it is assumed that prices will increase in future according to price inflation in France between 2003 and 2008 (Pégase 2010; Suerkemper et al. 2011).

Table 7: Assumed future growth rates of energy prices (source: (IEA 2010a & 2010b), except for wood: (Pégase 2010; Suerkemper et al. 2011).

	Electricity	Gas	Oil	Wood
Annual growth rate of energy prices (%/year)	0.30	2.59	3.14	2.51

Despite a very important dispersion of discount rate values revealed in the bibliography, it is chosen as invariable at 11%, based on the range of literature dedicated to behaviourally realistic technical choices for space heating (Sadler 2003).

Capital cost (or access to capital) is defined as *limited* because households' capability of investing in BAT solutions is restricted. When it is time to invest (end of the average revealed lifetime), we consider that households face one offer from each energy performance option (so three different offers). The cost of each offer is randomly determined within each cost curve (see Figure 5 right).

At the time in question, investment is an obligation (boiler is broken, or roof is leaking). The reference offer is considered to be basic (what some authors call "anchor point" (Wilson and Dowlatabadi 2007), so $Cost_{ref}$ is the one corresponding to NPV_{basic} . Our model limits the household's investment capability in solutions with better NPV than NPV_{ref} ($=NPV_{basic}$) on the basis of a criterion of maximum extra cost between $Cost_{ref}$ and the cost of better NPV solutions. The extra cost cannot exceed X% (let say 10% for instance) of annual household income. Limitation is more on extra cost than on cost in itself.

Following that mechanism, Figure 7 shows the case of two households with different levels of wealth: the larger extra cost permitted to the wealthier household allows it to buy a more efficient solution (belonging to the medium option family). On the other hand, the less wealthy household can only afford a basic option solution (dashed red surface).

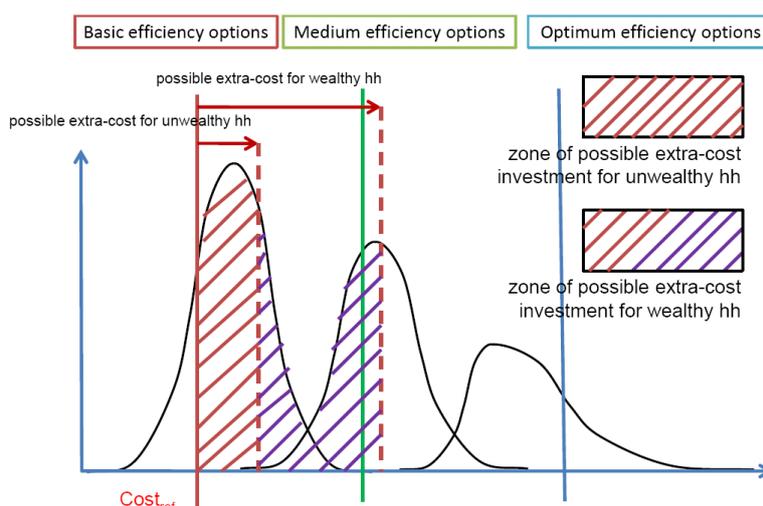


Figure 7: Extra-cost investment limitation: comparison of two households of different wealth.

Despite this example and in contrast to modelling with unique average prices per option, taking account of offers cost dispersion globally allows more "low-income" households to invest in high efficiency solutions of the medium option and gives "less artificial" results.

The “constrained best NPV” investment criterion analysis and the fact that investments are not made when they can lead to financial benefit but when they are needed (i.e. at the end of the average revealed lifetime), make our model a compromise between an economical driven model and a purely technological one.

Policy mechanisms studied

In order to increase the growth in efficient solutions, actions belonging to the optimum option open rights to public funding like tax credit, subsidies and soft loans.

Tax credit is a financial subsidy, currently calculated as a percentage of initial cost. This percentage is fixed and doesn't depend on cost level. Its effect is to “move” all optimum option costs lower as indicated in Figure 8.

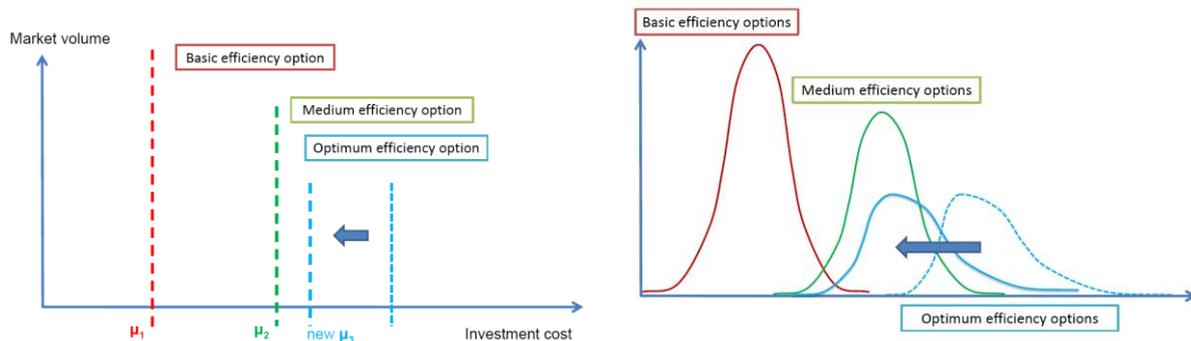


Figure 8: Impact of fixed % tax credit on optimum option costs, with average costs (left) and distributed costs (right).

In both representations, tax credit permits optimum option solutions NPVs to be close to medium solutions ones. In the same way, tax credit makes sure that NPVs merit order is according to efficiency ranking: $NPV_{\text{optimum}} > NPV_{\text{medium}}$ and $NPV_{\text{optimum}} > NPV_{\text{basic}}$. However, market modelling with distributed costs allows a wider access to more efficient (consequently, better penetration) solutions.

We propose to study a mechanism that moves more optimum option costs to the left with a variable percentage of tax credit, depending on the cost of the respective solution. The least expensive quartile of a solution is more subsidised than the two centre quartiles and even more so than the most expensive one. The mechanism follows equation 2:

$$\text{final Price} = \frac{100 - \text{tax credit} * (1 \pm \text{asymmetryratio})}{100} * \text{market price} \quad (\text{eq. 2})$$

with : Final price: final price for household (inc. VAT and tax credit).

Tax credit: average percentage of subsidy (% tax rebate).

Asymmetry ratio: ratio of asymmetry between subsidies allocated to the 1st (positive sign before asymmetry ratio) and 4th quartile (negative sign before asymmetry ratio).

Market price: market price before any subsidy (inc. VAT).

For instance, if on average the tax credit were 25%, the first quartile will be subsidised between 25% (asymmetry ratio=0) and 50% (asymmetry ratio=1), the second and third at 25% (unchanged) and the last will have between 0 (asymmetry ratio=1) and 25% (asymmetry ratio=0) subsidies. Option 3 cost progression with such a mechanism is shown in Figure 9.

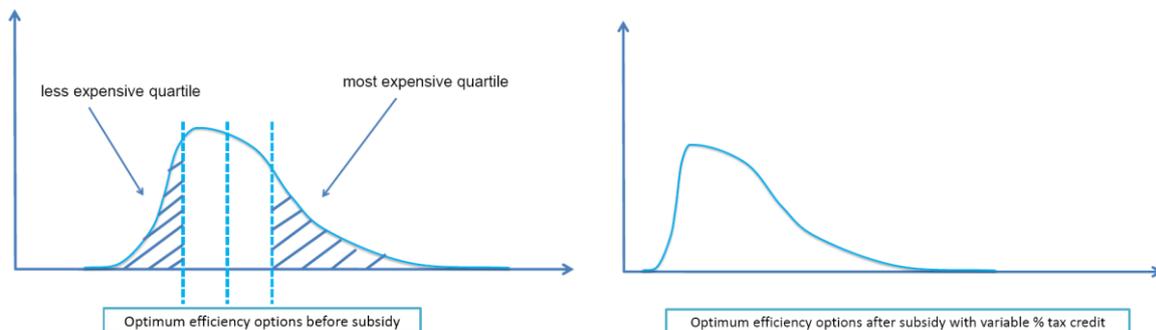


Figure 9: Progression of optimum option costs with variable % tax credit.

Among the three option levels studied, optimum option costs are now close to those of medium and even basic options.

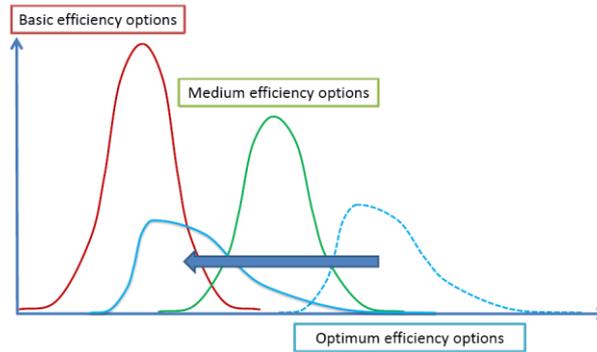


Figure 10: Progression of all options costs with variable % tax credit applied on optimum solution costs.

Results

Impact of market cost heterogeneity

A sensitivity analysis has been conducted regarding price heterogeneity of the better performing options (No. 2 and 3) in the case of a non-subsidy scenario (Figure 11 below). As predicted by Figure 7 (extra costs) and Table 6 (relative levels of cost), our simulation results highlight the fact that the higher the price dispersion, the more balanced are the market shares between options. Two facts have to be noted:

- first, even with no price dispersion, option 2 has a small market share. This means that the additional cost of some options 2 are compensated by energy gains even when there are no subsidies. This result could be understood as a contradiction to a rule of our model make households not to invest in options even if energy efficiency gains set off costs because of capital constraints. But investment is not driven by financial profitability. Investment is an obligation due to housing part obsolescence. When tile to invest has coming, households must do it and chose the best financial option between several offers. This apparent contradiction is due to the nature of hybrid models: by construction, they are made of compromises.
- the second fact is that, above a certain level of dispersion, simulated market shares of most efficient options do not grow any further. This can be interpreted as the meeting of demand for cost-effective energy efficient refurbishments at current market prices.

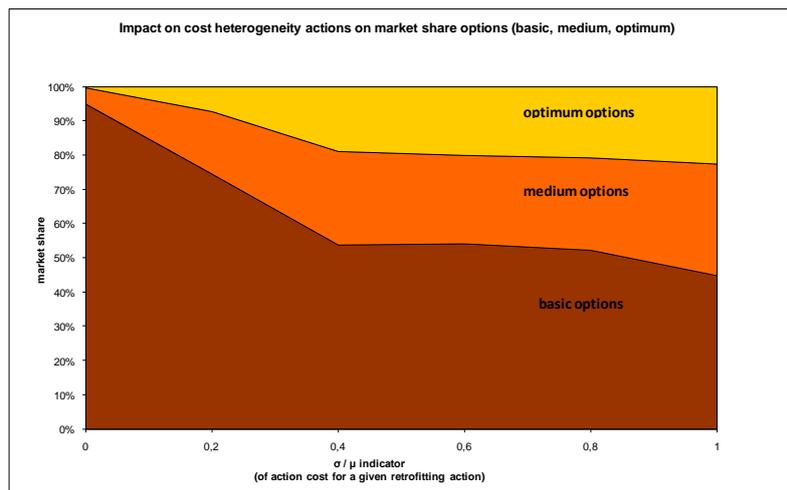


Figure 11: Impact of cost heterogeneity actions (without any subsidy) on market share of the three options.

Impact of asymmetry factor on national energy savings due to energy efficiency

Table 8 presents the effect of asymmetry ratio on the amount of residential space heating energy savings in France over the period 2010-2035. Simulations have been carried out using three capital constraint levels (5%, 10% and 15% of annual household income), two levels of asymmetry ratio (0 for classical subsidy that does not

depend on price quartile, and 1 for a double subsidy for the less expensive option 3 price quartile and 0% subsidy for the most expensive quartile), with an average 25% subsidy and a 0.4 price dispersion for most efficient refurbishment options. Results show a positive effect of asymmetry ratio on space-heating energy consumptions decrease, i.e. if the less expensive part of the most efficient refurbishment receives higher subsidy (in this case, 50%) then the national energy consumption is expected to decrease 7% more than with flat subsidy (25% for every option 3).

Table 8: Impact of asymmetry ratio on expected national energy consumption reduction on the 2010-2035 period

Capital constraint	5%	10%	15%
national energy savings variation (in %) over the period 2010-2035 when switching asymmetry ratio from 0 to 1	7.1%	7.7%	7.3%

Discussion

This article has presented the influence of two household technological choice modelling parameters on efficient technologies diffusion: capital constraint (under the form of a maximum additional cost that can be paid for efficient refurbishments instead of basic refurbishments) and refurbishment price dispersion (instead of using average values). It has been shown that both play a significant role in the construct of energy efficiency technology penetration. The conceptual framework that has been developed is based on literature review and expert judgments. However, many questions are still open and need to be further investigated and compared against real observations to be validated. For instance, price picking in the price distribution of each option has been chosen as random but it could be argued that low (high) prices will be proposed by the installer to low (high) income households. Further work is thus needed to validate this mechanism.

This model also does not (yet) take into account the heterogeneity of decision makers: all kinds are supposed to have the same investment behaviour. This is obviously unrealistic, even if owner-renters can choose a basic retrofitting option that is supposed not to improve energy efficiency of the housing, the model does not “force” them to this investment solution. Thus, heterogeneity of investment deciders has to be implemented in the next model version.

Regarding the efficiency of the policy tool that has been presented, numerical results can appear as moderate regarding energy impacts. However, this is partly due to the fact that neither the response of the refurbishment market nor technological learning have been modelled. It is also to be noted that every energy reduction percent obtained through this tool represents a gap decrease between what low and mid-income households can afford and what efficiency oriented policies try to promote. In the “true world”, a reaction of the refurbishment market is expected as the presented policy tool is able to give a strong signal for a combined effort on performance (through minimum requirements) and price (through progressive reduction of subsidies for the most expensive refurbishment that matches a minimum requirement). A major interest of a conditional subsidy scheme is that it provides a medium for both energy performance and cost-effectiveness debates between sector stakeholders, and particularly when deciding the technologies that have to be the technological norms of tomorrow (thus requiring a societal benefit). As current years are marked by two major constraints, public finances and climate issues, such a tool could be a medium to animate private-public debate about the ways to diffuse cost-effective technologies, or almost cost-effective ones, not just to wealthy households but to everyone in order to take a real, large-scale advantage of energy-efficiency, aligning the interests of public finances, household savings and green employment.

Conclusion

Considering the inertia of housing stock refurbishment and the ambitious European targets for energy conservation, energy efficiency is now an emergency in the residential sector and especially regarding space heating energy consumption. In order to have deeper insight into both technical and economic efficiency of efficiency oriented policies, a dwelling stock model has been developed. It represents the refurbishment market (performance and prices), dwelling stock performance (equipment and building shell) and household refurbishment investment rationale in a way that depicts a large diversity of market situations (confrontation of a household’s economic interest with a suitable technical offer). This objective led us to use two modelling parameters that are not commonly used: an explicit capital constraint for households and an explicit representation of price heterogeneity for equipment of same technical performance.

In this modelling framework, an innovative conditional subsidy scheme has been modelled and tested. This mechanism combines two potential levers to facilitate the transition from a highly efficient innovation to a

technical norm if the innovation is considered as having the potential to reach cost-effectiveness for the majority of households. These two levers are visible prices (for households as well as for public-private debate) and an incentive structure that encourage less expensive equipment for a given technical performance. In this way, this structure pushes towards more cost-effective investment of public finances and more affordable equipment for lower-income households.

Glossary

ADEME: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ANAH: Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat
BAT: Best Available Technology
BET: Break Even Time
CIMS: Canadian Integrated Modelling System
EPC: Energy Performance Certificate
ESC: Energy Saving Certificates ("white certificates")
ETS: Energy Trading System
GDP: Gross Domestic Product (in Euro)
GHG: Green House Gas
IRR: Internal Rate of Return
LPG : Liquefied Petroleum Gas
NPV: Net Present Value
OPEN: French national survey of refurbishment market carried out by ADEME.
PTZ: "Prêt à Taux Zéro": loan with credit rate at zero (soft loans)
VAT: Value Added Tax

Acknowledgments

This work was done with the support of ECLEER (European Centre and Laboratories for Energy Efficiency Research). J-M.Cayla from EDF-R&D is gratefully acknowledged for providing the household enquiry.

References

- Allibe, B., Osso, D., Laurent, M.-H. (2010) Modélisation thermique du chauffage individuel : d'un logement unique à l'ensemble du parc, 2010 IBPSA France Conference, 9-10 November, Les Renardières, France
- Amann J.-T. (2006), Valuation of non energy benefit to determine cost-effectiveness of whole-house retrofit program ; a literature review, May 2006, ACEEE report number A061
- ANAH (2004), Observatoire de l'habitat existant, FFB/ANAH
- ADEME (2001), Enquête Sofres-ADEME, Bilan 2000, Maîtrise de l'énergie, attitude et comportement des particuliers – note de synthèse, 42p
- ADEME (2007), Observatoire Permanent de l'amélioration Energétique du Logement (OPEN), Résultats de la campagne 2007, ADEME, BIIS, CAH, 28 p
- ADEME (2008), Observatoire Permanent de l'amélioration Energétique du Logement (OPEN), Campagne 2009, Résultats 2006/2008, ADEME, BIIS, CAH, 28 p
- Bataille C., Jaccard M., Nyboer J., Rivers N. (2006), Towards General Equilibrium in a technology-rich model with empirically estimated behavioural parameters. *The Energy Journal*, 2006, vol. Hybrid Modelling, Special Issue #2, 93-112
- CAH (2004), Marché de l'amélioration de l'habitat : Données chiffrées - 17 Juin 2008, Club de l'amélioration de l'habitat, 6p
- CAH (2008), Les chiffres du marché, CAH, 25/06/2008
- Cayla, JM., Maizi, N., Marchand. C., Assoumou. E. (2007), Households under Carbon Constraint and the Burden Sharing Issue, *International Energy Workshop*, Venice, June 2007
- Cayla J-M., Allibe B., Laurent M-H. (2010), From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption, ACEEE 2010, 15–20 august 2010, Pacific Grove – United States
- CEREN (2009), Centre d'Etudes et de Recherches Economiques sur l'Energie, Suivi du parc et des consommations en 2008, study n°9102

- Energine (2008), Solaire thermique : l'Ademe fait le point <http://www.energine.com/1/6441+solaire-thermique---lademe-fait-le-point-3+.html> (quoting EurObserv'ER : <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/sig.asp>)
- Guide de la fenêtre (2011), http://www.guide-de-la-fenetre.com/fenetre_tout_comprendre/aev_label_fenetre
- IEA (2010a). World Energy Outlook 2010
- IEA (2010b). Energy prices and taxes. Quarterly Statistics, Second Quarter 2010
- INSEE (2002), Enquête Logement 2002-fichier détail, CD-Rom
- Journi H. (2010), "Approche par le coût global et nouveaux mécanismes de financement appliqués au cadre bâti", oral presentation in : Première rencontre « économie et développement urbain durable », 23 January 2009, Paris
- Jaffe A.B., Stavins R.N. (1994), The Energy Efficiency Gap: what does it mean?, *Energy Policy*, 22, 804-810
- Lagandré E. (2011), Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat (ANAH), personal communication
- Laurent, M-H., D. Osso, E.Cayre (2009), Energy savings and costs of energy efficiency measures: a gap from policy to reality?, European Council for an Energy Efficiency Economy – ECEEE'09 summer study – Act! Innovate! Deliver! Reducing energy demand sustainably, 1-6 Jun 2009, Nice, France, 571-581
- Ministry of Ecology, Sustainable Development, Transports and Housing (2011), Le crédit d'impôt dédié au développement durable, 12 January 2011
- Pégase (2010), Pétrole, Électricité, Gaz et Autres Statistiques de l'Énergie, <http://www.statistiques.equipement.gouv.fr>
- Sadler, M. (2003), Home energy preferences & policy. Applying stated choice modelling to a hybrid energy economy model, Research project for the degree of Master of Resource Management, Simon Fraser University, 2003
- Singh, H., Muetze, A., Eames, P.C. (2010), Factors influencing the uptake of heat pump technology by the UK domestic sector, *Renewable Energy*, 35, 873-878
- SPRU (Science and Technology Policy Research), (2000). Reducing Barriers to Energy Efficiency in Public and Private Organizations. Brighton
- Suerkemper F., S.thomas, D.Osso, P.Baudry (2011), Cost-effectiveness of energy efficiency programmes - evaluating the impacts of a regional programme in France, *Energy Efficiency*, accepted (2011), 19p
- Traisnel J.-P. (2001) Habitat et développement durable-consommations de chauffage, bilan rétrospectif et prospectif, *Les Cahiers du CLIP*, n°13 (2001) 5-71
- Traisnel J.-P., Joliton D., Laurent M-H., Caffiaux S., Mazzenga A. (2010), Habitat Facteur 4 Étude d'une réduction des émissions de CO₂ liées au confort thermique dans l'habitat à l'horizon 2050, *Les Cahiers du CLIP*, n°20, 104p
- Urge-Vorsatz D., A. Novikova, M. Sharmina (2009), Counting good: quantifying the co-benefits of improved efficiency in buildings, European Council for an Energy Efficiency Economy – ECEEE'09 summer study – Act! Innovate! Deliver! Reducing energy demand sustainably, 1-6 June 2009, Nice, France, 185-195
- Van Aerchot C., Glachant D. (2009), Energy efficiency in buildings: the road to a real market transformation European Council for an Energy Efficiency Economy – ECEEE'09 summer study – Act! Innovate! Deliver! Reducing energy demand sustainably, 1-6 June 2009, Nice, France, 259-270
- Van Oel, C. J., A. Bogerd, and G. J. De Haas (2009), Occupant-owner preferences in decision making of low energy refurbishment concepts, presented at European Conference on energy and behaviour, October, 18th/19th, 2009
- Vielle, M. (2007) Les déterminants économiques de la demande en énergie du secteur résidentiel, report for EDF R&D, ORDECSYS
- WBCSD (2009), Transformer le marché, EEB project of World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), June 2009, 67 p
- Weiss, M., Dittmar, L., Junginger, M., Patel, M.K., Blok, K. (2009), Market diffusion, technological learning and cost-benefit dynamics of condensing boilers in the Netherlands, *Energy Policy*, 37, 2962-2976
- Wilson, C., H. Dowlatabadi, 2007, Models of Decision Making and Residential Energy Use, *Annual Review of Environment and Resources*, 32, 169-203

Wittmann, T., R. Morrison, J. Richter and T. Bruckner (2006), A Bounded Rationality Model of Private Energy Investment Decisions, in: Proc. of the 29th IAEE International Conference: Securing Energy in Insecure Times, Potsdam (2006)

Paper 5-226 - OSSO

Demolition vs. refurbishment for the old houses: a regional cost-benefit analysis

Dominique OSSO^a, Benoit ALLIBE^{a,b}, Marie-Hélène LAURENT^a

^aEDF-R&D, ENERBAT Dpt.
Site des Renardières – Avenue des Renardières
77818 Moret-sur-Loing cedex
FRANCE
Phone: 01 60 73 61 45
Fax: 01 60 73 73 15
Dominique.osso@edf.fr

^bCIRED
Campus du Jardin Tropical
45 bis, avenue de la Belle Gabrielle
94736 Nogent-sur-Marne Cedex
Tél : 01 43 94 73 73
Fax : 01 43 94 73 70
allibe@centre-cired.fr

Abstract

Cost effectiveness of the energy efficiency measures for the building stock is clearly a keypoint to reach the Green House Gas (GHG) mitigation and energy consumption decrease targets in France. In this frame, for the old and inefficient houses without heritage value (e.g. 3 millions in France built from 1949 to 1974), the question of demolition vs. refurbishment arises.

Actually, the refurbishment of old houses is helpful to enhance their efficiency, but if new small multi-storey residential buildings replace them, this could lead to added energy savings due to advanced thermal efficiency as well as promoting sufficiency with the limited dwelling surface per inhabitant and reducing urban sprawl. Moreover, some co-benefits are expected like reduced individual car travelling, and decreasing real estate market pressure allowing access to low or mid-income households.

In this paper, we present a local cost-benefit analysis from a societal viewpoint with:

- Energy savings due to refurbishment vs. energy consumption of the new built dwellings depending on location,
- Cost of retrofitting vs. cost of demolition and construction of the flats depending of the real estate market,
- Assessment of co-benefits: reducing car transportation, access to new building market in chosen area...

For this purpose, we used data from a recent survey on 2012 French representative households together with other data provided by national statistics agency.

Finally, we evaluate the interest of local urban planning to reduce GHG emissions and energy consumption by replacing old houses by new multi-family building in dense peri-urban areas.

Introduction

It is usually assumed that drastic energy savings in dwellings can't be achieved without strong retrofitting programmes. Consequently, there are a lot of reasons to study efficiency of retrofitting actions and renewable technologies for existing buildings. However, energy efficiency regulation for new building became more drastic over time as claimed by the EPBD¹⁹⁹ directive. In France the next building code revision will be in enforcement in 2012 and requires that new residential buildings present specific consumption under 50 kWh_{pe}/m² in primary energy (pe) for the main end-uses (space heating, sanitary hot water, lighting and ventilation). Unfortunately, the amount of destructed old buildings (assumed to be replaced by new ones) stays low in France with an amount of 30,000 dwellings for the time frame 1990-2000 (Traisnel et al. 2010). Moreover, in many forecasting studies presenting scenarios about future residential consumption it is usually assumed that demolition of old dwellings is concerning the worst efficient ones²⁰⁰ (Traisnel 2001; Chambolle and Pouliquen 2008; Giraudet et al. 2010; Sartori et al. 2009). More recent works (Traisnel et al. 2010) have included consideration of urban characteristics in their prospective study for the construction of new dwellings.

Especially, for the old and inefficient houses without heritage value (e.g. 3 millions in France built from 1949 to 1974 (INSEE 2006)), the question of demolition vs. refurbishment arises. According to Power (2008) this last issue were debated along the XXth century and remains not fully resolved.

On the other hand, the question of urban densification and preventing of urban sprawl (new individual housing located in outlying suburbs) occurs to limit the transportation energy consumption linked to this phenomenon. Urban sprawl is a problematic trend due to the costs and availability of plots of land to build new dwellings and the households desire to live in an individual housing. So, the question of the residential sector and energy consumption evolution in France has to take into account a global approach coupling building and transportation considerations. These issues were studied for France among others by Maïzia (2010).

Actually in France, the majority of new dwellings were built in two different areas (J-P. Traisnel et al. 2010) (annual 2005 data):

- Urban and suburbs areas with around 110,000 new mostly composed of multi-storey dwellings (more than 60%),
- Rural areas with 140,000 new units, mainly composed of individual housing (around 80%).

¹⁹⁹ Energy Performance of Buildings Directive, 2010/31/UE.

²⁰⁰ For example : average efficiency of demolished buildings from 398 kWh/m² in 1973 to 250 kWh/m² in 2050.

Some interesting results were presented showing that an individual housing located in a rural or peri-urban area emits around 3.8 tCO₂/y for transportation and the main dwelling end-uses (space heating and domestic hot water) i.e. 46% more than a household located in a centre of an urban area (Traisnel 2001). Moreover, the French public statistics agency INSEE has shown in a forecast study that the continuation of migration to peri-urban area could induce a 4% increase of car transportation in 2020.

Actually, the refurbishment of old houses is helpful to enhance their efficiency, but if new small multi-family buildings were to replace them, this could lead to added energy savings due to higher thermal efficiency as well as promoting sufficiency with limited dwelling surface per inhabitant. Moreover, some co-benefits, not necessarily financial, like reduced individual car travelling and decreasing real estate market pressure allowing access for low or mid-income households are expected. On the other hand, the demolition is associated with social cost and political problems as well as high costs (demolition cost and cost of new building). These issues were recently discussed by Power (2008), showing that the demolition versus refurbishment discussion is not complete unless social and environmental (life cycle analysis or embodied energy of building materials) issues are included, and resulting in a conclusion in favour of retrofitting. In large multi-storey buildings, the social cost of expropriation-demolition and the political problems arising could be high. Moreover, the demolished multi-dwelling units are generally in a poor condition (including thermal efficiency) in specific district. Conversely, in this paper as we only deal with old individual housings when they are for sale (i.e. without the necessity to expropriate the household) the social cost should be low. In that case, the driver for demolition should not be the bad condition of the building or the urban planning in specific district, but the real estate market pressure. Then, the relation between demolition of individual housings and their energy consumption has to be reconsidered.

Moreover, economic models of urban structure, based on the classical theory of urban land use and city size, rely on two phenomena: a behavioural part accounting for households weighting proximity of the city centre against the price of the building; a second part accounting for the property developer's willingness to build new dwellings depending on the local level of property prices (Viguié et al. 2010). Another modelling approach of urban development was also done with empirical (past) correlations of the building stock, daily mobility and land urbanization (Maïzia 2010).

This paper will present a French regional study comparing the impact of demolition of an old single family house located in a dense urban area replaced by a small multi-family building (densification scenario) and the continuous trend of urban sprawl (continuous sprawl scenario). The study consists in a first part showing the general relation between variables of property market and the regional density and a second one presenting the comparison of the energy and financial impacts of two different scenarios:

- Refurbishment of an old house, located in an urban area, and building of new ones in a rural area.
- Demolition of this old house replacing it by a new multi-family housing in a urban area.

Methodology and data

This study is divided into two parts where the first part concerns the theoretical approach comparing new buildings and refurbishment of existing ones at French regional level and the second presents case studies based on cross-sectional data. As space heating consumption represents 64% of the whole energy consumption of main dwellings (CEREN 2010), this work deals only with space heating consumption and will not present data about other end-uses.

It is well known that space heating consumption is firstly depending on climatic conditions, building envelope performance and space heating system efficiency. However, non-technical characteristics such as energy prices or households socio-economic characteristics are also non-negligible determinants of energy consumption (Cayla et al. 2010). Furthermore there is a relation between the location of dwellings, the building structure (vintage, morphology, envelope efficiency) and the type of households (socioeconomic characteristics). As presented by APUR, a correlation is observed between age of buildings and their compactness as well as the thermal transmission of the envelope (APUR 2007). Such relation was also observed in another study (Schuler et al. 2000).

Moreover, it is well established that the urban heat island effect could be of importance on the space heating consumption in very dense urban area as temperature differences between core urban and surrounding rural locations of several degrees are commonly observed (Pigeon et al. 2007; Kolokotroni et al. 2010).

Moreover, the distance between a dwelling and city centre is one of the main determinants of its estate value. The difference between dwelling current estate value and the potential estate value of a new building constructed in place of the current one participates to the financial interest to demolish a dwelling. The first part of the study

will explore the link between the potential financial benefit of a dwelling demolition and the energy consumption of this dwelling.

Cross-sectional data

For the case study analysis, a cross-sectional database was used. It is based on results from a dedicated survey on French representative households (representativeness is guaranteed by TNS Sofres Metascope, which exploit a panel composed of 20,000 French households (Sofres 2011)). This survey have been realized in 2009 on 2012 representative French households with enquiries about their behaviours completed by the technical description of their dwelling as well as their energy bills (Table 1). To be able to extrapolate at the national level, each household is weighted to be representative to the French population. This weight is determined, for each household, from their income, the urban density and location of the dwelling, the family type, the age of the reference person, occupational status, the type of building and the date of construction (Cayla et al. 2010; Cayla et al. 2011).

Finally, after correction and cleaning the sample, this cross-sectional data consist of a total of 900 households representative of the French building stock (each household is weighted to be representative). For this work, we used dwellings from the enquiry composed of 341 individual houses built before 1975 (before first thermal regulation) and 84 new multi-family housings built after year 2000.

Table 1: Number of questions per topic asked to 2012 representative French households (June 2009).

Topic	Dwelling characteristics	Space heating system	Dwelling environment	Socio-economical data	Behaviour	Energy consumption (bills)
Number of question	39	9	4	16	12	5

Energy savings potentials and space heating consumption were assessed using the data in the cross-sectional survey.

Observed space heating consumption was assessed from household energy bills (gas, fuel oil, LPG, electricity, wood) provided by the questionnaire, using a regression methodology provided by CEREN²⁰¹ for hot water and cooking end-uses and a multi-linear regression for the other specific electricity end-uses. The end-uses consumption of the 900 households sample, extrapolated at the French national level was in accordance to national end-uses consumption provided by CEREN (Allibe 2009; CEREN 2007; Cayla 2011). All energy consumptions below are expressed in term of final energy (i.e. energy paid by households).

Theoretical space heating consumption was assessed with the French EPC (Energy Performance Certificate) methodology based on the former thermal regulation (RT1988) on the basis of data coming from the survey. Even if the EPC was demonstrated to be innaccurate by overestimating the energy consumption for space heating (Cayre et al. 2011; Allibe et al. 2010), it is a public tools and remains the reference of the residential building efficiency in France. Moreover, the EPC methodology is used for prospective or energy saving potential studies (Traisnel 2001; Sartori 2009). In this paper, the theoretical space heating consumption was only used to demonstrate that using such theoretical consumption in a demolition perspective could lead to overestimation of the energy savings (see section “Space heating consumption of old individual houses” below).

Regional data

We have used regional data in relation to the regional population density (as an indicator of urban density) to provide a regional analysis of the potential of individual housing that could be pull down to be replaced by residential apartment building. Data concerning new buildings are provided by MEDDTL²⁰² (SOeS 2010), regional data for the cost of old dwellings are provided by solicitor's office survey (notary) (Chambre des Notaires de Paris 2010; Notaires de France 2010) and the dwellings area from the French national statistics agency INSEE (CEREN 2009). Economic regional data (GDP²⁰³, turn-over, number of employees) were provided by Ormières (2010).

²⁰¹ CEREN (Centre Etude et de Recherche sur l'Énergie -Centre for Studies and Economic Research on Energy) is a French organisation that supply reference data on energy consumptions in France (<http://www.ceren.fr>)

²⁰² Ministry of Ecology, Sustainable Development, Transportation and Housing (Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement).

²⁰³ GDP: Gross domestic Product.

We must notice that in France, the region “Ile de France” including the capital city Paris is the densest, far away compared to others. Around 19% of the population live in 2.2% of the surface of Metropolitan France. This explains why all the figures concerning “Ile de France” region are different than the other regions.

Theoretical analysis

- *New buildings*

Metropolitan France is composed of 21 regions (see appendix A) with various population density (INSEE 2006) in which we observe a link with the surface and with the price of the plots of land available for new individual buildings (Figure 1). As urban density increases, the price of land increases and the size of plots of land decreases. Moreover, in the forecasting scenario of INSEE for future population (Léon 2010), a moderate correlation between plots of land specific price and population expected variation is observed (Figure 2).

At the national level in 2009, a flat was sold 222,354 Euro and an individual house cost 201,589 Euro indicating that multi-storey building, even if they are smaller, are more costly on average. Consequently, these figures show the property market pressure on the availability of space to build new buildings. This could be explained by considering the type of new buildings: in urban area (downtown and inner suburbs) between 63% to 85% of new buildings were flats, against less than 20% in rural area (INSEE 2006). This also could explain the fact that individual house are more costly in dense regions than multi-family building (Figure 2).

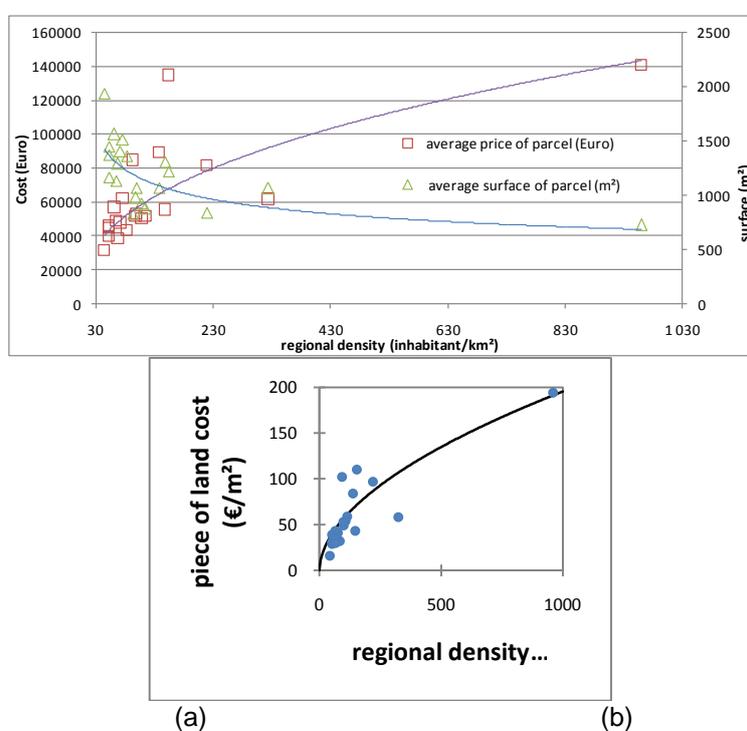


Figure 1: (a) Cost ($R^2=0.658$) [left in Euro] and plot size ($R^2=0.571$) [right in m^2] and (b) specific price of plot ($R^2=0.861$) (in Euro/ m^2) dedicated to the new houses in relation to urban density (data weighted by population 2007).

Obviously, as reported by low to moderate coefficient of determination²⁰⁴ (R^2 value), the population density of French regions cannot fully explain variation of the studied variables. For example, the region “Provence Alpes Côte d’Azur”, well-known for its seaside resort, with an intermediate density²⁰⁵ of 138 inhab./ km^2 , presents approximately the same price of plots of land that the most dense region “Ile de France” with an sevenfold density. Moreover, an average density is not a representative figure for region presenting large density heterogeneity.

²⁰⁴ The coefficient of determination measure the quality of adjustment inside the sample data (D.N.Gujarati 2004).

²⁰⁵ 113 inhab./ km^2 on average for metropolitan France.

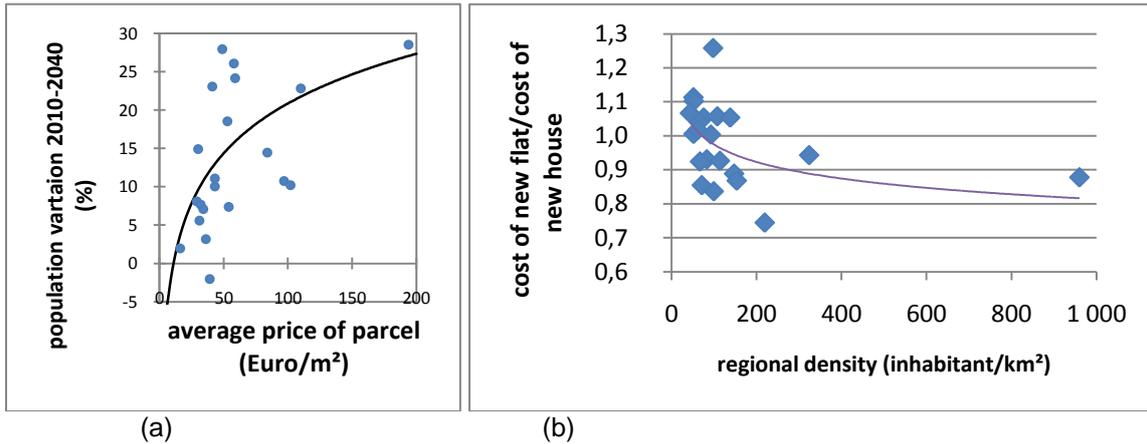


Figure 2: (a) Price of plots of land (Euro/m²) in relation to future population increase (%) weighted by population (2007)(R²=0.429); (b) ratio of cost for new flat to costs of new house according to population density (R²=0.22).

- *Purchase of an old individual house*

As expected, the price of existing houses increases with the population density (Figure 3) reflecting the balance between offer and demand of the property market concerning availability of individual dwellings in urban area. The purchase price is varying from 113,500 Euro to 368,900 Euro (see appendix B). However, the correlation between the two variables is moderate.

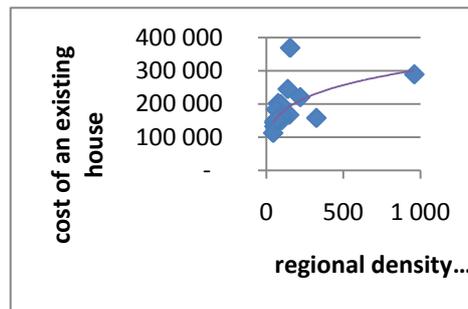


Figure 3: Price of purchase (Euro) of an existing house (2009) in relation to regional density (R²=0.41).

- *Refurbishment of an old individual house*

The chosen retrofitting measures are the insulation of walls and roof, installation of double glazing windows, heat pump for space heating and solar domestic hot water system. Only the costs for materials and works and the associated energy savings are taken into account for this study. The energy savings were calculated following an engineering estimate methodology on the basis of thermal losses decrease and on the ratio of initial and final efficiencies of space heating equipment. This methodology was presented in a previous study (Laurent et al. 2009) and will not be explained further.

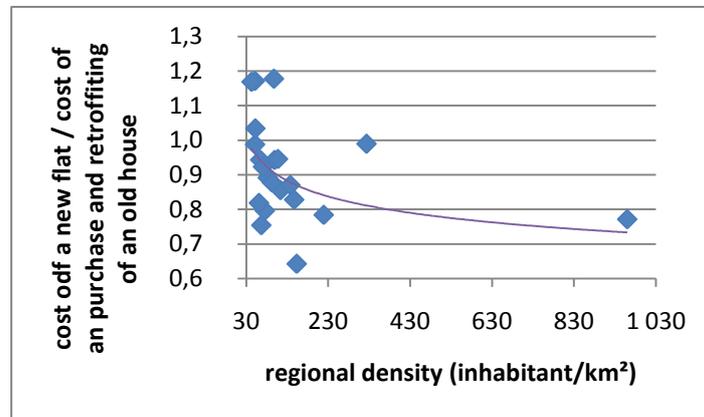
The costs of refurbishment were regionalised from national costs already presented in a previous paper (Laurent et al. 2009) and inflated by 10% to take into account the price increase over 2 years as observed in the past (CAH 2008). The regional costs were created using two index corresponding to the wealth of the regional population (expressed by the GDP/inhabitant) and the cost of retrofitting (turn-over/employee) as following:

$$C_{\text{regionalkost}} = C_{\text{nationalkost}} * \left[\frac{\left(\frac{\text{GDP}}{\text{population}} \right)_{\text{regional}}}{\left(\frac{\text{GDP}}{\text{population}} \right)_{\text{average}}} \right] + \left[\frac{\left(\frac{\text{Turn-over}}{\text{employee}} \right)_{\text{regional}}}{\left(\frac{\text{Turn-over}}{\text{employee}} \right)_{\text{average}}} \right] * \frac{1}{2} \quad \text{eq. 1}$$

- *Comparison between the cost of retrofit and new building*

The comparison between the cost of a new flat and the cost of an old house retrofitted is presented in figure 4. Only for 9 regions the cost of a flat is higher or equal to the cost of purchasing an existing house and

refurbishing it (ratio ≥ 1) and it correspond to the region with density below <98 inhab./km². For other regions, the ratio stays below unity, independently of regional density, indicating that the purchase of an existing house is very expensive. This value is then chosen to separate the two types of studied areas (high and low density considered as rural respectively urban) in the case studies. This is in accordance with publications considering the limit between rural and urban areas around 80 to 102 inhab./km² (Laganier et al. 2009, Noin 1989)²⁰⁶. These 9 regions with a population density upper than 98 inhab./km² are corresponding to 60% of the entire metropolitan population.



A reference situation is also used to assess the different energy savings of the two scenarios. The reference consist of the same old house described in the scenarios above and 9 another dwellings without any specific characteristic. As no information is available on the origin of the households (i.e. where they come from before purchasing new dwelling?), we decide to chose an average dwelling of the French building stock.

To sum up, the three case studies concerning the 10 households are:

- Initial situation (reference): 1 household located in the old house in urban area and 9 average dwellings.
- “Refurbishment” scenario: 1 household located in the retrofitted old house in urban area and 9 households located in house in rural area.
- “Demolition” scenario: 10 households located in a multi-storey building in urban area.

We must notice that this work is done considering equivalent households (i.e. with the same number of persons in each) and could be a limitation of the study as households living in a flat are usually smaller than households living in an individual house.

• *Space heating consumption of old individual houses*

No statistical correlation ($R^2 < 0.01$) were found between theoretical or observed consumption (expressed in kWh/m² as well as with absolute consumption) with regional density or household’s income (Figure 5) for the old individual housings. These results are in good accordance with previous works dedicated to other country showing the lack of relation between neighborhood density and space heating consumption (Kasa 2010).

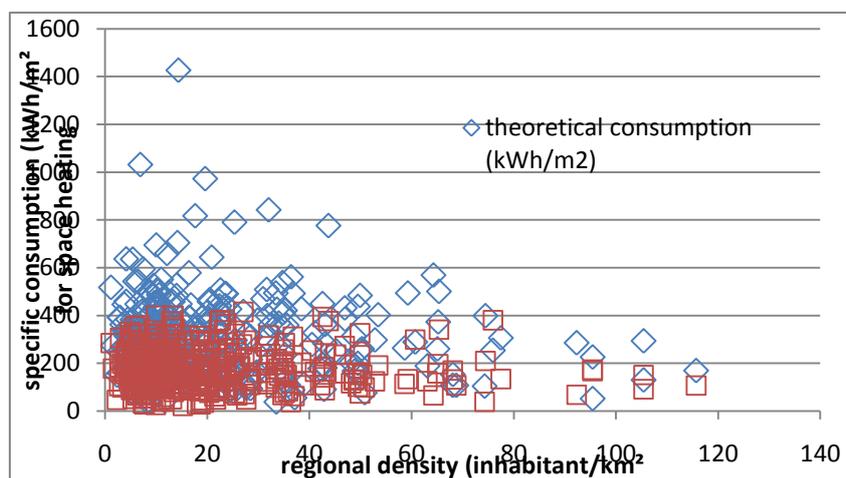


Figure 5: Specific consumption (observed and theoretical) for space heating (expressed in final energy kWh/m²) in accordance with regional density for old houses (built before 1975) in the cross sectional data.

Table 2: Theoretical and observed space heating consumption for the 10% highest or average consumption of the old individual houses in the cross-sectional survey.

	10% theoretical highest	10% observed highest	Average theoretical	Average observed
Total space heating consumption	970 MWh	288 MWh	200 MWh	180 MWh

However, there is a large difference between the theoretical and observed space heating consumption (Table 2). The average theoretical space heating efficiency is 304 kWh/m² and the assessed consumption from energy bills is 177 kWh/m² for the old houses of the survey. Considering energy consumption (expressed in final energy) the space heating consumption per dwelling is 31.4 MWh/dw from EPC assessment(theoretical) and 18.6 MWh/dw estimated from energy bills (observed) (Allibe et al. 2010).

Following the logic of urban economics, demolished houses should be located in area with a high market pressure (i.e. located in dense urban area as presented in Figure 2b) and are not chosen for their poorest thermal efficiency as explained in the “introduction” section. In this case, Figure 5 shows that demolished houses (in higher density areas) don’t seem to consume more energy than other ones. As we demonstrate that in such dense areas there is not evidence of higher space heating consumption for these dwellings.

Consequently, it seems to be an error, in forecasting scenario, to think that demolished houses were those with the lowest efficiency (i.e. the highest energy consumption). As shown in Table 2, this error, combined with EPC bias, could lead to an overestimation of demolition energy benefits by a factor of 5. Obviously, as we don't know with accuracy where are located the demolished building, a random choice (or based on average efficiency) seems more realistic to avoid a systematic overestimation of energy savings.

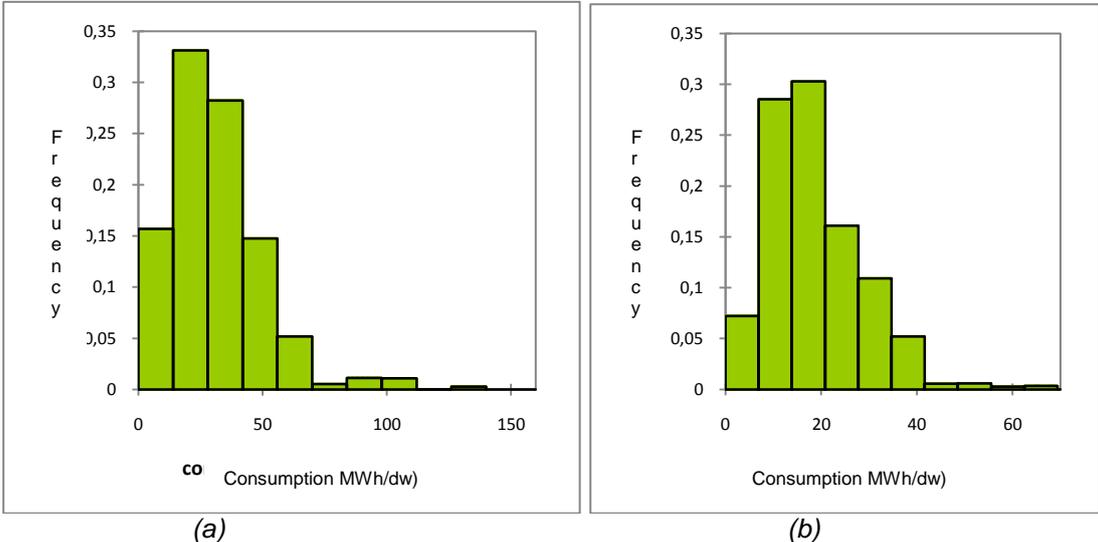


Figure 6: Energy consumption for space heating in old individual houses (built <1975) (a) calculated by EPC, (b) assessed from energy bills (weighted) in the cross-sectional data. Median space heating consumption (a) 28.4 MWh/dw (b) 16.9 MWh/dw.

- *Space heating consumption of new buildings*
The consumption of the new buildings (i.e. built after 2000) based on the cross-sectional survey is presented below. For the individual houses, the average space heating consumption is 7.01 MWh/dw and 4.43 MWh/dw for the multi-storey housing (that is to say, a specific consumption of 69 kWh/m² for flats and 72 kWh/m² for houses)(Figure 7).

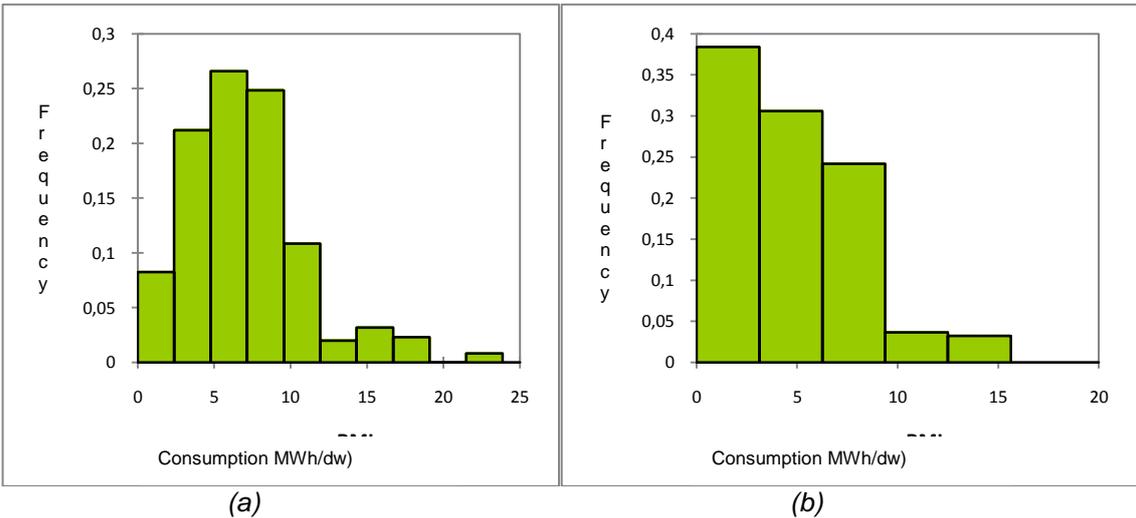


Figure 7: Energy consumption for space heating (MWh/dw) in (a) new (>2000) individual houses (b) multi-storey buildings (weighted). Median space heating consumption (a) 6.99 MWh/dw (b) 3.39 MWh/dw.

No statistical relation with regional density were found for space heating consumption (kWh/dw) ($R^2 < 0.01$) as well as for specific consumption (kWh/m²) ($R^2 = 0.02$) for the new individual houses as previously shown for the old individual housings.

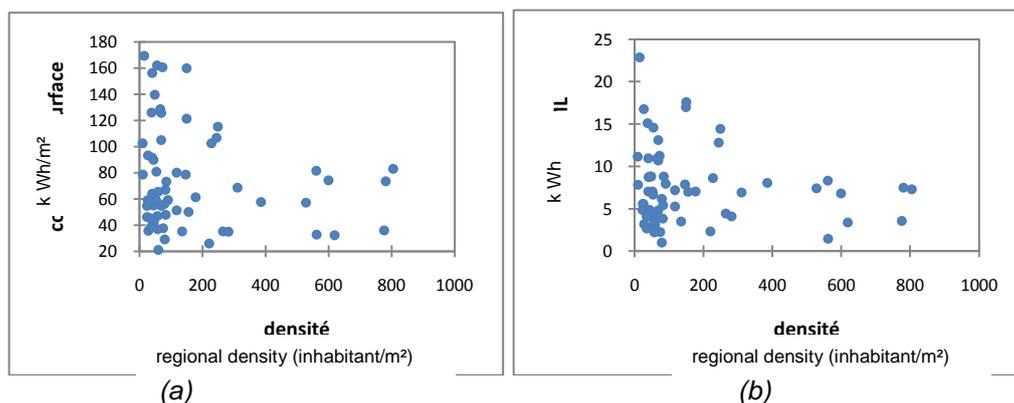


Figure 8: (a) Observed specific space heating consumption (kWh/m²) and (b) energy consumption (MWh/dw) in relation to population density (inhab./km²) for individual houses built after year 2000 in the survey. We must notice that a house in the survey, located in the municipality in the region “Ile de France”, of around 3000 inhab./km² is not represented in the figure 8 below (all the remaining houses were located in municipalities with a population density below 1000 inhab./km²).

Reference situation

The reference situation for the comparison has been chosen as following: an old individual dwelling built before 1975 with an average consumption of 18.67 MWh/dw and 9 others dwellings without any indication of origin. In this case, the average consumption (13.1 MWh/dw) of the building stock, as assessed with the cross-sectional database, is associated to these last households (Allibe et al. 2010). The corresponding total space heating consumption of the reference situation for the 10 considered dwellings is 136.57 MWh.

Table 2: Various space heating consumption depending on location (rural/urban) and age of building (<1975 or >2000)(expressed in MWh/dw) (source: cross-sectional data).

Region (limit: 98 inhab./km ²)	Energy consumption of old building refurbished	Energy consumption of old building	Energy consumption of new flat	Energy consumption of new house	Dwelling (house or flat) without origin or age determined
low density	-	-	-	7.47	13.1
high density	8	18.67	4.60	-	

- **Refurbishment scenario**

In the “refurbishment scenario”, it is considered that an old house located in urban or peri-urban area is retrofitted and that 9 individual dwellings were built in a rural area. Unfortunately, we are not able to propose a statistical analysis for each region due to lack of data. The cross-sectional survey was initially made to be representative at the national level (Metropolitan France). To overcome this limitation, we only present results considering two types of regional population density: a rural area with a density below 98 inhab./km² and urban area above this value. The efficiency of the retrofitting is corresponding to an average performance as encountered in the current refurbishment market. The resulting total space heating consumption is 75.23 MWh for the 10 households considered in this scenario.

The whole cost for the refurbishment scenario is corresponding to the purchase of an existing house, built before 1975, located in a urban area plus the costs for refurbishment measures, which added up with the construction of 9 new homes in a rural area.

The resulting energy savings are 61.34 MWh (45% of the reference consumption) for a total expense of 2,353,630 Euros. Then, the corresponding cost of saved energy²⁰⁸ (CSE) is 38 Euro/kWh. As the lifetime of all considered buildings are assumed to be equal, a discounting approach over lifetime (e.g. net present value) is not considered useful.

Table 3: Costs (Euros) for the two scenarios in relation to population density (source: SOeS; *EDF-R&D).

Region	Purchase of existing	Retrofitting of old	Demolition of old	Purchase of	Purchase of
--------	----------------------	---------------------	-------------------	-------------	-------------

²⁰⁸ Calculated as the ratio between cost and energy savings and expressed in Euro/kWh.

(limit: 98 inhab./km ²)	house built before 1975	house*	house*	new flat	new house
High density	244,800	37,651	20,000	202,168	-
Low density	-	-	-	-	230,131

- *Demolition scenario*

In this scenario, we consider that an old house located in a urban area is demolished and replaced by 10 new apartments as presented above. Then, the total space heating consumption is 46.00 MWh for the 10 households considered in this scenario. The resulting energy savings, compared to the reference situation, are 90.57 MWh (66% of the reference consumption) for a total expense of 2,286,480 Euros.

For the demolition scenario, energy savings are higher (+32%) than the refurbishment one. At the opposite the total expense shows a small decrease (-2.9%) compared to the first scenario. So, the resulting CSE (25 Euro/kWh) is lower than that of “refurbishment scenario” above.

We must notice that the cost of demolition includes a very large uncertainty but even if the demolition cost increase twofold or threefold, the total cost changes slightly (respectively -2.0% and -1.2%).

Co-benefit analysis in transportation

Even if the sole energy consumption viewpoint is differentiating the two scenarios, this only aspect of the issue is not sufficient to be conclusive about the demolition scenario as other issues have to be considered like social consideration (e.g. “high social cost” to expropriate households from their living environment) and impact on transportation consumptions (promoting the collective transportation systems).

In this purpose, to enhance the cost benefit analysis of the two scenarios, the transportation side is studied but limited to pendulum and local travels, neglecting long distance ones in this rough analysis even if these last are depending on the location of households. In the cross-sectional database, it is clear that the expense for car fuel is depending on urban structure (Figure 9). This could be explained by the distance from collective transportation (bus, tramway, underground or train) declared by households. The average minimal distance is shortest for the households living in apartment buildings located in urban area, followed by old houses built before 1975 and new houses in rural area respectively.

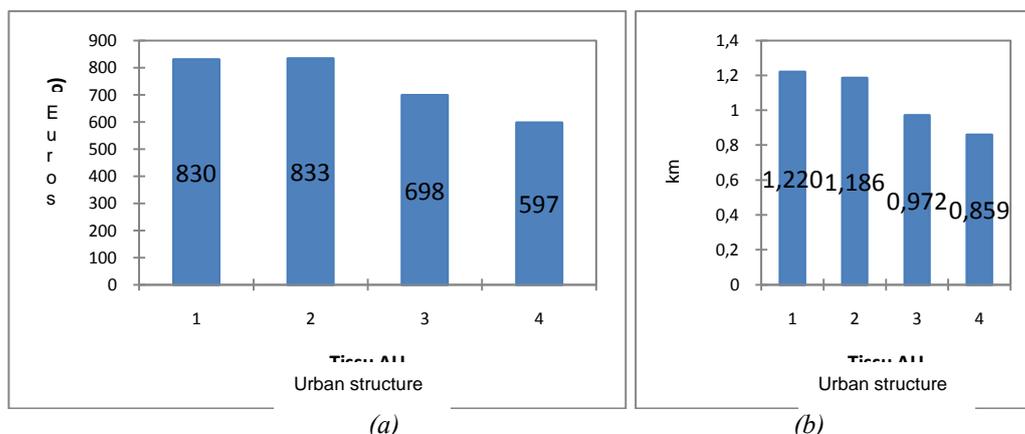


Figure 9: (a) Average expense (euros) of petrol for local travel by car and (b) minimal distance (km) to collective transportation system (bus, underground, tramway or train) in relation to urban structure (1: rural, 2: peri-urban, 3: suburbs, 4: inner city) for the dwellings in the cross-sectional database.

Surprisingly, considering the dwelling chosen for our scenarios, the expenses dedicated to local mobility (Table 3) aren't significantly different between the dwelling types as expected from the urban structure segmentation presented above even if the minimal value is for the new flat (Figure 9). Thus, the energy consumptions dedicated to local mobility for the 10 households considered in the scenarios are similar for the reference situation and the two scenarios (Table 3):

- Reference situation: 79.93 MWh.
- Refurbishment scenario: 75.85 MWh; energy savings compared to reference: 4.07 MWh,
- Demolition scenario: 70.69 MWh; energy savings compared to reference: 9.24 MWh.

In his study Maïzia (2010) shows that a “reduction of local mobility” scenario could lead to a daily car fuel consumption decreasing of 20% compared to the current situation (reference year 2000). With a cutting back of 11% associated to the “demolition” scenario compared to the reference situation, our result appears conservative.

Table 3: Transportation figures in relation to building type (weighted) calculated on the basis of a petrol price of 1.14 Euros/l and conversion factors: 36777 kJ/l, 0.027778 Wh/kJ. *limit of density=98 inhab./km².

	Minimal distance to collective transportation system (km)	Expense for petrol dedicated to local travels (Euros)	Consumption (kWh)
Old houses <1975	2.7	892	7993
New flat >2000 in high density*	1.8	789	7069
New house> 2000 in low density	3.0	841	7540

The additional gain of energy savings due to the reduction of transportation consumption, with the energy savings associated to the space heating end-use, helps to increase the profitability of the demolition scenario:

- Refurbishment scenario: total energy savings (heating, transportation): 65.41 MWh and the resulting CSE = 36 Euro/kWh.
- Demolition scenario: total energy savings (heating, transportation): 99.81 MWh and CSE = 23 Euro/kWh.

Impact of the number of new apartments built

The change in the number of apartments in the new multi-storey building slightly modifies the results. By increasing the number of flats, the demolition scenario presents a higher profitability:

- The CSE for the demolition scenario increase from 25 Euro/kWh to 22 Euro/kWh, respectively with 5 and 20 dwellings,
- The additional energy savings of the demolition scenario versus refurbishment increase from 31% to 33% respectively with 5 and 20 dwellings,

The sole figure which is largely modified by the number of chosen new flats is the cost difference between the scenarios. In case of few flats the demolition is costly than the refurbishment scenario (ca. +5% with 5 apartments). When the number of flats increase, the demolition scenario is less expensive (-8% with 20 apartments). A minimum of 8 flats appears to be necessary to have a positive difference between the two scenarios in favour of the demolition one.

Conclusion

The issue of demolition vs. refurbishment for the old houses in France was discussed on the basis of a regional study assuming that the driver for demolition is the property market, using the population density as the indicator of the market pressure. The main assumption is to consider that the availability of plot of land is negatively linked to urban density. This was revealed partly true as the piece of land's specific price is largely dependent on the regional population density in France.

Additionally, from a cross-sectional survey, we have shown that the energy efficiency and the energy consumption of building (both theoretical or observed), for space heating end-use, don't present a statistical correlation with the population density.

So, we conclude that the houses that are demolished for financial benefit purpose are located in dense area but they are not the poorest efficient one (i.e. with the highest space heating consumption). These two last points let us to draw a first conclusion about the lack of link between demolished houses and their energy efficiency. This implies to choose, in the prospective or forecasting scenarios, the average consumption of the building stock to be subtracted from the total space heating consumption when considering building demolition flow.

The cost benefit analysis of demolition of an old inefficient house (i.e; built before any thermal regulation) located in urban areas and replaced by a multi-family building was done on the basis of a cross-sectional enquiry with observed space heating consumption. A large difference of energy savings for space heating was demonstrated to the detriment of the "refurbishment and construction of new houses in rural area" scenario. However, a life cycle cost analysis (embodied energy) not included in this study could lead to different conclusion as presented by others studies.

At the opposite, a small difference of car fuel consumption for daily travels was assessed between the "refurbishment" or "demolition" scenarios. However, the trend is also in favour of the last one. To be conclusive, the co-benefit on transportation side lightly increase the difference between the two scenarios and further study appears to be necessary to well understand the behavior of household concerning the transportation dedicated to local travels.

A question that was not discussed in this paper is how to implement such hypothesis, “i.e. demolition preferred to refurbishment”, without any social disruptiveness. The main question is how to have access to plot of land in urban area for the building of multi-dwelling unit. One way, could rely on the pre-emption right of houses for sale avoiding expropriation order of the households. When a house is to be sold after the departure of the household, the local authority have the right to buy it in detriment of other purchasers. Then, the local authority could sell by auction the plot of land to property developer in order to build a multi-storey building. This kind of urban planning policy has to be discussed at a local level depending of the specific urban and social structure in order to promote selective demolition.

This study remains, an exploratory works that have to be consolidated, but interesting results are presented showing that, under definite conditions, the demolition of an old buildings in urban areas is potentially interesting from an energy viewpoint. Finally, this study reveals the lack of cross-sectional data able to realise coupled studies on building energy consumption and transportation.

Glossary

CSE: Cost of Saved Energy (in Euro/kWh of final energy)

dw: dwelling

EPC: Energy Performance Certificate

GDP: Gross Domestic Product (in Euro)

Inhab. : inhabitant

LPG: Liquid Petroleum Gas

R²: coefficient of determination

Appendix A

Table 1: regional data for the new buildings (source SoES).

Region	average surface of plots of land (m ²)	average price of plots of land (Euro)	average price of a new individual house (Euro)	average price of a new individual house (plots of land + building) (Euro)	average price of a new flat in a multi-storey building (Euro)
Alsace	838	81,592	189,801	271,393	202,168
Aquitaine	1516	62,118	131,326	193,444	203,775
Auvergne	1372	39,997	138,365	178,362	198,527
Basse-Normandie	1366	43,438	131,661	175,099	162,996
Bourgogne	1452	44,783	130,081	174,864	175,825
Bretagne	880	51,677	139,656	191,333	177,280
Centre	1138	49,157	121,488	170,645	177,660
Champagne-Ardenne	1166	45,750	133,168	178,918	197,208
Franche-Comté	1408	47,946	159,900	207,846	177,675
Haute-Normandie	1308	55,675	128,651	184,326	163,818
Ile-de-France	728	140,933	158,703	299,636	263,088
Languedoc-Roussillon	833	84,757	121,012	205,769	206,464
Limousin	1939	31,656	133,383	165,039	176,050
Lorraine	1072	52,989	157,207	210,196	175,930
Midi-Pyrénées	1563	56,872	128,500	185,372	188,604
Nord-Pas-de-Calais	1065	61,802	136,248	198,050	186,806
Pays de la Loire	928	50,478	130,967	181,445	191,808
Picardie	979	51,753	126,188	177,941	223,800
Poitou-Charentes	1294	38,517	122,101	160,618	148,470
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	1222	134,894	162,865	297,759	258,553
Rhône-Alpes	1067	89,393	147,651	237,044	249,750

Appendix B

Table 2: regional data for the existing buildings (source SoES).

Region	average price of old individual house (Euro)	Average surface SHAB (m ²)	Cost of refurbishment (€)	Population (2007) (in thousand)	Density (inhab./ km ²)
Alsace	220,200	119	42298	1,827	219
Aquitaine	202,400	124	44006	3,151	76
Auvergne	132,500	101	35929	1,339	51
Basse-Normandie	150,200	98	34678	1,461	83
Bourgogne	143,600	104	36898	1,634	52
Bretagne	166,900	104	36944	3,120	114
Centre	153,000	107	37815	2,527	64
Champagne-Ardenne	148,200	114	40590	1,339	52
Franche-Comté	152,600	112	39915	1,159	71
Haute-Normandie	167,000	101	36014	1,817	147
Ile-de-France	289,100	106	37729	11,599	960
Languedoc-Roussillon	198,800	100	35671	2,561	93
Limousin	112,500	107	38092	737	43
Lorraine	151,300	111	39260	2,340	99
Midi-Pyrénées	183,500	124	43939	2,811	61
Nord-Pas-de-Calais	157,800	102	36119	4,022	324
Pays de la Loire	167,200	109	38640	3,483	108
Picardie	159,800	97	34368	1,900	98
Poitou-Charentes	154,200	118	41870	1,740	67
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	368,900	99	35312	4,864	153
Rhône-Alpes	244,800	113	40169	6,066	138

Aknowledgments

Part of this work was carried out with the support of ECLEER (European Centre and Laboratories for Energy Efficiency Research). Thanks to Jean-Michel Cayla (EDF-R&D) for the work done about transportation and the cross-sectional enquiry and to Maxime Raynaud (EDF-R&D) for his help in statistical analysis. Finally, the authors wish to thank Anette Persson (ECEEE panel leader) for their relevant comments, which were used to improve drastically the paper.

Reference

- APUR (2007), Consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liés au chauffage des résidences principales parisiennes, Atelier Parisien d'Urbanisme, December 2007
- Allibe B., Laurent M-H., Osso D. (2010), Modélisation thermique de l'habitat : d'un logement unique à l'ensemble du parc, International Building Performance Simulation Association – IBPSA, 9-10 november 2010, Moret sur Loing - France, 8p
- Batietude (2010), Observatoire des Logements Neufs, <http://www.batietude.com/>
- CAH (2008), Club Amélioration de l'habitat, Marché de l'amélioration de l'habitat - données chiffrées, 6p
- Cayla J-M., Allibe B., Laurent M-H. (2010), From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption, ACEEE 2010, 15–20 août 2010, Pacific Grove - United States
- Cayla J-M., Maizi N., Marchand C. (2011), The role of income in energy consumption behaviour: evidence from french households data, Energy Policy, submitted
- Cayre E., Allibe B., Laurent M-H., Osso D. (2011), There are people in the house !: How misleading for energy policies are the results of purely technical analysis of residential energy consumption, European Council for an Energy Efficiency Economy – ECEEE 2011 - Energy efficiency first: The foundation of a low-carbon society, 6–11 June 2011, Presqu'île de Giens - France, submitted paper, submitted paper 7-277
- CEREN (2007), Estimation des consommations de gaz à usage eau chaude sanitaire et cuisson, Etude 7107, <http://www.ceren.fr/>
- CEREN (2009), Consommation d'énergie régionales par usages, exploitation particulière de l'enquête logement 2006, étude 8107, <http://www.ceren.fr/>
- CEREN (2010), Suivi du parc et des consommations d'énergie – consommation 2009, volume 2, <http://www.ceren.fr/>
- Chambolle T., Pouliquen H. (2008), Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050, Partie 5 – scénarios énergétiques, Centre d'Analyse Stratégique, n°12, la documentation française, 170p

- Chambres des Notaires de Paris (2010), BIEN database. Prix de vente des maisons anciennes par département (valorisation des indices Notaires-INSEE), <http://www.paris.notaires.fr/statimmo/statimmo.php>
- Giraudet L.-G., Guivarch C., Quirion P. (2010), Do proposed policies meet French energy conservation targets? Insights from prospective modelling, International Energy Workshop (IEW), Stockholm, Sweden, June 21-23
- Gujarati D.N. (2004), Econométrie, 4th Edition, De Boeck edition, 1009p
- INSEE (2006), Recensement général de la population & Enquête logement, <http://www.insee.fr>
- Kaza N. (2010), Understanding the spectrum of residential energy consumption: a quantile regression approach, Energy Policy 38, 6574-6585
- Kolokotroni M., Davies M., Croxford B., Bhuiyan S., Mavrogianni A. (2010), A validated methodology for the prediction of heating and cooling energy demand for buildings within the Urban Heat Island: Case-study of London, Solar Energy, Volume 84, Issue 12, Pages 2246-2255
- Laganier J., Vienne D. (2009), Recensement de la population de 2006 -La croissance retrouvée des espaces ruraux et des grandes villes, INSEE Première, n°1218, 6p
- Laurent M-H., Osso D., Cayre E. (2009), Energy savings and costs of energy efficiency measures: a gap from policy to reality ? European Council for an Energy Efficiency Economy – ECEEE'09 summer study – Act! Innovate! Deliver! Reducing energy demand sustainably, 1-6 Juin 2009, Nice, France, 571-581
- Léon O. (2010), La population des régions en 2040 - Les écarts de croissance démographique pourraient se resserrer, INSEE première, n° 1326 - Décembre 2010, 4p
- Noin D. (1989) densité de population: les inégalités de la distribution spatiale des Français, Mapped Monde 89/1, 1p
- Notaire de France (2010), Immoprix, les chiffres de l'immobilier des notaires de France, Prix : appartements anciens en France (hors Ile-de-France), <http://www.immoprix.com>
- Power A. (2008), Does demolition or refurbishment of old inefficient homes help to increase our environmental, social and economic viability ?, Energy Policy, 38, 4487-4501
- Traisnel J-P. (2001), Habitat et développement durable – consommation de chauffage, bilan retrospectif et prospectif, Cahier du CLIP, n°13, 5-71
- Traisnel J-P., Joliton D., Laurent M-H., Caffiaux S., Mazzenga A. (2010), Habitat Facteur 4 Étude d'une réduction des émissions de CO₂ liées au confort thermique dans l'habitat à l'horizon 2050, Les Cahiers du CLIP n°20, 104p
- Ormières M. (2010), MARCO 2010 - Tableau de bord des marchés du bâtiment, Développement Construction, <http://www.developpement-construction.com/>
- Maïzia M. (2010), Prospective à l'horizon 2050 du développement urbain en France et implication énergétiques et spatiales des secteurs de l'habitat et de la mobilité quotidienne, Colloque 2010 de la CPDT – Conférence Permanente du Développement Territorial, 8-9 novembre 2010, Liège Belgium
- Pigeon G., Legain D., Durand P., Masson V. (2007), Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France), International Journal of Climatology, 27: 1969–1981
- Sartori I., Wachenfeldt B.-J., Hestnes A.-G. (2009), Energy demand in the Norwegian building stock : Scenarios on potential reduction, Energy Policy, 37, 1614-162
- Schuler A., Weber C., Fahl U. (2000), Energy consumption for space heating of West-German households: empirical evidence, scenario projections and policy, Energy Policy, 28, 877-89
- SOeS (2010) EPTB - Prix et surface des terrains selon la région (2006-2009) Service de l'observation et des statistiques, <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>
- TNS-Sofres (2011), Le panel postal : Métascope, <http://www.tns-sofres.com>
- Vigué V., Hallegatte S., Rozenberg J. (2010), L'agglomération parisienne au XXI^{ème} siècle : leçon d'un exercice de prospective, not published, 17p
- Wikipedia (2011), Coefficient d'occupation des sols, <http://fr.wikipedia.org/>

Eléments de réflexion sur la création d'un modèle technico-économique de dynamique des consommations énergétiques et émissions de GES associées au secteur résidentiel français

Dans le cadre des réunions du groupe « socio-économie du PREBAT », l'idée d'un support commun de modélisation technico-économique de l'amélioration thermique des logements français a été envisagée. L'intérêt premier d'un tel modèle semblerait être de disposer d'un support commun de discussion sur les coûts de la transition du système énergétique « bâtiments + équipements (+ménages) » actuel vers un état dans lequel il serait émetteur d'une quantité très réduite de gaz à effet de serre (objectif Facteur 4 ou plus ambitieux).

Plusieurs structures de parcs de logements et équipements, couplés à une base de prix de transition, ont été évoquées, parmi lesquelles celle d'un parc segmenté en étiquettes DPE (Diagnostic de Performance Energétique) exprimées en énergie primaire auquel serait couplée une structure de coûts de transition entre étiquettes énergie primaire. Une telle architecture aurait l'avantage de reposer sur une méthode de calcul et une base de données de performances ouvertes (la méthode 3CL, majoritairement utilisée sur le terrain, incluse dans le DPE permet le calcul de consommation normative de chauffage, la base de données de performance par énergie, zone climatique et période de construction est fournie avec l'algorithme de calcul). D'autre part, une telle structure de modélisation permettrait d'utiliser des travaux déjà réalisés à l'échelle du parc national de logements, en particulier le modèle de parc résidentiel de l'ANAH, qui est déjà exploité par le modèle RES-IRF du CIRED (lui-même utilisé par le CGDD).

Cependant, certains éléments peuvent être opposés à l'utilisation d'une telle structure comme support de discussion et de consensus. L'objet de cette note n'est pas de réfuter en bloc l'utilisation d'une modélisation utilisant les étiquettes énergie primaire du DPE mais d'essayer d'en éclaircir les limites et de proposer des alternatives tentant d'y remédier. Elle liste donc certains points qui pourraient être l'objet d'amélioration.

La première critique, et la principale, cible le stade énergétique utilisé pour représenter le parc de logements : celui de l'énergie primaire. En effet, celui-ci ne correspond pas au stade perçu par les ménages (l'énergie finale i.e. celle qui leur est facturée). Ceci n'est pas particulièrement gênant si l'énergie primaire n'est utilisée que pour visualiser l'évolution temporelle de la performance du parc de logements mais cela le devient bien plus si la probabilité de transition (amélioration de la performance des logements) est évaluée à partir de cette structure. En effet, il est tout à fait possible de « rétrograder » en étiquette en énergie primaire tout en réduisant les émissions de GES (donc en « remontant » en étiquette CO₂) et en réduisant la facture énergétique d'un ménage lors d'une substitution énergétique. C'est en

particulier le cas lorsqu'un logement passe d'un chauffage à combustible (gaz ou fioul) à une pompe à chaleur, transition présentée comme quasi-incontournable sur une partie du parc de logements pour atteindre un facteur 4 à 2050 [CLIP, 2011]. On est alors dans une situation où il peut être intéressant pour le ménage et pour la collectivité (via la valorisation des émissions de GES) de payer pour une transition « négative » d'étiquette énergie primaire.

En ce qui concerne spécifiquement la modélisation des investissements en efficacité énergétique réalisés par les ménages, si la rentabilité est le critère de choix parmi plusieurs solutions techniques possibles, alors il semble nécessaire de modéliser chaque type d'investissement en utilisant le stade énergétique sur lequel l'amélioration énergétique agit (énergie utile pour l'amélioration du bâti, énergie finale pour une substitution entre équipements), puis de le convertir si nécessaire au stade auquel la facture énergétique est exprimée (i.e. en énergie finale), car la facture est la variable observable pour le ménage. Ainsi, les travaux d'isolation et de ventilation interviennent sur l'énergie utile (diminution du besoin énergétique nécessaire au maintien d'une certaine température dans un logement) dont la conversion en énergie finale dépend du rendement du système de chauffage utilisé. Un changement de système de chauffage (à partir d'une énergie conventionnelle) ou d'eau chaude sanitaire (à partir d'énergie conventionnelle ou renouvelable) agit sur l'énergie finale à prix de marché, et l'installation d'un système de production d'électricité renouvelable intervient sur une vente à prix subventionné par l'état pour un tarif exprimé au stade de l'énergie finale. On observe qu'aucune des améliorations classiques ne présente l'énergie primaire comme unité usuelle.

Par ailleurs, la décision d'investissement est faite a priori en fin de vie des différents éléments du logement. Si la question ne se pose pas pour des systèmes de production d'énergie renouvelables (pas de système préexistant), elle est assez centrale pour les autres éléments du logement : faire abstraction de la durée de vie restante revient à négliger la valeur résiduelle des éléments étudiés. Un renouvellement trop anticipé peut donc être déficitaire, la perte de valeur résiduelle compensant les gains énergétiques que l'on peut attendre d'une rénovation. Or, les différents éléments d'un logement n'ont pas les mêmes durées de vie moyennes. Si on se réfère aux durées de vie des fiches de certificats d'économie d'énergie, les murs, la toiture et les fenêtres ont une durée de vie de plus de 30 ans contre environ 15 ans pour les systèmes. La seule notion d'étiquette et l'utilisation du coût de transition comme déclencheur de travaux ne permet pas de refléter les différences de durée de vie entre les types de travaux de rénovation.

Il est important de noter que la rentabilité moyenne des différents investissements présentés précédemment varie très fortement d'une technologie à une autre [voir par exemple Laurent et al., 2009]. Ainsi, le coût global actualisé de transition d'une étiquette DPE peut varier très fortement suivant la technologie utilisée. L'utilisation du coût de transition par étiquette comme support de discussion sur le coût moyen d'amélioration énergétique d'un logement semble difficile car ce coût de transition sera une moyenne des différentes options technologiques permettant de la réaliser, et le coût moyen variera donc suivant les parts de marché des technologies envisagées. La transition d'étiquette DPE apparaît donc comme un indicateur composite difficile à interpréter de manière fine. Il semble plus facile de trouver un consensus sur le prix des technologies de rénovation explicitement représentées que sur un prix moyen de transition d'étiquette.

D'autre part, le rythme de remplacement des équipements n'est pas guidé par leur potentielle rentabilité financière mais par leur durée de vie (technique ou qualitative). Ainsi, un ménage ne choisit pas quel équipement rénover de manière la plus rentable mais est obligé

d'en remplacer un en fin de vie, il doit alors choisir entre les différentes options technologiques possibles pour l'élément à renouveler, et profite éventuellement des travaux pour renouveler un autre élément proche de la fin de vie. Là-encore, ceci ne serait pas pris en compte par un modèle de coût de transition par étiquette.

Enfin, le calcul DPE est réalisé à partir d'une hypothèse de gestion du confort lié au chauffage par les occupants du logement qui est identique quelle que soit la performance du logement, le prix de l'énergie de chauffage ou le revenu du ménage habitant. Ceci est sensiblement remis en cause par les observations d'élasticité prix et revenu ainsi que d'effet rebond [Cayre et al., 2011]. Les consommations estimées par le moteur de calcul du DPE devraient donc intégrer un facteur correctif pour prendre en compte ces effets. Il ressortirait de cette correction que les logements ayant les plus grosses factures théoriques (et dans lesquels les rénovations seraient les plus rentables) consomment en réalité beaucoup moins d'énergie du fait de la gestion de température (et probablement ventilation) effectuée par les ménages occupants. La prise en compte d'un tel facteur correctif permettrait une estimation plus réaliste des gains financiers et énergétiques que l'on peut attendre de la rénovation des logements les plus consommateurs (cible prioritaire de la politique de maîtrise de l'énergie)

Les éléments énoncés précédemment poussent à reconsidérer l'approche majoritairement évoquée pour la modélisation commune de la dynamique des consommations énergétiques et d'émissions de GES du parc résidentiel français. Une approche plus complexe représenterait plus justement les mécanismes guidant les investissements en efficacité énergétique du secteur résidentiel. Cette approche de modélisation pourrait être caractérisée par :

- une représentation explicite de la performance actuelle du parc de logement **élément par élément** (murs, toiture, plancher, vitrages, systèmes de chauffage et systèmes d'eau chaude sanitaire).
- des éléments non seulement décrits par leur performance mais aussi leur **durée de vie moyenne** (calibrée éventuellement sur les flux de rénovation observés, par exemple ceux de l'enquête OPEN), celle-ci étant prise en compte pour le calcul d'une valeur résiduelle.
- une **offre technique de rénovation représentant explicitement les technologies disponibles**, caractérisées par une performance, un prix et une durée de vie. Les options de rénovation sans amélioration de l'efficacité, proposées sur le marché (cf enquête OPEN), doivent également être représentées car elles font partie du marché, au moins actuel, et la performance moyenne des équipements du marché doit être déplacée à la hausse par les politiques. Sans prendre en compte les technologies sans amélioration, on ne pourra pas scénariser leur disparition.
- un calcul de rentabilité des investissements basé sur l'énergie facturée au (ou revendue par) le ménage, c'est-à-dire en **énergie finale**.
- le calcul de consommations d'énergie à un instant t **peut être réalisé par la méthode du DPE et sa base de données associée mais celle-ci doit être calibrée sur des données de consommation réalistes** pour éviter de surestimer les consommations (et donc la rentabilité des rénovations) des logements les moins performants. Cette calibration pourrait intégrer le lien entre le prix des énergies, la performance énergétique des logements (et potentiellement avec le revenu des ménages) et les comportements quotidiens de chauffage.
- la rentabilité des investissements devrait être calculée sans prendre en compte l'effet rebond, celui-ci reflétant un arbitrage du ménage entre gain financier et

- augmentation de confort thermique. Le **gain de confort** fait partie des éléments valorisés par le ménage lors d'une rénovation.
- un **taux d'actualisation** plus élevé que le taux « sociétal » peut être utilisé pour représenter les différentes barrières à l'efficacité énergétique auxquelles sont confrontés les ménages (limite d'accès au capital et à l'information, split-incentives...).

Ces conditions paraissent nécessaires pour une représentation réaliste des impacts et des coûts associés aux politiques publiques d'efficacité énergétique ainsi que les évolutions « naturelles » de l'efficacité énergétique des logements. Elle doit cependant s'accompagner d'une traduction en « étiquettes énergie primaire et CO₂ du DPE » afin de pouvoir suivre son évolution selon ces indicateurs importants pour les politiques énergétiques

A notre sens, une double comptabilité s'impose :

1. consommations réalistes et exprimées en énergie finale pour décrire au mieux la dynamique d'investissements en technologies efficaces, dynamique qui a bien lieu à leur échelle. ces consommations peuvent être calculées avec le stade énergie finale du moteur de calcul du DPE en lui ajoutant un facteur correctif
2. mais également une traduction en étiquette énergétique et carbone, pour observer selon ces deux unités l'évolution de la performance des logements français, résultante de la dynamique à l'échelle individuelle.

Ces deux approches sont nécessaires et tout à fait compatibles entre elles, mais il convient bien de ne pas les confondre.

Références :

[CLIP, 2011] : Traisnel J-P., Joliton D., Laurent M-H., Caffiaux S., Mazzenga A. (2010), Habitat Facteur 4 Étude d'une réduction des émissions de CO₂ liées au confort thermique dans l'habitat à l'horizon 2050, Les Cahiers du CLIP n°20, 104p

[Laurent et al., 2009] : Laurent M-H., Osso D., Cayre E. (2009), Energy savings and costs of energy efficiency measures: a gap from policy to reality ? European Council for an Energy Efficiency Economy – ECEEE'09 summer study – Act! Innovate! Deliver! Reducing energy demand sustainably, 1-6 Juin 2009, Nice, France, 571-581

[Cayre et al., 2011] : Cayre E., Allibe B., Laurent M-H., Osso D. (2011), There are people in the house !: How misleading for energy policies are the results of purely technical analysis of residential energy consumption, European Council for an Energy Efficiency Economy – ECEEE 2011 - Energy efficiency first: The foundation of a low-carbon society, 6–11 June 2011, Presqu'île de Giens - France, submitted paper, submitted paper 7-277
