

**Projet de recherche PREBAT : Réduction des émissions de gaz
à effet de serre et efficacité énergétique dans le bâtiment : les
dimensions économiques et financières**

Simulation des effets économiques et
environnementaux des politiques
visant à réduire les émissions de CO₂
émanant du logement résidentiel
Une application à la région Rhône-
Alpes

Rappel de l'objectif du projet PREBAT

Ce projet a pour ambition de simuler, sur le parc de logements de la région Rhône-Alpes, les effets économiques et environnementaux de différentes politiques visant à réduire la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre émanant du logement résidentiel.

Le projet peut être décomposé en 4 étapes qui constituent les 4 chapitres de ce rapport :

1. Description de l'état des lieux du parc de logements en Rhône-Alpes
2. Etude de l'offre en équipements économeurs d'énergie ou faiblement émetteur de gaz à effet de serre, dans le résidentiel.
3. Etude de la demande d'investissements économeurs d'énergie dans le résidentiel
4. Projections de l'évolution du parc compte tenu des déterminants de l'offre et de la demande et de scénarii de politiques économiques.

Table des matières

Introduction	10
I. L'objectif du projet	11
II. Le contexte de l'étude	11
III. Description détaillée de la recherche réalisée	13
Chapitre 1 : Etat des lieux énergétique du parc de logements en Rhône-Alpes	19
I. Présentation de l'enquête-logement : échantillon Rhône-Alpes en 1996-97 et en 2001-02	24
A. Les logements en Rhône-Alpes	25
B. Les ménages en Rhône-Alpes	30
C. La facture énergétique des logements en Rhône-Alpes	32
II. Estimation de la consommation énergétique des logements et de leurs émissions de GES : Méthodologie	34
A. Etape 1 : Des facteurs énergétiques à la consommation énergétique finale.	35
1. La redéfinition de l'échantillon	35
2. La reconstitution des prix des énergies	36
3. Echantillon final	39
B. Etape 2 : de la consommation d'énergie finale à la consommation d'énergie primaire	42
C. Etape 3 : de la consommation d'énergie primaire des logements à leurs émissions de gaz à effet de serre :	43
III. Estimation de la consommation énergétique des bâtiments en Rhône-Alpes et leurs émissions de gaz à effet de serre : Analyse statistique	44
A. La consommation d'énergie finale des ménages en Rhône-Alpes	44
B. La consommation énergétique primaire en Rhône-Alpes	48
C. Les émissions de gaz à effet de serre par logement en Rhône-Alpes	54
IV. Conclusion	58
V. Bibliographie	59
Chapitre 2 : Dynamique de l'offre et rapidité d'adaptation des entreprises du bâtiment à la demande	61
I. Le contexte de l'étude de l'offre	68
A. Précisions introductives	68
1. Les enjeux de la réduction de la consommation énergétique dans le bâtiment, le contexte technique et réglementaire	68
2. Une offre à appréhender dans le cadre du dilemme entre efficacité énergétique et caractéristiques écologiques des matériaux	70
B. Méthodologie de l'étude	74
1. Objectifs du projet et choix d'une méthodologie qualitative	74
2. Sélection des acteurs à interroger et administration des entretiens	76
3. Synthèse des entretiens réalisés	78
C. Avantages et inconvénients écologiques de chacune des filières de l'offre	80
1. Synthèse de l'offre de bâti (maisons, fenêtres et occlusions)	81
2. Synthèse de l'offre de produits d'isolation : intérêt économique / intérêt écologique	84
3. Synthèse de l'offre de produits de chauffage et température	89
4. Synthèse de l'offre de production d'électricité renouvelable	93
D. Freins institutionnels, contraintes techniques et labels	95
II. Opportunités et freins au développement des quatre grandes filières de l'offre	97

A.	Analyse de l'offre bâti (maisons et fenêtres)	97
1.	Opportunités au développement de l'offre	97
2.	Les freins au développement de l'offre	100
B.	Analyse de l'offre isolation : premiers résultats d'analyse	102
1.	Opportunités au développement de l'offre	102
2.	Les freins au développement de l'offre	105
C.	Analyse de l'offre chauffage et température	113
1.	Opportunités au développement de l'offre	113
2.	Les freins au développement de l'offre	115
D.	Analyse de l'offre électricité solaire photovoltaïque	121
1.	Opportunités au développement de l'offre	122
2.	Les freins au développement de l'offre	125
III.	Conclusions et perspectives de l'analyse de l'offre	133
A.	Des incitations publiques à confirmer dans la durée	134
B.	Un effort de formation des artisans à renforcer	136
C.	Une logique de concentration susceptible de freiner la dynamique concurrentielle et d'innovation	137
D.	Une démarche d'innovation appréhendée sous l'angle du cycle de vie	139
E.	La nécessaire structuration des acteurs de l'offre	140
F.	Le rôle de la distribution	142
IV.	ANNEXES	144
A.	Energie grise : exemple de quantification	144
B.	Guide d'entretien	145
C.	Les dix premiers producteurs de cellules photovoltaïques en 2008, en mégawatts	147
D.	Documents tirés de la Brochure OPEN 2009	148
V.	BIBLIOGRAPHIE	150
Chapitre 3 : Adoption d'une technologie qui économise l'énergie dans le secteur résidentiel en présence d'incertitude		152
I.	Introduction	156
II.	The model	160
III.	The optimal path after adoption	162
IV.	The optimal adoption timing with no discounting	165
A.	The marginal value of wealth	166
B.	Boundary conditions	170
C.	Comparative statics	174
V.	The optimal adoption time with discounting	176
A.	An approximate value function before adoption	176
B.	Choosing the coefficients	177
C.	Results	178
D.	Comparative statics	180
VI.	Conclusion	180
VII.	References	181
VIII.	Appendix	184
A.	Solving the optimal program after adoption	184
B.	Solving the optimal program before adoption	188
C.	Comparative Statics	192
Chapitre 4 :		194
Modèle Socio-démographique du parc de logement		194

I.	Introduction	197
II.	Recensement des modèles existants	198
A.	Panorama des différentes méthodologies d'estimation de la consommation énergétique	198
B.	Les modèles de simulation de la consommation d'énergie	203
III.	Modèle d'estimation de la consommation d'énergie primaire du parc et des émissions de gaz à effet de serre français	206
A.	Méthodologie générale retenue et la segmentation du parc	206
B.	Modélisation de la dynamique du parc de logements	209
1.	Le stock de logements	209
2.	Les démolitions	210
3.	Les nouvelles constructions	210
4.	Estimation de l'âge moyen du parc de logements et de leur vétusté énergétique	211
5.	Estimation de la surface des logements	212
C.	Modélisation de la consommation d'énergie	213
1.	La consommation énergétique liée au chauffage et à l'eau chaude	214
2.	La consommation énergétique liée aux appareils électroménagers	219
3.	La consommation énergétique liée à l'éclairage	220
IV.	Calibrage	223
V.	Résultats	225
A.	Analyse rétrospective	226
B.	Analyse prospective	228
1.	Scénario 1 : la subvention	235
2.	Scénario 2: les primes	236
3.	Scénario 3 : les taxes	238
4.	Scénario 4 : le CIDD	239
5.	Scénario 5 : Combinaisons de mesures	240
6.	Résumé	242
VI.	Préconisations	243
VII.	Conclusion	244
VIII.	Bibliographie	246
IX.	Annexes	249
A.	Tableau des durées de vie	249
B.	Le poids des segments	249
	Conclusion	250
	ANNEXE : Demande d'énergie en France dans le résidentiel. Analyse micro-économétrique de la consommation d'énergie	253
I.	Introduction:	255
II.	French housing characteristics	256
A.	Main features of the French housing sector	256
B.	Energy expenditures and final energy demand	258
III.	Discrete-continuous choice model of energy demand: literature and methodology	264
A.	Literature	264
B.	Model	266
C.	Description of data and variables	269
IV.	Main determinants of energy demand in individual houses and in collective housing	271
A.	Process of estimations in the second step	271
B.	Main determinants of energy demand in individual houses: results	272
C.	Main determinants of energy demand in collective housing units: results	275

V.	Conclusion	278
VI.	References	282
VII.	Appendix	284

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Années de construction des logements en Rhône-Alpes	25
Figure I-2 : Surface des logements en m ² en Rhône-Alpes	26
Figure I-3 : Proportion de logements individuels selon la période de construction – enquête de 2006 - en Rhône-Alpes.....	26
Figure I-4 : Taille Distribution géographique des logements en Rhône-Alpes.....	27
Figure I-5 : Le confort dans les logements en Rhône-Alpes.....	28
Figure I-6 : Taille des logements en fonction du nombre de personnes dans le ménage en Rhône-Alpes	29
Figure I-7 : Isolation du logement selon sa période de construction – enquête logement 2006 - en Rhône-Alpes.....	30
Figure I-8 : Composition du ménage – Enquête 2006 - en Rhône-Alpes.....	30
Figure I-9 : Le statut d'occupation des logements en 2001 en Rhône-Alpes.....	31
Figure I-10 : Le statut d'occupation des logements en 2006 en Rhône-Alpes.....	31
Figure I-11 : Pourcentage de ménages ayant des dépenses dans les différences combustibles en Rhône-Alpes .	32
Figure I-12 : Montant annuel moyen des dépenses dans les différents combustibles en Rhône-Alpes	32
Figure I-13 : Montant annuel moyen en 2006, des dépenses dans les différents combustibles en fonction de la surface du logement en Rhône-Alpes.....	33
Figure II-1 : Combustibles utilisés par les ménages de Rhône-Alpes d'après l'enquête logement de 2006	36
Figure II-2 : Le prix de l'électricité en 2006.....	37
Figure II-3 : Le prix du gaz	38
Figure II-4 : L'échantillon final.....	40
Figure II-5 : Les charges locatives et de copropriété (échantillon total en Rhône-Alpes de 2631 individus)	40
Figure III-1 : Distribution des performances énergétiques en kWh d'énergie finale/m ² /an en 2002 et 2006	45
Figure III-2 : Distribution des performances énergétiques en fonction du statut d'occupation des ménages (en kWh _{ef} /m ² /an) en 2006 : énergie finale (Rhône-Alpes)	46
Figure III-3 : Distribution des logements individuels et collectifs selon leur performance énergétique (en kWh _{ef} /m ² /an) énergie finale (Rhône-Alpes)	46
Figure III-4 : Distribution des logements selon leur performance énergétique en fonction de leur date de construction (en kWh _{ef} /m ² /an) en 2006 : énergie finale (Rhône-Alpes)	47
Figure III-5 : Distribution des logements selon leur performance énergétique en fonction du combustible utilisé pour le chauffage (en kWh _{ef} /m ² /an) en 2006 : énergie finale (Rhône-Alpes)	47
Figure III-6 : Distribution des logements selon leur période de construction en fonction de leur performance énergétique : énergie primaire (Rhône-Alpes)	48
Figure III-7 : Part des logements dans les étiquettes énergie en fonction de leur période de construction en 2006 : énergie primaire (Rhône-Alpes).....	49
Figure III-8 : Distribution des logements selon leur performance énergétique en fonction du type de logement et de leur période de construction (en kWh _{ep} /m ² /an) en 2006 : énergie primaire (Rhône-Alpes)	49
Figure III-9 : Combustibles utilisés pour le chauffage en fonction de la période de construction du logement ...	50
Figure III-10 : Distribution des ménages en fonction de leur statut d'occupation, selon leur performance énergétique (en kWh _{ep} /m ² /an)	51
Figure III-11 : Distribution des propriétaires et des locataires en fonction de l'année de construction de leur logement (graphique de gauche) et du combustible utilisé pour le chauffage (graphique de droite) en 2006	52
Figure III-12 : Distribution des logements en fonction de la zone géographique, selon leur performance énergétique (en kWh _{ep} /m ² /an)	52
Figure III-13 : Quantité de gaz à effet de serre émise par les logements classés selon l'étiquette énergie (Rhône-Alpes) en 2006.....	54
Figure III-14 : Les émissions de gaz à effet de serre en Rhône-Alpes en 2001 (en kg _{eqCO2} /m ² /an) (Rhône-Alpes).	55
Figure III-15 : Part des combustibles utilisés pour le chauffage dans chaque étiquette climat kg _{eqCO2} /m ² /an en 2006 (Rhône-Alpes)	56
Figure III-16 : Distribution des logements selon leur performance énergétique en fonction du type de logement (collectif et individuel) et de leur période de construction (en kg _{eqCO2} /m ² /an), (Rhône-Alpes)	57
Figure III-17 : Distribution des ménages selon de leur statut d'occupation en fonction leur performance énergétique kg _{eqCO2} /m ² /an, (Rhône-Alpes)	57
Figure 0-1 : Le crédit d'impôt moins décisif que le prêt bancaire pour les gros travaux	149

<i>Figure IV-1 : The value functions with $\gamma < 1$ (optimum)</i>	<i>172</i>
<i>Figure IV-2 : The value functions with $\gamma > 1$ (optimum)</i>	<i>174</i>
<i>Figure V-1 : The value functions with $\gamma < 1$ (optimum) and $\gamma > 1$ under the assumption with discounting.....</i>	<i>179</i>
<i>Figure VIII-1 : Figures of numerical computation of the effects of σ_2^2</i>	<i>187</i>

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Caractéristiques des enquêtes logements de l'INSEE	24
Tableau II-1 : Les émissions de gaz carbonique	44
Tableau III-1 : Consommation énergétique moyenne en fonction du combustible utilisé pour le chauffage : estimation à partir de l'enquête-logement, Rhône-Alpes.	50
Tableau III-2 : Consommation énergétique moyenne en fonction du statut d'occupation du ménage	51
Tableau III-3 : Consommation énergétique moyenne en fonction de la zone géographique du logement	53
Tableau III-4 : Emission moyenne de GES en fonction du combustible utilisé pour le chauffage, (Rhône-Alpes)	56
Tableau III-5 : Emission moyenne de GES en fonction du statut d'occupation en 2006 en Rhône-Alpes	58
Tableau I-1 : Synthèse des entretiens réalisés	78
Tableau I-2 : Synthèse de l'offre du bâti (maisons, fenêtres et occlusions)	81
Tableau I-3 : Avantages et inconvénients écologiques des produits du bâti	82
Tableau I-4 : Synthèse de l'offre de produits d'isolation	84
Tableau I-5 : Avantages et inconvénients écologiques des produits d'isolation	86
Tableau I-6 : Synthèse de l'offre de produits de chauffage et température	90
Tableau I-7 : Avantages et inconvénients des produits de chauffage et température	90
Tableau I-8 : Synthèse de l'offre de production d'électricité renouvelable	93
Tableau I-9 : Avantages et inconvénients écologiques de l'offre de production d'électricité renouvelable	94
Tableau IV-1 : Energie grise, un exemple de quantification	144
Tableau O-1 : Les dix premiers producteurs de cellules photovoltaïques en 2008	148
Tableau O-2 : Segmentation du marché de l'amélioration énergétique par type de travaux	148
Tableau VIII-1 : Comparative Statics with $p=0$	192
Tableau VIII-2 : Comparative Statics with $p \neq 0$	193
Tableau IV-1 : les projections du nombre de ménages	223
Tableau V-1 : Le nombre de rénovations entre 2006 et 2010 en France et en Rhône-Alpes	228
Tableau V-2 : le scénario de référence pour la région Rhône-Alpes	234
Tableau V-3 : les plafonds de ressources et les taux applicables par l'ANAH	235
Tableau IX-1 : le tableau des durées de vie des équipements	249

Introduction

I. L'objectif du projet

Ce projet a pour ambition de simuler, sur un parc de logements, les effets économiques et environnementaux de différentes politiques visant à réduire la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre émanant du logement résidentiel. Le champ géographique couvert par l'étude est régional, à savoir celui de Rhône-Alpes¹, en raison de l'hétérogénéité de ses modes d'habitat (urbain, rural, individuel, collectif, plaine, montagne...) de son fort degré de renouvellement et de la présence locale d'industries novatrices en matière d'éco-conception.

Le projet s'est composé de 4 étapes qui constituent les 4 chapitres de ce rapport :

1. Description de l'état des lieux du parc de logements en Rhône-Alpes
2. Etude de l'offre en équipements économeurs d'énergie ou faiblement émetteurs de gaz à effet de serre, dans le résidentiel.
3. Etude de la demande d'investissements économeurs d'énergie dans le résidentiel
4. Projections de l'évolution du parc compte tenu des déterminants de l'offre et de la demande et de scénarios de politiques économiques.

II. Le contexte de l'étude

L'intérêt porté à l'efficacité énergétique dans le bâtiment s'inscrit dans une prise de conscience liée aux conclusions des groupes d'experts sur l'évolution du climat (voir rapports du GIEC), et à l'évaluation des coûts économiques du réchauffement climatique. Le rapport Stern, par exemple, conclut que les coûts du changement climatique correspondent à une perte annuelle de PIB mondial comprise entre 5 % et 20% ; en revanche, les coûts annuels d'une politique de forte réduction de GES se

¹ Afin de disposer des relais territoriaux nécessaires nous avons collaboré avec le « Cluster de recherche Energies de Rhône-Alpes ».

limiteraient à 1% du PIB mondial² (STERN, 2006). L'ensemble du rapport souligne la nécessité de stabiliser les niveaux de GES dans l'atmosphère entre 450 et 550 ppm³, ce qui exige de plafonner les émissions d'ici à 2050, à 25% au moins en deçà des niveaux actuels. En octobre 2006, la Commission européenne a présenté un plan d'action en ce sens. L'engagement pris par la France de diviser par 4 les émissions de gaz à effet de serre (« atteindre le facteur 4 ») s'inscrit dans cette démarche.

Dans ce contexte, le secteur du bâtiment est concerné au premier chef. Les bâtiments représentent 40% de la consommation énergétique totale de l'Europe. Une directive de 2002 sur la performance énergétique des bâtiments (« Directive PEB ») a proposé aux États membres une approche intégrée en vue d'une utilisation efficace de l'énergie dans le secteur des bâtiments. En novembre 2008, la Commission a proposé une refonte de la directive PEB, susceptible d'entraîner des économies d'énergie à hauteur de 60 à 80 millions de tonnes équivalent pétrole par an d'ici à 2020, soit une réduction de la consommation finale d'énergie de l'UE de 5 à 6 % supplémentaires par rapport aux directives de 2002. Sur la base de ces propositions, le Parlement européen a adopté, en avril 2009, une résolution législative appelant une législation encore plus ambitieuse et exigeante. Une amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments peut contribuer à l'objectif européen de réduire les gaz à effet de serre (GES) de 20% d'ici à 2020.

En France, le bâtiment est le secteur le plus consommateur d'énergie puisqu'il représente environ 43% de l'énergie primaire totale consommée, entre 19 et 25 %⁴ des émissions de CO₂⁵, et pourrait apporter une contribution allant jusqu'à 40% de réduction de la consommation d'énergie⁶ ce qui conforte les évaluations européennes. Parmi les programmes d'action issus du Grenelle de l'Environnement, la maîtrise de l'énergie dans le bâtiment figure donc dans les tous premiers⁷.

² Ces conclusions restent à ce jour controversées.

³ Ppm « partie par million » 1mg de GES équivalent CO₂ /kg d'air

⁴ Voir par exemple le rapport BALMES (2007).

⁵ WWF Newsletter, mai 2009.

⁶ Voir par exemple <http://www.logement.gouv.fr/>

⁷ Voir par exemple le discours de Conclusion du Grenelle par le président Nicolas SARKOZY et le programme « Moderniser le bâtiment et la ville » : <http://www.legrenelle-environnement.gouv.fr/grenelle-environnement/>

III. Description détaillée de la recherche réalisée

Nous présentons maintenant chacun des chapitres constitutifs de ce projet de recherche, en précisant pour chacun d'eux la méthodologie retenue, les hypothèses faites et les résultats obtenus. En revanche, la mise en perspective de ces travaux dans la littérature existante, bien sur développée dans chaque chapitre, n'est pas présente dans cette introduction.

Afin de réaliser, dans le premier chapitre, l'état des lieux du parc de logements en Rhône-Alpes, nous nous sommes appuyés sur les enquêtes « logement » de 1996-1997, de 2001-2002 et de 2005-2006 de l'INSEE. Le premier travail descriptif a permis de dessiner un profil des logements les plus énergivores et les plus émetteurs de gaz à effet de serre en Rhône-Alpes, ceux sur lesquels il est important d'agir pour respecter les objectifs de baisse des émissions de gaz à effet de serre fixés par le Grenelle de l'Environnement. Très schématiquement, parmi les gros consommateurs d'énergie et les gros émetteurs de GES, on trouve essentiellement des logements individuels, construits avant 1974, chauffés au fioul et habités par leur propriétaire. Les caractéristiques techniques de l'isolation sont encore assez mal saisies à ce niveau de l'étude par les données fournies dans l'enquête-logement.

Cette première analyse statistique a servi de base :

- (i) à un travail économétrique permettant d'estimer les principaux déterminants de la consommation énergétique, *ceteris paribus*, du côté des ménages. Ce travail a été effectué sur toute la France et n'est donc présenté qu'en annexe de ce document. Il se présente sous la forme d'un article de recherche, rédigé en anglais, qui a été présenté à des conférences internationales et nationales (Annual International Symposium on Economic Theory Policy and Applications et Association Française de Sciences Economiques en 2010) et qui est soumis à la revue « Energy

Economics ». Cet article a permis d'identifier les leviers les plus significatifs en matière d'efficacité énergétique et de suggérer une segmentation du parc de logement pour les simulations du chapitre 4.

- (ii) au chapitre 4 qui propose des simulations de l'évolution du parc de logements sous différents scénarios de politiques environnementales.

Le deuxième chapitre propose l'analyse de l'offre dans le secteur du bâtiment qui permet de réduire les émissions de GES. Il s'agit d'évaluer la dynamique de l'offre en matière d'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. Il est en effet nécessaire d'estimer la réactivité du secteur de la construction à une demande plus importante en matière d'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, pour confronter l'offre à la demande potentielle évaluée dans les autres volets du projet. Cette partie du projet de recherche s'appuie sur une démarche qualitative, basée sur une série d'entretiens semi-directifs auprès d'intervenants du secteur du bâtiment concernés par la problématique du projet. Cette démarche qualitative oblige à une certaine prudence dans les conclusions car nous avons souvent été confrontés à des acteurs, parties prenantes du marché, dont il a fallu consolider scientifiquement les affirmations (par la confrontation des affirmations de chacun, et/ou par l'inscription des diverses réponses dans une analyse économique plus globale). Nous avons choisi de réaliser un inventaire d'observations de l'offre qui, même s'il ne peut pas être exhaustif, fournit des éléments constitutifs, à un moment donné, de la situation. Cet ensemble de repères construit une image synthétique de l'offre qui permet d'aller ensuite vers des préconisations. Il est prévu que ce travail donne lieu à des présentations à des conférences en gestion durant l'année 2011 puis à une publication scientifique dans une revue de gestion.

Globalement, il ressort que les acteurs sont prêts à relever le défi du BBC et du respect des contraintes environnementales qui se dessinent dans un avenir proche. Les produits et systèmes existent, et leurs performances sont cohérentes avec les exigences de réduction des émissions de GES dans le bâtiment. Le développement

rapide du marché laisse penser que les coûts se réduiront rapidement ; des nouveaux produits pourront profiter d'économies d'échelle productives pour faire face à une demande élargie. Par ailleurs, la contrainte environnementale prend une telle importance sur le marché du bâtiment que la plupart des acteurs l'estime comme une évidence incontournable pour l'avenir, qui les oblige à innover et à faire des investissements massifs afin de bien se positionner sur le marché de demain. Notre analyse des enjeux de développement de l'offre a souligné cette dynamique au niveau du marché, mais a également permis de mettre en évidence plusieurs limites. Tout d'abord, l'action des pouvoirs publics joue certes un rôle notable dans le développement de l'offre, mais est diversement appréciée par les acteurs. Par ailleurs, nous avons identifié 4 freins principaux au développement de l'offre : (i) les freins techniques et de coût, (ii) la formation insuffisante des artisans, (iii) le retard des producteurs français, (iv) la coordination insuffisante de l'offre. Pour prendre en compte ces freins, le modèle de simulation du chapitre 4 intégrera donc un degré de réaction de l'offre à la demande.

Le troisième chapitre analyse le côté demande, c'est à dire la rapidité d'adoption des investissements économiseurs d'énergie par les ménages. Cela nécessite une étude approfondie du processus de décision en matière de choix technologique du ménage, sachant que la décision est en partie irréversible, prise dans un environnement incertain et qu'elle résulte d'un arbitrage entre consommation, épargne et rénovation du logement⁸. Ce travail se présente sous la forme d'un article de recherche, rédigé en anglais dans le chapitre 3 de ce rapport. Cet article a fait l'objet de présentations à des conférences internationales (Conference in Public Economic Theory et Conference of the World Association of Environmental and Resource Economists) et nationales (Association Française de Sciences Economiques en 2010) et est

⁸ Il est à noter que la distinction entre le comportement de rénovation des locataires et des propriétaires n'a pas pu être étudiée dans le cadre de ce modèle théorique comme c'était initialement prévu faute de temps. Ce travail est cependant en cours, dans le cadre du projet émanant du « Cluster de recherche Energies de Rhône-Alpes ». Les simulations du chapitre 4 distinguent cependant ces deux types d'agents.

actuellement en révision pour la revue « Annales d'économie et statistiques ».

La littérature a mis en évidence un « paradoxe énergétique » dans la mesure où certaines observations semblent contradictoires. Ainsi, (i) la coexistence d'une consommation d'énergie accrue et d'un très faible taux d'adoption d'investissements économeurs d'énergie semble paradoxale, tout comme le fait que (ii) les subventions n'ont qu'un très faible pouvoir incitatif sur l'adoption de ces investissements. Une explication plausible réside dans la prise en compte des incertitudes (sur le prix de l'énergie et les émissions de GES), jointe à l'irréversibilité de l'investissement (Hasset et Metcalf (1999)). L'intuition est la suivante : avoir l'opportunité de prendre une décision irréversible (l'adoption d'investissements économeurs d'énergie) en incertitude engendre une valeur de l'option d'adopter cette décision. Dans un cadre d'équilibre partiel, dans lequel investir implique de payer le coût d'investissement mais pas d'arbitrer avec la consommation, cette valeur d'option retarde en effet la décision d'adoption (Dixit et Pindyck, 1994 ; Pindyck, 2000) car elle déconnecte la valeur de l'investissement de sa valeur actualisée nette.

Nous avons construit un modèle d'équilibre général pour étudier la réaction, en matière d'investissements économeurs d'énergie, des ménages qui arbitrent entre consommation, épargne et rénovation du logement en présence d'incertitude. Le rendement financier de l'épargne ainsi que l'efficacité énergétique de la technologie qui économise l'énergie sont incertains. Le modèle est résolu analytiquement pour un taux d'actualisation nul et simulé pour un taux d'actualisation strictement positif. Nous obtenons que l'adoption dépend non seulement des paramètres technologiques (coût de la technologie, efficacité, incertitude) mais aussi des préférences des agents. Surtout, l'incertitude sur l'efficacité énergétique n'affecte pas le timing de l'adoption, contrairement à ce qui est obtenu en équilibre partiel. Ainsi, l'explication habituelle du paradoxe énergétique basée sur l'existence d'une valeur d'option n'est plus valide lorsque le modèle est étendu à l'équilibre général. Par ailleurs, cela nous permet de conclure que le modèle de simulation des politiques environnementales du quatrième chapitre de ce projet de recherche pourra faire abstraction de l'incertitude

sur l'efficacité énergétique sans que cela remette en cause sa validité.

La dynamique inhérente au parc de logements rhônalpin et les effets des politiques environnementales sont présentés dans le chapitre 4 de ce rapport. Pour obtenir ces résultats, nous avons construit un modèle basé sur une approche bottom-up. Cette approche extrapole la consommation d'énergie estimée d'un ensemble représentatif de résidences principales au niveau régional (et national en annexe du chapitre 4). Ce modèle permet, d'une part, de comprendre la décision de rénovation des ménages mais aussi de mesurer l'impact des politiques sur l'objectif fixé par le gouvernement soit diviser par 4 les émissions de d'ici à 2050. L'originalité du modèle réside dans le fait que nos estimations de consommations énergétiques ne sont pas uniquement déterminées par des facteurs physiques ou thermiques. Ainsi, nous introduisons des variables socio-économiques. Dans le cadre de l'estimation de la consommation liée à l'eau chaude et au chauffage, nous tenons compte des rénovations qui affectent les consommations moyennes. Les rénovations sont fonctions du revenu des individus, de leur statut d'occupation et de leur taux d'endettement. L'objectif est d'identifier des strates de population afin d'appliquer des mesures adéquates au public visé. Finalement, pour déterminer la consommation énergétique liée à chaque usage, nous intégrons la dynamique inhérente au parc de logements. A notre connaissance, il n'existe pas de modèle similaire au nôtre à l'échelle régionale comme nationale.

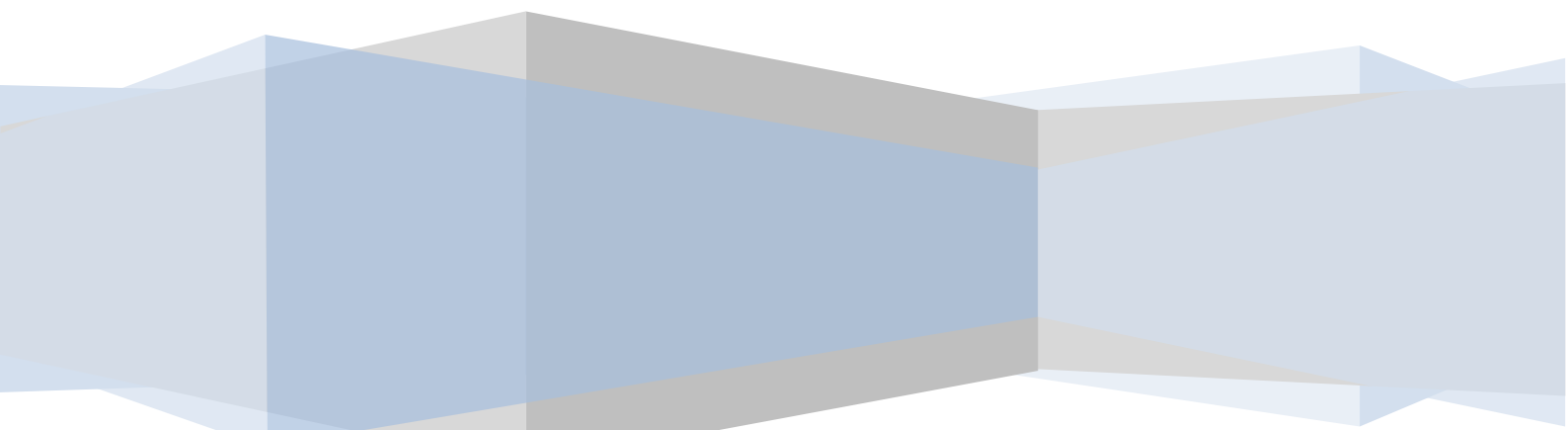
Nous montrons que les politiques mises en place actuellement sont efficaces mais pas suffisantes pour parvenir au facteur 4 (division par deux des émissions) et au seuil des 50 kWh_{ep}/m²/an (consommation moyenne en 2050 de 102 kWh_{ep}/m²/an en maintenant les politiques actuelles). Elles conduisent à un taux de rénovation de 9.67%, contre 0.56% sans ces mesures. L'effet groupé des politiques semble plus important que l'effet cumulé qu'elles produisent individuellement. Le crédit d'impôt est la mesure la plus efficace si nous nous intéressons uniquement au nombre de logements rénovés. D'un point de vue budgétaire, ce constat peut être nuancé. Il serait intéressant d'étudier le nombre de rénovations réalisées pour chaque euro dépensé et cela pour chaque mesure. Par ailleurs, ce sont les ménages à forts revenus

qui rénovent le plus. Mais une fois atteint le seuil des $70 \text{ kWh}_{ep}/\text{m}^2/\text{an}$, ces derniers arrêtent de rénover car ce n'est plus avantageux financièrement pour eux. Il a donc été mis en évidence que pour maintenir un rythme de rénovations élevé, il faut aider les ménages à faibles revenus. En effet, ces derniers vivent dans les logements les plus énergivores et en l'absence de mesures, ils ne rénovent pas du tout. Nous pouvons parler de pauvreté énergétique. Il est par exemple plus efficace de mettre en place une prime pour les faibles revenus que pour récompenser les ménages qui ont effectué des bouquets de travaux. Nous remarquons que d'une manière générale, les taxes sur les logements les plus énergivores ont un impact plus importants sur le nombre de rénovations et la consommation d'énergie que des primes ou des subventions. De plus, l'impact du crédit d'impôt est très significatif sur le nombre de rénovations, mais l'augmenter n'a pas un effet considérable. Finalement, une combinaison de mesures trop importantes pour être réalistes, ne permet tout de même pas d'atteindre le facteur 4 en 2050 et ce, même si le taux de renouvellement du parc de logements (taux de démolition et de nouvelles constructions) est accéléré.

A première vue, les politiques publiques seules ne suffisent donc pas à réduire significativement la consommation énergétique. Ces mesures doivent être combinées à une politique de recherche et développement active en faveur des équipements économeurs d'énergie. Cependant, nous avons été amenés à faire plusieurs hypothèses fortes. Tout d'abord, les estimations de consommation énergétique (consommations de référence et gains liés aux rénovations) reposent sur des analyses techniques que nous avons prises telles quelles via les logiciels 3CL. Ensuite, nous avons considéré que les réglementations thermiques étaient immédiatement appliquées ou nous avons fait des hypothèses d'évolution sur la répartition des différents appareils électroménagers dans les étiquettes énergétiques jusqu'en 2050. Enfin, il a évidemment été impossible de tenir compte des innovations techniques majeures qui surviendront dans le futur ou de l'évolution de la sensibilité environnementale des ménages. Ces limites ouvrent des possibilités d'extensions futures de ce travail.

Chapitre 1 : Etat des lieux énergétique du parc de logements en Rhône-Alpes

Anna Risch et Claire Salmon



Plan du chapitre :

I. Présentation de l'enquête-logement : échantillon Rhône-Alpes en 1996-97 et en 2001-02	24
A. Les logements en Rhône-Alpes	25
B. Les ménages en Rhône-Alpes.....	30
C. La facture énergétique des logements en Rhône-Alpes.....	32
II. Estimation de la consommation énergétique des logements et de leurs émissions de GES : Méthodologie	34
A. Etape 1 : Des facteurs énergétiques à la consommation énergétique finale.....	35
1. La redéfinition de l'échantillon	35
2. La reconstitution des prix des énergies	36
3. Echantillon final.....	39
B. Etape 2 : de la consommation d'énergie finale à la consommation d'énergie primaire	42
C. Etape 3 : de la consommation d'énergie primaire des logements à leurs émissions de gaz à effet de serre :.....	43
III. Estimation de la consommation énergétique des bâtiments en Rhône-Alpes et leurs émissions de gaz à effet de serre : Analyse statistique	44
A. La consommation d'énergie finale des ménages en Rhône-Alpes	44
B. La consommation énergétique primaire en Rhône-Alpes	48
C. Les émissions de gaz à effet de serre par logement en Rhône-Alpes.....	54
IV. Conclusion	58
V. Bibliographie.....	59

Liste des figures :

Figure I-1 : Années de construction des logements en Rhône-Alpes	25
Figure I-2 : Surface des logements en m ² en Rhône-Alpes	26
Figure I-3 : Proportion de logements individuels selon la période de construction – enquête de 2006 - en Rhône-Alpes	26
Figure I-4 : Taille Distribution géographique des logements en Rhône-Alpes	27
Figure I-5 : Le confort dans les logements en Rhône-Alpes	28
Figure I-6 : Taille des logements en fonction du nombre de personnes dans le ménage en Rhône-Alpes	29
Figure I-7 : Isolation du logement selon sa période de construction – enquête logement 2006 - en Rhône-Alpes	30
Figure I-8 : Composition du ménage – Enquête 2006 - en Rhône-Alpes	30
Figure I-9 : Le statut d'occupation des logements en 2001 en Rhône-Alpes	31
Figure I-10 : Le statut d'occupation des logements en 2006 en Rhône-Alpes	31
Figure I-11 : Pourcentage de ménages ayant des dépenses dans les différences combustibles en Rhône-Alpes	32
Figure I-12 : Montant annuel moyen des dépenses dans les différents combustibles en Rhône-Alpes	32
Figure I-13 : Montant annuel moyen en 2006, des dépenses dans les différents combustibles en fonction de la surface du logement en Rhône-Alpes	33
Figure II-1 : Combustibles utilisés par les ménages de Rhône-Alpes d'après l'enquête logement de 2006	36
Figure II-2 : Le prix de l'électricité en 2006	37
Figure II-3 : Le prix du gaz	38
Figure II-4 : L'échantillon final	40
Figure II-5 : Les charges locatives et de copropriété (échantillon total en Rhône-Alpes de 2631 individus)	40
Figure III-1 : Distribution des performances énergétiques en kWh d'énergie finale/m ² /an en 2002 et 2006	45
Figure III-2 : Distribution des performances énergétiques en fonction du statut d'occupation des ménages (en kWh _{ef} /m ² /an) en 2006 : énergie finale (Rhône-Alpes)	46
Figure III-3 : Distribution des logements individuels et collectifs selon leur performance énergétique (en kWh _{ef} /m ² /an) énergie finale (Rhône-Alpes)	46
Figure III-4 : Distribution des logements selon leur performance énergétique en fonction de leur date de construction (en kWh _{ef} /m ² /an) en 2006 : énergie finale (Rhône-Alpes)	47
Figure III-5 : Distribution des logements selon leur performance énergétique en fonction du combustible utilisé pour le chauffage (en kWh _{ef} /m ² /an) en 2006 : énergie finale (Rhône-Alpes)	47
Figure III-6 : Distribution des logements selon leur période de construction en fonction de leur performance énergétique : énergie primaire (Rhône-Alpes)	48
Figure III-7 : Part des logements dans les étiquettes énergie en fonction de leur période de construction en 2006 : énergie primaire (Rhône-Alpes)	49
Figure III-8 : Distribution des logements selon leur performance énergétique en fonction du type de logement et de leur période de construction (en kWh _{ep} /m ² /an) en 2006 : énergie primaire (Rhône-Alpes)	49
Figure III-10 : Combustibles utilisés pour le chauffage en fonction de la période de construction du logement	50
Figure III-11 : Distribution des ménages en fonction de leur statut d'occupation, selon leur performance énergétique (en kWh _{ep} /m ² /an)	51
Figure III-12 : Distribution des propriétaires et des locataires en fonction de l'année de construction de leur logement (graphique de gauche) et du combustible utilisé pour le chauffage (graphique de droite) en 2006	52
Figure III-13 : Distribution des logements en fonction de la zone géographique, selon leur performance énergétique (en kWh _{ep} /m ² /an)	52
Figure III-14 : Quantité de gaz à effet de serre émise par les logements classés selon l'étiquette énergie (Rhône-Alpes) en 2006	54
Figure III-15 : Les émissions de gaz à effet de serre en Rhône-Alpes en 2001 (en kg _{eq} CO ₂ /m ² /an) (Rhône-Alpes)	55
Figure III-16 : Part des combustibles utilisés pour le chauffage dans chaque étiquette climat kg _{eq} CO ₂ /m ² /an en 2006 (Rhône-Alpes)	56
Figure III-17 : Distribution des logements selon leur performance énergétique en fonction du type de logement (collectif et individuel) et de leur période de construction (en kg _{eq} CO ₂ /m ² /an), (Rhône-Alpes)	57
Figure III-18 : Distribution des ménages selon de leur statut d'occupation en fonction leur performance énergétique kg _{eq} CO ₂ /m ² /an, (Rhône-Alpes)	57

Liste des tableaux :

Tableau IV-1 : Caractéristiques des enquêtes logements de l'INSEE _____	24
Tableau V-1 : Les émissions de gaz carbonique _____	44
Tableau VI-1 : Consommation énergétique moyenne en fonction du combustible utilisé pour le chauffage : estimation à partir de l'enquête-logement, Rhône-Alpes. _____	50
Tableau VI-2 : Consommation énergétique moyenne en fonction du statut d'occupation du ménage _____	51
Tableau VI-3 : Consommation énergétique moyenne en fonction de la zone géographique du logement _____	53
Tableau VI-4 : Emission moyenne de GES en fonction du combustible utilisé pour le chauffage, (Rhône-Alpes) _____	56
Tableau VI-5 : Emission moyenne de GES en fonction du statut d'occupation en 2006 en Rhône-Alpes _____	58

Afin de réaliser l'état des lieux du parc de logements en Rhône-Alpes, nous nous sommes appuyés sur les enquêtes « logement » de 1996-1997, de 2001-2002 et de 2005-2006 de l'INSEE. Ces bases de données nous apportent les informations utiles pour :

- ❖ décrire les caractéristiques techniques des logements
- ❖ décrire les caractéristiques démographiques et économiques des occupants
- ❖ estimer la consommation énergétique des logements et leurs émissions de gaz à effet de serre.

Nous allons présenter dans ce document la méthodologie employée pour dresser notre état des lieux, ainsi que nos premiers résultats.

I. Présentation de l'enquête-logement : échantillon Rhône-Alpes en 1996-97 et en 2001-02

Nous disposons, pour notre travail, de 2 631 ménages répondant à l'enquête-logement en 2002 et de 1743 ménages en 2006. D'après les pondérations, on estime à environ 2,3 millions de logements la taille du parc de résidences principales en Rhône-Alpes sur ces deux périodes. La représentativité de notre échantillon est jugée relativement bonne, au vu des informations fournies lors du recensement de 1999.

Les principaux thèmes abordés dans l'enquête-logement de l'INSEE concernent :

- les caractéristiques physiques du logement (surface, âge, étage, etc...)
- la qualité et le confort de l'habitat (dont la qualité d'isolation perçue par le ménage)
- les modalités juridiques d'occupation du logement (propriétaire, locataire, etc.)
- les dépenses (dont les dépenses énergétiques) et les aides associées au logement
- les caractéristiques socio-démographiques des ménages, leur revenu, leur patrimoine en logements et leur mobilité résidentielle

Seules les informations utiles à notre étude seront présentées dans la suite du rapport. Nous présenterons trois points successivement, en comparant les résultats sur 2001-2002 et 2005-2006:

- ❖ Les logements
- ❖ Les ménages
- ❖ La facture énergétique

Tableau I-1 : Caractéristiques des enquêtes logements de l'INSEE

	Enquête de 2001-2002	Enquête de 2005-2006*
Échantillonnage	RP 99 et BSLN 99, achevés depuis le RP 99	
<u>Au niveau national :</u>		
Taille de l'échantillon	47 647 adresses	64 240 adresses
Nombre de répondants	32 156 ménages, soit 78 791 individus	42 965 ménages, soit 110 398 individus et 42 702 logements
<u>Au niveau de la région Rhône-Alpes :</u>		
Echantillon final	2 631 résidences principales	1743 résidences principales

*Particularités de l'enquête logement 2006 par rapport à celle de 2002 :

- L'échantillon est plus important car l'enquête logement 2006 inclus les DOM-TOM
- Un logement peut être composé de plusieurs ménages

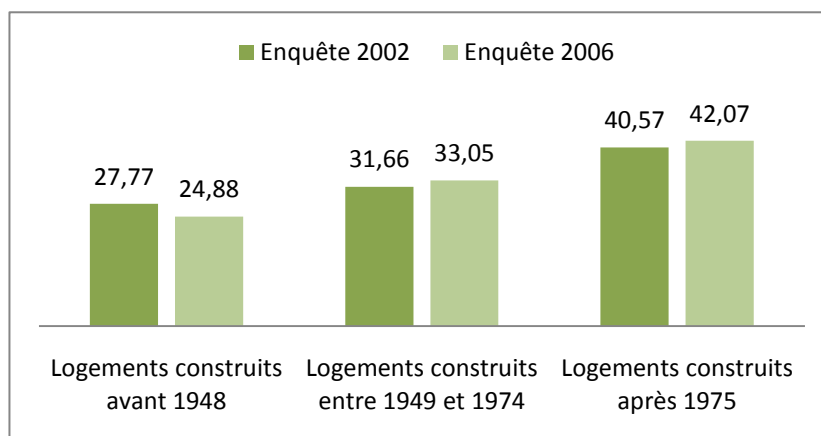
A. Les logements en Rhône-Alpes

Nous présentons ici de manière succincte quelques caractéristiques du parc de logements en Rhône-Alpes en 2002 et en 2006.

Age

Le parc de logements se renouvelle assez lentement. En 2006, en Rhône-Alpes, près de 25% des logements avaient plus de 60 ans, 42% moins de 25 ans.

Figure I-1 : Années de construction des logements en Rhône-Alpes

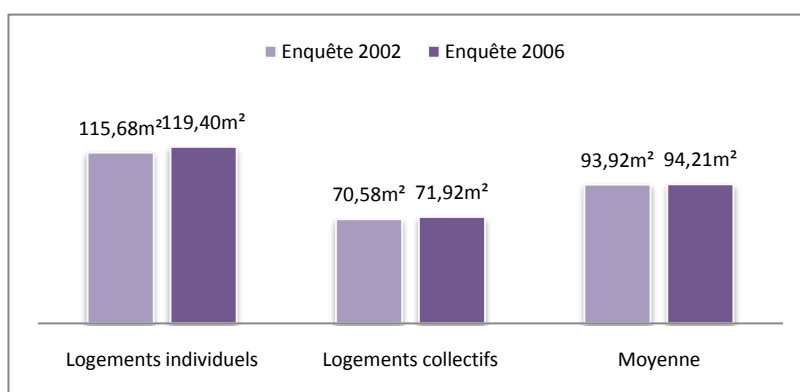


Source : enquête-logement, 2001-02 et 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

Type de logement et surface

En 2006, la part des logements individuels en Rhône-Alpes avoisine les 47%. Ils sont de plus en plus nombreux dans le parc de logements de la région, mais restent minoritaires. Cette augmentation va de pair avec une hausse de la superficie moyenne des logements. En effet, les logements individuels sont significativement plus grands -environ 117 m² contre 71 m² pour les logements collectifs, en moyenne sur les deux enquêtes.

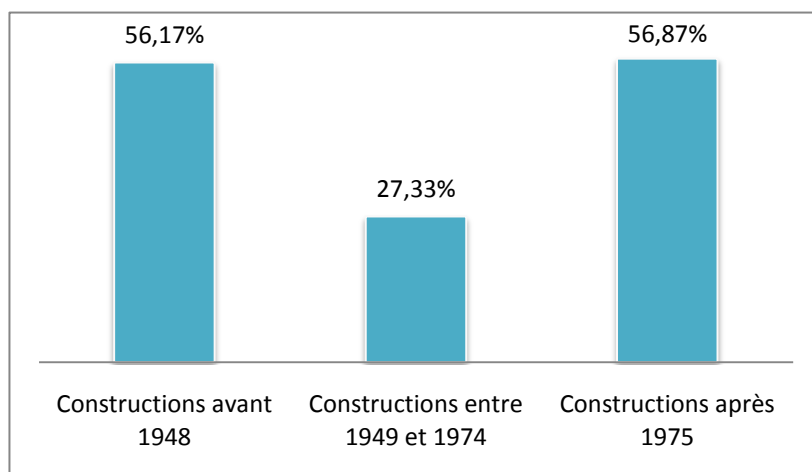
Figure I-2 : Surface des logements en m² en Rhône-Alpes



Source : enquête-logement, 2001-02 et 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

Figure I-3 : Proportion de logements individuels selon la période de construction –

enquête de 2006 - en Rhône-Alpes



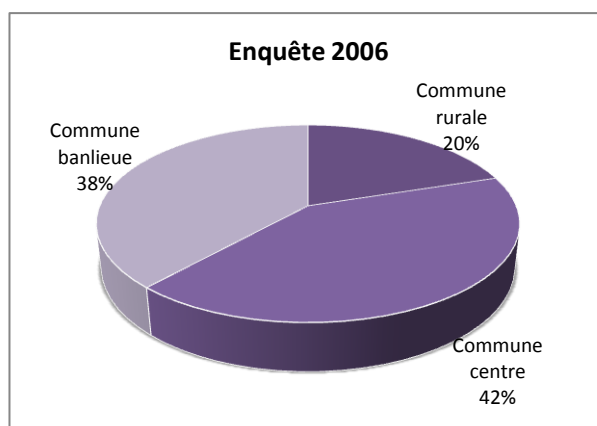
Source : enquête-logement, 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

La période 1949-1974 paraît assez atypique concernant la construction. Les logements neufs sont pour les trois-quarts des logements collectifs sur cette période.

Localisation

La distribution géographique des logements est la même en 2002 et en 2006. La majorité des logements se situent dans des communes centres. Seulement un cinquième des logements sont en zone rurale en Rhône-Alpes.

Figure I-4 : Taille Distribution géographique des logements en Rhône-Alpes

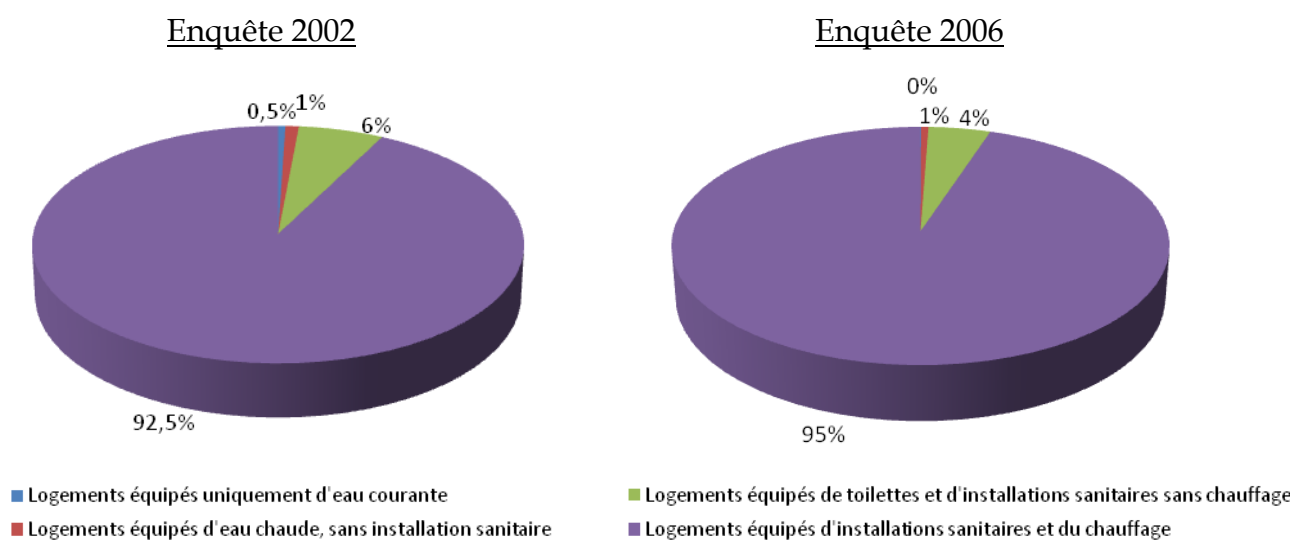


Source : enquête-logement, 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

Confort et surpeuplement

Le confort des logements s'est amélioré en quatre ans. Il y a de moins en moins d'habitations sans eau chaude, ni installation sanitaire et chauffage. En 2002, les logements équipés d'eau courante uniquement (sans installation sanitaire et chauffage) représentaient 0,52% du parc de résidences principales en Rhône-Alpes, et en 2006 ce chiffre a diminué pour atteindre 0,04%.

Figure I-5 : Le confort dans les logements en Rhône-Alpes

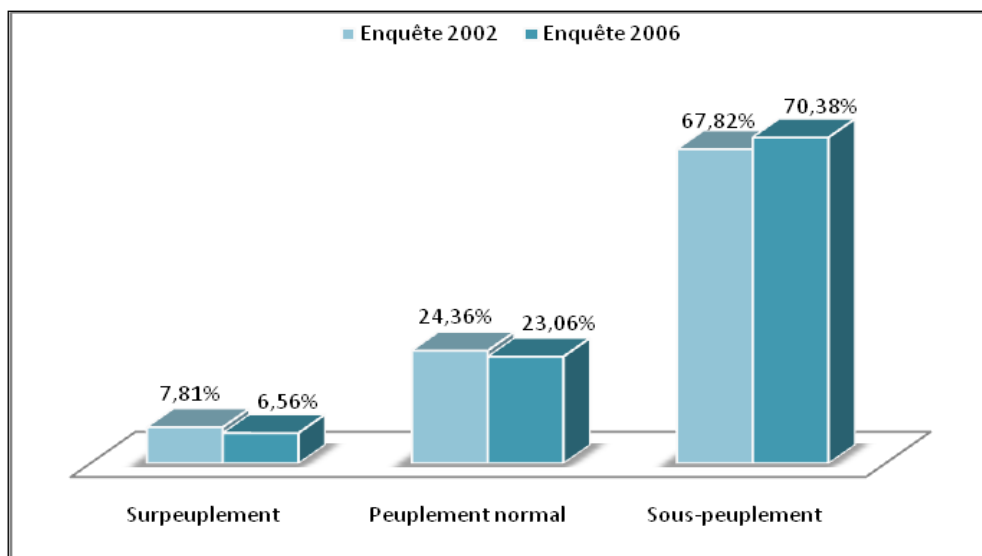


Source : enquête-logement, 2001-02 et 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

La plupart des logements de Rhône-Alpes sont sous-peuplés au sens de l'INSEE ; le nombre de pièces est supérieur aux nombres de pièces nécessaires au ménage⁹.

⁹ Le nombre de pièces nécessaires est calculé d'après les caractéristiques des personnes du ménage. On compte :
- une pièce de séjour pour le ménage
- une pièce pour la personne de référence et son conjoint
- une pièce pour chaque couple n'incluant pas la personne de référence
- une pièce pour les autres personnes non célibataires et pour les célibataires de 19 ans et plus
- et pour les célibataires de moins de 19 ans : une pièce pour deux enfants s'ils sont de même sexe ou ont moins de 7 ans, sinon une pièce par enfant.

Figure I-6 : Taille des logements en fonction du nombre de personnes dans le ménage en Rhône-Alpes



Source : enquête-logement, 2001-02 et 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

Note : Surpeuplement : nombre de pièces du logement < nombre de pièces nécessaires au ménage

Peuplement normal : nombre de pièces du logement = nombre de pièces nécessaires au ménage

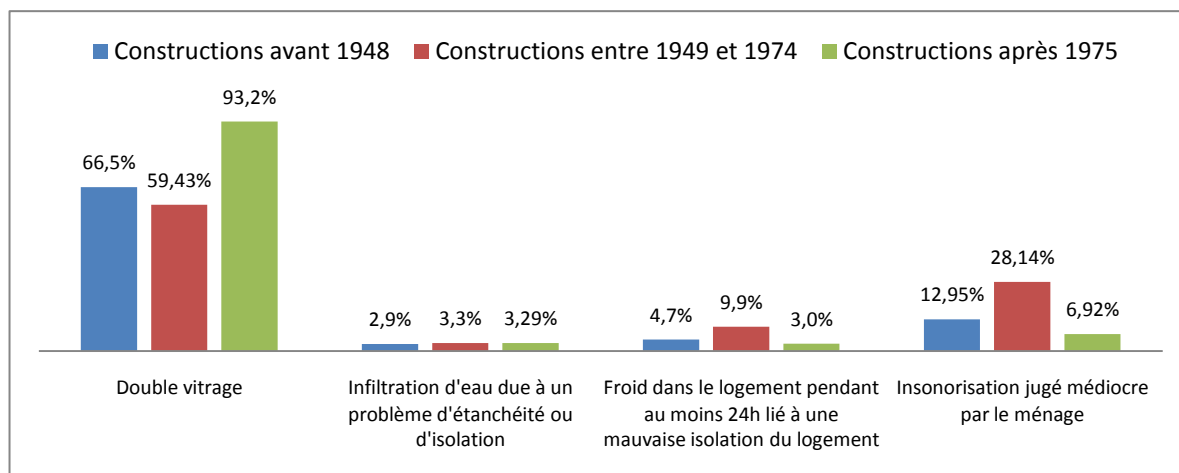
Sous-peuplement : nombre de pièces du logement > nombre de pièces nécessaires au ménage

Isolation et insonorisation

De manière générale, les nouveaux logements semblent être de mieux en mieux isolés.

Avant 1974, 62,5% des nouveaux logements avaient la majorité de leurs fenêtres équipées en double vitrage, contre plus de 90% sur la période suivante. Les problèmes de froid et d'insonorisation, de toute façon rares, ont été moins nombreux courant 2006 dans les logements plus récents. Les ménages semblent être également plus satisfaits de l'insonorisation de leur logement si celui-ci a été construit après 1975.

Figure I-7 : Isolation du logement selon sa période de construction – enquête logement 2006 - en Rhône-Alpes



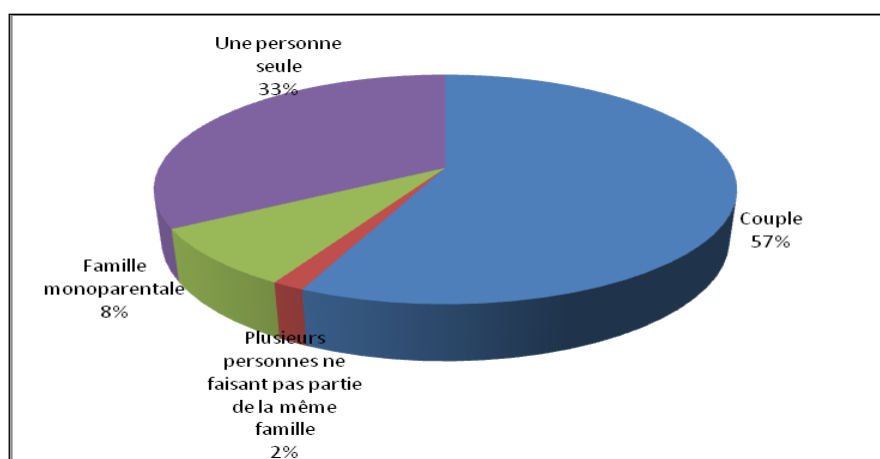
Source : enquête-logement, 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

B. Les ménages en Rhône-Alpes

Taille

Les ménages sont composés d'environ 2,3 personnes en moyenne, en 2002 et 2006. Ce sont essentiellement des couples, avec ou sans enfants.

Figure I-8 : Composition du ménage – Enquête 2006 - en Rhône-Alpes



Source : enquête-logement, 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

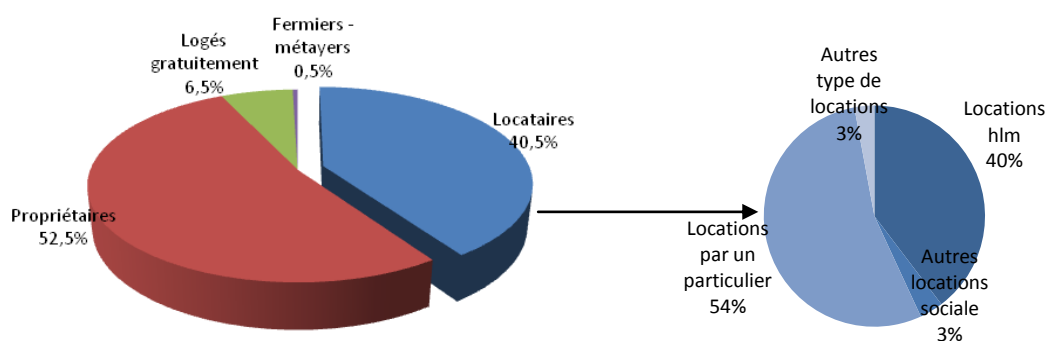
Revenu

Le revenu des ménages a augmenté de 5,4% entre les deux enquêtes, atteignant en 2006 près de 30 730 euros annuel. Cela s'est accompagné d'une légère hausse du nombre de propriétaires et d'une augmentation de la superficie des logements (d'environ 2,3 m² entre les deux enquêtes).

Le statut d'occupation

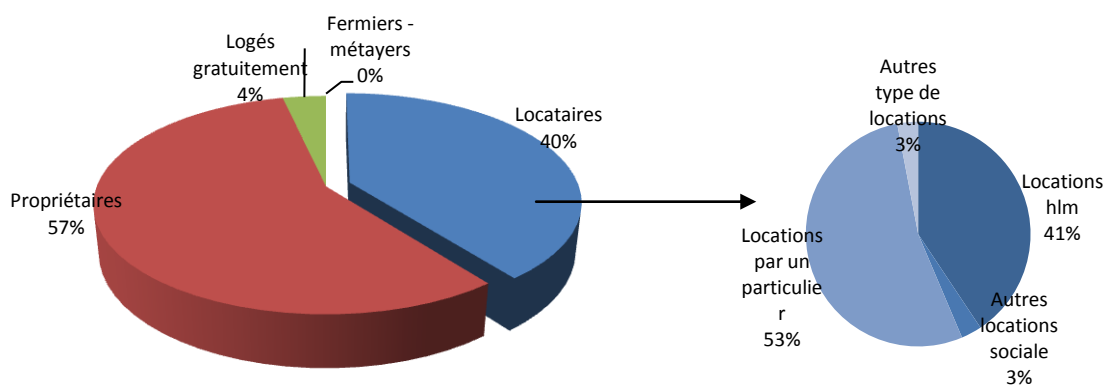
La part des propriétaires a augmenté entre les deux années d'enquête, au détriment de celle des locataires. Elle a ainsi atteint les 56,9% en 2006 prenant 4,4 points de pourcentage par rapport à 2002. Les locations sur le marché privé représentent en 2006 un peu plus de la moitié des locations (53%) ; les locations à titre social 44%.

Figure I-9 : Le statut d'occupation des logements en 2001 en Rhône-Alpes



Source : enquête-logement, 1996-97 et 2001-02, INSEE, calcul des auteurs.

Figure I-10 : Le statut d'occupation des logements en 2006 en Rhône-Alpes



Source : enquête-logement, 2001-02 et 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

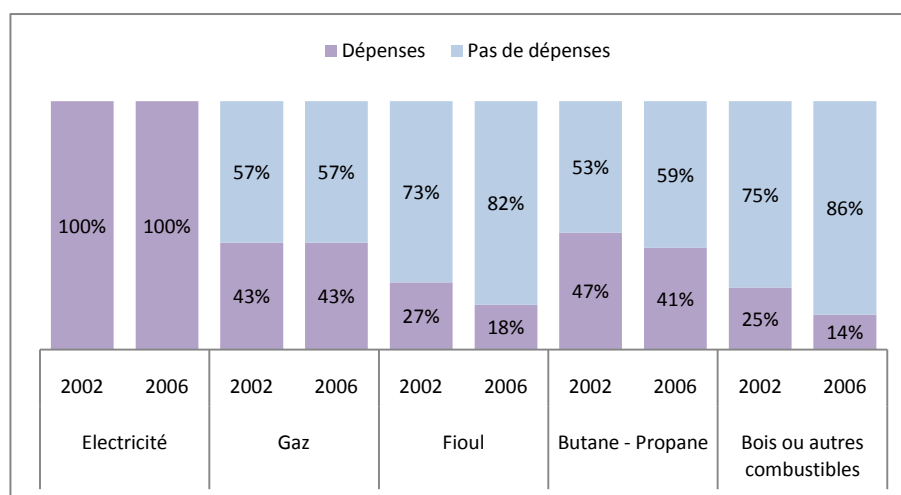
Les propriétaires et les locataires de la région Rhône-Alpes vivent dans des logements avec des caractéristiques quelque peu différentes. Par exemple, 71% des propriétaires vivent dans des logements individuels contre seulement 13% des locataires. En moyenne, les propriétaires vivent dans des logements de plus de 112m² contre 68,4m² pour les locataires.

Les propriétaires vivent également dans des logements plus récents et ont un revenu annuel nettement plus élevé que le reste de l'échantillon. Ils font également plus de travaux dans leur logement.

C. La facture énergétique des logements en Rhône-Alpes

Les dépenses énergétiques des ménages sont essentiellement liées au chauffage, puis aux appareils de cuisson ou éventuellement aux appareils indépendants fournissant de l'eau chaude.

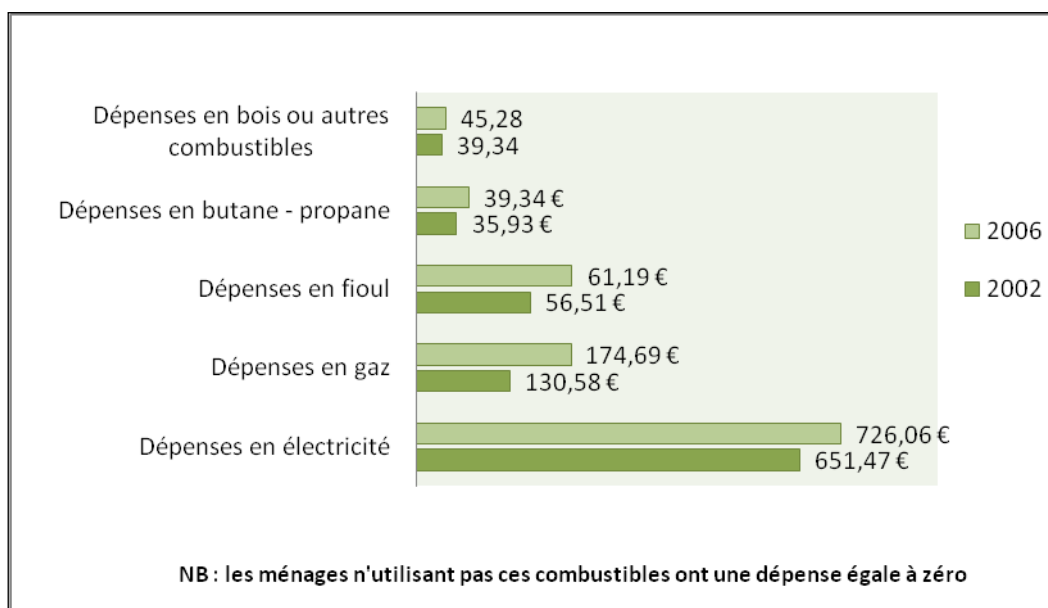
Figure I-11 : Pourcentage de ménages ayant des dépenses dans les différences combustibles en Rhône-Alpes



Source : enquête-logement, 2001-02 et 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

Figure I-12 : Montant annuel moyen des dépenses dans les différents combustibles

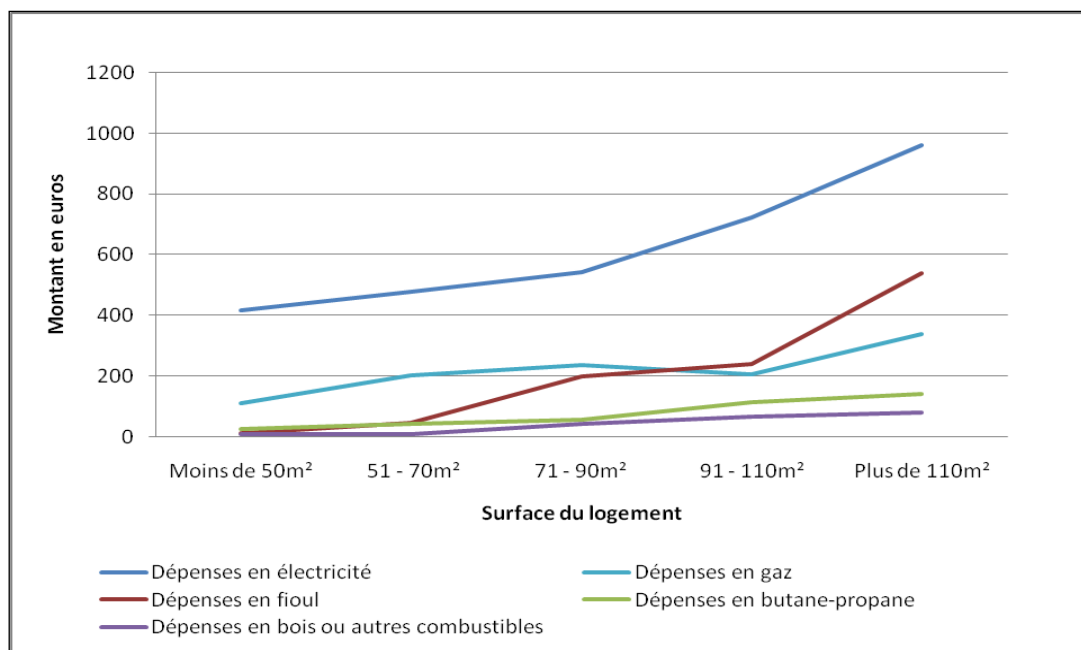
en Rhône-Alpes



Source : enquête-logement, 2001-02 et 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

Ces dépenses sont évidemment très dépendantes de la surface du logement.

Figure I-13 : Montant annuel moyen en 2006, des dépenses dans les différents combustibles en fonction de la surface du logement en Rhône-Alpes



Source : enquête-logement, 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

Au delà de ce résultat, il apparaît que les logements qui consomment le plus (en

euros) sont des logements de grande taille, de plus de 140m² en moyenne. Ce sont pour près de 90% d'entre eux des logements individuels. Ils sont plus nombreux que le reste de l'échantillon à se situer en zone rurale, et à avoir été construits avant 1948. Et ce sont des logements qui semblent moins bien isolés. Ce sont pourtant des logements qui ne semblent pas moins bien isolés. Ils sont, par exemple, pas moins nombreux à avoir des doubles vitrages. Ils sont habités principalement par leur propriétaire. On y retrouve des ménages composés de plus de 3 personnes en moyenne, avec des revenus nettement plus élevés que le reste de l'échantillon. Compte tenu de ces constats statistiques, nous avons jugé qu'il était intéressant d'aller plus loin dans l'analyse, afin de formuler des recommandations de politiques économiques adaptées à chaque catégorie de logement. Les caractéristiques, *ceteris paribus*, de la consommation énergétique ont fait l'objet d'un travail approfondi pour la France. Ce travail est disponible en annexe.

II. Estimation de la consommation énergétique des logements et de leurs émissions de GES : Méthodologie

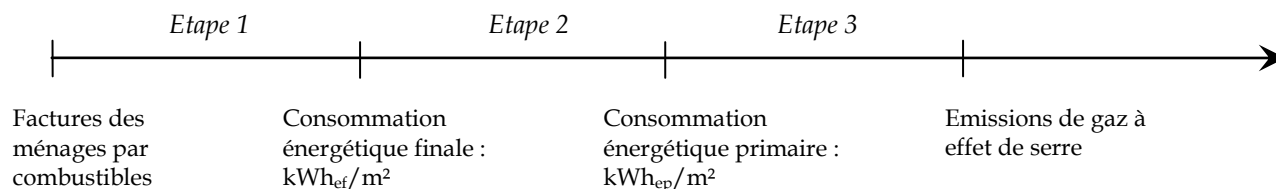
L'objectif final de cet état des lieux du logement en Rhône-Alpes est d'estimer la consommation énergétique et les émissions de GES des logements en Rhône-Alpes.

Nous connaissons le montant annuel payé par les ménages en électricité, en fioul, en gaz naturel, en butane et propane, et en bois et charbon. Nous allons, à partir de là, estimer le nombre de kWh consommés qui a entraîné cette dépense. Nous estimerons ensuite les émissions de GES.

Schématiquement, notre démarche peut se décrire de la manière suivante, en trois étapes.

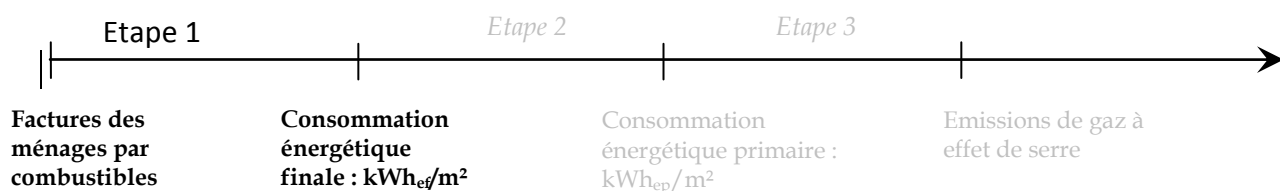
- ❖ Etape 1 : Estimer la consommation énergétique finale à partir des factures
- ❖ Etape 2 : Convertir la consommation énergétique finale en consommation énergétique primaire.

- ❖ Etape 3 : Estimer les émissions de GES à partir des consommations énergétiques primaires.



Nous présentons ici la méthodologie pour chacune de ces trois étapes et nous présenterons les premiers résultats pour les années 2002 et 2006 dans la partie C de ce rapport.

A. Etape 1 : Des facteurs énergétiques à la consommation énergétique finale.



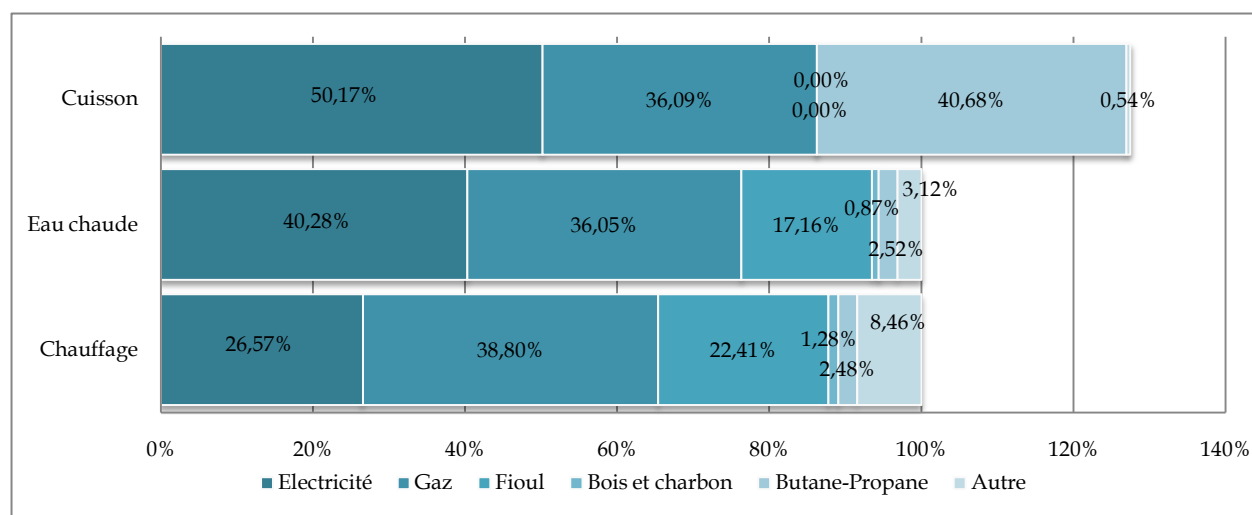
1. La redéfinition de l'échantillon

Pour que nos estimations concernant la consommation énergétique soient exactes, il est nécessaire que les montants déclarés par les ménages prennent en compte le chauffage. Cela n'est pas toujours le cas compte tenu de l'existence des chauffages collectifs et mixtes. Pour certains ménages, cette dépense est incluse dans les charges de copropriété ou les charges locatives.

Nous serons donc contraints d'écarter ces observations pour ne pas biaiser les résultats. Plus généralement, seront écartés tous les ménages pour lesquels l'information sur la consommation énergétique réelle ne peut être déduite des informations fournies.

Le point 3 de ce paragraphe détaillera l'échantillon.

Figure II-1 : Combustibles utilisés par les ménages de Rhône-Alpes d'après l'enquête logement de 2006



Source : enquête-logement 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

NB : Pour la cuisson, les pourcentages dépassent les 100% car des ménages utilisent plusieurs combustibles, comme l'électricité et le gaz par exemple. Pour le chauffage, nous avons pris en compte le combustible principal.

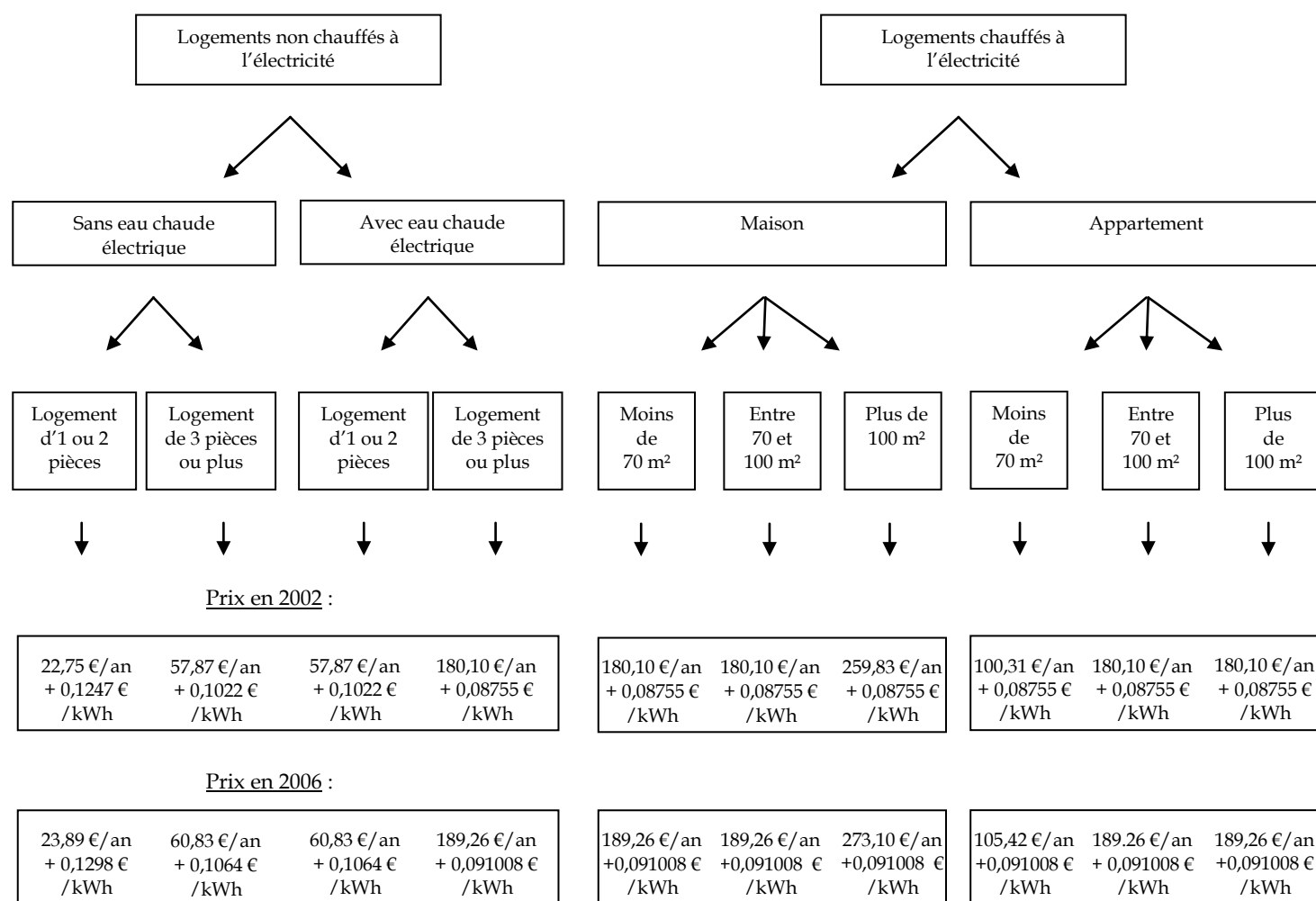
2. La reconstitution des prix des énergies

Les prix de l'électricité, du fioul, du gaz naturel, du butane, du propane du bois et du charbon en 2001, utilisés dans cette étude sont disponibles sur le site internet du ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire.

○ L'électricité :

EDF propose plusieurs tarifs pour l'électricité, fonction du nombre d'appareils électroménagers possédés par le ménage (ballon d'eau chaude électrique, lave-linge, sèche-linge, lave-vaisselle, congélateur, lave-linge avec sèche-linge intégré) et des caractéristiques du logement.

Figure II-2 : Le prix de l'électricité en 2006



NB : Nous faisons l'hypothèse que pour les tarifs heures creuses/heures pleines, 63% de la consommation est en heures pleines et 37% en heures creuses.

○ Le gaz naturel :

GDF propose également plusieurs tarifs pour le gaz, en fonction de l'usage qui en est fait.

- Le tarif de base pour les consommations allant de 0 à 1000 kWh, conseillé pour les ménages utilisant le gaz uniquement pour la cuisson

- Le tarif B0 pour les consommations comprises entre 1000 et 6000 kWh, pour les ménages consommant du gaz pour la cuisine et l'eau chaude sanitaire
- Le tarif B1 pour les consommations allant de 6000 et 30000 kWh, pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et/ou la cuisine individuelle
- Le tarif B2l pour les consommations allant au-delà, pour les chauffages et/ou l'eau chaude dans les chaufferies moyennes.

Figure II-3 : Le prix du gaz

Cuisson Ou eau chaude	Cuisson + Eau chaude sanitaire Ou chauffage seul	Chauffage + Eau chaude et/ou Cuisson
↓	↓	↓
<u>Prix en 2002 :</u> 22,85 €/an + 0,0594 €/kWh	32,96 €/an + 0,0483 €/kWh	116,59 €/an + 0,0327 €/kWh
<u>Prix en 2006 :</u> 25,32 €/an + 0,0711 €/kWh	35,95 €/an + 0,059 €/kWh	125,2 €/an + 0,0422 €/kWh

○ Le fioul :

Le prix du fioul domestique était de 0,0397 €/kWh en 2001, pour le tarif C1 correspondant à une livraison annuelle entre 2000 et 5000 litres.

○ Butane et Propane :

Le prix du propane était de 0,0662 €/kWh en 2001 pour une livraison annuelle inférieure à 2 tonnes. Le prix du butane paraît être semblable.

○ Le bois :

Le prix du bois a peu varié entre 1999 et 2001. Il est estimé à 0,018 €/kWh.

○ Le charbon :

Il existe différentes variétés de charbon¹⁰. Nous faisons une moyenne des prix de ces différents charbons, sachant que nous ne pouvons pas savoir quelle variété a été utilisée par les ménages. Nous le fixons à 0,0445 €/kWh pour 2001.

○ Le chauffage urbain :

En 2006, 90 ménages de notre échantillon utilisent le chauffage. Il est particulièrement difficile de déterminer le prix du chauffage urbain car il dépend de la commune dans laquelle le ménage se trouve. Nous allons dans un premier temps écarter cette sous-population du fait du manque d'information que nous possédons.

3. Echantillon final

En 2006, nous avons au départ un échantillon de 1743 ménages. Seuls 954 sont conservés dans la suite de l'étude, compte tenu des imperfections d'observation de la facture énergétique des 789 autres ménages. En 2002, 1658 ménages sont conservés sur les 2631 de l'échantillon de départ. L'importance de l'échantillon écarté est problématique sur plusieurs points. Les ménages que nous avons écartés ont des caractéristiques significativement différentes du reste de l'échantillon.

Nous avons essentiellement retiré des locataires, qui habitent dans des logements plus petits que le reste de l'échantillon. Ils sont également moins nombreux à se chauffer à l'électricité et à avoir du double vitrage. De plus les montants déclarés dans toutes les énergies sont significativement inférieurs à ceux de l'échantillon restant.

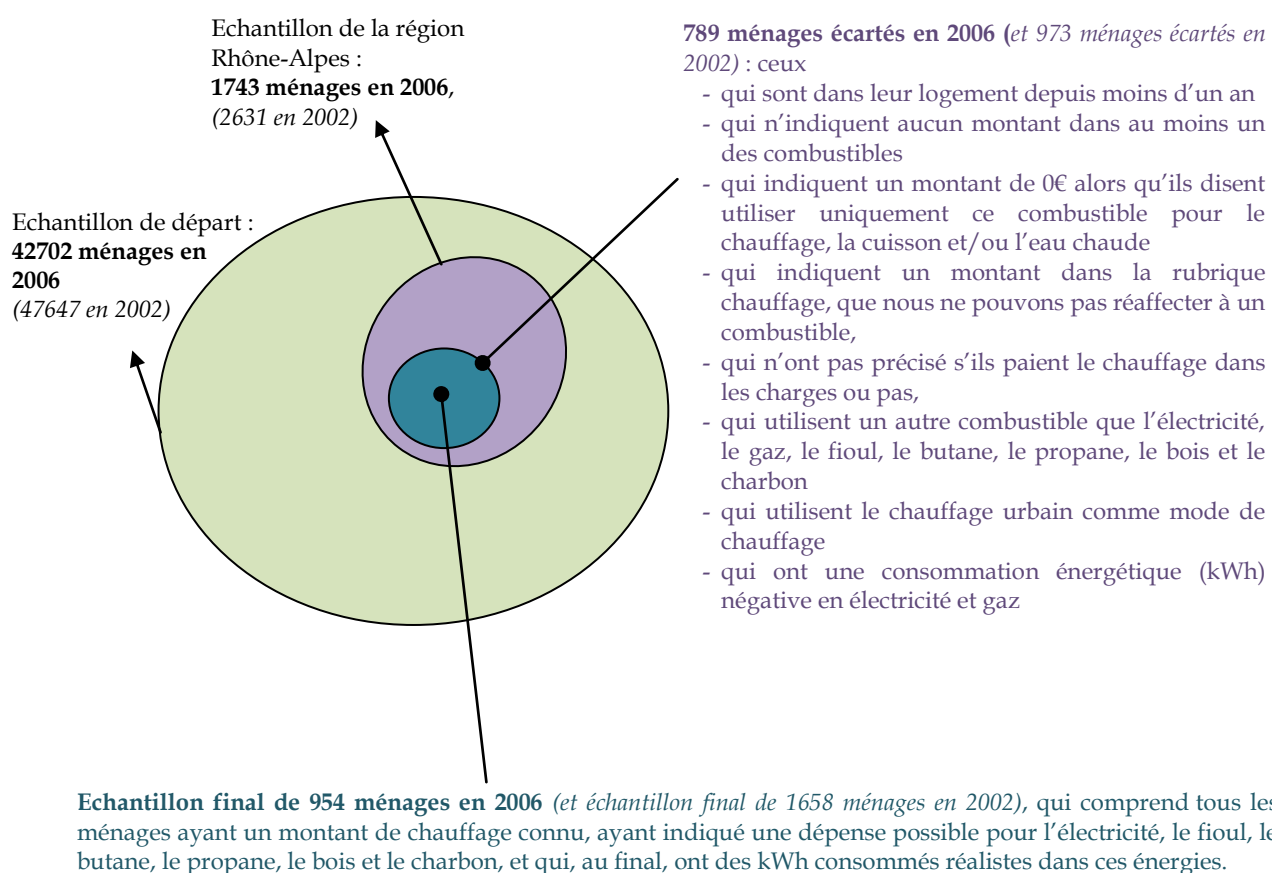
Le principal problème réside surtout dans le fait que nous avons écarté près de la moitié des ménages qui habitent dans des logements collectifs. Pour beaucoup, cela est lié au fait que le chauffage est inclus dans les charges de copropriété ou les charges locatives, et peu ont indiqué le détail de ces charges lors de l'enquête. En

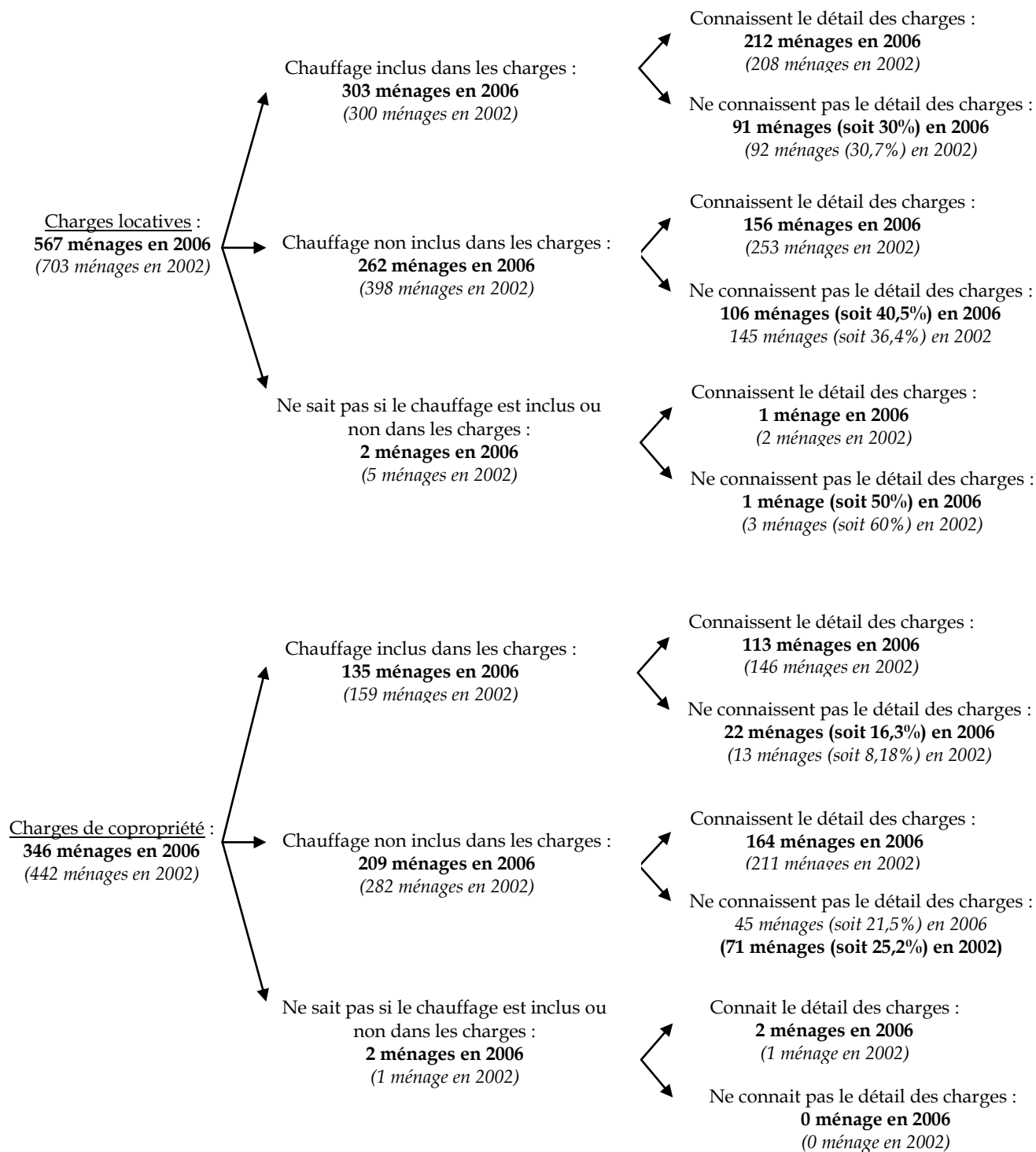
¹⁰ Dans la base de données le montant des dépenses de charbon est mélangé avec les dépenses en d'autres combustibles (les combustibles qui ne correspondent à aucun de ceux cités ci-dessus). Nous avons vérifié que seulement les individus utilisant le charbon pour se chauffer ou pour l'eau chaude, avaient des dépenses dans la catégorie 'charbon et autres'. Cependant, nous ne sommes pas en mesure d'affirmer que le montant déclaré ne concerne que le charbon. Une marge d'erreur existe, puisqu'il est possible qu'un individu utilisant le charbon pour se chauffer ait inclus également des dépenses de pétrole dans le montant indiqué.

effet, 567 ménages paient des charges locatives, parmi eux 198 n'en connaissent pas le détail, soit légèrement plus du tiers, et 346 individus paient des charges de copropriété, parmi eux, 67 n'en connaissent pas le détail, soit 19%. Le même constat a pu être réalisé sur la base de l'enquête de 2002. Ne pas connaître le montant consacré au chauffage n'incite pas ces ménages à prêter attention à cette dépense. De plus, il n'existe pas d'incitation, en particulier dans les copropriétés, à réguler la température de son logement, puisque cela profite avant tout à la copropriété et pas directement au ménage.

C'est pourquoi l'étude portant sur les déterminants de la consommation énergétique (disponible en annexe) prend en compte le mode de chauffage du logement.

Figure II-4 : L'échantillon final



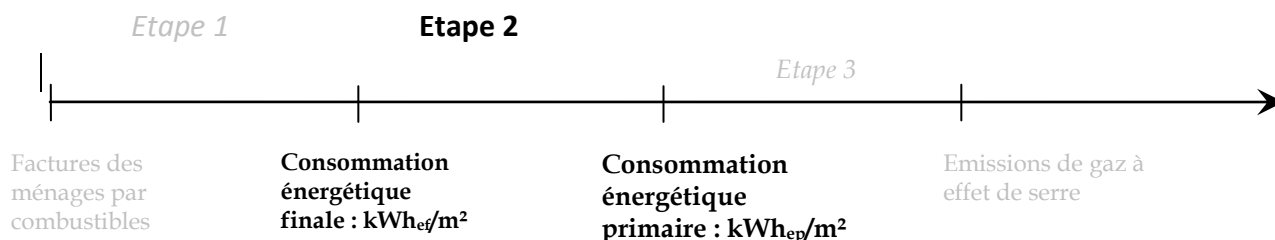


Afin que nos résultats ne soient pas biaisés par le fait de supprimer ces observations, nous redresserons l'échantillon dans la suite de ce travail. La méthode choisie

consiste à affecter à chaque observation la probabilité estimée d'être prise en compte dans l'estimation en fonction des variables explicatives observées pour tous. Cela permet de rapprocher les caractéristiques de l'échantillon étudié à la population de la région Rhône-Alpes (après pondération, les statistiques descriptives entre population et échantillon sont significativement non différentes).

En additionnant les kWh consommés en électricité, fioul, gaz naturel, butane et propane, bois et charbon, nous obtenons la consommation énergétique finale des logements. La consommation énergétique finale est la consommation propre uniquement aux ménages. Elle se différencie de la consommation d'énergie primaire qui inclut en plus les pertes de distribution ainsi que la consommation des producteurs et des transformateurs d'énergie.

B. Etape 2 : de la consommation d'énergie finale à la consommation d'énergie primaire



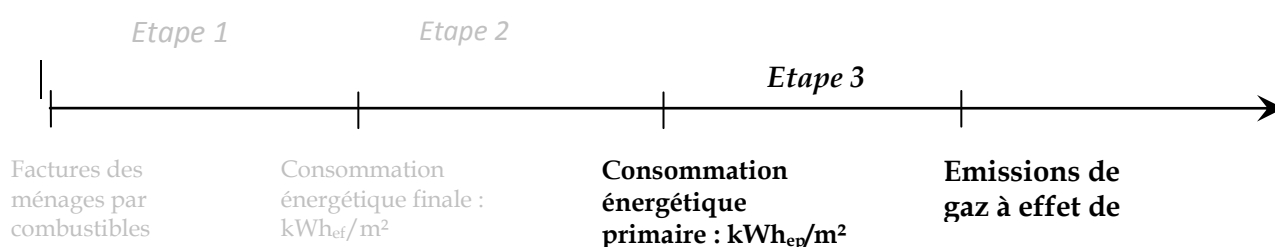
La consommation d'énergie primaire inclut les pertes de distribution ainsi que la consommation des producteurs et des transformateurs d'énergie. C'est l'énergie primaire qui est l'unité de mesure généralement prise en compte dans le calcul des étiquettes énergie, ou lors de la plupart des études réalisées sur la consommation énergétique des logements¹¹.

On considère en France, qu'il est nécessaire de produire 2,58 kWh d'électricité primaire pour obtenir 1 kWh d'électricité finale. En ce qui concerne le gaz, le fioul et

¹¹ Julien Marchal et Eric Lagandré (2008), Modélisation des performances énergétiques du parc de logement, état énergétique du parc en 2008, ANAH.

les combustibles fossiles, il faut légèrement plus d'1 kWh d'énergie primaire pour produire 1 kWh d'énergie finale, donc la quantité d'énergie primaire est actuellement arrondie à 1 kWh¹². Nous utiliserons ces coefficients de conversion pour passer de l'énergie finale à l'énergie primaire.

C. Etape 3 : de la consommation d'énergie primaire des logements à leurs émissions de gaz à effet de serre :



Pour estimer les émissions de gaz à effet de serre correspondant à la consommation énergétique des ménages, nous nous appuyons sur le « Bilan Carbone, Entreprises et Collectivités, Guide des facteurs d'émissions, version 5.0 » publié par l'ADEME et la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre en janvier 2007. Celui-ci nous fournit les coefficients de conversion pour passer du kWh aux émissions de gaz à effet de serre. Les équivalences sont présentées dans le tableau suivant :

¹² http://www.logement.gouv.fr/article.php3?id_article=5702

Tableau II-1 : Les émissions de gaz carbonique

Type d'énergie	Emissions liées à la combustion du combustible (kg équivalent carbone par kWh : $\text{kg}_{\text{eqC}}/\text{kWh}$)	Emissions liées à l'extraction, au traitement, au transport et à la combustion du combustible (kg équivalent carbone par kWh : $\text{kg}_{\text{eqC}}/\text{kWh}$)	Degré d'incertitude
Electricité	-	0,023 (hors pertes en lignes) 0,0253 (pertes en lignes incluses) ¹³	15%
Gaz naturel	0,056	0,063	5%
Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL)	0,063	0,075	5%
Fioul domestique	0,074	0,082	5%
Bois	0	0	-
Charbon	0,09379	0,10425	20%

III. Estimation de la consommation énergétique des bâtiments en Rhône-Alpes et leurs émissions de gaz à effet de serre : Analyse statistique

A. La consommation d'énergie finale des ménages en Rhône-Alpes

La consommation énergétique finale des ménages est en moyenne de 229,68 $\text{kWh}_{\text{ef}}/\text{m}^2$ en 2002 et de 190,91 $\text{kWh}_{\text{ef}}/\text{m}^2$ en 2006 pour les ménages de la base de données de Rhône-Alpes. Pour comparaison, l'ADEME estime qu'elle était de 211,71 $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ en 2002 pour la France.

Afin de mieux apprécier la distribution des performances énergétiques des logements, nous créons sept classes de consommation, inspirées de l'étiquette énergie.

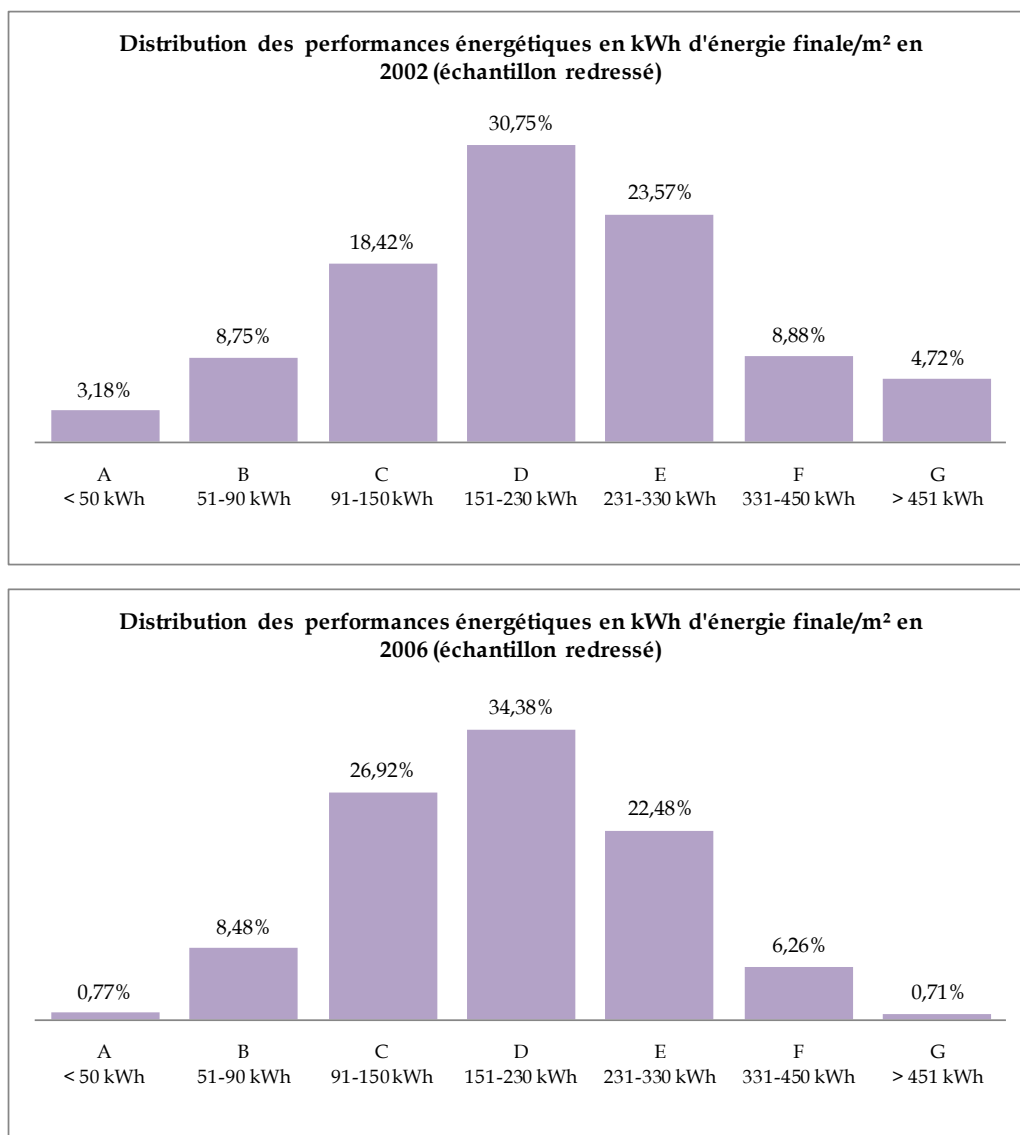
L'étiquette A correspond à une consommation inférieure à 50 $\text{kWh}_{\text{ef}}/\text{m}^2.\text{an}$, B de 51 à 90 $\text{kWh}_{\text{ef}}/\text{m}^2/\text{an}$, C de 91 à 150 $\text{kWh}_{\text{ef}}/\text{m}^2/\text{an}$, D de 151 à 230 $\text{kWh}_{\text{ef}}/\text{m}^2/\text{an}$, E de 231 à 330 $\text{kWh}_{\text{ef}}/\text{m}^2/\text{an}$, F de 331 à 450 $\text{kWh}_{\text{ef}}/\text{m}^2/\text{an}$ et G supérieure à 451

¹³ Quand les ménages consomment 1 kWh d'électricité, il y a en réalité 1,1 kWh d'électricité qui a été produite. En effet, 10% de l'électricité est perdue dans les lignes électriques. Pour l'état des lieux nous prendrons en compte ces pertes, puisque cela reste des émissions de gaz à effet de serre provoquées par les ménages. De plus, pour la suite de l'étude, nous prendrons en compte les émissions liées à la combustion du combustible, mais également tout le processus amont, c'est-à-dire, celles liées à l'extraction, au traitement et au transport.

kWh_{ef}/m²/an.

Nous obtenons la distribution suivante :

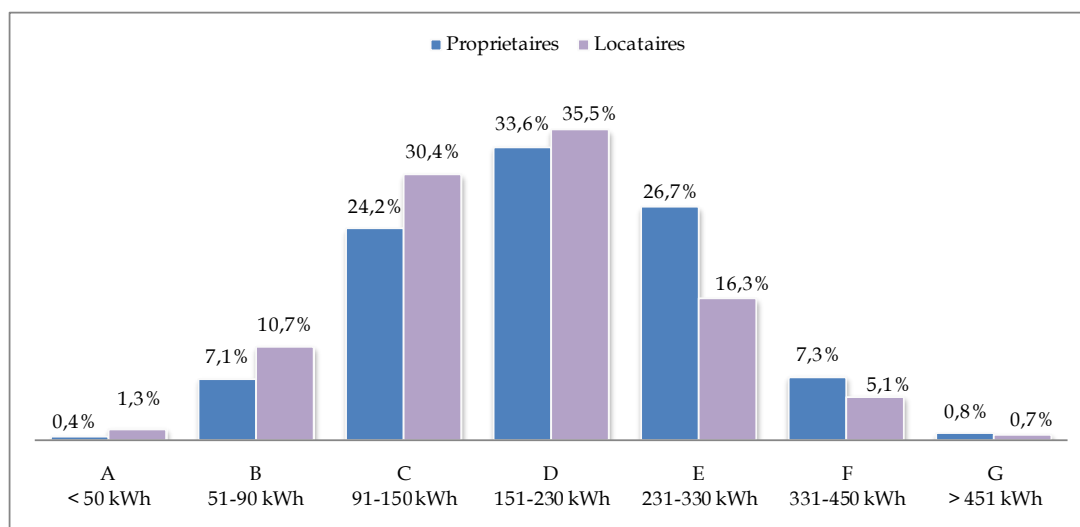
Figure III-1 : Distribution des performances énergétiques en kWh d'énergie finale/m²/an en 2002 et 2006



Source : enquête-logement 2001-02, 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

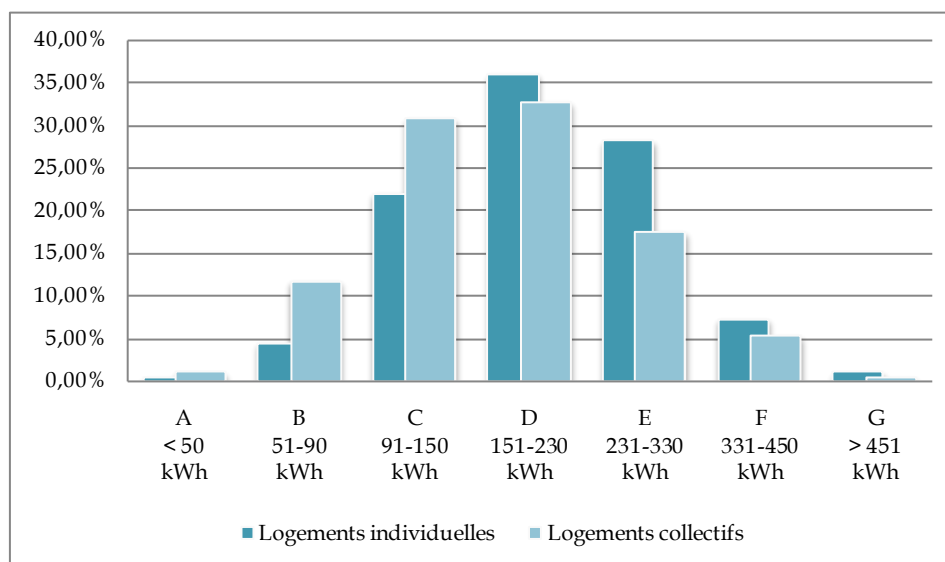
Les locataires ont une consommation énergétique moins importante que celle des propriétaires, mais sont également plus présents dans les logements collectifs, moins énergivores que les logements individuels. Les logements collectifs consomment en moyenne 190,60 kWh_{ef}/m²/an et les logements individuels 237,33 kWh_{ef}/m²/an.

Figure III-2 : Distribution des performances énergétiques en fonction du statut d'occupation des ménages (en kWh_{ef}/m²/an) en 2006 : énergie finale (Rhône-Alpes)



Source : enquête-logement 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

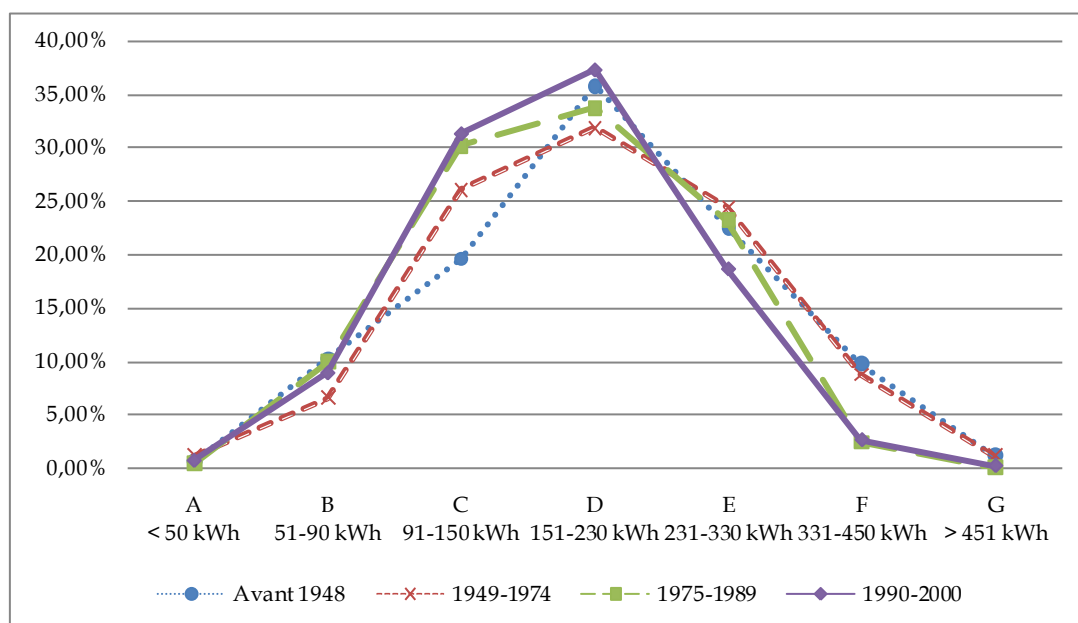
Figure III-3 : Distribution des logements individuels et collectifs selon leur performance énergétique (en kWh_{ef}/m²/an) énergie finale (Rhône-Alpes)



Source : enquête-logement 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

Les logements construits plus récemment sont moins présents dans les classes à forte consommation énergétique que les logements plus anciens.

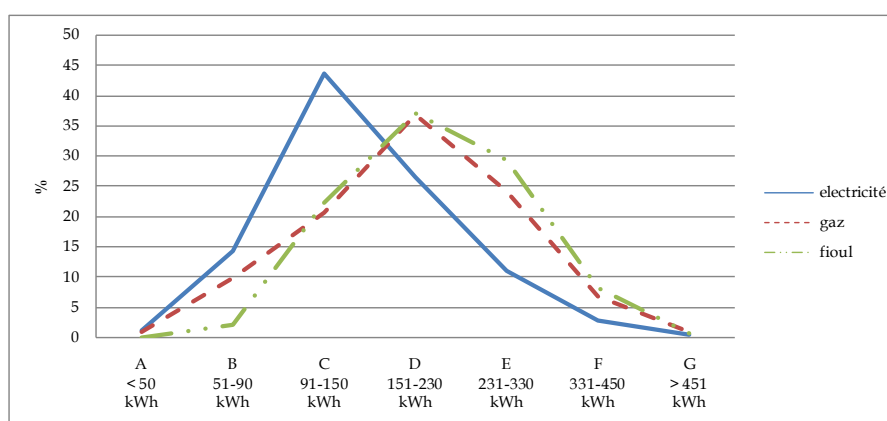
Figure III-4 : Distribution des logements selon leur performance énergétique en fonction de leur date de construction (en kWh_{ef}/m²/an) en 2006 : énergie finale (Rhône-Alpes)



Source : enquête-logement 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

On note par ailleurs que les ménages se chauffant au fioul ont une consommation énergétique plus importante que les ménages utilisant un chauffage à l'électricité.

Figure III-5 : Distribution des logements selon leur performance énergétique en fonction du combustible utilisé pour le chauffage (en kWh_{ef}/m²/an) en 2006 : énergie finale (Rhône-Alpes)



Source : enquête-logement 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

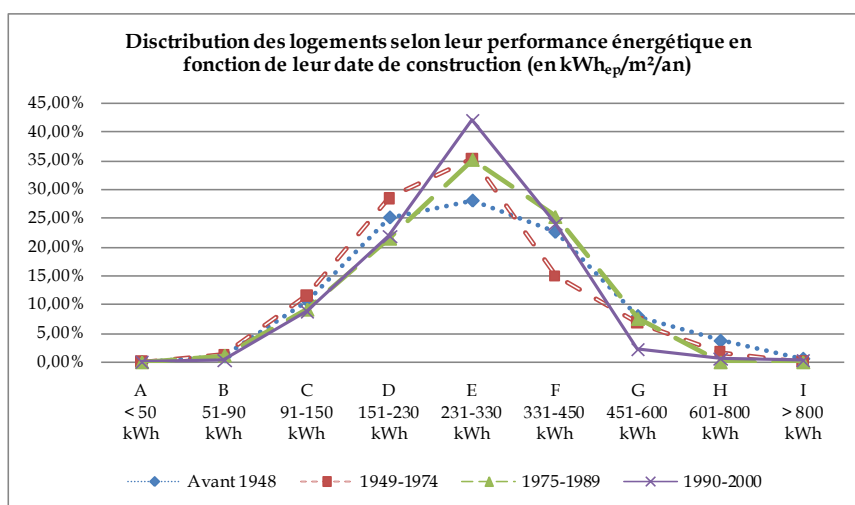
B. La consommation énergétique primaire en Rhône-Alpes

C'est cette consommation primaire qui permet de comparer réellement les différents types d'énergies.

Comme précédemment, nous créons neuf classes de consommation énergétique primaire allant de A à I. A correspond à une consommation inférieure à 50 kWh_{ep}/m².an, B de 51 à 90 kWh_{ep}/m².an, C de 91 à 150 kWh_{ep}/m².an, D de 151 à 230 kWh_{ep}/m².an, E de 231 à 330 kWh_{ep}/m².an, F de 331 à 450 kWh_{ep}/m².an, G de 451 à 600 kWh_{ep}/m².an, H de 601 à 800 kWh_{ep}/m².an et I supérieure à 800 kWh_{ep}/m².an.

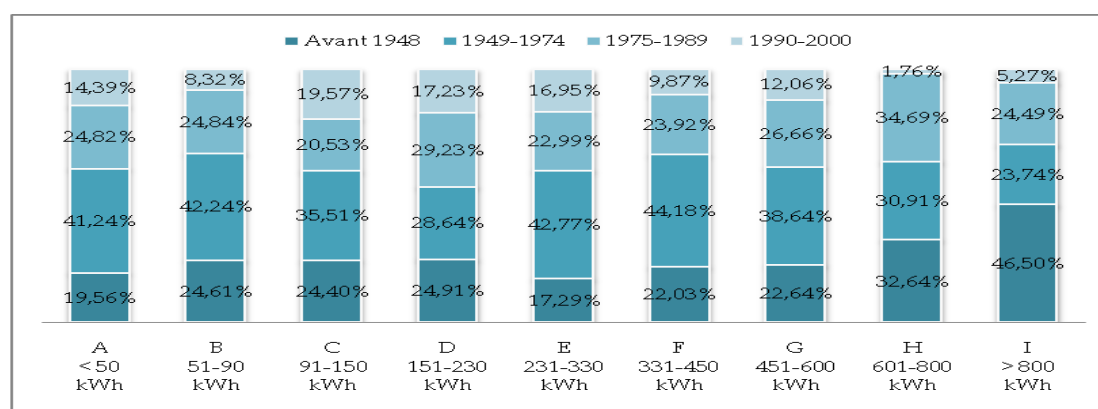
Depuis les années 1990, les logements construits sont moins énergivores que les logements plus anciens. Ils sont moins souvent, par rapport aux logements construits dans les périodes précédentes, classés dans les catégories de F à I. On retrouve probablement l'effet de la réglementation thermique de 1988. Cependant, contrairement à ce que nous aurions pu penser, la part des logements construits avant 1975 n'est pas plus importante dans les classes énergivores. Quelle que soit la classe énergie, elle avoisine les 60-65%. Ceci laisse supposer que l'année de construction est un révélateur imparfait de la consommation énergétique compte tenu des travaux réalisés en cours de période.

Figure III-6 : Distribution des logements selon leur période de construction en fonction de leur performance énergétique : énergie primaire (Rhône-Alpes)



Source : enquête-logement 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

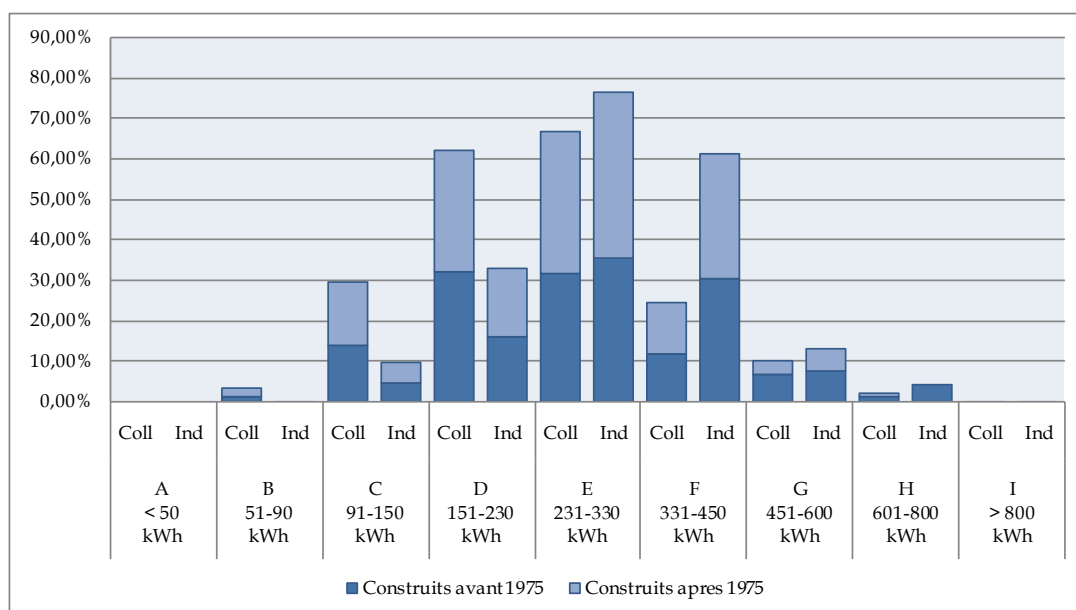
Figure III-7 : Part des logements dans les étiquettes énergie en fonction de leur période de construction en 2006 : énergie primaire (Rhône-Alpes)



Source : enquête-logement 2001-02, INSEE, calcul des auteurs.

Les logements collectifs ont une consommation énergétique primaire plus faible que les logements individuels, respectivement 286,95 kWh_{ep}/m²/an et 337,38 kWh_{ep}/m²/an. 43,5% des logements collectifs se situent dans les classes A à D, contre seulement 20,84% des logements individuels.

Figure III-8 : Distribution des logements selon leur performance énergétique en fonction du type de logement et de leur période de construction (en kWh_{ep}/m²/an) en 2006 : énergie primaire (Rhône-Alpes)



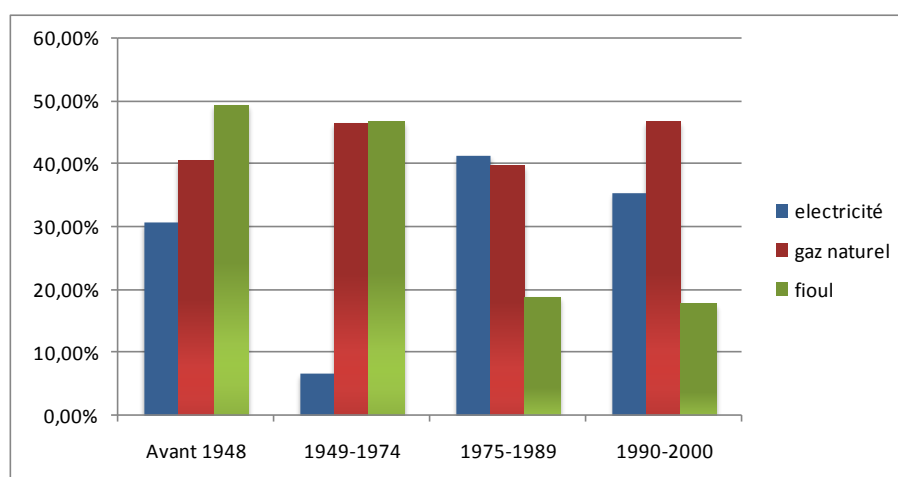
Source : enquête-logement 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

La consommation d'énergie primaire du parc de logement en Rhône-Alpes en 2006 est de 310,76 kWh/m²/an. Ce sont les logements chauffés à l'électricité qui consomment le plus d'énergie primaire, cela s'explique par le fait qu'il est nécessaire de produire 2,58 kWh d'électricité primaire pour obtenir 1 kWh d'électricité final. Les logements classés dans les étiquettes A à E sont essentiellement des logements chauffés au gaz naturel.

Tableau III-1 : Consommation énergétique moyenne en fonction du combustible utilisé pour le chauffage : estimation à partir de l'enquête-logement, Rhône-Alpes.

Combustible utilisé pour le chauffage	Consommation énergétique moyenne	Combustible utilisé pour le chauffage	Consommation énergétique moyenne
Electricité	331.65 kWh _{ep} /m ² /an	Fioul	274.63 kWh _{ep} /m ² /an
Gaz naturel	255.08 kWh _{ep} /m ² /an	Moyenne	310,76 kWh _{ep} /m ² /an

Figure III-9 : Combustibles utilisés pour le chauffage en fonction de la période de construction du logement

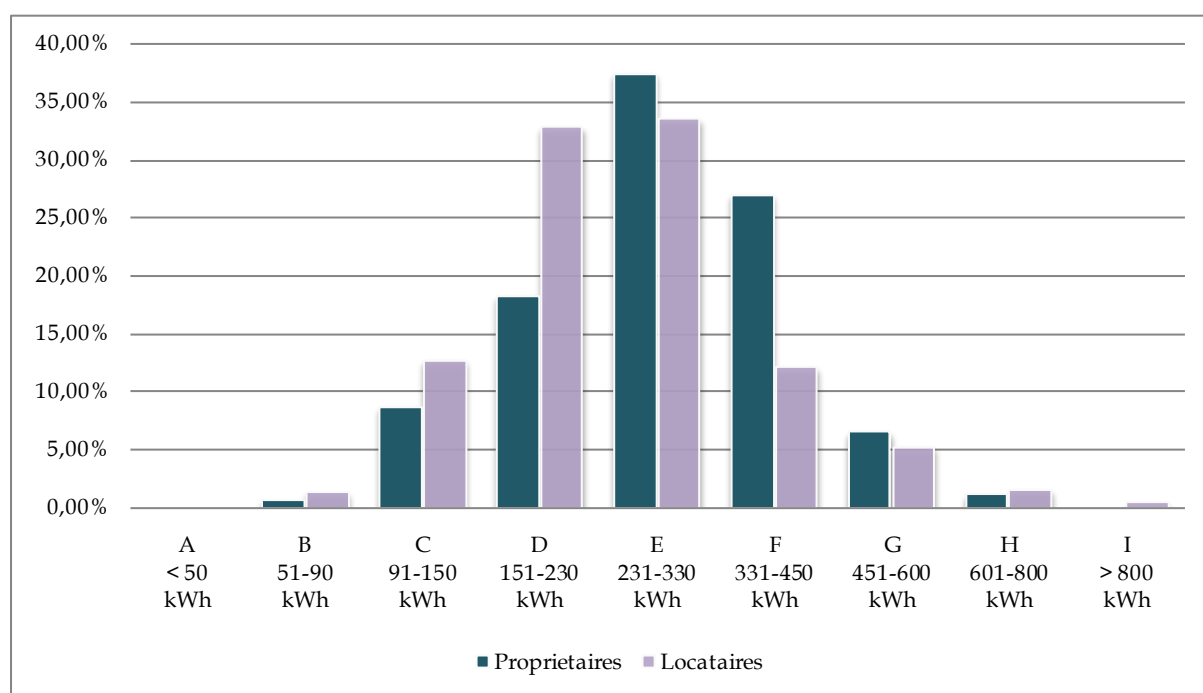


Source : enquête-logement 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

Le chauffage au fioul représente une part moins importante dans les nouvelles constructions au profit de l'électricité.

Les locataires sont plutôt concentrés dans les classes peu consommatrices d'énergie, plus de 80% d'entre eux sont entre A et E, alors que nous constatons l'inverse pour les propriétaires, plus de 70% sont entre E et I.

Figure III-10 : Distribution des ménages en fonction de leur statut d'occupation, selon leur performance énergétique (en kWh_{ep}/m²/an)



Source : enquête-logement 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

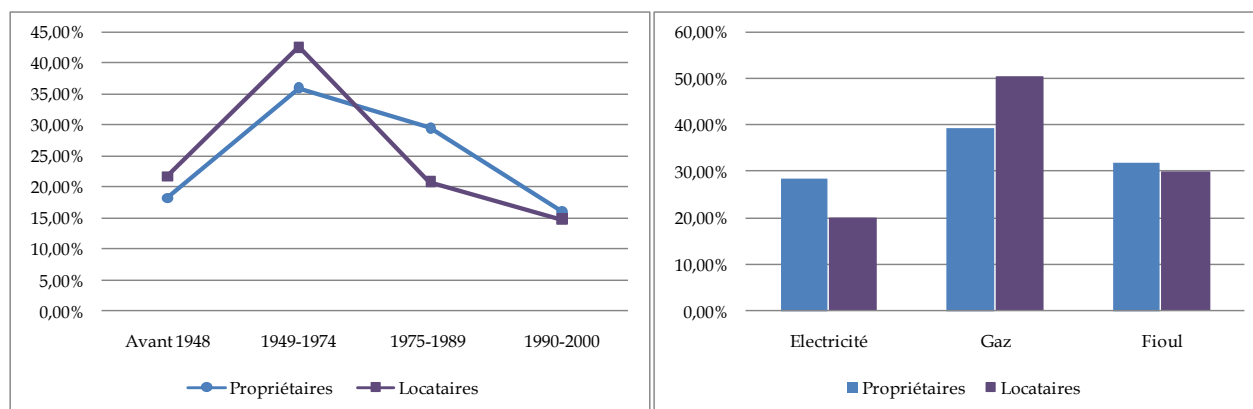
Tableau III-2 : Consommation énergétique moyenne en fonction du statut d'occupation du ménage

Statut d'occupation	Consommation énergétique moyenne
Propriétaires	293,08 kWh _{ep} /m ² /an
Locataires	261,07 kWh _{ep} /m ² /an

Cela peut s'expliquer par les caractéristiques des logements habités par les propriétaires et les locataires : 90% des locataires vivent dans des logements collectifs contre 27% des propriétaires, et ils sont plus nombreux à utiliser du gaz pour le chauffage et moins du fioul. Cette différence de consommation énergétique et d'émission de GES entre propriétaires et locataires peut aussi résulter de

comportements différents entre ces deux catégories de ménages.

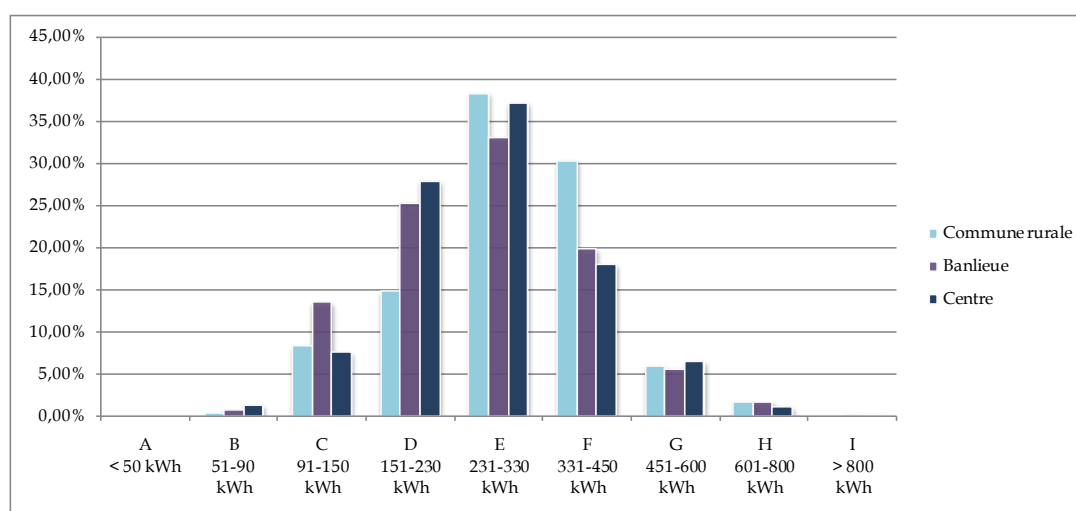
Figure III-11 : Distribution des propriétaires et des locataires en fonction de l'année de construction de leur logement (graphique de gauche) et du combustible utilisé pour le chauffage (graphique de droite) en 2006



Source : enquête-logement 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

Les logements se situant en zone rurale ont une consommation énergétique plus importante.

Figure III-12 : Distribution des logements en fonction de la zone géographique, selon leur performance énergétique (en kWh_{ep}/m²/an)



Source : enquête-logement 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

Tableau III-3 : Consommation énergétique moyenne en fonction de la zone géographique du logement

Zone géographique	Consommation énergétique moyenne
Centre	290,00 kWh _{ep} /m ² /an
Banlieue	313,62 kWh _{ep} /m ² /an
Commune rurale	363,61 kWh _{ep} /m ² /an

Source : enquête-logement 2001-02, INSEE, calcul des auteurs.

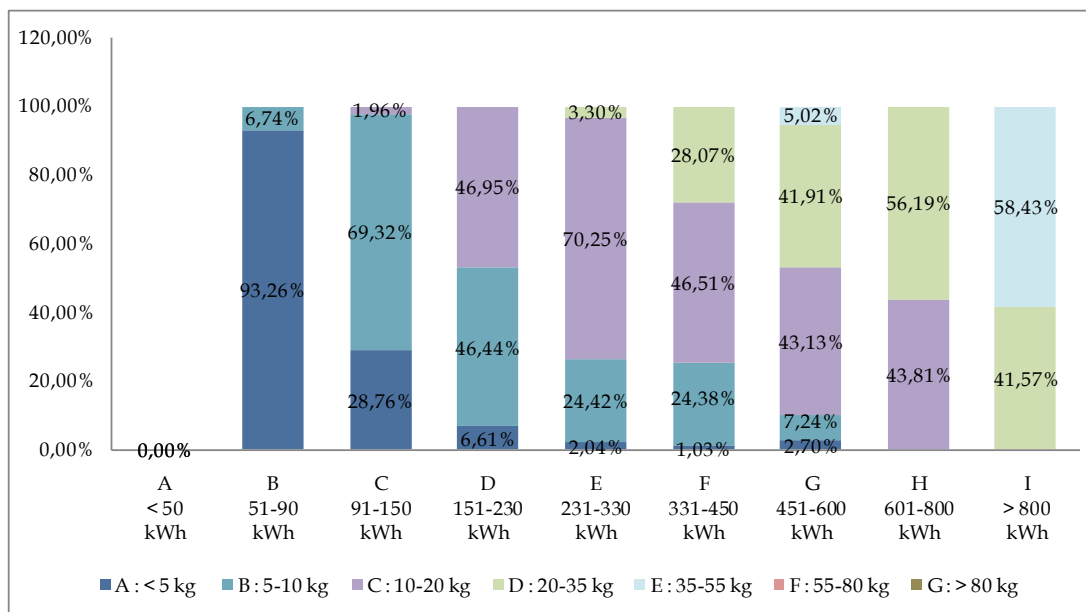
Zone géographique	Consommation énergétique moyenne
Centre	276,93 kWh _{ep} /m ² /an
Banlieue	275,71 kWh _{ep} /m ² /an
Commune rurale	302,68 kWh _{ep} /m ² /an

Source : enquête-logement 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

Les caractéristiques des logements varient selon la zone géographique. Les centres sont en grande majorité composés de logements collectifs, à l'inverse des zones rurales où la plupart des logements sont des habitations individuelles. De plus, dans ces dernières, les ménages utilisent plus souvent du fioul et de l'électricité pour se chauffer.

Nous commençons à avoir une idée des logements qui consomment le plus d'énergie. Toutefois, une consommation énergétique élevée ne signifie pas forcément des émissions de gaz à effet de serre importante. Cela est par exemple le cas des logements chauffés à l'électricité. Ils se situent dans les classes énergie les plus énergivores (de G à I), mais si on se réfère au « Bilan Carbone, Entreprises et Collectivités, Guide des facteurs d'émissions, version 5.0 » nous nous apercevons que le contenu en carbone de l'électricité en France est plus faible que celui des autres combustibles. Ces ménages n'auront donc pas des émissions excessivement élevées.

Figure III-13 : Quantité de gaz à effet de serre émise par les logements classés selon l'étiquette énergie (Rhône-Alpes) en 2006



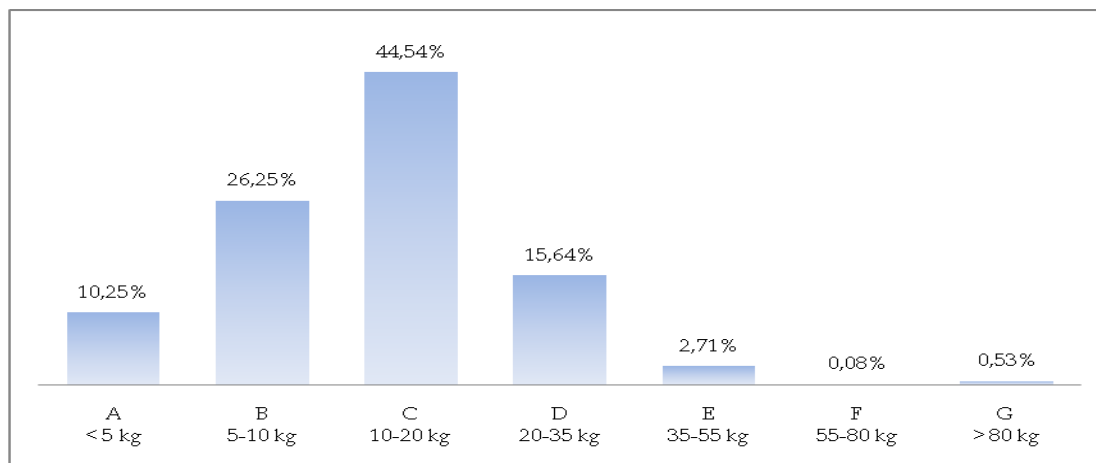
Source : enquête-logement 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

C. Les émissions de gaz à effet de serre par logement en Rhône-Alpes

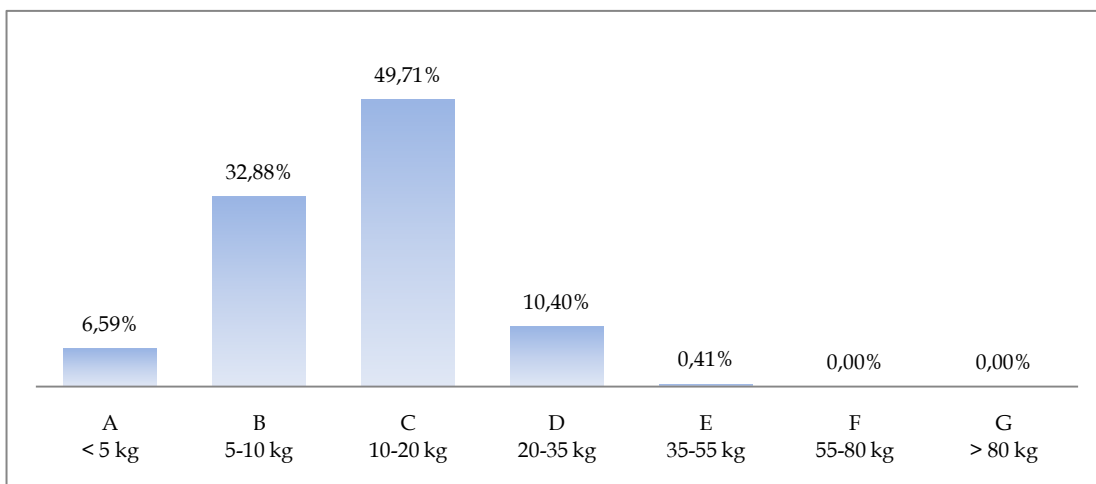
Nous séparons la quantité de gaz à effet de serre émise par les ménages en sept classes, inspirées de l'étiquette climat, à la différence près que nous réalisons cette analyse en équivalence carbone et que les étiquettes climat sont en équivalence CO₂ : A correspond à une émissions inférieure à 5 kg_{éqC}/m²/an, B de 5 à 10 kg_{éqC}/m²/an, C de 10 à 20 kg_{éqC}/m²/an, D de 20 à 35 kg_{éqC}/m²/an, E de 35 à 55 kg_{éqC}/m²/an, F de 55 à 80 kg_{éqC}/m²/an, G une émission supérieure à 80 kg_{éqC}/m²/an. Nous obtenons la distribution suivante :

Figure III-14 : Les émissions de gaz à effet de serre en Rhône-Alpes en 2001 (en $\text{kg}_{\text{eqCO}_2}/\text{m}^2/\text{an}$) (Rhône-Alpes)

En 2002 :



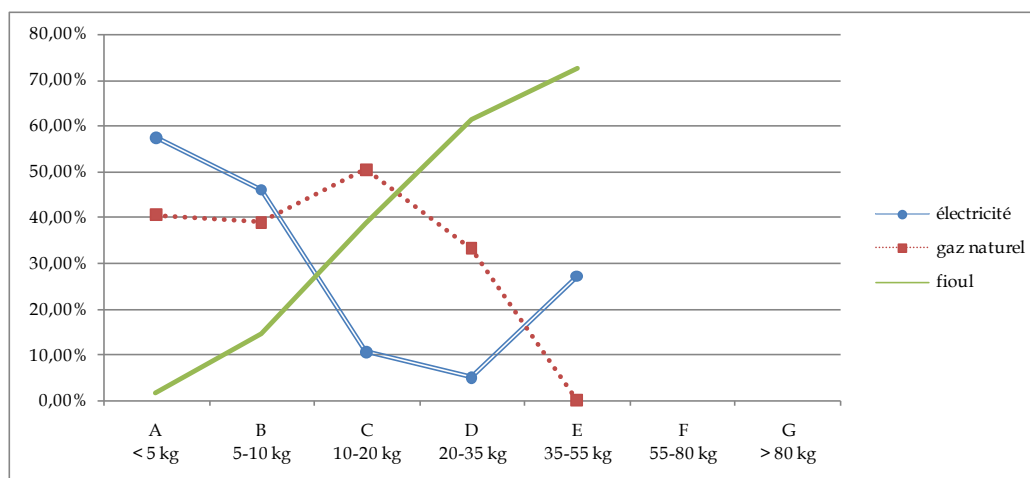
En 2006 :



Source : enquête-logement 2001-02, 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

Comme nous avons vu dans la partie précédente, les émissions sont fonction du contenu en carbone des différents combustibles. En moyenne, les ménages utilisant un chauffage électrique émettent moins de gaz à effet de serre que les ménages utilisant du fioul pour se chauffer.

Figure III-15 : Part des combustibles utilisés pour le chauffage dans chaque étiquette climat kg_{éq}CO₂/m²/an en 2006 (Rhône-Alpes)



Source : enquête-logement 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

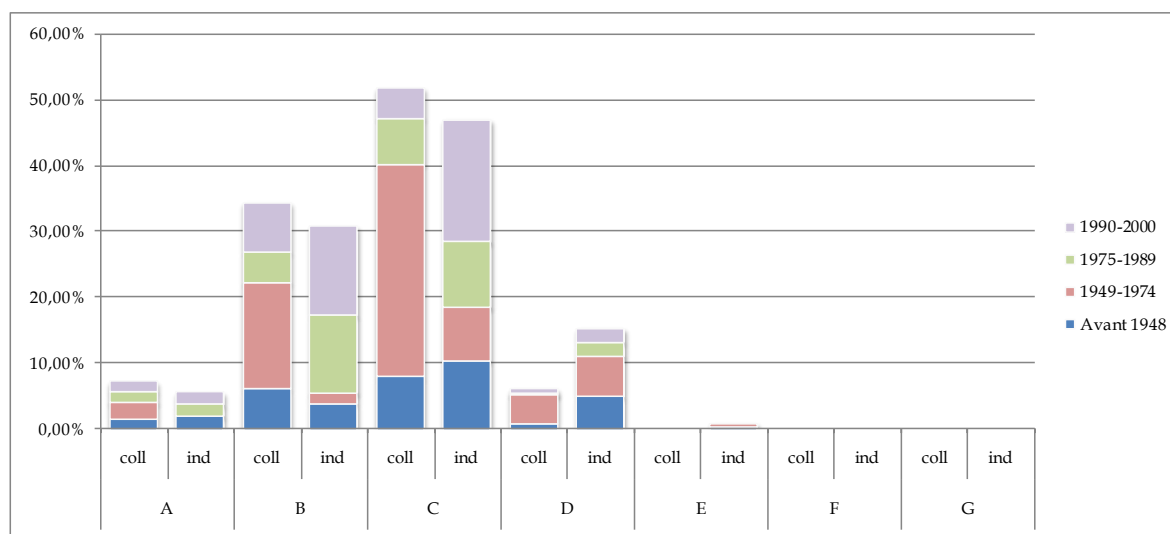
Tableau III-4 : Emission moyenne de GES en fonction du combustible utilisé pour le chauffage, (Rhône-Alpes)

Combustible utilisé pour le chauffage	Quantité de gaz à effet de serre émise en moyenne	Combustible utilisé pour le chauffage	Quantité de gaz à effet de serre émise en moyenne
Electricité	8,49 kg _{éq} C/m ² /an	Fioul	16,19 kg _{éq} C/m ² /an
Gaz naturel	12,35 kg _{éq} C/m ² /an	Moyenne	12,58 kg _{éq} C/m ² /an

Source : enquête-logement 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

Les logements collectifs émettent en moyenne légèrement moins de gaz à effet de serre que les logements individuels, respectivement 11,83 kg_{éq}C/m²/an et 13,49 kg_{éq}C/m²/an. Comme nous aurions pu nous y attendre, les logements qui en émettent le plus sont principalement les plus anciens.

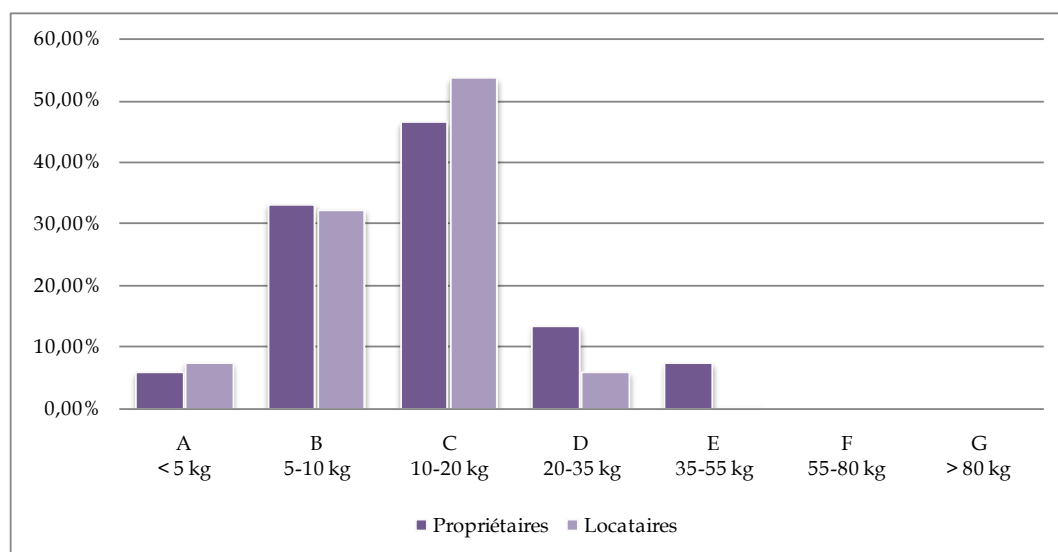
Figure III-16 : Distribution des logements selon leur performance énergétique en fonction du type de logement (collectif et individuel) et de leur période de construction (en $\text{kg}_{\text{eqCO}_2}/\text{m}^2/\text{an}$), (Rhône-Alpes)



Source : enquête-logement 2001-02, INSEE, calcul des auteurs.

Les propriétaires ont une consommation énergétique plus importante que les locataires, et émettent également plus de gaz à effet de serre.

Figure III-17 : Distribution des ménages selon de leur statut d'occupation en fonction leur performance énergétique $\text{kg}_{\text{eqCO}_2}/\text{m}^2/\text{an}$, (Rhône-Alpes)



Source : enquête-logement 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

Tableau III-5 : Emission moyenne de GES en fonction du statut d'occupation en 2006 en Rhône-Alpes

Statut d'occupation	Quantité de gaz à effet de serre émise en moyenne
Propriétaires	13,09 kg _{éq} CO ₂ /m ² /an
Locataires	11,85 kg _{éq} CO ₂ /m ² /an

Source : enquête-logement 2005-06, INSEE, calcul des auteurs.

IV. Conclusion

Ce premier travail descriptif a permis de dessiner un profil des logements les plus énergivores et les plus émetteurs de gaz à effet de serre en Rhône-Alpes, ceux sur lesquels il est important d'agir pour respecter les objectifs fixés par le Grenelle de l'Environnement.

Très schématiquement, parmi les gros consommateurs d'énergie et les gros émetteurs de GES, on trouve essentiellement des logements individuels, construits avant 1974, chauffés au fioul et habités par leur propriétaire. Les caractéristiques techniques de l'isolation sont encore assez mal saisies à ce niveau de l'étude par les données fournies dans l'enquête-logement.

Pour approfondir cette analyse, nous avons réalisé une étude sur les déterminants de la consommation d'énergie, *ceteris paribus*, du côté des ménages (voir annexe). Celle-ci nous a permis de mettre en évidence les leviers les plus significatifs en matière d'efficacité énergétique.

V. Bibliographie

ADEME et MIES (2007), *Bilan Carbone Entreprises et Collectivités, Guide des facteurs d'émissions version 5.0.*

ADEME (2006), *Bilan énergétique et bilan des émissions de gaz à effet de serre en Rhône-Alpes, Prospective à l'horizon 2020, Synthèse des résultats.*

Beguïn J.-M., Boulanger P.-M., Lussis B. (2003), *L'apport des sciences sociales à l'utilisation rationnelle de l'énergie par les ménages, Conclusions et perspectives du séminaire énergie du 26 mai 2003*, Institut pour un Développement Durable Belge

Bessière Sabine (2003), *La proportion de logements vacants la plus faible depuis 30 ans*, INSEE Première n°880

Beudaert Marc (2007), *L'énergie en 2006 : nouvelle hausse des prix, recul de la consommation*, Insee Première n°1152

Bossier F., Bréchet T., Gouzée N., Mertens S., Van Den Steen P., Willems S. (1996), *Politiques et mesures destinées à modifier les tendances des émissions anthropiques de Gaz à Effet de Serre en Belgique*, Bureau Fédéral du Plan, Planning Paper 76

Daubresse Marion (2003), *La reprise de l'accession à la propriété*, INSEE Première n°913

Gueyffier Marie-France (2006), *Maîtrise de l'énergie et modernisation durable des bâtiments existants, Recensement des études des dernières années*, Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de la Mer et Ministère de l'emploi, de la cohésion sociale et du logement

Jacquot Alain (2003), *De plus en plus de maisons individuelles*, INSEE Première n°885

Marchal Julien et Lagandré Eric (2008), *Modélisation des performances énergétiques du parc de logement, état énergétique du parc en 2008*, ANAH.

Nemry F., Theunis J., Bréchet T., Lopez P. (2000), *Réduction des émissions de gaz à effet de serre et flux de matières*, Institut pour un Développement Durable Belge, Rapport final aux Services Fédéraux des Affaires Scientifiques, Techniques et Culturelles

OCDE (2003), *Pour des bâtiments écologiquement viables, Enjeux et politiques*

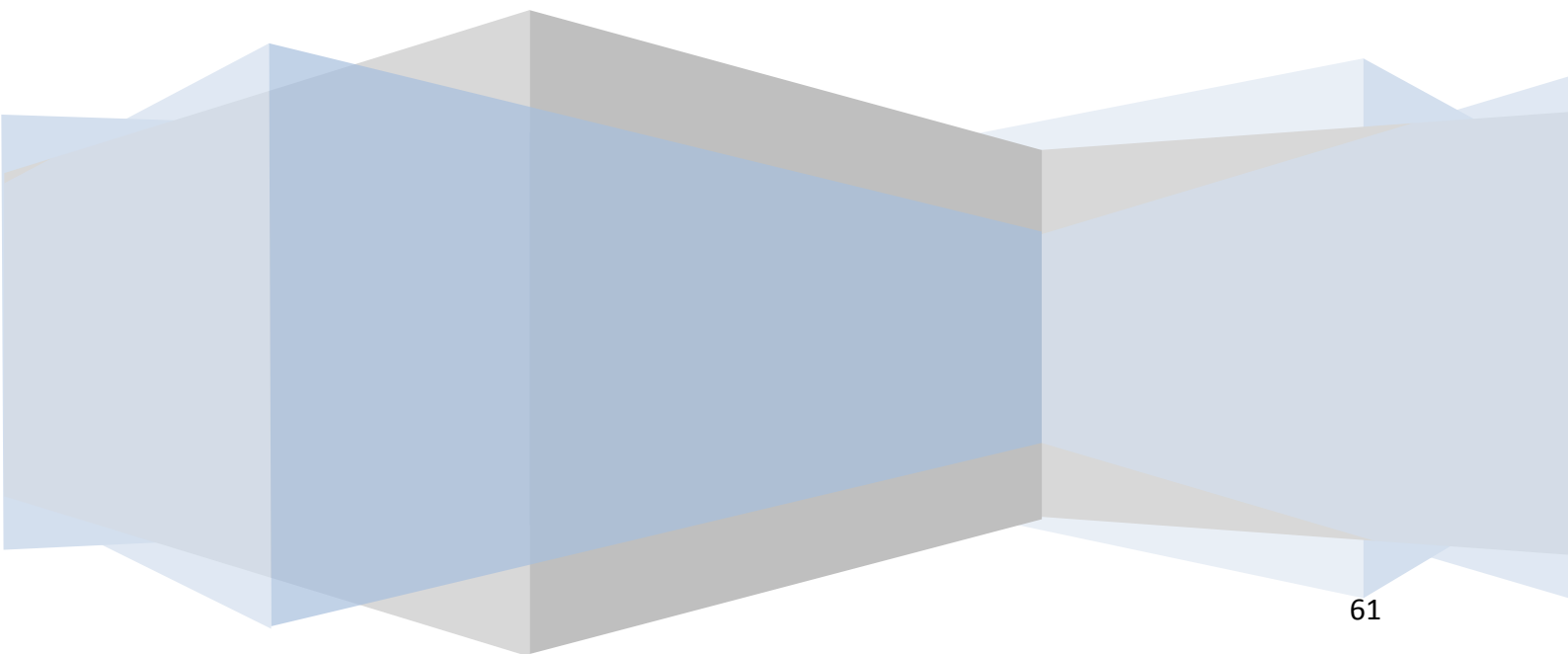
Pelletier Philippe (2007), *Amélioration énergétique du parc de logements existants*,

Rapport d'étape au ministre d'Etat, ministre de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables

Pelletier Philippe (2008), Comité Opérationnel « *Rénovation des bâtiments existants* », Rapport d'étape au ministre d'Etat, ministre de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables

Chapitre 2 : Dynamique de l'offre et rapidité d'adaptation des entreprises du bâtiment à la demande

A-M. Bocquet et B. Serrate



Le projet dans son ensemble vise à proposer des pronostics sous différents scénarios de politiques économiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'objectif du sous-projet «offre» est l'analyse de l'offre dans le secteur du bâtiment, qui permet de réduire les émissions de GES. Il s'agit d'évaluer la dynamique de l'offre en matière d'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. Il faut aussi estimer la réactivité du secteur de la construction à une demande plus importante en matière d'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, pour confronter l'offre à la demande potentielle évaluée dans les autres volets du projet.

Cette partie du projet de recherche s'appuie sur une démarche qualitative, basée sur une série d'entretiens semi-directifs auprès d'intervenants du secteur du bâtiment concernés par la problématique du projet.

Nous présentons ici successivement :

I : Le contexte de l'étude de l'offre

A - Précisions introductives

B - Méthodologie de l'étude

C - Approche en termes d'avantages et inconvénients écologiques de chacune des filières de l'offre

D - Freins institutionnels et les contraintes attachées aux labels

II : Les opportunités et freins au développement de chacune des filières de l'offre

A - Analyse de l'offre du bâti

B - Analyse de l'offre des produits d'isolation

C - Analyse de l'offre des produits de chauffage et de « température »

D - Analyse de l'offre d'électricité solaire photovoltaïque

III : Les conclusions et perspectives de l'analyse de l'offre

La deuxième section respectera toujours le même plan en deux sous parties pour chacune des 4 filières :

- Les opportunités au développement de l'offre : perspectives de la demande et soutien (ou frilosité) des pouvoirs publics.

- Les freins rencontrés au développement de l'offre : freins techniques et de coûts, manque de formation des artisans, retard des producteurs français et coordination nécessaire de l'offre.

Plan du chapitre :

I.	<i>Le contexte de l'étude de l'offre.....</i>	68
A.	Précisions introductives.....	68
1.	Les enjeux de la réduction de la consommation énergétique dans le bâtiment, le contexte technique et réglementaire.....	68
2.	Une offre à appréhender dans le cadre du dilemme entre efficience énergétique et caractéristiques écologiques des matériaux.....	70
B.	Méthodologie de l'étude	74
1.	Objectifs du projet et choix d'une méthodologie qualitative	74
2.	Sélection des acteurs à interroger et administration des entretiens	76
3.	Synthèse des entretiens réalisés.....	78
C.	Avantages et inconvénients écologiques de chacune des filières de l'offre	80
1.	Synthèse de l'offre de bâti (maisons, fenêtres et occlusions)	81
2.	Synthèse de l'offre de produits d'isolation : intérêt économique / intérêt écologique	84
3.	Synthèse de l'offre de produits de chauffage et température.....	89
4.	Synthèse de l'offre de production d'électricité renouvelable	93
D.	Freins institutionnels, contraintes techniques et labels.....	95
II.	<i>Opportunités et freins au développement des quatre grandes filières de l'offre.....</i>	97
A.	Analyse de l'offre bâti (maisons et fenêtres)	97
1.	Opportunités au développement de l'offre	97
2.	Les freins au développement de l'offre	100
B.	Analyse de l'offre isolation : premiers résultats d'analyse.....	102
1.	Opportunités au développement de l'offre	102
2.	Les freins au développement de l'offre	105
C.	Analyse de l'offre chauffage et température	113
1.	Opportunités au développement de l'offre	113
2.	Les freins au développement de l'offre	115
D.	Analyse de l'offre électricité solaire photovoltaïque	121
1.	Opportunités au développement de l'offre	122
2.	Les freins au développement de l'offre	125
III.	<i>Conclusions et perspectives de l'analyse de l'offre.....</i>	133
A.	Des incitations publiques à confirmer dans la durée	134
B.	Un effort de formation des artisans à renforcer.....	136
C.	Une logique de concentration susceptible de freiner la dynamique concurrentielle et d'innovation.....	137
D.	Une démarche d'innovation appréhendée sous l'angle du cycle de vie.....	139
E.	La nécessaire structuration des acteurs de l'offre	140
F.	Le rôle de la distribution.....	142
IV.	<i>ANNEXES</i>	144
A.	Energie grise : exemple de quantification.....	144
B.	Guide d'entretien	145
C.	Les dix premiers producteurs de cellules photovoltaïques en 2008, en mégawatts	147

D. Documents tirés de la Brochure OPEN 2009	148
V. <i>BIBLIOGRAPHIE</i>	150

Liste des figures :

<i>Figure 0-1 : Le crédit d'impôt moins décisif que le prêt bancaire pour les gros travaux.....</i>	149
---	------------

Liste des tableaux :

Tableau I-1 : Synthèse des entretiens réalisés	78
Tableau I-2 : Synthèse de l'offre du bâti (maisons, fenêtres et occlusions)	81
Tableau I-3 : Avantages et inconvénients écologiques des produits du bâti	82
Tableau I-4 : Synthèse de l'offre de produits d'isolation	84
Tableau I-5 : Avantages et inconvénients écologiques des produits d'isolation	86
Tableau I-6 : Synthèse de l'offre de produits de chauffage et température	90
Tableau I-7 : Avantages et inconvénients des produits de chauffage et température	90
Tableau I-8 : Synthèse de l'offre de production d'électricité renouvelable	93
Tableau I-9 : Avantages et inconvénients écologiques de l'offre de production d'électricité renouvelable	94
Tableau IV-1 : Energie grise, un exemple de quantification	144
Tableau 0-1 : Les dix premiers producteurs de cellules photovoltaïques en 2008	148
Tableau 0-2 : Segmentation du marché de l'amélioration énergétique par type de travaux	148

I. Le contexte de l'étude de l'offre

A. Précisions introductives

1. Les enjeux de la réduction de la consommation énergétique dans le bâtiment, le contexte technique et réglementaire

L'intérêt porté à l'efficacité énergétique dans le bâtiment s'inscrit dans une prise de conscience liée aux conclusions des groupes d'experts sur l'évolution du climat (voir rapports du GIEC), et à l'évaluation des coûts économiques du réchauffement climatique. Le rapport STERN, par exemple, conclut que les coûts du changement climatique correspondent à une perte annuelle de PIB mondial comprise entre 5 % et 20% ; en revanche, les coûts annuels d'une politique de forte réduction de GES se limiteraient à 1% du PIB mondial¹⁴ (STERN, 2006). L'ensemble du rapport souligne la nécessité de stabiliser les niveaux de GES dans l'atmosphère entre 450 et 550 ppm¹⁵, ce qui exige de plafonner les émissions d'ici à 2050, à 25% au moins en deçà des niveaux actuels. En octobre 2006, la Commission européenne a présenté un plan d'action en ce sens. L'engagement pris par la France de diviser par 4 les émissions de gaz à effet de serre (« atteindre le facteur 4 ») s'inscrit dans cette démarche.

Dans ce contexte, le secteur du bâtiment est concerné au premier chef. Les bâtiments représentent 40% de la consommation énergétique totale de l'Europe. Une directive de 2002 sur la performance énergétique des bâtiments (« Directive PEB ») a proposé aux États membres une approche intégrée en vue d'une utilisation efficace de l'énergie dans le secteur des bâtiments. En novembre 2008, la Commission a proposé une refonte de la directive PEB, susceptible d'entraîner des économies d'énergie à hauteur de 60 à 80 millions de tonnes d'équivalent pétrole par an d'ici à 2020, soit une réduction de la consommation finale d'énergie de l'UE de 5 à 6 % supplémentaires par rapport aux directives de 2002. Sur la base de ces propositions, le Parlement européen a adopté, en avril 2009, une résolution législative appelant une législation

¹⁴ Ces conclusions restent à ce jour controversées.

¹⁵ Ppm « partie par million » 1mg de GES équivalent CO₂ /kg d'air

encore plus ambitieuse et exigeante. Une amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments peut contribuer à l'objectif européen de réduire les gaz à effet de serre (GES) de 20 % d'ici 2020¹⁶.

En France, le bâtiment est le secteur le plus consommateur d'énergie puisqu'il représente environ 43% de l'énergie primaire totale consommée¹⁷, entre 19 et 25 %¹⁸ des émissions de CO₂¹⁹, et pourrait apporter une contribution allant jusqu'à 40% de réduction de la consommation d'énergie²⁰ ce qui conforte les évaluations européennes. Parmi les programmes d'action issus du Grenelle de l'Environnement, la maîtrise de l'énergie dans le bâtiment figure donc dans les tous premiers²¹.

Les objectifs suivants sont avancés :

- Avant 2012, tous les bâtiments neufs devront répondre aux normes « basse consommation ».

- Dès 2020, tous les bâtiments neufs devront être à énergie positive, c'est à dire produire davantage d'énergie qu'ils n'en consomment.

- Dans les bâtiments anciens, l'accent est mis sur le diagnostic de performance énergétique et la rénovation thermique, aussi bien pour les bâtiments publics que privés (sans toutefois afficher d'objectifs en matière de consommation en KWh / m²).

Le niveau de performance énergétique BBC (Bâtiment Basse Consommation énergétique) a été défini par l'arrêté ministériel du 8 mai 2007, et correspond à une consommation énergétique de 50 KWh ep/m²/an (pour le neuf). Actuellement, la consommation totale en énergie primaire des bâtiments est comprise entre 160 et 300 KWh/m²/an ; les bâtiments neufs qui répondent à la réglementation thermique (RT 2005) ont une consommation de l'ordre de 100 KWh/m²/an (source : ADEME). L'ADEME estime que les techniques de construction actuelles permettent d'atteindre une consommation de 50 KWh/m²/an (soit le standard basse consommation)²².

¹⁶ www.tenerrdis.fr, posté juillet 2009.

¹⁷ Plus d'1T équivalent pétrole par français par an

¹⁸ Voir par exemple le rapport BALMES (2007).

¹⁹ WWF Newsletter, mai 2009.

²⁰ Voir par exemple <http://www.logement.gouv.fr/>

²¹ Voir par exemple le discours de Conclusion du Grenelle par le président Nicolas SARKOZY et le programme « Moderniser le bâtiment et la ville » : <http://www.legrenelle-environnement.gouv.fr/grenelle-environnement/>

²² Voir http://www.actu-environnement.com/ae/news/prebat_appel_projet_batiment_2358.php4

Plusieurs labels permettent de certifier ce standard basse consommation : les labels suisse MINERGIE et allemand PASSIVHAUS correspondent ou dépassent la norme basse consommation française. En France le label EFFINERGIE a été lancé en 2007 à la suite de diverses initiatives régionales, par l'association EFFINERGIE qui regroupe des collectivités locales, des banques et des acteurs de la filière du bâtiment. Le label certifie une consommation inférieure à 50 KWh/m²/an pour les constructions résidentielles neuves et 80 KWh/m²/an pour les rénovations (exigences à différencier en fonction des types de bâtiments et des conditions climatiques)²³. Une 1^{ère} réalisation, certifiée en octobre 2006, est accessible pour 125 000 € les 100 m² (hors terrain) (cf. la « bonne maison », gamme Geoxia-Phénix). Sur le plan technique, la maison EFFINERGIE fait appel à l'isolation thermique (isolation par l'extérieur, triple vitrage), les énergies renouvelables (chauffage solaire, géothermie, puits canadien, ventilation double flux²⁴...), le respect de l'environnement (bois issu de forêts certifiées...).

2. Une offre à appréhender dans le cadre du dilemme entre efficience énergétique et caractéristiques écologiques des matériaux

Dans une consultation réalisée en 2002 par l'ADEME en collaboration avec le Plan Urbanisme Construction et Architecture (PUCA), destinée à préparer le Bâtiment 2010 (COHEN-AKNINE, HERANT, CASAMASSIMA, 2002), il est mentionné qu'il faut porter l'effort prioritairement sur 4 aspects :

- (i) L'enveloppe du bâtiment : les ponts thermiques, la perméabilité à l'air des façades, la super isolation (en conception architecturale globale) et les matériaux renouvelables
- (ii) Les systèmes climatiques : ventilation, efficacité énergétique, efficacité acoustique, gestion de l'énergie
- (iii) L'intégration des énergies renouvelables

²³ Voir http://www.actu-environnement.com/ae/news/label_effinergie_2416.php4 et <http://www.effinergie.org/xwiki/bin/view/Main/WebHome>

²⁴ L'air vicié ressort et réchauffe l'air capté.

- (iv) La question des déchets dans la construction : intégration de matériaux recyclés et recyclabilité des matériaux utilisés.

On peut distinguer deux préoccupations importantes qui vont pouvoir être intégrées dans l'analyse de l'offre : la réduction de la consommation énergétique et donc des GES par une amélioration de l'enveloppe du bâtiment et de son isolation, et la réduction des émissions de GES liées à l'utilisation d'énergies renouvelables et de matériaux « durables ». Il faut en effet tenir compte du coût énergétique lié à la fabrication des matériaux d'isolation et de chauffage, source d'émissions de GES indirectes. D'après l'étude belge menée sur la réduction des émissions de GES (NEMRY, THEUNIS, BRECHET, LOPEZ, 2000), la construction d'une maison de type conventionnel induit des émissions indirectes qui représentent 7 à 14% des émissions dues au chauffage sur toute la durée de vie de la maison. Par ailleurs, certains matériaux isolants (chanvre, laine, paille...) sont plus écologiques que les matériaux conventionnels si on tient compte de leur recyclabilité (CHAMPOUILLON, 2007). De plus en plus, l'attention portée dans les bâtiments BBC, à la qualité écologique des matériaux semble se renforcer.

Il existe néanmoins un débat entre la priorité donnée à l'isolation (qui détermine les émissions de GES pendant la phase d'usage du bâtiment) et l'importance accordée à la qualité écologique des matériaux (et des émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie des produits, fabrication et destruction comprises). La réflexion est influencée par les enjeux estimés prioritaires. Par exemple, E. WURTZ (2008) affirme que le bâtiment représente 46% de la consommation énergétique, et que de ce fait, il faut avant tout chercher à diminuer cette consommation ; mais il insiste aussi sur le fait que les émissions liées à cette consommation sont discutées par les experts. Par ailleurs, à « Prioriterre »²⁵, on souligne que *l'isolation ne constituant que 5 à 10% de la consommation en énergie grise²⁶ du bâtiment, on doit lui donner un avantage*. De ce point

²⁵ ONG chargée d'informer et conseiller les particuliers et les entreprises sur les économies d'eau et d'énergie.

²⁶ Pour évaluer le caractère durable des matériaux le concept « d'énergie grise » est intéressant à mobiliser : il prend en compte le maximum de facteurs relatifs à la fabrication, l'usage et au recyclage du produit...l'énergie grise donne une approximation de l'énergie consommée durant tout le cycle de vie du produit. On prend en compte l'énergie dépensée lors de la conception du produit, de l'extraction et du transport des matières, de la

de vue, la priorité doit être accordée à l'isolation, quelque soient les qualités écologiques des matériaux isolants utilisés.

Dans le contexte de hausse des prix des matières premières du printemps 2008, l'importance des économies d'énergie s'impose aux entreprises du bâtiment quelles que soient les qualités écologiques des isolants et des chauffages utilisés. L'accent est mis sur le renforcement de l'isolation avant tout. Lors du colloque « Bâtiment 2020 », on souligne que répondre à l'engagement pris par la France de diviser par 4 les émissions de gaz à effet de serre (« atteindre le facteur 4 ») impose de construire autrement (« Bâtiment 2020 », 2008). Si dans un premier temps l'accent a été mis sur l'apport des énergies renouvelables, aujourd'hui il est mis sur les effets d'isolation et de réduction de la consommation énergétique. *L'engouement pour les « maisons passives » et pour « les bâtiments qui produisent de l'énergie »* (« bâtiments à énergie positive ») (WURTZ, 2008) révèle que pour beaucoup de décideurs l'enjeu clé de la diminution des GES est l'amélioration de l'isolation des bâtiments. Que ce soit avec des matériaux traditionnels ou avec des matériaux innovants et plus écologiques, il faut combiner l'étanchéité du bâtiment, son isolation, sa ventilation avec son orientation²⁷.

Dans un Bâtiment Basse Consommation, le renforcement de l'isolation peut aussi bien utiliser des matériaux traditionnels (en augmentant leur épaisseur pour les rendre plus performants) qu'utiliser des matériaux durables. Concernant les performances énergétiques des isolants, on peut se référer aux travaux déjà cités du colloque « Bâtiment 2020 », qui présente une évaluation des taux d'économie par an en fonction du type d'isolation, sans prendre en compte la qualité durable -ou non- des matériaux (« Bâtiment 2020 », 2008).

Le pouvoir isolant des matériaux traditionnels est lié à leur épaisseur. Pour ce qui est des matériaux écologiques (ou éco-matériaux), certaines caractéristiques sont encore

transformation des matières et de la fabrication du produit, de la commercialisation, de l'usage ou la mise en œuvre, et enfin l'énergie dépensée lors du recyclage du produit... le concept est difficile à quantifier et donne davantage un ordre de grandeur de l'énergie utilisée plutôt qu'une valeur précise.

²⁷ Sur la combinaison isolation, étanchéité, chauffage écologique et orientation, voir le document du conseil régional de Lorraine (« Guide de l'éco-construction », en collaboration avec l'agence de l'eau et l'ADEME, 2007, www.ademe.fr).

mal connues (par exemple l'inflammabilité de la laine de mouton, ou les risques liés à l'utilisation de la paille²⁸). L'analyse des avantages/inconvénients écologiques des divers produits de construction est polémique : par exemple, le bloc béton contient du ciment (15-20%), mais utilise moins d'énergie que la brique (surtout si on utilise des brûleries de déchets pour fabriquer les blocs béton) et est fabriqué partout (peu de transport). Concernant la nouvelle brique mise en avant par Imérys/ bloc béton (Optibric PV + thermique + solide + résistante au feu), on ne dispose pas de son coût de fabrication énergétique. *Cette brique a sans doute un impact énergétique en fabrication 10 fois supérieur à celui du béton cellulaire* (France-Matériaux).

Par ailleurs, les propriétés de l'isolation apparaissent problématiques à évaluer, même qualitativement, car l'organisation de l'offre est complexe avec des matériaux très divers et encore mal répertoriés, tant du point de vue de leurs avantages (et inconvénients) techniques, écologiques que de leurs coûts. L'analyse du cycle de vie du produit n'est pas encore menée sur tous les matériaux, les conclusions tirées donnent lieu à controverses.

La même dualité entre efficacité énergétique et caractéristiques écologiques des sources se retrouve à propos des ventilations et chauffages²⁹. Le bâtiment consomme une énergie finale³⁰, soit en énergies fossiles, soit en énergies renouvelables. La contrainte carbone donne un avantage aux énergies les moins émettrices en CO₂ (énergies renouvelables) et exige une refonte profonde des modes de consommation d'énergie, mais pousse avant tout à améliorer l'efficacité des chauffages et ventilation des bâtiments individuels et collectifs, et ceci quelque soit la source d'énergie.

Une autre difficulté dans l'analyse des matériaux (et de l'offre en général), réside dans l'incertitude attachée aux innovations envisageables. Par exemple, la grande innovation en matière d'isolation réside aujourd'hui dans les matériaux à

²⁸ L'utilisation de paille dans la brique creuse permet d'améliorer son pouvoir isolant mais rend les murs gélifs du fait des qualités hydrophages de la paille (GRELAT, 2004).

²⁹ Par exemple, il y a débat concernant le recours aux panneaux solaires, qui permettent de réduire les émissions de GES, mais qui posent le problème de leur recyclabilité.

³⁰ ADEME Stratégie et études n°18, 2 février 2009

changements de phase (catégorie MCP), qui permettent de stocker de la chaleur latente de fusion, par changement d'état du produit (liquide/gazeux, ou liquide /solide). Les produits qui permettent ces MCP sont les hydrates salins, les paraffines, et des composés organiques (acides gras, esters acides, eutectiques). Les utilisations sont multiples et on peut imaginer de nombreuses applications dans le bâtiment, notamment grâce à des micro-capsules insérées dans le sol, qui emmagasinent puis restituent la chaleur.

Un autre exemple d'innovation majeure dans l'enveloppe des bâtiments est la mise au point de rupteurs thermiques (un isolant d'où sortent des armatures carbonées soudées à des armatures inox), qui peuvent permettre de résoudre les questions de ponts thermiques entre l'intérieur et l'extérieur dans les structures en béton.

B. Méthodologie de l'étude

1. Objectifs du projet et choix d'une méthodologie qualitative

Pour évaluer la réactivité du secteur de la construction à une demande plus importante en matière de réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre et d'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, il faut mener à bien l'analyse de la dynamique de l'offre. L'accent est mis sur :

- La compréhension de chaque filière, de son intérêt économique /écologique, de ses contraintes d'adaptation
- L'analyse des besoins en formation
- La capacité des institutions (telles que l'ADEME, les pôles de compétitivité et clusters régionaux...) à stimuler l'innovation
- L'impact des promoteurs et constructeurs sur l'articulation des filières.

L'analyse des résultats sera réalisée en deux temps :

Une classification des produits à partir de leurs avantages / inconvénients

écologiques³¹

Entre autres critères, nous privilégions ici les analyses de cycle de vie (ACV). Celles-ci existent depuis les années 80 dans l'industrie, et sont utilisées depuis une dizaine d'années pour évaluer les impacts des matériaux de construction.

Les opportunités et contraintes au développement de l'offre en matière d'amélioration de l'efficacité énergétique et de diminution des émissions de GES

Il s'agit d'identifier la dynamique de l'offre et la réactivité des différentes filières, leur capacité à répondre à la demande. Nous chercherons à préciser, entre autres, les gains à espérer des innovations technologiques et les combinaisons efficaces entre les diverses filières pour proposer une offre globale.

Compte tenu des objectifs du projet, on a recours à une méthodologie qualitative, basée sur une série d'entretiens semi-directifs auprès d'intervenants du secteur du bâtiment concernés par la problématique du projet. En sciences de gestion, les méthodologies qualitatives sont largement utilisées et constituent une stratégie de recherche à part entière ; elles favorisent la description d'un phénomène, mais surtout son explication et sa compréhension (WACHEUX, 1996 ; HLADY RISPAL, 2002). Plus précisément, selon WACHEUX (1996), on peut justifier le choix d'une méthode qualitative par un questionnement large et une démarche de compréhension de la perception des acteurs, dans le cadre de situations de gestion concrètes. Les méthodes qualitatives sont particulièrement adaptées quand on veut réaliser une analyse approfondie d'un phénomène dans sa complexité, en le replaçant dans son contexte (WACHEUX, 1996; MILES et HUBERMAN, 2003). Ce type de méthode répond aux objectifs de notre projet, centré sur la compréhension des enjeux, des contraintes, des opportunités perçues dans chaque filière, et la démarche stratégique de chaque filière face à un contexte nouveau.

³¹ Les avantages et inconvénients écologiques sont ici analysés de la façon la plus large possible, en intégrant aussi bien les émissions de GES, l'énergie grise liée à la fabrication des produits, le transport, la recyclabilité...

2. Sélection des acteurs à interroger et administration des entretiens

Les entretiens constituent la source de données privilégiée dans la plupart des méthodologies qualitatives, car ils fournissent une information directe sur le phénomène étudié et la perception des acteurs (HLADY RISPAL, 2002). Le recours à plusieurs entretiens, auprès d'acteurs très divers, permet d'assurer une triangulation des données, ce qui évite des erreurs d'analyse et garantit la validité interne³² de la recherche (WACHEUX, 1996 ; HLADY RISPAL, 2002). Dans cette optique, nous avons mené une série d'entretiens auprès d'intervenants le plus divers possible du secteur du bâtiment, concernés par la problématique du projet. Ces acteurs se situent à des stades différents dans le processus de construction du bâtiment ; certains orientent l'offre en amont (prescripteurs, donneurs d'ordre...), d'autres interviennent directement sur l'offre, au niveau de la production de matériaux, de la distribution ou encore de l'installation. C'est la diversité des points de vue qui permet de construire l'analyse, après synthèse des résultats. Concernant les « intervenants techniques », les acteurs à interroger ont été choisis pour assurer la meilleure représentation possible du phénomène qui nous intéresse, à savoir l'adaptation de l'offre pour améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment en Rhône Alpes³³. L'investissement de l'entreprise sur ce secteur³⁴, le poids de l'entreprise sur le marché³⁵, l'intervention sur le secteur géographique rhônalpin³⁶, ont constitué des critères de sélection.

Dans une analyse qualitative, il n'est pas facile de déterminer à l'avance le nombre d'entretiens à mener. L'objectif est d'atteindre un point de saturation ; selon YIN (2003), on atteint ce point lorsque les nouveaux entretiens apportent peu d'éléments nouveaux. Nous avons mené à ce jour 53 entretiens (dont 9 entretiens qui concernent

³² La validité interne de la recherche renvoie à la pertinence et la cohérence interne des résultats (DRUCKER-GODARD et al., 2007).

³³ Pour justifier le choix des entreprises interrogées, on peut se référer à HLADY-RISPAL (2002) ; l'échantillon doit assurer la variété et l'équilibre (suffisamment de situations différentes et d'homogénéité), le potentiel de découverte compte tenu de l'objectif de recherche (des cas intéressants du point de vue du phénomène étudié).

³⁴ Nous avons pris en considération l'appartenance au cluster Eco-Energies, par exemple, mais aussi la communication sur ce thème.

³⁵ Nous avons favorisé les entreprises leaders.

³⁶ Même si le siège social se trouve hors Rhône-Alpes.

la filière solaire, réalisés en 2007, et réactualisés).

Les acteurs interrogés ont été les suivants :

- Les acteurs en amont de l'offre (15 entretiens)
- Les acteurs institutionnels qui orientent l'offre : prescripteurs, coordinateurs, certificateurs et organismes de financement
- Les concepteurs et les donneurs d'ordres qui créent la demande : architectes, constructeurs de maisons écologiques clés en main, maîtres d'œuvre...
- Les intervenants techniques, au cœur de l'offre de produits (34 entretiens) : producteurs de matériaux et de systèmes.

Pour les classer, on peut se référer aux 6 zones clés de la réduction énergétique identifiées par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)³⁷.

A partir de ces zones clés, nous avons effectué des regroupements, de façon à aboutir à 4 filières :

- Le bâti (constructeurs de maisons et de fenêtres) (6 entretiens)
- L'isolation du toit, des murs et des planchers (12 entretiens)
- Le chauffage et la température des bâtiments, y compris ceux rattachés à la filière solaire thermique (9 entretiens)
- La production d'électricité renouvelable intégrée au bâtiment : solaire photovoltaïque (7 entretiens)
- Les acteurs en aval de l'offre (4 entretiens) : distributeurs et installateurs.

La présentation des résultats de l'analyse est organisée autour des acteurs centraux de l'offre (les intervenants techniques des quatre filières identifiées), qui jouent un rôle déterminant sur le marché (voir Chapitre 3). L'opinion des autres acteurs (en amont et en aval de l'offre) vient à l'appui de cette analyse de l'offre.

³⁷ Il s'agit du toit, des murs, des fenêtres, du chauffage, de la ventilation et de l'énergie solaire (voir http://www.cstb.fr/bepos/presentations/cstb_bepos.swf).

3. Synthèse des entretiens réalisés

Tableau I-1 : Synthèse des entretiens réalisés

En amont de l'offre	Entretiens réalisés	Lieu, date
Bureau d'étude maisons bois haute efficacité énergétique	Imagine	Annecy, avril 2008
Collectivité territoriale	Conseil Général Savoie Service Etude Logement	Bourget du Lac, avril 2008
Laboratoire recherche Université de Savoie	LOCIE (Laboratoire Optimisation Conception Ingénierie Environnement)	Savoie Technolac, mai 2008
Accompagnement économique	Agence Economique Départementale Savoie	Le Bourget du Lac, mai 2008
ONG Info et conseil aux particuliers et entreprises sur les économies d'eau et d'énergie	Prioriterre	Annecy, juin 2008
Structure régionale de mise en place du label Effinergie	Rhonealpeénergie- Environnement (RAEE)	Lyon, juin 2008
Cluster régional	Cluster RA Eco-énergies	Lyon, juin 2008
Centre de Certification	CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)	Grenoble, juin 2008
Cluster recherche	Cluster RA Eco-énergies	Lyon, février 2009
Architecte	Cabinet Dupuis-Baldy	Annecy, avril 2009
Agence environnement	ADEME RA	Lyon, mai 2009
Cabinet économiste thermicien	Cabinet EIC2	Annecy, juin 2009
Cabinet architectes	Edouard Boucher	Paris, mars 2010
Bureau études, maître d'oeuvre	Bio Teknik	Issy-les-Moulineaux, mars 2010
Conseil habitat écologique, NRJ	Nouvel'ère	Sucy-en-Brie, mars 2010
Intervenants techniques		
Producteur - bâti - constructeur de maisons bois	Les Architectes du Bois	Poissy, mars 2010
Producteur - bâti - constructeur de maisons bois	TBN 19	Eggleton, mars 2010
Producteur - bâti - constructeur de maisons en terre	Heliopsis	Annecy, Conférence Maison de l'Architecture, octobre 2010
Producteur - bâti - professionnels de la maison	AsTerre (Association nationale des professionnels de la Terre Crue) ³⁸	Annecy, Conférence Maison de l'Architecture,

³⁸ Association qui regroupe des producteurs de matériaux, des artisans, des architectes, des organismes de formation...

En amont de l'offre	Entretiens réalisés	Lieu, date
en terre		octobre 2010
Producteur - bâti - fenêtres et occlusions (fabrication, pose)	Menuiserie David	Villiers St Denis, mars 2010
Producteur - bâti - fenêtres et occlusions (fabrication, pose)	MPO Fenêtres	Alençon, mars 2010
Producteur - isolation	Blocalians	Groupeement de producteurs multi-sites, février 2009
Producteur - isolation	Effisol	Nanterre, février 2009
Producteur - isolation	Isover, Saint Gobain	Lyon, février 2009
Producteur - isolation	Rector Lesage	Voreppe, février 2009
Producteur - isolation	Sopréma	Avignon, février 2009
Producteur - isolation	Ursa, grpe Ursalita	Noisiel, février 2009
Producteur - isolation	Cellisol	Cruviers Lascours, mars 2009
Producteur - isolation	KP1	Avignon, mars 2009
Producteur - isolation	VPI Vicat	L'Isle d'Abeau, mars 2009
Producteur - isolation	Xella	Bourgoin Jallieu, mars 2009
Producteur - isolation	Steico	Imbsheim, avril 2009
Producteur - isolation	Canevaflor	Lyon, juin 2009
Producteur - chauffage et température	CIAT	Culoz, mars 2007
Producteur - chauffage et température	Vivreco	Aix-les-Bains, juillet 2009
Producteur - chauffage et température	Eole	La Bouilladisse, juin 2009
Producteur - chauffage et température	Green Wind	Paris, mars 2010
Producteur - chauffage et température	Ökofen	Barberaz, mars 2010
Producteur - chauffage et température	Pile Poêle	Rampillon, mars 2010
Producteur - chauffage et température	Tiplo	Plaisir, mars 2010
Producteur - chauffage (solaire)	Clipsol	Aix-les Bains, mars 2007 - Actualisation en mai 2010
Producteur - chauffage solaire et photovoltaïque	Viessmann	Gemay, mai 2010
Ingénierie des procédés (solaire photovoltaïque)	Appolon Solar SAS	Lyon, avril 2007
Ingénierie des procédés (cellules photovoltaïques)	Cythelia	Bourget du Lac, avril 2007
Producteur - photovoltaïque	Photowatt technologies	Bourgoin-Jallieu, avril 2007
Producteur - photovoltaïque	Imerys toiture PV	Quincieux, mai 2007
Producteur - photovoltaïque	Solar Force	Bourgoin-Jallieu, mai 2010

En amont de l'offre	Entretiens réalisés	Lieu, date
Producteur – photovoltaïque	Tenesol	La Tour de Salvagny, mai 2007
Producteur – photovoltaïque	Ferropem	Chambéry, juin 2007
En aval de l'offre		
Installateur	Menui-Concept	Annecy, septembre 2009
Distributeur	France Matériaux	Aix-les Bains, septembre 2009
Distributeur	Maison-Nature	Albertville, juillet 2010
Distributeur	Filiale de SOLON SE	Lyon, juillet 2010

Les entretiens menés sont des entretiens semi-directifs ; ceux-ci ont l'avantage d'orienter l'interlocuteur vers des thématiques précises, sans toutefois l'enfermer dans la réponse à des questions trop fermées (WACHEUX, 1996 ; HLADY RISPAL, 2002). Les entretiens ont été administrés par téléphone ou email suivi d'un contact téléphonique, ou en face à face (entretiens auprès des acteurs en amont de l'offre³⁹, entretiens dans la filière solaire, entretiens intervenants techniques rencontrés au salon EcoBat à Paris en mars 2010...). Plusieurs entretiens, réalisés en 2007 (notamment dans la filière solaire), ont été exploités et réactualisés, à l'aide d'une collecte complémentaire de données (soit par entretien, soit à partir de sources documentaires). Un exemple de guide d'entretien administré auprès des intervenants techniques figure en annexe II.

C. Avantages et inconvénients écologiques de chacune des filières de l'offre

« Les préoccupations environnementales sont souvent contradictoires pour l'habitat », souligne l'architecte M. Tassin. On peut identifier différents types d'exigences concernant l'habitat, exigences avec des priorités parfois antinomiques (TASSIN, 2009). Chaque « famille » a son propre discours et affiche ses priorités.

Trois types⁴⁰ de famille peuvent nous intéresser ici car on les retrouve dans notre

³⁹ Notamment les acteurs institutionnels (entretiens plus complexes, richesse des informations recueillies...).

⁴⁰ M. Tassin propose d'imaginer un jeu des 8 familles qui identifie des familles d'exigences en habitat (Tassin, 2009).

terrain d'observations (elles nous serviront pour spécifier les avantages et inconvénients écologiques des différents produits) :

1 - La famille de la « maîtrise de l'énergie » qui a comme priorité les économies en énergies (renouvelables ou traditionnelles), et qui pose de plus en plus la question de l'énergie grise des matériaux.

2 - La famille qui se préoccupe du lien entre habitat et santé, se préoccupe des dangers des espaces clos et non respirants, des isolants toxiques et composés organiques volatils.

3 - La famille des « recycleurs » particulièrement soucieuse de réutiliser les matériaux et de gérer les déchets des chantiers.

Cette typologie simplifiée nous permet ainsi d'évaluer les avantages et les inconvénients des différentes filières analysées dans ce rapport à lumière des éléments recueillis lors des entretiens.

1. Synthèse de l'offre de bâti (maisons, fenêtres et occlusions)

Tableau I-2 : Synthèse de l'offre du bâti (maisons, fenêtres et occlusions)

Entreprise/Groupe	Produits
Les Architectes du Bois	Maisons en bois
TBN 19	Maisons en bois
Heliopsis	Maisons en terre, enduits terre
AsTerre	Maisons en terre
Menuiserie David	Fenêtres
MPO Fenêtres	Fenêtres

-
- 1- « famille maîtrise de l'énergie »... maîtrise de la demande et énergie renouvelable. Obsédée par le lambda de l'isolation et de plus en plus par la question de l'énergie grise des matériaux
 - 2- « famille paysage historique de ma région » défendue par les CAUE... problème avec les matériaux qui ne font pas partie de l'histoire
 - 3- « famille Habitat Santé » qui travaille sur le danger des espaces clos et sur la question des composés organiques volatils, sur les champs magnétiques, les isolants toxiques etc....
 - 4 - « famille limitation des transports motorisés » favorable à la compacité de l'habitat. Obsession de la proximité des matériaux
 - 5- « famille des recycleurs »...la mode des matériaux recyclé (la ouate de cellulose, le verre cellulaire...) et la gestion des déchets de chantier
 - 6- « famille défense de la faune et de la flore »...la ville végétale, les déchets végétaux
 - 7- « famille des bonnes vibrations cosmotéluriques ou géobiologiques »
 - 8- « famille des conditions sociales et des conditions de travail »...privilégie les acteurs en SCOP

+ : avantage /- inconvénient

Tableau I-3 : Avantages et inconvénients écologiques des produits du bâti

Avantages / inconvénients écologiques		
Produits / entreprises	Avantages écologiques	Inconvénients / contraintes
Maisons bois (Les Architectes du Bois, TBN 19)	+ + Intérêt écologique du bois par rapport aux autres matériaux (ressource renouvelable, captation du CO2) + Isolation par l'épaisseur du bois, matériau sain	- L'approvisionnement doit être local et respecter la renouvelabilité de la ressource - Il faut privilégier les traitements naturels
Maisons terre, enduits terre (Heliopsis, AsTerre)	+ + Matériau sain, utilisable sans aucune transformation + + Bonne régulation de l'hygrométrie, Bonne isolation thermique en association avec du végétal (roseau ou paille par ex.)	- Un approvisionnement local n'est pas toujours possible - Coût élevé de pose, temps de séchage long - Spécificités du matériau et contraintes de pose
Fenêtres triple vitrage (Menuiserie David, MPO Fenêtres)	+ Isolation	- Filière de recyclage du PVC à développer

Le bâti (construction de la maison, fenêtres...) est directement concerné par la problématique de la réduction des émissions de GES.

- Sur le plan de la construction, la maison en bois apparaît comme une solution dans une logique de réduction globale des émissions de GES. Tout comme le bois combustible, le bois matériau de construction peut mettre en avant son intérêt écologique, lié au captage du CO2 pendant la croissance des arbres, ainsi qu'à la renouvelabilité de la ressource. Les acteurs rencontrés souhaitent par ailleurs privilégier un approvisionnement local, et soulignent l'existence d'une production locale qui respecte le rythme de reforestation. Par ailleurs, le bois est un bon matériau de construction, et un isolant naturel ; pour véritablement être considéré comme un matériau sain, il doit être traité en privilégiant les traitements naturels. *Nous utilisons du bois massif, vertical, il n'y a aucun tassement de la maison. Il n'y a pas d'isolant, pas d'autre matériau, c'est l'épaisseur du bois qui isole, ça diminue la consommation énergétique.*

Le bois est du bois de pays (Limousin), une production locale. La production du bois n'est pas un frein ! La forêt limousine est en augmentation ; C'est de la maison durable, avec du bois PEFC. Nous privilégions le bois sans colle, et Pour le traitement du bois, on privilégie l'oléothermie (un traitement à l'huile, naturel) (TBN 19). Il y a une plus value écologique du bois, une préservation de l'environnement plus importante (Les Architectes du Bois).

- La maison en terre, qui souffre d'une certaine méconnaissance, est une filière en développement avec de nombreux avantages sur le plan écologique et des émissions de GES. L'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble travaille sur cette filière depuis environ 30 ans avec l'association CRAterre⁴¹. On peut utiliser la terre comme matériau de construction à part entière, ou comme simple enduit (à l'intérieur notamment). La terre est un matériau très simple à utiliser, qui ne nécessite pratiquement aucune transformation, d'où un bilan énergétique à la fabrication très bon. *L'argile est un liant minéral utilisable sans aucune transformation, avec de l'eau. (...) La terre consomme 4 à 6 fois moins d'énergie grise à la fabrication que les autres enduits (AsTerre).*

La terre bénéficie de nombreux atouts en tant que matériau de construction écologique : c'est un matériau sain, qui a de très bonnes qualités de régulation de l'hygrothermie, ainsi qu'en matière de régulation thermique (en association avec des fibres végétales ou autres). *La terre est un très bon matériau sur le plan de l'hygrothermie... Il faut voir la globalité du chantier, la maison dans son ensemble doit respirer ; la maison en terre respire sans VMC (Héliopsis). La terre est un très bon matériau sur le plan thermique, en association avec des panneaux de roseau. C'est très bien pour absorber / désabsorber l'humidité, alors que le placo ou la laine de verre, avec le temps, prennent l'humidité et perdent leur pouvoir isolant (AsTerre).*

- Concernant les fenêtres, nous avons choisi de nous concentrer sur le triple vitrage, suivant en cela les recommandations du CSTB. Les acteurs rencontrés proposent des fenêtres en bois, aluminium et PVC. Le gain écologique est ici évident, il est lié à la capacité d'isolation ; le vitrage est un complément de l'isolation des

⁴¹ www.craterre.org

murs. Le triple vitrage s'impose comme une solution technique évidente (lorsque l'isolation des murs est performante : neuf ou grosse rénovation), car pour un faible surcoût, le gain en isolation est significatif. *L'isolation s'associe avec du triple vitrage (sauf dans la rénovation)* (Menuiserie David). *Le triple vitrage est à privilégier car le gain en isolation est plus important que l'apport solaire. Pour un surcoût faible, l'économie est très importante (des centaines de litres de fioul), il y a un retour sur investissement en 7 ans (comparé au double vitrage)* (MPO).

2. Synthèse de l'offre de produits d'isolation : intérêt économique / intérêt écologique

Tableau I-4 : Synthèse de l'offre de produits d'isolation

Entreprise/Groupe	Produits
Blocalians	Blocs béton, préfabriqués
Effisol	TMS : isolant mince thermoacoustique à base de polyuréthane
Isover, Saint Gobain	Isolants en laine minérale de roche ou laine de verre Distribution de gammes complètes de produits isolants
Rector Lesage	Béton de coffrage et correcteurs de liaison (rupteurs clipsés)
Soprema	Toiture végétalisée, avec insertion de cellules PhotoVoltaïques Ouate de cellulose
Ursa, grpe Ursalita	Laine de verre (80%) et polystyrène extrudé (20%)
Cellisol	Ouate de cellulose en vrac
KP1	Béton précontraint pour plancher avec rupteurs thermiques
VPI Vicat	Poudres pour mortiers industriels, isolant par l'extérieur
Xella	Béton cellulaire en système constructif complet
Steico	Gamme d'isolants en fibres de bois ou en fibres de chanvre
Canevaflor	Mur de terre monobloc, protection thermique

Les analyses de cycle de vie permettent de quantifier les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service. Une ACV complète renseigne sur la totalité des impacts environnementaux ; pour rendre son résultats intelligible il faut souvent trouver une méthode de simplification (JARNO, COURGEY, ARCANE, 2009).

Pour parvenir à des comparaisons cohérentes entre produits il faut utiliser les mêmes bases de données en définissant ce sur quoi porte l'évaluation. Le concept « d'énergie grise », évalué à partir d'une ACV, donne une approximation de l'énergie consommée durant le cycle de vie du produit ; il est fréquemment utilisé, mais a un contenu parfois variable. Ainsi il peut tenir compte (ou non) du transport, de la

gestion en fin de vie, et préciser (ou non) si l'énergie d'origine est renouvelable. La valeur en énergie grise d'un produit dépend des critères d'évaluation choisis (plus elle est élevée plus le produit est consommateur d'énergie).

Pour comparer les bilans CO₂ et énergie grise on peut utiliser la base de données autrichienne IBO, mais il existe aussi des initiatives françaises avec le logiciel EQUER ou les fiches FDES. L'énergie grise a aussi été quantifiée pour certains produits sur la base Ekoinventaire (EQUER) dont nous présentons un exemple de quantification en annexe I.

Il est possible de comparer l'impact environnemental des isolants (en tenant compte de leur service rendu en terme d'isolation, selon une unité fonctionnelle 1m² d'isolant à R=5m².K/W), soit à partir de la contribution à l'effet de serre en kg de CO₂eq/m², soit par l'évaluation de son contenu en énergie grise en KWh Ep/m² (EQUER WWW.izuba.fr - FEDES www.inies.fr - IBO www.ibo.at).

Par exemple :

- L'isolant « fibre de bois-panneaux » à 180kg/m³ contribue à l'effet de serre en dégageant moins de 20 kg CO₂eq/m², avec un contenu en énergie primaire de 190KWh Ep/m².
- La « laine de verre HD » chargée à 80kg/m³ contribue à l'effet de serre à 35 kg CO₂eq/m² et a un contenu en énergie grise de 210 KWh Ep/m².

Si on intègre les critères « effet de serre » et « énergie grise » les meilleures notes sont attribuées aux matériaux d'origine végétale et animale, peu transformés et issus de matières recyclées (JARNO, COURGEY, ARCANE, 2009).

Notre travail ne vise pas à contribuer à l'évaluation quantitative des différents matériaux. Par contre, à partir du concept d'énergie grise, nous pouvons présenter une évaluation qualitative des avantages et inconvénients écologiques des différents types de produits développés par les entreprises interrogées.

Tableau I-5 : Avantages et inconvénients écologiques des produits d'isolation

+ : avantage / - inconvénient

Avantages / inconvénients écologiques		
Produits / entreprises	Avantages écologiques	Inconvénients / contraintes
Blocs béton (Blocalians)	+ Fabriqué partout + Recyclable par concassage	- Le ciment (6% du bloc béton) est énergivore à la fabrication
TMS (Effisol)	+ Facile à transporter + Facile à mettre en œuvre	+ou - recyclable par déchiquetage - Produits chimiques complexes
Laine de verre (Isover)	+ Moyennement coûteux en énergie primaire	- Mise en œuvre délicate et peu durable - Toxicité discutée
Béton de coffrage (Rector Lesage)	+ S'insère dans une solution globale + Facile à mettre en œuvre	- Peu recyclable - Transport lourd et compliqué
Toits végétalisés (Soprema)	+ Apporte une solution « verte » en ville	- Doit se combiner à l'étanchéité - Difficile à transporter
Polystyrène extrudé (Ursa)	+Léger (mais volumineux)	- Non recyclable - Energivore
Ouate de cellulose (Cellisol)	+ Réutilisation des déchets papier et tissu + Recyclable + Facile à mettre en œuvre	- Volumineux à transporter
Béton précontraint (KP1)	+Facile à mettre en œuvre + Recyclabilité correcte	- Coût énergétique élevé de fabrication - Lourd à transporter
Poudres et mortiers (VPI Vicat)	+ Faciles à mettre en œuvre + Faciles à transporter	- Solvants chimiques techniques - Non recyclable
Béton cellulaire (Xella)	+ Facile à mettre en œuvre + Recyclable + Léger à transporter	- Coût énergétique de fabrication (chauffe) élevé
Fibres de bois et fibre de chanvre (Steico)	+ La filière bois absorbe et stocke du CO2 + Usage connu et recyclabilité + Produits entièrement naturels et renouvelables	- Pour le chanvre, fluctuations importantes de la production au gré des politiques agricoles (plante de jachère) - Le bois est souvent importé
Murs de terre (Canevaflor)	+ Fabriqué partout + Facile à mettre en œuvre + Recyclable	- Encore expérimentaux

Avantages / inconvénients écologiques		
Produits / entreprises	Avantages écologiques	Inconvénients / contraintes
	+ Peuvent être végétalisés	

Au total nous observons une grande diversité de produits et de fabrications, avec des avantages économiques et /ou écologiques difficiles à quantifier, mais que l'on peut apprécier de façon qualitative. Trois grands types de produits d'isolation sont identifiés :

- Des produits isolants traditionnels utilisant le béton, la laine de verre ou de roche, le béton précontraint et le polystyrène. Sont vantées leurs qualités d'isolant et la bonne connaissance de leur fabrication. Les acteurs interrogés sont souvent rattachés à de grosses structures industrielles dont la capacité de mobilisation d'une activité de Recherche et Développement ainsi que des services marketing est certaine.

Les fabricants de béton soulignent que leurs structures de production sont décentralisées, ce qui diminue les coûts de transport et facilite la destruction du produit ; par ailleurs, c'est un produit qui a une longue durée de vie. L'innovation peut consister à diminuer la part du ciment dans la fabrication, polluant car le ciment est énergivore. *Mais l'essentiel de l'innovation dans la conception de ces produits consiste à revisiter de façon fondamentale les règles du bâtiment, et notamment la question de l'inertie thermique. Il faut revenir à des matériaux traditionnels en améliorant leur mise en œuvre et ne pas chercher forcément une rupture technologique* (Blocalians). Isover, par exemple, met en avant l'intérêt de la laine de verre, qui offre un débouché au recyclage du verre (la laine de verre est aujourd'hui un des débouché principal des déchets du verre usé).

Les fabricants de laine de verre et polystyrène insistent sur leur capacité à isoler par l'extérieur les bâtiments, et les possibilités de mélange des différents isolants (Isover distribue des isolants à base de chanvre qui est traité et incorporé à du polyester ; il utilise divers type de polystyrène expansé ou extrudé). *L'utilisation du béton et du polystyrène permet de combiner une réponse thermique à une réponse mécanique* (KP1). *La laine de verre et les polystyrènes sont des matériaux complémentaires ayant des niveaux de résistance mécanique différents* (Ursa). *L'introduction de fibre végétale dans le bloc béton*

améliore la résistance thermique et renouvelle l'image du parpaing (Blocalians). Isover incorpore jusqu'à 40% de laine de coton pour accroître la souplesse des panneaux de calfeutrement.

Tous insistent sur l'importance de la maîtrise des ponts thermiques (voir solutions clipsées de Rector Lesage) et vantent les solutions globales d'isolation qui réduisent le nombre d'interventions et diminuent les prix.

- Des produits qui se positionnent comme éco-matériaux, utilisant le bois, la ouate de cellulose, la terre et le végétal. Les fabricants ont une capacité de réponse beaucoup plus réduite avec des coûts d'approvisionnement en matières premières mal stabilisés. Par contre, tous soulignent, au-delà de la capacité d'isolation, les qualités écologiques de leur produit (durée de vie, recyclabilité, absence de toxicité...) et misent sur les possibilités de combiner au mieux leurs produits entre eux. Maison-Nature, distributeur de matériaux écologiques a élaboré une grille de critères de sélection de produits, en prenant en compte l'énergie grise de chaque matériaux, la proximité de la production pour éviter les transports, la composition des produits en évitant les dérivés pétroliers et les composants chimiques, enfin la toxicité du produit et sa fin de vie (biodégradabilité). A partir de ces 4 critères une fiche est élaborée autour des 3 axes : technique, prix, écologie.

La ouate de cellulose est issue du recyclage de vieux papiers et constitue un très bon isolant pour une maison à ossature bois (Cellisol), mais peut aussi être utilisée en consolidation d'étanchéité pour les toits végétalisés (Sopréma).

Les murs et toitures végétalisées sont une réponse à la fois aux préoccupations d'isolation des résidences urbaines et aux préoccupations de renouvellement de l'air des grandes métropoles (Canevaflor).

Les isolants en fibre de bois s'inscrivent dans une filière bois européenne désormais normalisée avec des jalons homogènes et des performances bien évaluées. *Le positionnement de la filière chanvre est moins évident car soumis à des problèmes d'approvisionnement liés à la politique de jachère (le chanvre est un produit de jachère) qui fluctue au gré des politiques agricoles européennes attachées aux céréales (Steico).*

- Enfin les fabrications « nouvelles » ne se référant pas aux éco-matériaux, utilisant de nouvelles matières comme le béton cellulaire (même s'il existe à l'état naturel, il est le résultat d'une réaction chimique provoquée et autoclavée sous haute température), ou comme les mortiers industriels de haute technicité de VPI.

L'isolation par l'extérieur présente un avantage clé dans le cadre de la rénovation des bâtiments mal isolés sans contraintes de pose. Xella développe un programme de recherche pour diminuer l'épaisseur des blocs de béton cellulaire tout en conservant leur qualité d'isolation.

Dans cette famille nous retrouvons les fabricants d'isolants minces. Le polyuréthane, qui constitue les produits TMS d'Effisol, offre une grande performance d'étanchéité thermique (isolation par le dessus) et *présente l'avantage d'être peu tassable dans le temps*. Ce produit peut être recyclable par déchiquetage. *Associé à des parois d'agglomérés bois, l'isolant mince apporte un grand pouvoir isolant intérieur* (France-Matériaux).

3. Synthèse de l'offre de produits de chauffage et température

La démarche privilégiée aujourd'hui pour la maîtrise de l'énergie et des émissions de GES consiste à intégrer la réflexion sur les chauffages et les fenêtres une fois que le bâtiment a été conçu et bien isolé (WURTZ, 2008 ; ADEME-RA, 2009) La filière solaire en particulier, qui se développe activement depuis quelques mois, ne peut trouver son efficacité en termes de réduction de la consommation énergétique que si son développement est coordonné à la réflexion sur l'isolation.

Le solaire thermique est resté confidentiel en France jusqu'à la fin des années 90, mais le solaire thermique est une filière émergente désormais et sa faible taille par rapport à d'autres pays européens incite au développement.

En 2009, le parc total en métropole et outre-mer est de 2 220 millions de m² soit 1550 MWth ou 715 000 logements. Mais le marché français peut offrir un fort potentiel pour le développement du solaire thermique puisqu'il semble qu'on puisse espérer en 2020 un parc cumulé de 21 M de m² (ENERPLAN 10 /2008).

Tableau I-6 : Synthèse de l'offre de produits de chauffage et température

Entreprise/Groupe	Produits
CIAT	Pompes à chaleur et ventilation aéro et géothermiques, modules qui s'intègrent au solaire
Vivreco	Pompes à chaleur aéro et géothermiques
Eole	Puits canadiens
Green Wind	Ventilations double flux, puits canadien
Ökofen	Chaudières granulés, solaire thermique
Pile Poêle	Poêles bois en pierre
Tiplo	Poêles et chaudières bois, pompes à chaleur air/air, solaire thermique
Clipsol	Solaire thermique
Viessmann	Solaire thermique et photovoltaïque

Tableau I-7 : Avantages et inconvénients des produits de chauffage et température

+ : avantage / - inconvénient

Avantages / inconvénients écologiques		
Produits / entreprises	Avantages écologiques	Inconvénients / contraintes
Pompes à chaleur et ventilation du bâtiment (CIAT)	+ Energie renouvelable (chauffage et climatisation) + Projet de co-développement	- Installation de chauffage en combinaison énergétique
Pompes à chaleur aéro et géothermiques (Vivreco, Tiplo)	++ Réduction des émissions de GES du chauffage (neuf et rénovation, maisons BBC, passives ou standard)	- Consommation d'électricité (faible)
Puits canadiens (Eole, Green Wind)	+ + Economies d'énergie en hiver et en été	- Transport (produits fabriqués en Allemagne)
Ventilations double flux (Green Wind)	+ Aération de la maison sans perte de chaleur (intérêt écologique et santé)	
Chaudières granulés (Ökofen)	+ + Intérêt écologique du bois par rapport aux énergies fossiles (ressource renouvelable, captation du CO2) + Approvisionnement local (déchets de bois)	- L'approvisionnement doit être local et respecter la renouvelabilité de la ressource
Poêles bois restitution chaleur (Pile Poêle)	+ + Très bon rendement, très faibles rejets de fumée, énergie peu chère et	- L'approvisionnement doit être local et respecter la

Avantages / inconvénients écologiques		
Produits / entreprises	Avantages écologiques	Inconvénients / contraintes
	renouvelable	renouvelabilité de la ressource - Transport depuis la Finlande - Solution inadaptée pour les résidences secondaires
Poêles et chaudières bois (Tiplo)	+ + Bon rendement, énergie peu chère et renouvelable	- L'approvisionnement doit être local et respecter la renouvelabilité de la ressource
Solaire thermique (Clipsol, Tiplo, Ökofen)	++ Energie renouvelable	- Installation de chauffage sur mesure -Transport (certains composants fabriqués en Chine) - Recyclage en fin de vie des cellules à mettre en place
Solaire Thermique et PV (Viessmann)	+ Combinaison du solaire thermique et PV	-Pas de fabrication locale - Recyclage en fin de vie des cellules à mettre en place

Concernant l'offre de produits de chauffage et température, c'est le recours aux énergies renouvelables qui permet d'assurer une réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les technologies actuelles cherchent à capter l'énergie issue de l'air (pompes à chaleur air/air), du sol (géothermie par pompes à chaleur ou puits canadien), du bois (chaudières et poêles à bois ou granulés) ou du soleil (solaire thermique), pour le chauffage. La ventilation du bâtiment peut aussi obéir à cette logique, avec par exemple la VMC (Ventilation Mécanique Contrôlée) double flux, qui permet de ventiler le bâtiment sans perte d'énergie (le flux d'air qui sort se réchauffe au contact du flux d'air qui entre).

Certaines solutions techniques sont innovantes (solaire thermique, pompes à chaleur...), mais d'autres sont très anciennes, comme par exemple le principe du

puits canadien, ou encore celui des poêles qui restituent de la chaleur. *Nos poêles en pierre fonctionnent par accumulation et restitution de chaleur, c'est une technique finlandaise, ça démarre en France mais la technologie est très ancienne !* (Pile Poêle).

La plupart de ces solutions de chauffage et ventilation sont pensées en combinaison les unes avec les autres (chaudière à granulés /solaire thermique, puits canadien / VMC double flux...). *Les clients ne veulent pas seulement une solution chauffage, c'est un mix de technologies, sur le neuf ou la rénovation* (Tiplo).

Pour évaluer l'intérêt écologique de ces différentes solutions, il faut prendre en considération leurs avantages, mais aussi leurs inconvénients ou leurs contraintes.

- Concernant les pompes à chaleur, les puits canadiens et la ventilation, l'inconvénient de ces produits est lié principalement à leur consommation d'électricité (qui reste faible au regard de l'avantage en terme d'émission de GES), ainsi que leur transport (la plupart de ces produits sont fabriqués en Allemagne).

- Concernant le chauffage au bois (poêles ou chaudières), on peut mettre en avant l'intérêt du bois en terme de captage de CO₂ pendant sa croissance. Par contre, le chauffage au bois émet des rejets et particules lors de la combustion, mais ceux-ci sont très restreints dans le cas des poêles et chaudières modernes, avec un très bon rendement. Il faut aussi s'assurer que l'approvisionnement en bois puisse être assuré de façon locale, et en respectant la renouvelabilité de la ressource. Les acteurs de cette filière prennent en considération ces contraintes, et mettent en avant l'avantage de la solution bois. *Le bois est une énergie peu chère et renouvelable (voir les simulations et comparaisons des énergies). Nous appliquons les normes allemandes et scandinaves pour les poêles qui assurent un meilleur rendement que flamme verte (norme française inférieure à la norme européenne)* (Tiplo). *Le granulé est là, c'est un déchet du bois, lié à l'entretien des forêts, et la forêt progresse en Europe. La consommation émet peu de CO₂ car le rendement est très bon, les particules sont très réduites (50 fois moins qu'un feu)* (Ökofen). Une réflexion plus globale est menée au sein de la filière, notamment par la FIBRA (Fédération forêt-bois Rhône-Alpes), qui vise à « consolider le positionnement

économique de la filière pour développer la mise en marché de l'ensemble des bois rhônalpins disponibles, en les affirmant par rapport aux autres matériaux, dans un triple souci économique, territorial et environnemental. » (FIBRA, 2008).

- Concernant la filière solaire thermique, les principaux inconvénients, sur le plan écologique, sont le transport (certains composés des cellules sont fabriqués en Chine) et le recyclage des cellules en fin de vie, qui reste à mettre en place. *Il y a du travail à faire pour recycler les cellules ! La fabrication du silicium est limitée et il est difficile à recycler, il faut travailler sur d'autres pistes pour des panneaux plus faciles à recycler (Ökofen).*

4. Synthèse de l'offre de production d'électricité renouvelable

Tableau I-8 : Synthèse de l'offre de production d'électricité renouvelable

Entreprise/Groupe	Produits
Viessmann	Solaire thermique et photovoltaïque (PV)
Apollon Solar	Ingénierie de procédés photovoltaïques
Cythelia	Ingénierie en conseils en procédés photovoltaïques et diagnostics énergétiques
Photowatt	Modules solaires photovoltaïques
Imerys	Tuiles photovoltaïques
Solar Force	Procédés de fabrication de silicium en couches minces
Tenesol	Panneaux solaires intégrés
Ferropem	Processus de fabrication de silicium métallurgique

Tableau I-9 : Avantages et inconvénients écologiques de l'offre de production d'électricité renouvelable

+ : avantage / - inconvénient

Avantages / inconvénients écologiques		
Produits / entreprises	Avantages écologiques	Inconvénients / contraintes
Solaire Thermique et PV (Viesmann)	+ Combinaison du solaire thermique et PV	- Pas de fabrication locale
R&D procédés photovoltaïques (Apollon solar)	+ Amélioration des processus de fabrication dans le solaire PV	
Ingénierie des procédés photovoltaïques (Cythelia)	+ Amélioration des processus d'installation du solaire PV. Assistance à la maîtrise d'œuvre. + Solutions d'intégration de modules PV	
Modules solaires photovoltaïques (Photowatt)	+ Production d'électricité renouvelable	- Consommation énergétique de fabrication des cellules - Recyclabilité du silicium
Tuiles photovoltaïques (Imerys)	+ Production d'électricité renouvelable + Insertion des cellules PV dans l'habitat	- Recyclabilité et durée de vie encore mal connues
Découpage du silicium (Solar Force)	+ Production d'électricité renouvelable + Processus qui peut réduire les besoins de silicium	
Panneaux solaires (Tenesol)	+ Production d'électricité renouvelable + Intégration des cellules dans des systèmes complets	- Recyclabilité encore mal évaluée
Electrométallurgie (Ferropem)	+ Production d'électricité renouvelable + Innovation dans la production du silicium métal	

D. Freins institutionnels, contraintes techniques et labels

Les freins institutionnels au développement de nouveaux produits constituent une contrainte majeure au développement de l'offre. Pour être développé, un produit doit obtenir la garantie décennale et l'avis technique du CSTB, qui concernent les matériaux isolants, les appareils de chauffage et de ventilation. Il semble nécessaire de transformer la réglementation en outil de levier décisif et de trouver un moyen pour accélérer les certifications. La question des délais pour obtenir les autorisations devient ainsi déterminante et s'impose comme amplificateur de coûts.

Ainsi certains matériaux ne sont pas encore certifiés, ni agréés. Le département CSTB de Grenoble est chargé d'agréer les matériaux isolants nouveaux, les caractériser et favoriser leur développement, *mais le service est débordé par les demandes de certification* (CSTB). Depuis peu les « avis techniques » qui se sont substitués aux agréments CSTB sont délivrés par une commission d'experts et relèvent de procédures simplifiées. Ces appréciations techniques d'expérimentation (les Atex) sont sans aucun doute plus rapides, mais applicables seulement à des chantiers particuliers et bien identifiés (site ACERMI, www.acermi.com).

Le rôle du CSTB dans la certification des produits est une clé importante. Cette certification/ « agrémentation » permet d'évaluer l'offre et de stimuler la R&D. Elle peut être incitative comme elle peut freiner l'innovation. Elle a un coût parfois difficile à surmonter pour certaines PME qui affirment alors *ne pas pouvoir accéder facilement à la certification de leurs produits* (La Toison Dorée). Il existe d'autres procédures de labellisation (comme par exemple le label allemand « Nature plus ») mais ce sont toujours des démarches payantes.

Les acteurs de la certification et de l'attribution des labels, en France, ont des difficultés à suivre en temps réel l'offre de nouveaux produits et cette tension constitue un véritable handicap au développement du marché.

Le CSTB, pour répondre à la demande plus rapidement, préconise une procédure plus rapide : « Innov-pass », et Rhône-Alpes énergie-environnement multiplie les actions.

Le département ACERMI (Association pour la Certification des matériaux Isolants) publie les documents de référence en matière de règlement technique et de certification. Une liste de certifications en cours de validation est publiée régulièrement, la dernière date d'août 2009.

Un autre frein provient de la diversité des labels. Ces derniers jouent un rôle positif dans la visibilité de l'offre, mais les exigences, la qualité et le coût des labels ne sont pas homogènes. Effinergie semble en deçà du label suisse Minergie qui demande une démarche d'accompagnement.

Minergie-Eco prend en compte l'énergie grise des matériaux, ce qui se traduit par un surcoût élevé (une consultation de bureau d'études pour obtenir le label se situe autour de 4 000 €).

C'est envisageable dans le cas d'une construction neuve mais l'est moins en rénovation. Le surcoût annoncé pour une maison garantie au label Minergie, qui a maintenant 10 ans, a beaucoup baissé puisque de 10% on estime maintenant le surcoût de la construction pouvant répondre au label à 2-3%. Ce label donne lieu à des financements, des taux hypothécaires intéressants et est suivi de contrôles de consommation sur 3 ans en Suisse.

De toute façon les deux labels (Minergie et Effinergie) ont pour objectif de diviser la consommation énergétique par 2 ou 3 (Cluster RA Eco-énergie).

Il y a actuellement en France 4 organismes qui labellisent Effinergie, avec un prix de certification 10 fois inférieur à celui de Minergie (Cluster Eco-énergies). C'est un label adopté par 20 régions françaises, simple et applicable au neuf, à l'existant, en logements individuels ou collectifs, et en tertiaire. Est posée ici la question de la vérification du label et du contrôle du respect de la RT 2005.

Le cluster Rhône-Alpes Eco-énergies souligne les mérites du label Effinergie, qui offre l'avantage d'être un système léger et lisible. C'est un outil de calcul pour la Réglementation Thermique (la référence est celle de la RT 2005, qui pour la zone géographique qui nous concerne est fixée à 80 KWh d'énergie primaire/m²/an consommée en combustibles fossiles), *or en 2010 tous les bâtiments publics devront passer par cette réglementation. Faire du label Effinergie est beaucoup plus facile que de faire*

de la maison passive (Cluster RA Eco-Energies).

Le label Effinergie renvoie à un enjeu marketing, et peut permettre aux gros constructeurs comme Bouygues ou Maison Phénix de valoriser leur offre et d'obtenir une plus value commerciale. Le problème est plus complexe concernant les petites entreprises de construction, qui devront se coordonner, et composer leur offre en tenant compte des exigences du label. L'influence des financeurs peut alors jouer un rôle décisif dans la coordination des artisans et l'amélioration des habitats, en proposant des financements avantageux pour des bâtiments respectant le label⁴².

Soulignons aussi l'apparition de structures d'informations et de conseils en BBC (Prioriterre, Imagine par exemple) qui jouent un rôle important dans la coordination de l'offre et dans la formation des architectes et bureau d'études afin de respecter les exigences nécessaires à l'obtention des divers labels (Minergie, Minergie-eco, Effinergie...). Dans la liste des adhérents au cluster Eco-énergie, on en trouve une proportion importante⁴³. Notons que la distribution semble s'orienter sur une norme RT (entre 50 et 80 kwh d'énergie primaire/m²/an), qui paraît un objectif simple et indiscutable.

II. Opportunités et freins au développement des quatre grandes filières de l'offre

A. Analyse de l'offre bâti (maisons et fenêtres)

1. Opportunités au développement de l'offre

a. Les perspectives du marché

La maison en bois répond à une demande du marché, justifiée par les qualités

⁴² La MACIF par exemple développe avec le CSTB un programme de financement « la maison du bien être ».

⁴³ Sur les 80 membres du cluster Ecoénergies du collège entreprises, en Mars 2009, on note 7 architectes/économistes, 18 Bureaux d'études, 11 experts -conseil en maîtrise de l'énergie.

techniques, économiques et écologiques du matériau de construction bois. *Ce sont les particuliers qui demandent, naturellement à terme une demande viendra des cabinets d'architectes. Nous utilisons du bois massif, vertical, il n'y a aucun tassement de la maison. Il n'y a pas d'isolant, pas d'autre matériau, c'est l'épaisseur du bois qui isole, ça diminue la consommation énergétique... Le prix est idem que pour une maison traditionnelle* (TBN 19).

Le marché de la maison en terre est plus restreint que celui de la maison bois, mais est en développement également. Là encore, ce sont les qualités de la terre en tant que matériau de construction qui expliquent l'intérêt qui lui est accordé actuellement : qualités écologiques, techniques et esthétiques.

Sur le plan technique, la terre est un bon régulateur d'humidité et un régulateur thermique ; par ailleurs, la terre est un matériau sain, agréable à vivre et très simple dans sa mise en œuvre, puisqu'il suffit de mélanger la terre avec de l'eau et de la comprimer pour obtenir des briques « crues » directement utilisables. Les acteurs du secteur mettent en place des actions de sensibilisation du grand public, avec des démonstrations en utilisant des techniques très simples, et font participer les enfants à des petits projets. La simplicité du matériau terre explique son utilisation par le passé, notamment dans certaines régions (par exemple le pisé en Rhône-Alpes) ; cette utilisation ancestrale favorise actuellement le développement du marché par le biais de la restauration d'anciens bâtiments. En parallèle, des bâtiments très modernes en terre se développent, entre autres pour des raisons esthétiques.

Pour des raisons techniques, le triple vitrage est amené à se développer. Les acteurs de la filière soulignent toutefois l'hétérogénéité des demandes, en fonction de la prise en charge ou non des coûts de chauffage. *La demande ne peut que se développer ! Le triple vitrage n'est qu'à 7% (Menuiserie David). Pour un surcoût faible, l'économie est très importante (des centaines de litres de fioul), il y a un retour sur investissement en 7 ans (comparé au double vitrage). La demande existe, mais elle pourrait potentiellement être plus élevée. Les HLM font attention car ils payent l'entretien ; dans un pavillon, on est sensibilisé. Mais les promoteurs, il y a des voyous...A l'arrivée de la RT 2005, les promoteurs se sont dépêché de déposer en 2004 !* (MPO).

b. Soutien ou frilosité des pouvoirs publics

Concernant le bâti, on peut souligner le rôle, limité, des crédits d'impôt ; ceux-ci sont inexistantes sur les maisons en bois et en terre, et insuffisants sur le triple vitrage. Les acteurs souhaitent des normes plus sévères et soulignent les difficultés d'harmonisation des normes. *Pas de crédit d'impôt sur le bois ! Pas de label. La demande est là néanmoins* (TBN 19). *Le bois est peu développé, reste confidentiel, mais en développement, grâce à la réglementation (même si elle est en retard). La RT 2012 est en retard mais elle nous aide ! On pourrait ne pas s'en satisfaire...* (Les Architectes du Bois). *Menuiserie 21 est un syndicat menuiserie bois, on pousse à des RT plus structurantes !* (Menuiserie David). *Le crédit d'impôt diminue, c'est moins intéressant. C'est le coefficient d'isolation qui détermine le crédit. Comment le calculer ? Il y a un problème de calcul (petites, grandes fenêtres...). Personne ne vérifie ! La profession devrait le calculer. Les normes doivent être plus sévères, c'est ce qui fera évoluer le marché. Les normes qui arrivent (la RT 2012) sont trop faibles !* (MPO)

Concernant la maison en terre, c'est un éco-matériau utilisé traditionnellement, qui bénéficie d'un regain d'intérêt. Il y a donc une insuffisance notable de réglementation, dont souffre le développement du marché. *En France, on n'a pas de vraie réglementation « terre », on travaille à mettre en place des règles professionnelles. Le jour où on aura une réglementation... on en a besoin pour démultiplier les chantiers en terre crue* (AsTerre).

Par ailleurs, les pouvoirs publics soutiennent insuffisamment le développement des constructions en bois ou en terre dans les projets de construction publics. *Les projets publics sont très peu en bois ! Il y a une explication historique (développement du béton à la reconstruction, après guerre, et les maçons à occuper)* (Les Architectes du Bois). Quelques projets de construction en terre jouent un rôle phare, mais cela reste encore timide.

2. Les freins au développement de l'offre

a. Les freins techniques et de coût

Le frein majeur au développement de la maison bois est la disponibilité de la ressource ; pour l'instant celle-ci est suffisante, mais avec le développement des constructions bois, la ressource pourrait constituer une contrainte. *Le bois est du bois de pays (Limousin), une production locale. La production du bois n'est pas un frein ! La forêt limousine est en augmentation ; mais il y a très peu de bois massif sur le marché (TBN 19). Le bois est peu développé, reste confidentiel, mais en développement, grâce à la réglementation (même si elle est en retard) (Les Architectes du Bois).*

Il n'y a pas de surcoût concernant les maisons en bois, au contraire un gain économique lié à la baisse de consommation énergétique. *Il n'y a pas d'isolant, pas d'autre matériau, c'est l'épaisseur du bois qui isole, ça diminue la consommation énergétique (...). Le prix est idem que pour une maison traditionnelle (TBN 19). Le bois permet une construction rapide, sans surcoût par rapport à une maison traditionnelle, au contraire ! (Les Architectes du Bois).*

Concernant les constructions ou les enduits en terre, le matériau de base est disponible en France, même s'il n'existe pas partout des filières locales. Il est donc parfois nécessaire de transporter le matériau de base, mais les acteurs soulignent à juste titre que : *le problème du transport se pose pour tous les matériaux ! On ne se pose même pas la question quand on utilise du ciment ou de la chaux... (Heliopsis).*

Les principaux obstacles au développement des constructions en terre sont liés à la méconnaissance du produit par le grand public, à l'importance des coûts de main d'œuvre et aux exigences techniques des donneurs d'ordre. *On est confrontés à des gens qui ont un discours sans connaître le matériau. (...) Le problème de la terre est le temps de séchage... or on veut tout, tout de suite, dans notre société ! C'est une technique chère car elle nécessite beaucoup de main d'œuvre à la pose (Heliopsis). Il est par ailleurs impossible de construire en terre en janvier-février à cause du froid et de l'humidité (AsTerre).*

Le surcoût du triple vitrage, faible, est rapidement amorti. *Pour un surcoût faible, l'économie est très importante (des centaines de litres de fioul), il y a un retour sur investissement en 7 ans (comparé au double vitrage) (MPO).*

b. Le manque de formation des artisans

Concernant la construction de maisons bois, on observe un manque important d'artisans bien formés, auquel la profession essaye de répondre par un soutien à la formation. *On ne peut pas répondre à toutes les demandes, car on n'a pas assez de gens formés pour la mise en œuvre, c'est notre gros souci. La formation protège la qualité mais limite... C'est le principal frein ; on pourrait lancer le produit dans tous les réseaux de distribution, mais sans assurer la qualité, or nous assurons le suivi des chantiers, avec retrait de l'agrément des artisans si il y a un problème sur le chantier. On communique auprès des artisans, pour les amener à la formation. On travaille en partenariat avec l'école des compagnons du tour de France (Jura). Il y a aussi des mise à jour de formation (TBN 19).*

Ce problème de manque d'artisans bien formés est pire pour les maisons en terre, matériau encore peu connu. *Il y a entre 10 et 20 artisans en Rhône-Alpes, mais c'est déjà bien mieux qu'avant ! (Heliopsis).*

c. Le retard des producteurs français

Au niveau des constructions de maison en bois, tout comme les autres technologies bois (chaudières granulés, poêles accumulation de chaleur), les producteurs français accusent du retard par rapport à d'autres pays européens, qui investissent le marché français. *C'est un produit autrichien, avec une licence pour la France. Nous avons une expérience de 10 ans en Autriche sur ce produit, l'Autriche et l'Allemagne ont une longueur d'avance sur la France (TBN 19).*

Concernant le bois, c'est en France aussi un problème de reconnaissance du bois comme matériau de construction, et de ses qualités écologiques. *Des réticences dans les mentalités sur la durabilité du bois, encore peu connu en France, une idée reçue ! (Les*

Architectes du Bois).

Les filières de la construction en terre souffrent aussi d'un manque de reconnaissance et de développement, notamment en France. Sur ce marché encore restreint, il faut être inventif et faire appel aux compétences et matériaux là où ils se trouvent. *Pour isoler, on fibre la terre avec de la soie de cochon qui vient d'Allemagne... mais on peut aussi utiliser de la paille ou du roseau (Heliopsis).*

d. La coordination nécessaire de l'offre

Concernant la maison en bois, le développement du marché passe par une coordination en aval, avec les artisans. *Nous travaillons avec un réseau d'artisans qui se met en place. Des particuliers ou des artisans formés (le réseau) nous sollicitent (TBN 19).*

La filière de la maison en terre se structure pas à pas ; des structures comme AsTerre⁴⁴, qui regroupent des architectes, des producteurs de matériaux, des artisans, des centres de formation... jouent un rôle clé dans la coordination de l'offre. En ce qui concerne le triple vitrage, les fabricants s'appuient sur des fournisseurs de matériaux, dont les efforts de R&D permettent l'amélioration technique des produits. *On a un bureau d'études, et nous profitons de la R&D des fournisseurs aluminium, bois (Menuiserie David). La R&D se fait chez les fournisseurs, par exemple Réault, fournisseur de PVC, il faut les pousser à développer ; et en ce qui concerne le vitrage, les pousser à faire de la R&D (MPO).*

B. Analyse de l'offre isolation : premiers résultats d'analyse

1. Opportunités au développement de l'offre

a. Les perspectives du marché

Compte tenu des mesures envisagées dans le cadre du Grenelle de l'environnement, les acteurs de l'offre ont tous intégré aussi bien les contraintes que les opportunités

⁴⁴ Voir site internet : www.asterre.org

qui vont s'imposer d'ici 2012. De nombreux acteurs ont insisté sur l'importance du développement du marché. Si la demande augmente, si elle devient importante, l'offre cherchera à y répondre, développera des produits innovants entraînant les prix des produits à la baisse. La question est donc de savoir si le marché français est mûr ou non, et si les dates butoirs de 2012 et 2020 pourront être respectées (dates limites, concernant les bâtiments neufs, pour atteindre de faibles émissions de gaz à effet de serre).

Les fabricants de matériaux d'isolation, quel que soit le type de matériaux, affirment tous être prêts à répondre à une augmentation de la demande et être capables de réaliser des isolants nécessaires à construire un BBC. Toutes les personnes interrogées pensent qu'à moyen terme la demande se développera.

La société est de plus en plus sensibilisée aux solutions de construction permettant de respecter l'environnement. On va assister à la plus grosse modification des habitudes constructives que notre pays n'aura jamais connu (Xella).

Une meilleure isolation de l'habitat impacte faiblement les coûts de fabrication, ce qui est rassurant sur les perspectives de développement de constructions bien isolées.

Si on met en perspective ce surcoût d'isolation avec la réduction des dépenses de chauffage ou de ventilation que l'isolation doit générer, il devient alors minime, pas plus de 5% (Steico).

L'enjeu économique des matériaux d'isolation est lié à leur combinaison avec l'ensemble des produits destinés au BBC. L'isolation d'un bâtiment est la première étape de toute démarche de réflexion sur la diminution des émissions de gaz à effet de serre, mais elle ne peut être suffisante en tant que telle.

b. Soutien ou frilosité des pouvoirs publics

Les pouvoirs publics peuvent jouer un rôle incitatif déterminant, au travers de constructions publiques servant de références à une démarche durable, et par le jeu des normes et réglementations et de la fiscalité. Au delà des décisions votées par le gouvernement français en 2008, il convient de s'interroger sur les soutiens concrets au développement des bâtiments à basse consommation énergétique dans un

contexte de crise et de restriction des dépenses.

La frilosité des investissements publics en matière de Bâtiment à Basse Consommation peut être soulignée. Les marges de manœuvre réduites et les enveloppes d'investissement limitées ralentissent toute recherche d'efficacité énergétique dans les bâtiments collectifs. Les maîtres d'ouvrage de logements sociaux ont un vrai problème de budget (EIC2, ASADAC 73). Or si les entreprises de construction, qui font face à une réduction nette d'activité depuis 2008, proposent des matériaux dont les coûts supplémentaires sont de +10 à +15% , elles risquent de perdre le marché.

Les résistances à la construction de bâtiments collectifs« passifs » sont importantes de la part des élus qui n'en perçoivent pas encore l'utilité, et pour les bâtiments publics ce sont les politiques qui décident. Par contre les prises de conscience individuelles vont sans doute obliger ces élus à intégrer la contrainte.

La réglementation et les normes constituent également un frein, notamment pour les fabricants de matériaux écologiques. Pour les petits fabricants alternatifs, il est difficile de financer une demande de certification, la barrière à l'entrée est évidente. *Il semble que l'ensemble des évaluations énergétiques⁴⁵, issues des bases de données disponibles (EQUER, IBO...) et des normes, deviennent un écran qui fait oublier le pragmatisme et peut expliquer en partie le retard français de la construction BBC (Cabinet EIC2).* On en revient à l'idée de coût global, de construction et de fonctionnement, rarement pris en compte et peu avancé pour les bâtiments publics.

Les déductions fiscales sont largement utilisées par les pouvoirs publics comme levier au développement de BBC. Paradoxalement les acteurs interrogés en ont peu parlé, mais l'argument au niveau des ventes des différents matériaux est très important. Nous reverrons cela à propos de l'énergie solaire photovoltaïque. Les distributeurs de produits sont particulièrement sensibles aux questions de

⁴⁵ Nous appelons ainsi l'évaluation des matériaux d'isolation en termes de coût de fabrication en énergie grise par exemple.

fiscalisation *car les clients y sont attachés*. Par contre ils en soulignent les dangers dans la mesure où les incitations *placent le consommateur final dans un engrenage mal maîtrisé, pas toujours cohérent, et avec des combinaisons de matériaux au coup par coup* (France-Matériaux).

2. Les freins au développement de l'offre

a. Les freins techniques et de coût

Le coût de la certification ouvre les portes des assurances décennales françaises décisives pour les professionnels de la construction.

D'autres freins techniques à l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments existent. Le développement du marché de BBC est beaucoup plus facile pour les constructions neuves. Pour la réhabilitation ou la rénovation, les mesures sont plus complexes, plus coûteuses et moins efficaces. Atteindre les performances exigées par la réglementation thermique est problématique ; les produits eux-mêmes sont mal adaptés à la rénovation, la rénovation par l'extérieur s'impose. Or *l'isolation par l'extérieur n'est pas toujours évidente, notamment pour les ouvrants qui doivent être à l'aplomb de l'isolant (KP1) ; en zone urbaine cela risque de réduire les espaces de déplacement*.

Par ailleurs, *« les effets de mode écologique » semblent moins déterminants pour les immeubles collectifs en construction, pour lesquels les constructeurs et promoteurs sont plus préoccupés par les coûts immédiats de construction, ce qui laisse une belle place aux produits « traditionnels »* (Blocalians).

La question des surcoûts attachés à la construction de bâtiment à faible émission de GES est décisive pour l'avenir du marché. Tous les acteurs insistent sur la difficulté qu'il y a à mesurer de manière objective et dynamique les coûts supplémentaires.

Le surcoût est lié à l'épaisseur des isolants qui augmente dans les exigences du BBC (les isolants sur murs passent de 10 à 20 cm ou même de 10 à 28 cm pour les maisons ossature bois, et les isolants plafonds passent de 20 à 40 cm), mais il est lié aussi aux performances des

vitrages et à la technicité de la mise en œuvre de certains travaux. En fonction de la nature des isolants ce surcoût peut être encore plus élevé (cabinet Dupuis-Baldy).

L'impact des travaux sur le logement locatif est quasiment toujours pris en compte dans le calcul des loyers, mais le surcoût des loyers est en partie compensé par la réduction des charges locatives, notamment par la baisse des consommations énergétiques.

Le surcoût d'un programme technique pour logement collectif en respect de la Réglementation Thermique 2005 représente encore une majoration de 15 à 20% dans le coût du chantier. Par contre, depuis 15-16 mois, les prix proposés pour la construction collective ont été réduits (passant de 1 500 €/m² en Savoie à 1 300 - 1 100 €/m²), ce qui a eu pour résultat de baisser la répercussion du coût lié au respect de la RT. Grâce à cette compression des prix de la construction on parvient à une réduction des surcoût à environ seulement 5%. Ceci permet à l'OPAC 73 d'envisager des répercussions extrêmement faibles sur les prix des loyers, les augmentations sont vite rattrapées par la diminution des charges (ASADAC 73).

Pour la rénovation, les coûts de mise en conformité sont évalués entre 200 et 400 €/m², mais semblent plus difficiles à être récupérés par la diminution des charges.

La communication est de fait trop soumise aux grands groupes qui communiquent uniquement sur leur produit propre sans considérer le bâtiment comme un système associé dans lequel il faut maîtriser l'air, l'inertie thermique et les flux énergétiques.

Les économies réalisées sur la consommation d'énergie couvrent assez rapidement les surcoûts (Xella). Le coût supplémentaire vient surtout d'une approche qui isole les questions d'isolation (VPI). A performances équivalentes (difficiles d'ailleurs à mesurer) un type d'isolation peut modifier la perception de l'inertie thermique de la maison et en changer le confort (Steico).

Les fabricants de matériaux écologiques mettent en avant le confort à la pause et le confort à l'usage qui contrebalancent la question des coûts supplémentaires. Avec la prise de conscience actuelle et le début d'un changement d'éthique de vie les perspectives sont encourageantes. *Les consciences se réveillent et la population est de plus en plus demandeuse de produits sains et respirants (Cellisol).*

Pour les isolants en fibres de bois ou chanvres la contrainte reste cependant la matière première qui freine le développement de la filière. La catastrophe naturelle qui a abîmé la forêt des landes dans l'été 2009 va créer un supplément de tensions dans l'approvisionnement et risque d'obliger certains producteurs à recourir à des importations de bois qui augmenteront les coûts de matières premières (CAZALS, SERGENT, 2009).

b. Le manque de formation des artisans

Le manque de formation des artisans constitue un frein important au développement de l'offre BBC, frein d'ailleurs pris en considération dans les propositions du Grenelle de l'Environnement par la création d'un plan de formation professionnelle pour la rénovation thermique.

Le process bâtiment est différent du process industriel car le facteur humain y est décisif. Les besoins de formation professionnelle sont énormes, mais bien des problèmes résident encore et surtout dans une prise de conscience et un changement d'attitude tout au long de la construction. *On bataille sur les chantiers pour supprimer les ponts thermiques et pour changer les habitudes, comme par exemple l'habitude de beaucoup d'électriciens d'intervenir en fin de chantier et d'incorporer très peu directement les fils électriques dans le béton, pour passer ensuite dans les doublages intérieurs, en trouant ainsi les isolants par des galeries de cables* (cabinet Dupuis-Baldy).

Il faudrait former 4 à 5000 personnes /an en Rhône-Alpes d'ici 2010 (Rhonalpénergie-Environnement). Ce qui implique de considérer l'offre de formation métier par métier et de créer un outil de pilotage pour les organismes de formation.

Pour l'isolation, « les isolants sont là » (Prioriterre) et le problème est celui de l'installation et de la réglementation. De même pour les vitrages, la question clé est l'intégration dans les menuiseries et la question de la pose.

Le manque de formation est avéré chez les maçons et les plaquistes, d'autant plus que c'est un corps de métier qui reste sur des schémas anciens. On ne peut faire de la formation qu'au coup par coup quand on travaille avec un constructeur particulier (Recto Lesage et Effisol).

Il y a de fait un énorme déficit de compétences en France sur les produits de bâtiment. Les règles sont mal connues dans la mise en œuvre de solutions globales (par exemple la pose de pare-vapeur se fait mal) et la coordination des intervenants dans le bâtiment est difficile à mettre en œuvre d'autant plus qu'elle se fait souvent dans l'urgence. *Le problème de formation est aigu, ainsi que la question de l'encadrement des compétences* (Steico).

L'information des poseurs d'isolants est surtout un frein quand on développe un produit technique nouveau. Il faut sans doute organiser des formations vis à vis des artisans du bâtiment, qui par défaut de main d'œuvre ont pris du retard ces dernières années (VPI). Les poseurs manquent de sensibilité à la qualité des produits et ne vont pas spontanément vers la nouveauté. *Après 25 ou 30 ans de pratique mono produit, il est difficile de faire évoluer les maçons vers des nouveautés quelles qu'elles soient* (Xella). *Mais pour la maison individuelle il faut aussi sensibiliser les bricoleurs et donc former au conseil les distributeurs, or la distribution relaie difficilement les nouveautés* (Ursa).

Les artisans cependant commencent à se former, notamment des entreprises de jeunes charpentiers avancent dans la réflexion. On découvre les travaux réalisés en Suisse et en Allemagne (cabinet Dupuis-Baldy).

Le rôle des architectes et des économistes est certainement déterminant mais la connaissance des matériaux est, là encore, malaisée compte tenu du maelström au niveau de l'information. Pour chaque matériau il existe des fiches techniques (même si ces matériaux ne sont pas encore certifiés), pour lesquelles les caractéristiques « feu » restent plus déterminantes que les caractéristiques thermiques. Innover demande parfois une prise de risque importante que les petites structures d'architecture ne peuvent assumer. *Les choses changent vite, les études sont en train d'avancer et il y a réellement une prise de conscience, mais on ne peut pas espérer que cela soit efficient avant 2020 !* (Cabinet EIC2).

Comme dans toute période de mutation, la réflexion tous azimuts a abouti à des

abus, notamment dans le domaine de la rénovation thermique. Une multitude d'alternatives sont proposées pour améliorer l'étanchéité et l'isolation des bâtiments sans que la coordination de leur efficacité (entre l'isolation du toit et l'isolation des murs en rénovation par exemple) soit réelle, mais le challenge s'impose peu à peu et il faut espérer que les solutions s'éclairciront.

Les producteurs éditent des manuels d'information à destination des professionnels de la distribution, manuels qui expliquent, clarifient les produits et orientent les combinaisons. Ainsi le « Mémo » d'Isover-Placo, groupe Saint-Gobain fait l'inventaire de toutes les solutions en isolation et aménagement intérieur en évaluant : le confort acoustique, le confort thermique et le crédit d'impôt attaché, ceci avec une grille de classification dans laquelle on retrouve 3 catégories de qualité : une isolation maximum, une isolation optimale/ RT, et une isolation de confort. Une indication est donnée sur la majoration de prix attachée au produit, majoration comprise entre 10 à 30% par rapport aux matériaux traditionnels.

Ces manuels pratiques jouent un rôle déterminant dans le choix et la combinaison des produits, ils risquent cependant de constituer un système de barrières à l'entrée pour les petits producteurs de matériaux innovants.

c. Le retard des producteurs français

Les entretiens permettent de faire ressortir également le retard d'adaptation et le manque d'innovation des producteurs français, notamment sur certaines filières (isolants écologiques, maisons à ossature bois...).

L'Allemagne et la Suisse semblent en avance sur la France sur de nombreux créneaux, notamment sur les toits et parois végétalisés. *On trouve en Allemagne 6 fois plus de toits végétalisés qu'en France* (Canavaflor). Le marché allemand étant saturé, avec l'ouverture du marché français la présence de la concurrence allemande est évidente. Les producteurs français rencontrent des problèmes d'adaptation, avec un retard en matière de production « en série » des équipements. Malgré cela, certains producteurs français ont un bon positionnement concurrentiel sur ce marché.

Sur le marché des isolants écologiques, la place des « gros producteurs » comme Saint-Gobain ne facilite sans doute pas l'émergence de produits nouveaux, de qualité et peu chers ; et ce d'autant moins que certains gros producteurs deviennent leurs propres installateurs avec une politique commerciale offensive (KparK par exemple). Les groupes industriels du bâtiment freinent l'entrée sur le marché des petites structures, notamment de celles qui ont pris position sur les productions d'éco-matériaux. Par ailleurs on ne peut oublier les conflits d'intérêt qui agitent la profession : *comment imaginer par exemple qu'EDF soit vraiment favorable au développement de la maison passive ?* (Blocalians). Les grands groupes industriels ont souvent la main sur les décisions politiques, ce qui conduit les maîtres d'ouvrage à éviter toute innovation pour réduire au maximum les coûts et diminuer les risques. Le jeu concurrentiel s'exprime dans l'appropriation de l'innovation par les groupes et dans le positionnement parmi les familles de produit les plus rentables.

La concentration des producteurs s'accroît en parallèle avec le même élan de concentration des distributeurs, ne facilitant pas l'accès au marché des petits producteurs.

Le gros problème pour les produits « naturels » vient de la non concertation et même la guerre ouverte entre les distributeurs de ce type de produit. Les tensions profitent à la grande distribution qui oriente vers les produits reconnus le plus souvent issus des grands groupes producteurs (Maison-Nature).

Face à ces problèmes d'adaptation, peut-on penser qu'il est possible de créer une véritable collaboration européenne, sur le modèle de l'aéronautique ? Les constructeurs français semblent frileux à la collaboration, même si certains soulignent *l'importance d'adhérer à des collectifs comme « isolons la terre »* (Ursa, filiale française du groupe espagnol Ursalita).

On peut prendre l'exemple des maisons à ossature bois allemandes (elles nécessitent 5 mois pour être construites contre 12 à 18 mois pour une maison française). L'Agence économique de Savoie a entrepris des démarches pour attirer dans le département le constructeur allemand Schower Haus (maisons ossature bois à faible consommation énergétique), mais elle est confrontée à de nombreux obstacles (ce

sont des maisons préfabriquées qui demandent des installateurs monteurs qualifiés et posent un problème de transport).

d. La coordination nécessaire de l'offre

Pour répondre à une demande client, et assurer une réflexion énergétique globale, il faut coordonner au moins une dizaine d'entreprises. Il faut donc stimuler les associations afin d'offrir une offre globale aux clients. Cette offre globale permettra une meilleure adéquation à la demande et surtout aboutira à une performance énergétique mieux contrôlée. Reste à définir ce qu'est une offre globale, comment l'évaluer et qui doit se charger de sa coordination. A l'heure actuelle, aucun corps de métier ne semble à même d'assurer cette réflexion, à l'exception des bureaux d'études qui restent onéreux. La structuration en réseaux des intervenants dans le bâtiment n'est pas évidente.

Nombreux sont les acteurs interrogés à souligner l'importance des collaborations dans une volonté de meilleure maîtrise de l'offre. Effisol participe à une association de 6 autres producteurs. Steico s'insère dans des partenariats au sein de la filière bois pour réfléchir aux obligations réciproques de chaque intervenant. Ursa, comme nous l'avons déjà mentionné, adhère au collectif « isolons la terre » et à l'association Effinergie. KP1 propose une offre conjointe avec Vicat, Effisol et Deléage pour des planchers performants. Saint-Gobain pratique des partenariats avec divers industriels « pour combiner au mieux l'isolation des parois et la questions des occlusions ». VPI met en place des partenariats entre fabricants de polystyrène, fabricants d'aluminium profilé et fabricants de fibre de verre, pour offrir un système d'isolation extérieur complet. Les collaborations industrielles se font surtout autour de produits complémentaires, dans une logique verticale, qui permettent de contrôler des segments complets du BBC.

Dans cette perspective le cluster Eco-énergie Rhône-Alpes a créé un groupement pilote, en novembre 2006. C'est un élément du pôle de compétitivité TENERDIS⁴⁶.

⁴⁶ Pôle de compétitivité Energies Renouvelables Rhône Alpes.

Ce groupement comprend, en octobre 2009, 183 membres actifs : un collège entreprises avec 142 membres (65% de PME, 6% de grands groupes), un collège institutionnels composé de 19 membres, et un collège de formation/recherche composé de 22 membres. Afin d'accroître la compétitivité des membres, deux types de coordination sont activés : un premier autour du regroupement de compétences complémentaires, un second autour du regroupement des acteurs de même métier selon une logique horizontale. On observe dans le cluster une réelle volonté de mise en relation des divers membres, et par ailleurs, le développement du collège formation/recherche révèle la place accordée à la formation.

Une association créée à l'initiative de la Chambre de Commerce et d'Industrie Nord Isère et de la Fédération BTP38, nommée « pôle innovations constructives », poursuit le même objectif en cherchant à constituer et animer un réseau d'acteurs de solutions constructives, qui regroupe des entreprises et des établissements d'enseignement supérieur et de recherche.

Une organisation résiliaire identique à celle de l'automobile et de l'aéronautique a été évoquée à plusieurs reprises. Les gros intervenants du bâtiment comme Lafarge ou Saint-Gobain peuvent être considérés comme des équipementiers autour desquels gravitent de multiples sous-traitants artisans. Il faudrait que ces « équipementiers » jouent le jeu du BBC sans augmenter les prix, pour favoriser le développement du marché. A l'inverse, comme nous l'avons souligné plus haut, si les gros intervenants créent des barrières à l'entrée pour les petits producteurs, nous risquons de voir des positions de quasi-monopole, tant sur les types de produits que sur les prix. Ce danger est renforcé par la prise en main de la formation par les gros producteurs qui organisent des formations spécifiques, voire des labellisations, pour les artisans et installateurs de leur produit

Les distributeurs de matériaux jouent un rôle décisif dans la coordination de l'offre (Point P, SAMSE, France Matériaux...). Ils ont aussi un rôle de conseil, voire de formation des artisans. Le cluster Eco-énergie a d'ailleurs bien saisi cet enjeu, et associe des distributeurs au collège d'entreprises. Les négociants essaient de se placer au milieu de tous les changements et doivent parvenir à créer du Chiffre d'Affaires

avec les « nouveaux produits. » *Il faut faire des achats de complément de gamme pour élargir les marges. L'important pour la maison basse consommation c'est de vendre des systèmes complets, ce qui demande des moyens d'expertises et de connaissances techniques considérables* (France Matériaux). Les distributeurs doivent créer des structures de commercialisation spécifiques et former des spécialistes pour une commercialisation de qualité. *Les grosses entreprises de production de matériaux ont d'ailleurs créé des réseaux directs de distribution et ne passent pas par les négoce* (France Matériaux). Ils peuvent se placer sur toute la chaîne et sur plusieurs types de produits, mais le danger est alors une combinaison techniquement non objectivée de matériaux.

C. Analyse de l'offre chauffage et température

1. Opportunités au développement de l'offre

a. Les perspectives du marché

Les perspectives de marché sont là, que ce soit sur l'aérothermie, la géothermie, l'aération, le bois ou le solaire thermique. *Concernant les installations de pompes à chaleur aéro ou géothermiques et les puits canadien, la demande est là et on peut anticiper des perspectives très encourageantes. Le bouche à oreille fonctionne bien, ainsi que la presse spécialisée qui évoque régulièrement ces produits* (Eole, Vivreco). *Pour les puits canadien, le produit s'adresse néanmoins à une population particulièrement soucieuse d'écologie, encore limitée* (Eole). *Pour le bois, il y a des perspectives très encourageantes* (Pile Poêle). *Une vraie demande, des vrais projets !* (Tiplo).

En ce qui concerne le solaire, la filière « solaire thermique » participe à la diversification énergétique et permet d'assurer le « bouquet énergétique » recherché par les autorités. Le solaire thermique, qui consiste à capter la chaleur du soleil pour assurer les besoins de chauffage, permet en effet d'assurer un relais (ou un complément) aux formes de chauffage traditionnelles, aussi bien en maison individuelle qu'en habitat collectif. Les contraintes énergétiques de demain, la

raréfaction des énergies fossiles, ouvrent un potentiel de développement important pour toute la filière⁴⁷.

Si pendant longtemps, le marché français du solaire thermique est resté limité, depuis 2 à 4 ans, il se développe, avec une réelle prise de conscience de son intérêt économique, même si l'équipement des français reste encore très largement inférieur à celui des ménages allemands par exemple. Les salons consacrés aux nouvelles énergies remportent un franc succès en terme de fréquentation ; l'ensemble des acteurs interrogés insistent sur un changement notable dans la façon d'appréhender les équipements de demain et soulignent combien la demande évolue rapidement créant un véritable appel d'air pour les constructeurs. *Nous sommes dans le solaire parce que le bâtiment de demain devra intégrer les énergies renouvelables, il y a d'énormes opportunités technologiques, stratégiques (CIAT).*

En 2009 le parc total cumulé (métropole et outre-mer) représentait 2 220 millions de m², soit 1550 M Wth ; le marché offre néanmoins toujours un fort potentiel qui pourrait représenter en 2020 plus de 21 millions de m², équivalent de 14 G Wth (pouvant concerner 7 millions de logements).

b. Soutien ou frilosité des pouvoirs publics

Le rôle des pouvoirs publics dans le soutien de la demande (notamment par les crédits d'impôt) est souligné par les acteurs des filières chauffage et température, mais l'action des pouvoirs publics est jugée de façon mitigée, car trop frileuse. Les pouvoirs publics soutiennent la filière solaire, mais pas encore ou peu d'autres filières (puits canadiens, PAC, ventilation, bois). *L'installation d'un puits canadien n'est pas encore déductible des impôts (contrairement à d'autres produits comme les panneaux solaires...). L'extension de ce type de mesure fiscale aux puits canadiens faciliterait beaucoup le développement de ces produits ; d'ailleurs Eole œuvre dans ce sens (Eole). Dans le cadre de*

⁴⁷ La filière solaire trouve également sa place dans le développement des pays du Sud, à la recherche de solutions énergétiques diversifiées.

la RT 2012, il y a une réflexion en cours, ça va venir ! (Greenwind). L'action des pouvoirs publics est très timide ; par rapport à la réglementation et aux labels, nous nous situons sur le haut du pavé (Vivreco). Le crédit d'impôt bois a baissé, c'est dommage ! C'est dommage car ça complète bien une maison passive (Tiplo). Le bois n'est pas une énergie privilégiée en France, le crédit d'impôt n'est que de 25% (idem les pompes à chaleur), c'est 50% sur le solaire (Ökofen).

Par ailleurs, l'homologation des produits par le CSTB joue un rôle important sur le marché, mais celui-ci n'est pas toujours considéré comme parfaitement neutre dans ses arbitrages en faveur des différentes filières. *Bien sûr le CSTB joue un rôle de frein pour des produits nouveaux, et surtout pratique des choix de filière à soutenir... là encore le rôle des lobbies est à préciser (Ökofen).*

Dans le secteur du solaire, les pouvoirs publics soutiennent le développement du marché, mais la mise en œuvre des évolutions récentes de la réglementation se heurte à la lenteur du processus administratif français (décalage entre les annonces d'évolution de la loi et les décrets d'application des textes, lourdeur des procédures). *Il y a un manque de synchronisation des textes réglementaires. Parfois un texte sort et on ne peut pas l'appliquer (CIAT).*

L'intégration des capteurs solaires dans l'environnement urbain, tout en respectant le patrimoine architectural, reste problématique. *Des contacts sont pris pour faire reconnaître par les architectes des bâtiments de France que cette intégration dans la toiture est acceptable même sur des bâtiments anciens et classés (Imerys toiture).* Mais là encore, les repères traditionnels bougent rapidement, quantité de solutions pour les bâtiments collectifs voient le jour.

2. Les freins au développement de l'offre

a. Les freins techniques et de coût

Sur le plan des freins, ils sont principalement liés aux surcoûts liés à l'investissement

initial.

L'installation d'une pompe à chaleur ou d'un puits canadien génère des surcoûts au niveau de l'investissement initial, et ce type d'installation n'est pas encore déductible des impôts, comme peuvent l'être d'autres produits (Vivreco, Eole). Un frein concernant les chaudières granulés est le prix, le client doit être motivé (Ökofen).

Sur le plan technique, les technologies de l'aérothermie, de la géothermie, de la ventilation et du bois sont bien maîtrisées, mais certaines solutions sont plus faciles à installer ou plus faciles à expliquer que d'autres.

L'aérothermie, par exemple, est facile à installer mais son principe est complexe. Concernant les PAC, il y a un gros investissement de départ, et le principe est difficile à expliquer (Tiplo).

Concernant la ventilation et les puits canadiens : *il y a un manque de connaissances techniques des clients (la contre information est facile) (Greenwind).* Par ailleurs, il faut anticiper l'installation d'un puits canadien par exemple : *l'anticipation doit être faite puisque des tranchées doivent traverser le jardin et des gaines intérieures installées. Il est donc recommandé de le prévoir dès le début des travaux (Eole).*

En ce qui concerne le chauffage au bois, le principe est simple à expliquer au client mais l'installation prend de la place. *La concurrence (des chaudières à granulés) est bien celle de l'aérothermie, peut être plus facile à installer. Une contrainte est la place (2 fois plus que le fioul) (Ökofen).*

Par contre, l'énergie bois possède l'avantage d'un faible coût à l'usage. Avec le renchérissement du prix des ressources fossiles, on peut anticiper que cet avantage va se renforcer. *Etant donné la hausse des combustibles fossiles on peut imaginer une réduction de coût de 40% avec une réduction d'impôt de 25% (Ökofen).*

En ce qui concerne l'énergie solaire thermique, sa technologie est désormais bien maîtrisée (la chaleur du soleil, captée à partir de panneaux solaires, permet de chauffer de l'eau) mais son coût reste encore élevé car la filière intègre des équipements nécessitant une incorporation aux systèmes de chauffage, ce qui les

rend onéreux et suppose le renouvellement de tout l'équipement d'une maison dans le cas de rénovation.

Sur le plan technique, il est intéressant de combiner le solaire thermique et la filière solaire Photovoltaïque (PV). Le solaire PV transforme les rayons du soleil en énergie électrique ; plus précisément, on capte la lumière du soleil sous forme d'énergie et on la transforme en électricité grâce à un onduleur. Cette filière mobilise des technologies et des savoir-faire complètement différents. Par ailleurs, la filière PV est, à la différence du solaire thermique, très capitalistique car elle exige des investissements beaucoup plus lourds.

Viessmann (fabricant allemand) couvre actuellement environ 23 à 25 % du marché du solaire thermique européen, fabrique dans 17 sites avec 1900 personnes, et vend dans 38 pays. Les fabrications sont très diversifiées car le principe de Viessmann est d'être industriellement très intégré. *L'entreprise combine les équipements du solaire thermique et du solaire PV, mais la spécialité Viessmann est de réaliser des chauffages et chauffe eau pour l'habitat individuel et l'habitat collectif. L'entreprise vend ce qu'elle fabrique. La technologie la plus fréquente est celle des capteurs plans intégrés (Viessmann).*

Viessmann a racheté une usine en Chine pour produire des capteurs /tubes sous vide, les chinois étant leaders dans cette technologie, qui représente 8 à 10 % du marché du solaire thermique (avec des rendements nettement supérieurs, mais des contraintes d'étanchéité plus importantes).

b. Le manque de formation des artisans

Pour les ventilations double flux, il y a peu d'artisans bien formés en France et les systèmes les plus performants sont allemands. Les compétences sont insuffisantes. Les fournisseurs (nos acteurs de l'offre) négocient les marges de l'artisan en échange de formation et d'une aide pour améliorer les compétences. Les artisans sont souvent surchargés de travail et règlent leurs réponses au coup par coup. L'installation de chaudières à granulés, par exemple, rencontre également cette difficulté. Dans les deux cas, les producteurs répondent par le développement d'un réseau d'artisan, en assurant la formation. *Le frein : avoir des installateurs partout en France ! Les installateurs*

doivent être compétents, on assure la formation (Greenwind). Et avoir des installateurs motivés et compétents ! avec des marges réduites...Ökofen prend en charge la formation (Ökofen).

Concernant l'énergie solaire thermique, les clients directs sont des installateurs de chauffage. Or en France, il s'agit principalement de petites entreprises artisanales surchargées de commandes, qui ralentissent la croissance du marché à cause de leur manque de disponibilité, mais également leur méconnaissance de la technologie du solaire. Tous les fabricants de solaire thermique ont insisté sur *l'importance de la formation aux divers produits* (Viessmann, Clipsol). Une contrainte majeure pour le développement du solaire thermique est l'installation complète des systèmes d'alimentation, de chauffage et d'électricité dans l'habitat. Il faut articuler les capteurs de chaleur aux systèmes de chauffage, ce qui impose de mobiliser et de coordonner des artisans du bâtiment aux savoir-faire traditionnels différents : des plombiers et chauffagistes, mais aussi des couvreurs et des électriciens. *Ils doivent tous être formés aux exigences de l'énergie solaire, et apprendre à travailler ensemble. Sur le marché du thermique il y a eu depuis peu l'apparition de nombreuses sociétés de vente qui ont négligé la partie technique. Il en ressort aujourd'hui des problèmes d'installation et de durabilité. L'agrément qualisol, délivré en fin de formation, permet de réguler le marché et d'attester de la faculté de l'installateur à mettre en place du bon solaire ! Chaque région de distribution des produits Viessmann a sa propre plate-forme de formation (Viessmann).*

c. Le retard des producteurs français

L'ensemble de la filière chauffage et température se caractérise par un certain retard des producteurs français, et l'arrivée d'autres producteurs sur le marché.

Concernant les puits canadiens et les pompes à chaleur, le nombre limité de professionnels sérieux qui proposent des offres de qualité est considéré comme un frein au développement de l'offre (Eole, Vivreco).

Ce retard se retrouve également sur la filière bois ; d'autres producteurs européens sont en avance, concernant les nouvelles technologies de la filière bois, qui permettent d'améliorer le rendement (chaudières à granulés, poêles à accumulation et restitution de chaleur...).

La chaudière à granulés est un marché fait par les autrichiens encore restreint puisque qu'on estime à 5000 chaudières /an de distribués sur 600 000 chaudières installées par an... La R&D est en Autriche, avec un Bureau d'Etudes à Barberaz (73), où se trouvent aussi les formations (c'est un test en France) (Ökofen). La R&D se fait en Finlande (Pile Poêle).

En ce qui concerne la filière solaire française, pénalisée par un certain conservatisme du secteur du bâtiment en France, elle est dans l'ensemble plutôt en retard. *Le business model actuel conduit à diluer les responsabilités et à une grande hétérogénéité des acteurs. Certains appliquent encore des réglementations techniques caduques. La filière du bâtiment n'est pas encore mûre (CIAT).*

Face au développement du marché français, la menace d'entrée de nouveaux concurrents en France est importante. En 2008 on identifiait une quinzaine de concurrents, producteurs d'équipements complets en solaire thermique, sur le marché européen (parmi eux, deux français de taille industrielle, Clipsol et Giordanno), et d'autres concurrents au niveau mondial (par exemple la production chinoise de solaire thermique, qui se développe très vite en baissant les prix, et peut répondre aux ambitions affichées par les pouvoirs publics en équipement en chauffe eau solaires) (RAVIGNAN, 2009).

d. La coordination nécessaire de l'offre

Dans la filière chauffage et température, il est impératif de coordonner l'offre, notamment au moment de l'installation.

Concernant l'installation des puits canadiens, il faut l'anticiper dès le début des travaux (Eole). Il y a des partenariats avec les installateurs et certains bureaux d'études (Eole).

Concernant les chaudières, la coordination avec les acteurs qui fournissent le combustible, les granulés, est importante. *Il faudrait accompagner les projets et coordonner les acteurs, mais ici le produit est relativement standard ... Le plus important actuellement c'est la mutualisation des moyens notamment avec le granulé...* (Ökofen).

La filière solaire s'intègre dans celle du confort du bâtiment, chauffage et température mais aussi dans une conception de l'autonomie énergétique. Elle ne peut se développer qu'en synergie avec les autres producteurs d'équipements (notamment ceux de l'isolation thermique). Le bâtiment intègre inévitablement de plus en plus d'énergies renouvelables, tout en réduisant les pertes de chaleur.

Le bâtiment devient un « système complexe » qui exige une plus grande coopération entre les acteurs ; il faut mobiliser à la fois des énergies complémentaires (le fameux bouquet énergétique) et des équipements complémentaires pour un plus grand confort de l'utilisateur en créant ainsi un « bouquet d'usages ».

Nous développons des partenariats avec des entreprises qui développent des produits complémentaires pour apporter une solution de confort global à l'utilisateur. Le bâtiment devient un process et nous, on s'investit en tant que partenaire. Tous les constructeurs vont travailler en réseau, d'ailleurs on développe des projets de recherche en commun, par exemple, le co-développement d'un package avec CLIPSOL, commercialisé par les deux entreprises (CIAT).

Les solutions techniques pour alléger les émissions de GES sont donc complexes et nécessitent de développer de multiples coordinations inter-entreprises. On peut par exemple réfléchir la température du bâtiment à partir de la motorisation et de l'automatisation des fermetures et des équipements de la maison : une climatisation bien réglée avec une isolation performante peut faire baisser les émissions ; la motorisation des ouvertures de la maison et une programmation automatique peuvent être aussi utiles aux économies d'énergie. L'entreprise Somfy, qui fabrique des systèmes de motorisation de volets et fermeture de fenêtres, met au point un programme « Home motion », en partenariat avec l'entreprise danoise Velux. Somfy parle d'isolation dynamique en combinant une commande programmée à un capteur

d'ensoleillement intérieur. Par ailleurs, un nouveau projet de pare-soleil extérieur en lamelles bois, automatisé, pourrait jouer un rôle essentiel dans la température estivale.

Désormais les fabricants de volets roulants participent aussi à la réflexion, ainsi Profalux (fabricant de volet roulant en Haute-Savoie) développe un produit à lattes réfléchissantes, pour favoriser le maintien de la fraîcheur domestique en été.

D. Analyse de l'offre électricité solaire photovoltaïque

Pour réduire les émissions de Gaz à Effet de Serre, nous avons déjà souligné que le bâtiment devait à la fois réduire ses besoins en consommation énergétique, et recourir à un type d'alimentation en énergie à faible niveau d'émissions de GES, ce qui favorise les équipements producteurs d'électricité solaire ou éolienne.

Le marché du solaire en général est un marché à très fort potentiel de développement. L'accroissement de la demande d'électricité solaire a suscité l'apparition d'une industrie de bien d'équipements destinée à la production dans un petit nombre de pays. Les principaux sites de production d'équipements photovoltaïques se situent en Chine (en 2009, 29% des parts de marché), au Japon (24%) et en Allemagne (22% de parts de marché).

Le solaire Photovoltaïque est un moyen de production d'électricité non émetteur de CO₂ qui a l'avantage de s'adapter à une grande variété d'implantations. D'ici 2020, le solaire PV sera donc très largement diffusé dans les bâtiments neufs à basse consommation (BBC), voire dans les bâtiments à énergie positive (BEPOS).

La France entreprend un effort important de recherche en technologies solaires, mais semble encore un peu retrait face à l'Allemagne et à l'Espagne, qui accueillent sur leur sol la moitié des centrales Photovoltaïques du monde (avec des puissances totales respectives de 5,3 GW et 2,2 GW) (TRINK, 2009).

1. Opportunités au développement de l'offre

a. Les perspectives du marché

La technologie solaire photovoltaïque consiste à produire de l'électricité à partir de la chaleur solaire. L'utilisation conjointe des deux technologies solaires (thermique et photovoltaïque) est intéressante car elle permet aux équipements du solaire thermique d'être autonomes en alimentation électrique. Le développement du solaire photovoltaïque participe aussi à la diversification des sources d'énergie. Les objectifs nationaux annoncés en juin 2009 par le ministère de l'écologie sont de 1 100 MW en 2011 et 5 400 MW en 2020 d'énergie PV produite en France. La puissance du parc installé en 2009 atteignait 268 MWc⁴⁸ en raccordé.

Même si la quantité d'énergie aujourd'hui connectée reste inférieure aux attentes (sur un parc installé en 2009 qui atteint 430 MWc, seuls 268 MWc sont raccordés), la dynamique semble enclenchée.

Le parc total cumulé exploitant uniquement le potentiel des toitures (environ 13,5 GWc soit 3% de la consommation française), pourra se substituer à une partie de la production des centrales thermique, tout en permettant de réduire les émissions annuelles de CO₂ (l'Académie des technologies⁴⁹ évoque en 2008 une division par 3 des émissions). Cette perspective suppose une pénétration prioritaire du PV dans le neuf (4% des constructions en 2009, 18% en 2013, 45% en 2015, 70% en 2020) et une pénétration relative dans la rénovation des bâtiments anciens (2% des bâtiments rénovés) (ENERPLAN 10/2008).

Actuellement les coûts de production de l'énergie PV restent élevés (entre 1,6 et 3 fois le prix moyen payé actuellement en Europe pour la production d'autres énergies) mais le prix des modules PV a été divisé par trois en 20 ans, et tout laisse à penser que c'est un marché en plein développement (RAVIGNAN, 2009).

L'avantage de l'électricité solaire est qu'elle est inépuisable et abondante, et l'analyse du cycle de vie de centrales solaires PV fait ressortir une sobriété en termes

⁴⁸ Le Watt crête est l'unité communément admise pour la mesure de la quantité de puissance maximale que peut émettre un panneau PV dans des conditions d'ensoleillement données.

⁴⁹ « Les perspectives de l'énergie solaire en France », Académie des technologies, juillet 2008.

d'émission de Gaz à Effet de Serre. L'analyse du temps de retour énergétique des modules PV révèle aussi que la consommation énergétique liée à leur fabrication est loin d'être aussi importante qu'on l'a souvent écrit. Les progrès technologiques sur les nouvelles catégories de cellules PV, notamment les modules PV « films minces » permettent une diminution notable des coûts de fabrication.

Après une période de maturation industrielle déjà longue, on peut distinguer 4 grands types de centrales Photovoltaïques : les centrales au sol dites « fixes », les centrales au sol dotées de *trackers* (qui suivent la course du soleil), les centrales installées sur de grandes toitures, et enfin les centrales de toitures individuelles.

b. Soutien ou frilosité des pouvoirs publics

En plus du rachat par EDF de l'électricité PV, garanti pour une durée de 20 ans, qui offre des assurances sur le long terme, s'ajoutent des incitations en termes de TVA et de crédits d'impôts sur les équipements pour les particuliers. Pour accélérer la mise en place du solaire PV, Electricité Réseaux Distribution France (ERDF) essaie de raccourcir le temps des procédures administratives pour la connexion au réseau. La rentabilisation des équipements est liée à la volonté de l'Europe de diversifier les sources énergétiques. En France, cela se traduit par un soutien à la filière, grâce à la politique de rachat du KWh par EDF (60,2 cts €/kWh en 2006, puis 50 cts €/kWh en 2010), qui joue un rôle clé dans le boom du photovoltaïque.

Cette politique de rachat est accompagnée par des crédits d'impôts dits « développement durable » (ceux-ci seront globalement réduits, probablement de 10%, à partir de janvier 2011). Le crédit d'impôt sur les installations PV passera de 50 à 25% de l'investissement, alors que celui attaché aux pompes à chaleur passera de 40 à 36% et celui attaché aux double vitrages de 25 à 22,5%.

La fiscalité verte a été un tel succès que les objectifs définis par le Grenelle de l'environnement pour 2020 semblent avoir été atteints en 2011 ! Le crédit d'impôt développement durable a coûté deux fois plus que prévu, soit environ 2,8 Mrds d'€. L'engouement des particuliers pour l'énergie solaire a été tel que le crédit pourrait

représenter un manque à gagner pour l'Etat de 800 millions d'€ en 2010.

Par ailleurs, de nombreux partenariats se développent pour explorer des solutions nouvelles, et les soutiens institutionnels pour le développement de l'offre de la filière solaire sont multiples.

A côté des participations d'EDF à de nombreux programmes pour cofinancer de la Recherche & Développement, il faut aussi souligner le rôle déterminant du CEA et du CNRS dans le soutien de projets innovants. D'autre part, EDF Energies Nouvelles⁵⁰ intervient massivement dans la filière, par prise de participations au capital de nombreuses entreprises du secteur (Apollon Solar, Solarforce, Tenesol...). Le 23 juillet 2009, EDF-Energie Nouvelle s'est allié au fabricant américain First Solar (2^{ème} rang mondial des producteurs PV en 2008) pour ouvrir une usine de panneaux solaires Photovoltaïques, marquant ainsi une étape supplémentaire dans le développement des énergies renouvelables⁵¹.

Le programme « Solar Nano Crystal » est l'action la mieux coordonnée, entre industriels (Photowatt et EDF-Energie Nouvelle) et organismes de recherche (CEA et CNRS). Il bénéficie ainsi de 46,5 M d'€ d'aides publiques. Ce programme concerne toutes les étapes de la filière PV silicium.

Avec le pôle de compétitivité TENERDIS en Rhône-Alpes, qui est l'un des 4 pôles de compétitivité⁵² destinés au solaire, les pouvoirs publics tant nationaux que régionaux affichent un appui déterminant aux collaborations qui permettent l'émergence de recherches innovantes dans le domaine du solaire photovoltaïque. Ils soutiennent les grands projets comme celui cité ci-dessus, et nombre d'opérations de petite taille, comme la construction sur le site du Bourget-du-Lac en Savoie des 4 maisons passives expérimentales (maisons INCAS), projet auquel participent l'Institut National de l'Energie Solaire, le CEA, le CSTB et l'Université de Savoie.

Le pôle économique de Savoie Technolac organise des événements (« Solar event »), pour multiplier les rencontres et sensibiliser le grand public de manière festive.

⁵⁰ EDF-ENR, EDF Energie Renouvelable, EDF Energies Nouvelles

⁵¹ Fin décembre 2008 les régions Rhône Alpes et Bourgogne étaient au troisième rang du parc photovoltaïque raccordé au réseau avec 9,4 Mégawatt (après les régions PACA-Languedoc Roussillon-15,8 MW- et Bretagne-Pays de la Loire -10,1 MW).

⁵² Tennerdis (Rhône-Alpes, Cap Energies (PACA), Derbi (Languedoc Roussillon), S2E2 (Centre).

L'université de Savoie organise, au sein de son école d'ingénieurs Polytech', sa première école d'été sur les thèmes des systèmes intelligents et énergies renouvelables (ENERSI 2010), à l'adresse des doctorants, chercheurs et entreprises.

A l'avenir vont se développer autant les centrales de toiture, qui ont déjà connu un vif succès en 2009-2010, que des centrales au sol (avec le retour du solaire à concentration, domaine dans lequel la France pourrait se positionner à nouveau avec les centrales de Odeillo et Thémis dans les Pyrénées Orientales), mais un cadre réglementaire sera nécessaire pour harmoniser les 2 types de source d'énergie.

Par ailleurs un débat émerge entre les partisans d'une centralisation de la production et de la distribution énergétique, et ceux qui mettent en avant l'opportunité d'une production autonome et individuelle de la production énergétique, rendue possible par les modules solaires de toiture.

2. Les freins au développement de l'offre

a. Les freins techniques et de coût

Le frein essentiel à un très large déploiement de l'électricité d'origine PV tient à son coût. Une centrale PV coûte aujourd'hui entre 4 € pour une centrale fixe et 7 €/ Watt crête pour une centrale toiture résidentielle. Pour atteindre la parité réseau (c'est à dire le moment où les coûts d'électricité achetée par les particuliers aux fournisseurs traditionnels rejoignent les coûts de production d'électricité d'une centrale photovoltaïque), l'investissement doit se situer dans une fourchette 1,5 à 2 €/Wc pour les centrales de toiture. Les modules PV représentent encore la plus grande partie des coûts (57 % des coûts d'une centrale fixe), mais l'installation et l'intégration à l'habitat sont également décisifs pour les centrales de toitures (MOURATOGLOU, THEROND, 2009).

Le challenge technologique est aujourd'hui attaché à ce coût élevé de l'électricité photovoltaïque, qu'il faut absolument baisser pour développer l'offre. Ce challenge est lié au problème des rendements des panneaux solaires, qui sont en moyenne

estimés en Europe à 16% (soit 160 KWh/an/m²), mais avec de fortes différences entre les modules cristallins et les modules hybrides (la firme japonaise Sanyo, par exemple, mélange la technologie du cristallin et de l'amorphe, et parvient ainsi à dépasser des rendements de 20%).

La partie noble de la filière, productrice de Valeur Ajoutée, reste encore dans la fabrication des cellules et non dans les installations, même si l'un des enjeux majeurs de cette filière PV est de développer l'ingénierie de procédés qui doit offrir des solutions énergétiques par effets de complémentarité.

La filière de fabrication des modules PV demande des investissements de plus en plus lourds et repose sur des process de fabrication très standardisés *qui s'appuient sur des équipementiers fabricant des machines spécifiques comme par exemple les fabricants de fours, ou ceux de la sérigraphie ou des machines de test* (Cythélia). Pour les cellules à base de silicium cristallin, la technologie est bien connue, l'enjeu réside alors dans la capacité d'investissements et la capacité à construire des partenariats en matière de R&D pour faire naître des innovations.

Les cellules cristallines représentent encore près de 85 à 90% des composants nécessaires à la production, alors même que les cellules à couches minces et les cellules à base de silicium métal se sont développées rapidement, pour permettre de faire face à la contrainte majeure du manque de silicium (contrainte très forte jusqu'en 2009).

Il y a de fait un fort potentiel d'évolutions technologiques au sein des deux grandes filières industrielles que sont la filière historique « silicium », et la filière « films minces. Mais on constate une séparation étanche entre les fabricants des deux types de cellules, car aucun fabricant ne cherche à maîtriser les 2 technologies.

- Depuis 2007, la filière de films minces présente des coûts de fabrication significativement plus faibles, grâce au tellure de cadmium (à des prix inférieurs au silicium), mais aujourd'hui se pose une question d'avenir, en matière de dépendance vis à vis d'un fournisseur unique (First Solar). Les 2 autres technologies de films minces (le CIS cuivre indium sélénium, et le silicium amorphe) voient leur processus de fabrication se stabiliser. La part de marché des films minces devrait passer de 10 à

20% d'ici 2012 (EPIA/Soge).

- La filière silicium, antérieure du point de vue industriel et avec des rendements plus élevés, est soit mono ou poly cristal, soit métallurgique. Elle présente l'avantage de ne pas rencontrer de problème d'approvisionnement en matière première. Par contre, il n'y a qu'un nombre restreint d'entreprises de production de silicium dans le monde (moins d'une dizaine), et la filière PV doit impérativement innover, soit en améliorant les procédés de production du silicium cristallin, soit en trouvant d'autres matières premières alternatives. Il se profile des possibilités de ruptures technologiques qui permettront d'améliorer les rendements de cette filière. Après un triplement des prix des cellules cristallines entre 2005 et 2008, les prix ont baissé de 24 % au premier trimestre 2009 (par rapport à la moyenne des prix de 2008), grâce à l'augmentation des capacités de production d'une part, la crise de 2009 qui a ralenti la demande d'autre part, mais aussi la concurrence des filières à films minces.

L'avenir de la filière dépend d'innovations qui doivent permettre de *diversifier les matières premières* (Solar-Force et Ferropem), d'améliorer le rendement énergétique des cellules, *comme par exemple l'encapsulation des cellule, procédé permettant de réduire de moitié le coût de fabrication des modules* (Apollon Solar), ou de mieux insérer les divers types de cellules dans un environnement électrique.

Ferropem, qui appartient au groupe espagnol FerroAtlantica, travaille sur la technologie du silicium métal. Il s'inscrit dans le projet Photosil, *qui a pour objectif de produire un silicium à bas coût (en purifiant par une voie métallurgique un silicium à très bas coût employé pour réaliser des alliages métalliques ou obtenir des colles silicones)* (Ferropem). Ferropem se positionne très en amont de la filière en proposant la matière première. Le projet Photosil devrait permettre de diviser par deux le temps de purification du minerai de silicium. *Cette technologie devrait faire baisser les coûts des systèmes PV d'environ 25%* (Informations website Ferropem, 2008).

Solarforce développe un procédé de fabrication de couches minces de silicium sur ruban de carbone. *Le ruban Solarforce permet une augmentation des rendements importante, qui permettrait une haute qualité en silicium des wafers pour cellules PV, les*

plaques pouvant être ensuite facilement intégrées dans les cellules. La production de Solarforce a pris un peu de retard car il ne s'agissait pas seulement de se mettre en concurrence sur le marché des plaquettes pour cellule classique (avec l'avantage d'une technologie originelle qui évite le sciage), mais aussi d'aller plus loin dans une solution souple encore plus mince, en plaquettes associées en module PV, avec un rendement supérieur de 15% (et un coût de revient plus bas avec une consommation inférieure à 3 Gwatt crête). Solarforce se place dans une triple perspective : diviser par 2 le contenu de silicium, développer une voie innovante pour les panneaux PV qui permette de fournir de l'électricité à moins d'un € par Watt crête (voie disponible dans 2-3 ans), et permettre une pose facile sur un toit (Solarforce).

La recherche de partenaires est difficile, avec des prix mal ciblés car soumis à la nouveauté du marché. La machine de dépôt de silicium est réalisée par une société de St Etienne, mais le bâti de tirage est sous-traité par une société américaine submergée de commande. Le soutien de l'ANVAR est encore important !

Les équipements techniques (BOS), à ajouter aux modules afin de constituer un système photovoltaïque installé, vont pouvoir aussi améliorer considérablement les coûts totaux de fabrication.

Une contrainte technique majeure réside dans la maintenance des installations, notamment dans les territoires isolés. La maintenance et le recyclage des cellules PV à base de silicium cristallin posent un tel problème que cela risque de favoriser l'expansion des cellules minces.

Enfin un enjeu de taille est l'intégration des quantités de solaire PV dans les réseaux de distribution publique, à des niveaux de tensions jusqu'ici conçus pour accueillir des récepteurs électriques et non des générateurs. L'intermittence de la production PV et son caractère diffus amplifient le problème (MOURATOGLOU, THEROND, 2009).

b. La formation des artisans

Installer du solaire PV dans un bâtiment suppose un travail avec des artisans de la charpente et de la toiture, des couvreurs et des installateurs. Le coût du solaire PV est fortement lié aux coûts d'installation, qui peuvent être réduits par de nouvelles

techniques de pose. les matériaux. Ce qui suppose une fiabilité technique et une réactivité des installateurs. Le marché de l'intégration du solaire PV, sur un modèle « clés en main », est estimé en France en 2009 à 650 M d'€ mais il reste encore fragmenté (document CleanTech Republic, avril 2009). Les premiers intégrateurs à s'organiser seront gagnants.

Viessmann, même s'il reconnaît le marché du PV comme *versatile depuis peu*, continue d'offrir une formation à ses poseurs pour tout équipement solaire.

Imerys toiture, par exemple, conçoit des modules PV qui se posent sur un toit comme des tuiles, et qui favorisent une intégration acceptable même sur des bâtiments anciens et classés. *Les cellules intégrées aux tuiles sont fabriquées chez Photowatt, les châssis sont fabriqués par un tôlier aux Pays-bas, puis assemblés et labellisés chez Imerys qui se doit de développer une formation importante à la pose de ce type de produit* (Imerys).

La pose des produits PV s'inscrit dans des démarches de labellisation des produits. Les labels (qualisol et quali PV...) doivent être obtenus par les installateurs pour la garantie des produits et pour que l'acheteur final puisse toucher les aides publiques. Solon SE développe un produit innovant (sans cadre métallique, directement posé et collé sur tôle), en partenariat avec le fabricant de colles Sikasil, qui devient ainsi un partenaire essentiel en ce qui concerne les actions de formation à la pose du produit. L'entreprise met donc en place des formations avec son partenaire, et se concentre sur la coordination avec ses installateurs/distributeurs en réfléchissant à la mise en place de formations spécifiques.

La formation des artisans est donc bien encore ici la clé du développement.

c. Le retard des producteurs français

Les opérateurs industriels fabricant des équipements sont encore peu nombreux en France. Les grands groupes français (EDF Energies Nouvelles, GDF-SUEZ, Total Energies Nouvelles, Saint-Gobain, Véolia, Schneider Electric...) développent un réel savoir-faire, mais entrent très prudemment dans la fabrication industrielle d'équipements (TRINK, 2009).

Ténésol, filiale à 75% d'EDF et de Total Energie Nouvelle, s'est positionné en ingénierie de conception, d'installation et de maintenance. La spécialité en Rhône-

Alpes réside dans l'intégration de produits achetés.

Le seul producteur français de cellules PV, Photowatt (implanté en Isère), a une capacité de production limitée (CA de 135 M d'€ en 2008), mais fédère un réseau de 1200 sous-traitants et s'implique fortement au sein du consortium « PV Alliance » (qui intègre aussi le CEA et EDF-Energie Nouvelle).

L'année 2010 a vu se confirmer l'offensive des producteurs étrangers sur le marché rhône-alpin. Nous avons déjà cité le producteur allemand Viessmann, présent sur le marché du thermique et du PV. Au printemps 2010, la société espagnole L SOL installe ses bureaux en Savoie et propose de l'ingénierie de projet PV pour les professionnels.

En septembre 2010, la société allemande Solon SE, classée dans les 5 premières entreprises européennes de la production d'électricité PV, ouvre une filiale commerciale à Lyon. Le producteur allemand semble souffrir d'un déficit d'image en France, avec une visibilité peu évidente, et une marque peu citée. La volonté de Solon est de s'installer dans la « vallée du solaire » comme beaucoup de concurrents. *Les prototypes de BBC du Technolac du Bourget jouent un rôle attractif, et Lyon est pratique du point de vue logistique* (Solon SE), pour une entreprise qui fabrique encore essentiellement ses modules en Allemagne. Solon fabrique des modules PV cristallins et se positionne sur des produits plutôt haut de gamme.

d. La coordination nécessaire de l'offre

Le marché solaire (thermique et PV) est un bon exemple de marché où l'offre se structure depuis quelques années, en anticipation de l'évolution de la demande, notamment sous l'impulsion des pouvoirs publics. Ainsi depuis 2006, l'INES regroupe à Chambéry différents laboratoires et centres techniques (CNRS, CEA, IFP, BRGM et CSTB), avec pour partenaires des institutions publiques (Conseil général de la Savoie, Conseil régional, Université de Savoie et ADEME) et des entreprises (comme Photowatt, Clipsol ou Ténésol). C'est la plate-forme solaire du pôle de

compétitivité TENERDIS, allié aujourd'hui aux 2 autres pôles de compétitivité Derbi et Cap Energies, qui doit constituer un interpôle puissant sur tout le grand sud-est de la France et promouvoir de multiples projets énergétiques. Cette plateforme devrait organiser la coordination des acteurs de l'offre PV et valoriser divers projets innovants.

Le renchérissement du crédit et les inquiétudes sur l'avenir industriel fragilisent pourtant l'avenir de la filière PV. Les fabricants connaissent aujourd'hui au niveau mondial une crise de surproduction, avec des capacités de production d'autant plus excédentaires qu'ils ont beaucoup investi. Cela risque d'accélérer les concentrations industrielles au niveau mondial, or rappelons qu'en 2008, sur les 10 premiers constructeurs de cellules PV, 3 étaient chinois, aucun français. Il sera difficile pour les entreprises françaises de résister à la vague de Fusions-Acquisitions.⁵³

La faiblesse des relais industriels en matière d'équipements a conduit les pouvoirs publics à privilégier le marché spécifique de l'intégration du solaire au bâti, avec des tarifs d'achats favorables⁵⁴. Cette orientation a privilégié un modèle de prise de décision décentralisée qui permet à chaque citoyen d'intégrer une démarche de développement durable, mais elle bénéficie aujourd'hui à des fabricants étrangers, et surtout conduit à une dérive qui se traduit par une floraison d'équipements de toitures de hangars agricoles, avec des problèmes d'étanchéité.

IméryS développe une tuile photovoltaïque fabriquée en France, qui assure l'étanchéité de l'ensemble PV sans ajout de zinguerie, et la ventilation de chaque laminé en évitant la surchauffe et en optimisant les rendements.

La technologie de Solarforce a des potentiels importants pour l'intégration aux bâtiments : réduction des coûts, rendements dans la gamme du silicium cristallin compatibles avec des installations sur toitures, et possibilité à terme d'intégration à des formes diverses ou des structures souples.

⁵³ Voir en annexe le classement Eurobserv'er 2008.

⁵⁴ Au 14 janvier 2010, les conditions d'achat de l'électricité PV sont : entre à 0,50 et 0,58€/kwh pour les installations intégrées au bâti - 0,42 €/kwh pour les installations sur bâtiments professionnels - entre à 0,314€/kwh et 0,40 €/kwh pour les installations au sol.

Pour multiplier les produits d'intégration, les partenariats sont nécessaires. TENESOL travaille avec 2 filiales de Bouygues Construction et Canevaflor. Apollon Solar a mis en place une ligne pilote industrielle pour valider le procédé NICE de fabrication, avec Vincent Industrie et l'ANVAR. Pour aller plus loin dans son procédé de cristallisation (dont le but est de réduire le coût de production des lingots de silicium de qualité PV tout en réduisant de manière drastique la durée du procédé), Solarforce a intégré le projet Photosil en rejoignant Ferropem, le CNRS et le CEA-Liten.

III. Conclusions et perspectives de l'analyse de l'offre

Les résultats présentés ici viennent compléter la première partie du travail, qui construit une image de la consommation énergétique des logements en Rhône-Alpes et propose une étude de cette consommation énergétique selon le type de logements considérés. L'analyse de ces résultats tente un état des lieux de l'offre, en réponse à la demande d'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments.

Pour cette analyse de l'offre, nous avons choisi d'utiliser une méthodologie qualitative qui rend compte des représentations et des opinions des producteurs et acteurs qui structurent l'offre. Ce travail a permis un repérage nécessaire pour saisir les enjeux et les opportunités du mouvement en faveur du Bâtiment Basse Consommation (BBC) qui affectent notre société aujourd'hui. Mais ce travail, qualitatif, oblige à une certaine prudence dans les conclusions car nous avons souvent été confrontés à des acteurs, parties prenantes du marché, dont il a fallu consolider scientifiquement les affirmations. Cette consolidation se fait par la confrontation des affirmations de chacun, et/ou par l'inscription des diverses réponses dans une analyse économique plus globale, qui permet une prise de recul nécessaire aux conclusions. Cette prise de recul a été facilitée, sur certaines filières de l'offre (la filière solaire par exemple, riche en études générales et de mises en perspective). Sur d'autres filières elle s'est révélée plus difficile ; certaines données ne sont donc que des témoignages ou des interprétations, supports à notre questionnement. Nous avons choisi de réaliser un inventaire d'observations de l'offre qui, même s'il ne peut pas être exhaustif, fournit des éléments constitutifs, à un moment donné, d'une situation complexe et multiforme. Cet ensemble de repères construit une image synthétique de l'offre au travers d'un certain nombre de questions dont il nous faut tirer des conclusions pour aller vers des préconisations.

Globalement, il ressort que les acteurs sont prêts à relever le défi du BBC et du respect des contraintes environnementales qui se dessinent dans un avenir proche. Les produits et systèmes existent, et leurs performances sont cohérentes avec les

exigences de réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre dans le bâtiment. Le développement rapide du marché laisse penser que les coûts se réduiront rapidement ; des nouveaux produits pourront profiter d'économies d'échelle productives pour faire face à une demande élargie. Par ailleurs, la contrainte environnementale prend une telle importance sur le marché du bâtiment que la plupart des acteurs l'estiment comme une évidence incontournable pour l'avenir, qui les oblige à innover et à faire des investissements massifs afin de bien se positionner sur le marché de demain.

Notre analyse des enjeux de développement de l'offre a souligné cette dynamique au niveau du marché, mais a également permis de mettre en évidence plusieurs limites. Tout d'abord, l'action des pouvoirs publics joue certes un rôle notable dans le développement de l'offre, mais est diversement appréciée par les acteurs.

Par ailleurs, nous avons identifié 4 freins principaux au développement de l'offre :

- les freins techniques et de coût
- la formation des artisans
- le retard des producteurs français
- la nécessaire coordination de l'offre.

Ces limites et ces freins nous permettent, en bilan de notre analyse, une mise en perspective à partir des éléments qui nous semblent les plus pertinents, et qui débouchent sur plusieurs axes de réflexion.

A. Des incitations publiques à confirmer dans la durée

Le rôle incitatif des pouvoirs publics dans la dynamique de l'offre est à souligner ; toutefois, beaucoup d'acteurs n'en perçoivent pas les résultats tangibles et restent relativement sceptiques quant à l'engagement effectif de l'Etat sur ce marché. Les incitations mises en place par les pouvoirs publics offrent au marché un temps de maturation qui est nécessaire. Elles sont décisives, tant en ce qui concerne les contraintes de la réglementation thermique, que les dispositifs de crédits en soutien des investissements énergétiques. Par contre, on peut insister à nouveau ici sur le rôle de filtre joué par les certifications réglementaires des produits et matériaux

(certifications ACERNI et CSTB). Elles sont longues et coûteuses à obtenir, ce qui ralentit l'accès au marché des nouveaux produits. En introduction de ce travail nous avons souligné le rôle des décisions nationales liées au « Grenelle de l'environnement », qui s'imposent désormais comme un enjeu déterminant pour la structuration de l'offre. La mise en place des outils de Diagnostic de Performance Energétique favorise la sensibilisation des particuliers aux enjeux énergétiques, et est jugée comme globalement positive par les acteurs.

Sur le marché du solaire, la rapidité avec laquelle l'énergie solaire s'est développée montre qu'une interaction pertinente entre les pouvoirs publics et les entreprises permet d'améliorer la réactivité et l'efficacité de l'offre. Dans ce cadre, le développement des pôles de compétitivité (dont le rôle doit être néanmoins mieux évalué), mérite d'être souligné. Dans ce cadre, les incitations publiques interviennent à différents niveaux sur le territoire. En région Rhône-Alpes, le cluster Eco-énergie favorise la rencontre entre les acteurs en amont de l'offre (bureaux d'ingénierie, architectes, structures de conseils énergétiques...), et permet des fertilisations croisées, sources d'externalités positives. Le technopôle du département de la Savoie (« Savoie Technolac ») multiplie les événements pour sensibiliser le public et soutenir la demande⁵⁵. Par ailleurs, le technopôle joue un rôle de coordination auprès des entreprises qui gravitent autour de l'énergie solaire, en organisant des rencontres entre professionnels français et européens (échanges autour de la thématique de l'intégration du solaire dans les bâtiments, informations sur les dernières évolutions technologiques, rencontres de partenaires...). Le rassemblement sur le site d'entreprises de tailles diverses, le soutien accordé aux petites structures accueillies dans la pépinière, et la proximité de l'INES, créent des externalités technologiques qui, même si elles sont difficiles à mesurer à court terme, ont un impact essentiel sur la dynamique d'innovation.

L'autre volet de l'intervention publique dans le développement de l'offre est celui des incitations financières à destination de la demande. L'augmentation notable,

⁵⁵ Le « Solar event family », qui s'adresse au grand public.

depuis 2006, des achats de prestations d'amélioration du chauffage et de l'isolation⁵⁶ des bâtiments, est attribué par l'OPEN aux dispositifs d'aides financières, notamment aux règles de crédit d'impôt⁵⁷. Le crédit d'impôt apparaît cependant moins décisif en 2008, et son effet incitatif joue plus sur les petits travaux que sur les gros. Comme le coût des chantiers augmente (surtout dans le cadre d'une rénovation avec plusieurs types de travaux), le recours au crédit bancaire devient plus important en proportion, ce qui amenuise le pouvoir décisionnel du crédit d'impôt (cf Annexe IV). La crise économique de 2008-2009 a également ajouté un facteur déstabilisant au niveau de la demande. Le Grenelle de l'environnement a ouvert des perspectives en matière de solutions innovantes et a créé une dynamique d'investissements, perçue par les producteurs comme stimulante. Par contre, les règles et les défiscalisations semblent remises en question au coup par coup (comme durant l'été 2010), avec des effets d'annonce déstabilisateurs. Cette instabilité est citée par tous les acteurs de l'offre comme un frein majeur. La distribution, moins motivée pour aller vers les nouveaux matériaux, la déplore particulièrement. Or les distributeurs constituent une interface décisive du marché.

La stabilisation dans la durée des règles élaborées par les pouvoirs publics, notamment sur le plan fiscal, apparaît ainsi comme une condition de pérennité de la dynamique du marché.

B. Un effort de formation des artisans à renforcer

Toutes les entreprises interrogées ont insisté sur la technicité de leur produit et sur l'importance de la qualité de la pose. Le problème a été particulièrement mis en évidence avec les produits thermiques, par exemple ceux attachés à la technologie du solaire, qui demandent à la fois des compétences de chauffagistes et de couvreurs. L'OPEN souligne cependant que près d'un artisan ou d'une entreprise sur quatre a participé à une formation sur les économies d'énergie (les chauffagistes étant les plus

⁵⁶ Mais c'est surtout le chauffage qui en a profité.

⁵⁷ OPEN Observatoire Permanent de l'amélioration Energétique. Campagne 2009. Résultats 2006-2008.

nombreux).

Au delà des compétences techniques, les habitudes (des installateurs-poseurs, des distributeurs, des consommateurs...) constituent un frein important concernant l'utilisation de matériaux innovants dans le bâtiment. Pour répondre aux besoins de formation et faire évoluer les usages, la plupart des producteurs de matériaux assurent en interne la formation à leurs produits, ce qui leur permet de garder la maîtrise de la qualité. De fait, ces pratiques entraînent une captation du marché et une réduction de la concurrence entre les produits. La question de la formation professionnelle des jeunes artisans (formation publique ou formation privée) est au cœur du débat, car elle ne peut pas être orientée uniquement autour de quelques produits. Par ailleurs, les difficultés de l'enseignement technique du bâtiment, en termes de recrutement d'élèves et d'équipement des lycées professionnels, pénalisent ces formations. Enfin, dans un contexte de pénurie de main d'œuvre qualifiée sur les chantiers, la formation continue des artisans aggrave le problème du manque de temps disponible des différents corps de métiers.

La consolidation des programmes de formation aux métiers du bâtiment apparaît ainsi comme un facteur décisif dans la dynamique de l'offre, dans un contexte de forte évolution des compétences à mobiliser.

C. Une logique de concentration susceptible de freiner la dynamique concurrentielle et d'innovation

L'enjeu du positionnement concurrentiel stimule les restructurations au sein de chaque filière, et on assiste à un mouvement de concentrations stratégiques, économiques et financières, qui s'accélère. Ces concentrations s'effectuent le plus souvent à l'échelle européenne.

Prenons l'exemple du rachat en juillet 2010 du site d'Isoroy (fabricant d'isolants bois) à Saint-Dizier par le groupe allemand Homatherm, leader européen du marché des matériaux flexibles en fibres de bois, pour desservir le marché français et pour

doubler ses capacités de production. Isoroy, filiale du groupe portugais Sonae SGPS S.A. jusqu'en 2009, a été tout d'abord rachetée par Steico (que nous avons rencontré), qui a très vite revendu ses parts à Homatherm. Le groupe allemand, qui va démarrer la production au second semestre 2011, pourra, grâce à cette prise de participation, développer une gamme plus complète d'isolants et ainsi mieux s'imposer sur le marché français. Sur le marché du solaire nous avons vu comment les leaders énergétiques français ont construit « leur bouquet énergétique », en absorbant certaines structures productives, et en s'imposant par la puissance financière de leurs services de Recherche et Développement. Par ailleurs, l'approvisionnement en matières premières est dépendant d'un nombre restreint de groupes industriels. Enfin, comme les frontières entre activités solaire thermique et activités solaire PV sont de plus en plus floues, ce sont les grands acteurs français qui profitent de la complémentarité des 2 marchés, parallèlement à l'entrée des groupes étrangers comme Viessmann ou Solon. Ce double positionnement solaire s'inscrit effectivement dans une logique de compétitivité par les coûts, qui favorise les concentrations.

Cette logique de concentrations soulève la question de l'importance du maintien d'une certaine concurrence entre producteurs d'une même filière. Une polarisation d'investissements matériels et immatériels sur quelques produits, risque de restreindre l'innovation. Or sur ce marché de l'offre de produits et systèmes, la créativité prospective est nécessaire et s'accompagne de prise de risques. Les discussions sur les produits vont avoir lieu entre des grosses structures productives, qui tentent d'éviter une prise de risques sur de nouveaux produits mal connus. Autrement dit, les grands groupes seront-ils suffisamment innovants s'ils contrôlent déjà confortablement le marché ? Nous retrouvons la même inquiétude si chaque groupe organise ses propres formations produits en interne, car les poseurs (les artisans) risquent de ne savoir poser qu'un type de produit.

La préoccupation des groupes, sous pression de leurs actionnaires, va tendre vers la recherche d'un retour sur investissement rapide. On observe alors une opposition

entre une vision à court terme, attachée aux préoccupations industrielles et financières, avec des visions nécessairement à plus long terme concernant le bâtiment, l'urbanisme et une prise de conscience écologique.

D. Une démarche d'innovation appréhendée sous l'angle du cycle de vie

L'innovation est un enjeu déterminant pour répondre à l'amélioration de l'efficacité énergétique dans le bâtiment. Nous avons pu constater la diversité de solutions innovantes, tout en insistant sur l'impact de la demande, plus ou moins exigeante du point de vue écologique. Un bâtiment peut être faiblement émetteur de GES sans pour autant mettre en oeuvre des matériaux écologiques. La perspective de notre travail a été de présenter les différentes alternatives en matière d'offre et les combinaisons possibles, face aux enjeux de la durabilité économique. L'analyse du cycle de vie, que nous avons privilégiée, permet une analyse exhaustive mais implique un débat.

En effet, les préconisations ne peuvent être simples. Nous avons cherché à traiter la problématique de l'efficacité énergétique des bâtiments de la façon la plus large possible, y compris en intégrant les caractéristiques écologiques des matériaux. Cette préoccupation se retrouve dans les débats concernant les labels, qui sont souvent perçus comme contraignants ; sur ce point, on peut souligner que le label français Effinergie est moins exigeant, concernant la qualité écologique des matériaux utilisés, que les labels allemands ou suisses, qui impliquent une analyse du cycle de vie des matériaux utilisés (voir Minergie-Eco par exemple). Par ailleurs, en observant les avantages et les inconvénients écologiques de chaque produit (cf. succession des tableaux p67-77), nous observons certains paradoxes. D'une part, la disparition de produits traditionnellement utilisés, mais critiqués sur le plan écologique, ne sera pas sans problèmes en termes de durabilité (par exemple, la laine de verre, qui sert au recyclage d'une grande partie du verre, et qui a donc un intérêt à ce titre). D'autre part, il existe des combinaisons possibles de matériaux de qualités écologiques très différentes, dont on peut souligner l'intérêt (par exemple certains matériaux

nouveaux comme les isolants minces, en association avec divers produits plus traditionnels, comme par exemple les plaques d'agglomérés bois).

Les passerelles innovantes entre filières sont encore à construire, à la fois entre les différentes filières du bâtiment, et entre des secteurs ou « marchés » extérieurs au bâtiment, comme les transports (par exemple les synergies entre la filière solaire PV pour le bâtiment et la filière solaire qui accompagne la mobilité et le transport), ou encore l'agriculture (synergie avec la filière bois ou les filières chanvre, paille... pour l'isolation). On observe un foisonnement d'idées, de projets et de polémiques autour de ces sujets, que l'on retrouve sur les web-forums (par exemple le forum « Community Solar Pioneers »).

E. La nécessaire structuration des acteurs de l'offre

La structuration des acteurs est déterminante pour saisir la dynamique des divers volets de l'offre. La construction d'une offre globale, que ce soit dans le neuf ou dans la rénovation, implique une coordination entre les divers corps de métier.

Dans le neuf, cette collaboration est la plus souvent organisée par les acteurs « en amont de l'offre » (architectes et bureaux de d'étude). En ce qui concerne la rénovation, la coordination est plus difficile. Cela constitue un frein important, en particulier pour trois types de travaux : ouvertures, chauffage, isolation. Une meilleure coordination des acteurs pourrait faire baisser le coût, encore très élevé, d'une rénovation globale (coût estimé par l'OPEN à plus de 21 000€ en moyenne en 2008, avec une forte hausse du panier moyen de travaux : environ 30% entre 2006 et 2008⁵⁸). L'offre semble avoir été insuffisante, face à la demande, stimulée par les incitations fiscales et bancaires. De plus, 76 % des chantiers de rénovation restent centrés sur un seul type de travaux, ce qui peut révéler des difficultés à articuler les différents corps de métiers, qui doivent intervenir en alternance sur les chantiers. Or la réduction de la consommation énergétique et des émissions de GES d'un bâtiment

⁵⁸ OPEN Observatoire Permanent de l'amélioration Energétique. Campagne 2009. Résultats 2006-2008.

implique une démarche globale, notamment dans le cadre de la réglementation thermique qui se mettra en place dès 2012.

La coordination de l'offre implique des effets d'entraînement de toute la filière du bâtiment ; or les producteurs de matériaux ont leur propre logique d'innovation sectorielle, alors que le reste de la filière du bâtiment est soumise à des contraintes de coûts et de services différents. Par exemple, en aval de l'offre, la qualification de la main d'œuvre induit un décalage entre l'évolution rapide des produits, disponibles pour faire face à la demande, et les compétences en matière d'installation.

La structuration en filières au sein même du secteur du bâtiment est issue d'une tradition industrielle, qui a conduit les acteurs à s'organiser au sein de filières structurées de façon verticale, à partir de jeux de complémentarités. Ainsi l'analyse de l'offre de produits de construction « bois » s'inscrit dans le schéma général d'analyse de la filière. L'offre dépend donc de la capacité forestière (notamment de la forêt française), à répondre à la demande issue à la fois des « chauffagistes » (chaudières à bois), des constructeurs d'isolants naturels à fibre de bois, et des constructeurs de « maisons à ossature bois ». La filière du solaire PV cristalline, quant à elle, soulève la question de la disponibilité du silicium, et implique de s'intéresser à l'ensemble de la filière autour de cette matière première. A l'inverse, l'autonomie des producteurs de béton vis à vis de la matière première est un atout pour cette filière. Elle offre la possibilité d'un certain éclatement du tissu productif. Au sein de chaque filière, dans cette logique verticale, ce sont les acteurs dominants qui jouent un rôle structurant essentiel, d'où le rôle des concentrations déjà évoqué plus haut.

Néanmoins, d'autres dimensions de structuration industrielle ne doivent pas être sous-estimées :

- L'importance, pour la dynamique d'innovation, de synergies et de relations plus « horizontales », entre acteurs de tailles diverses positionnés sur des « niches », et des jeux de complémentarités productives en amont ou en aval.

- Le rôle des liens établis entre acteurs, sur un territoire donné. Chaque territoire a ses contraintes propres en matière de construction. Les acteurs interrogés dans notre étude ont souligné la particularité de la demande Rhône-alpine, liée au climat (avec des secteurs de montagne où les coûts de chauffage sont élevés), aux traditions et au niveau de vie (importance des investissements consacrés à l'habitat). La structuration des intervenants dans le bâtiment obéit donc aussi à une logique de proximité, qui inscrit l'offre dans son environnement géographique.

Ces deux dimensions de la structuration de l'offre justifient une approche en termes de clusters, qui introduit inévitablement une réflexion sur la coordination des acteurs. L'efficacité de l'offre dépend alors de la structuration en réseau d'entreprises de tailles et de spécialités diverses. Le cluster Ecoénergie de la région Rhône Alpes, plusieurs fois pris en exemple, se positionne dans cette perspective, et cherche à faire émerger une dynamique de développement autour d'une offre diversifiée. Les tensions concurrentielles et la baisse de la demande en 2008-2009 ont probablement amplifié le rôle des groupes les plus puissants, dans la structuration des réseaux. Il est aussi à noter que les collectivités territoriales, ainsi que des institutions comme l'ADEME, jouent un rôle déterminant dans la « clusterisation » des filières du bâtiment, dont le développement doit être encouragé, car c'est une voie pour le maintien d'une diversité de solutions de construction.

F. Le rôle de la distribution

Dans la dynamique de l'offre, les distributeurs jouent un rôle clé de conseil. L'observatoire OPEN souligne la hausse des achats de prestations concernant l'amélioration énergétique, stimulés par les dispositifs incitatifs.

Les artisans qui proposent ces prestations consultent les fiches conseils élaborées par les distributeurs, et attendent de la distribution un éclairage déterminant. L'organisation de la distribution joue donc un rôle d'accélérateur du marché, avec là encore un phénomène de concentration. Derrière le major de la distribution « Point P.

SA », on retrouve le groupe Saint-Gobain. Leroy Merlin détient 50% du capital du distributeur Domaxel, et le groupe King Fisher contrôle Castorama. Les distributeurs qui ne sont pas contrôlés par l'industrie suivent la même logique de concentration, tout en multipliant les enseignes et en structurant leurs réseaux de vente (voir par exemple le groupe SAMSE). A l'inverse, les producteurs d'isolants naturels ne semblent pas encore avoir réussi à organiser la distribution collective ou coopérative de leurs produits, ce qui maintient les prix à un niveau élevé, dans un marché qui reste confidentiel.

La distribution joue un rôle moteur en aval de l'offre, effort qui doit être coordonné avec l'ensemble des autres acteurs du marché ; il convient de mieux l'intégrer à la dynamique des clusters.

IV. ANNEXES

A. Energie grise : exemple de quantification

Fabrication des matériaux pour 1 kg (différent de l'énergie grise)

Tableau IV-1 : Energie grise, un exemple de quantification

Matériau	Energie(MJ)	Eau(L)
Brique	3	1.47
Béton cellulaire	2.48	1.68
Parpaing	0.92	0.70
Mortier Ciment	1.87	1.33
Acier construction	43	25
Béton b25	1	0.68
Bois Agglo plaque	42	8.4
Bois lamellé collé	53	14
Paille	0.02	0.008
Bois poutre	27.5	2.8
Bois Planche	73	13.2
Laine de verre	26.44	29.44
Polystyrène	105	35
Placo	1.23	0.56
Enduit chaux	2.35	1.73

1kWh = 3.6 MJ 1MJ = 0.278 kWh

Source : Base ekoinventaire sur logiciel Equer).

B. Guide d'entretien

Titre du projet global : REDUCTION DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE ET EFFICIENCE ENERGETIQUE DANS LE BATIMENT –
LES DIMENSIONS ECONOMIQUES ET FINANCIERES

Analyse de l'offre. Rapidité d'adaptation des entreprises du bâtiment

Bénédicte SERRATE : enseignant-chercheur benedicte.serrate@univ-savoie.fr

Anne-Marie BOCQUET : enseignant-chercheur anne-marie.bocquet@univ-savoie.fr

Les acteurs de l'offre identifiés

- isolation du toit
- isolation des murs
- fenêtres et occlusions
- chauffage et température

Q.1 Quels types de produits développez-vous ? A quelle étape intervenez-vous dans le bâtiment ?

Q.2 En quelques mots, comment sont fabriqués vos produits ?

Q.3 Quels produits développez-vous dans la perspective de l'intégration de critères écologiques dans le bâtiment (maison basse consommation, réduction des émissions de gaz à effet de serre...) ?

○ Dans quel type de maison BBC intervenez vous (avec quels autres produits complémentaires) ?

○ Comment voyez vous l'intérêt écologique / économique de votre produit par rapport à celui de vos concurrents ? Et sur quels critères vous basez vous ?

- Fabrication du produit
- Transport
- Maintenance
- Consommation NRJ pendant l'utilisation
- Destruction
- Sa durabilité dans le temps ?

○Quelles sont les contraintes de cette fabrication (comment compenser les surcoûts du produit durable) ?

○Qu'est-ce qui est fabriqué en interne / externe ? Quels sont vos partenaires de production ?

Q.4 Quels enjeux stratégiques cela représente pour votre entreprise ? Comment vous positionnez vous vis à vis de la concurrence?

Q.5 Quels sont les freins et /ou les opportunités que vous identifiez au développement de votre offre de produits (« écologiques » ?

- Des perspectives très encourageantes
- La demande de Bâtiments à Basse Consommation ou moins consommateurs de GES
- Les MP : coût, disponibilité...
- Le coût de fabrication
- Coûts d'investissement...
- L'installation, la mise en œuvre de vos produits

Q.6 Quelle est votre capacité de réponse (entreprise / concurrents) à une demande en développement ?

Q.7 Votre entreprise a-t-elle un budget de R&D pour le développement de ces produits, et avec quels partenaires ?

Q.8 Quels sont les partenaires industriels avec qui vous coopérez (entreprises qui produisent des produits complémentaires – objectif : voir comment les acteurs s'organisent dans la filière, où l'entreprise intervient) ?

○Qui décide des partenaires qui interviennent sur un chantier (cabinet d'étude, architecte, donneur d'ordre...) ?

○Quelle est votre latitude ?

○Quelle forme de coopération développez vous (partenariat, appartenance au même groupe, routine de collaboration avec les mêmes industriels, pas de relations privilégiées...) ?

Q.9 Quels intervenants vous permettent de valoriser votre produit (installateurs, prescripteurs, cabinets d'étude...) ?

Q.10 Comment voyez-vous l'action des pouvoirs publics (ADEME, collectivités territoriales...) ?

Comment vous positionnez vous par rapport à la réglementation / aux labels (RT 2005, EFFINERGIE, MINERGIE ...) ?

Q.11 Comment voyez-vous la problématique du bâtiment basse consommation/ de la maison écologique sur la région Rhône-Alpes ? Existe-t-il une spécificité de Rhône Alpes ?

Q.12 Quels sont à votre avis les freins au développement de la maison basse consommation/ maison écologique ?

○Les freins que vous identifiez au niveau de l'offre ?

○Les dynamiques que vous identifiez ?

Merci pour le temps passé à lire et répondre à ce questionnaire.

Pour plus de question vous pouvez nous joindre par mail aux adresses ci-dessus.

Anne Marie Bocquet et Bénédicte Serrate

C. Les dix premiers producteurs de cellules photovoltaïques en 2008, en mégawatts

Tableau 0-1 : Les dix premiers producteurs de cellules photovoltaïques en 2008

Entreprises	pays	Production 2008
Q-Cells	Allemagne	574
First Solar	Etats-Unis	502,6
Suntech Power	Chine	497,5
Sharp	Japon	473
JA Solar	Chine	300
Kyocera	Japon	290
Yingli Green Energy	Chine	281,5
Motech	Taiwan	272
Sun Power	Etats-Unis- philippines	236,9
Sanyo	Japon	215

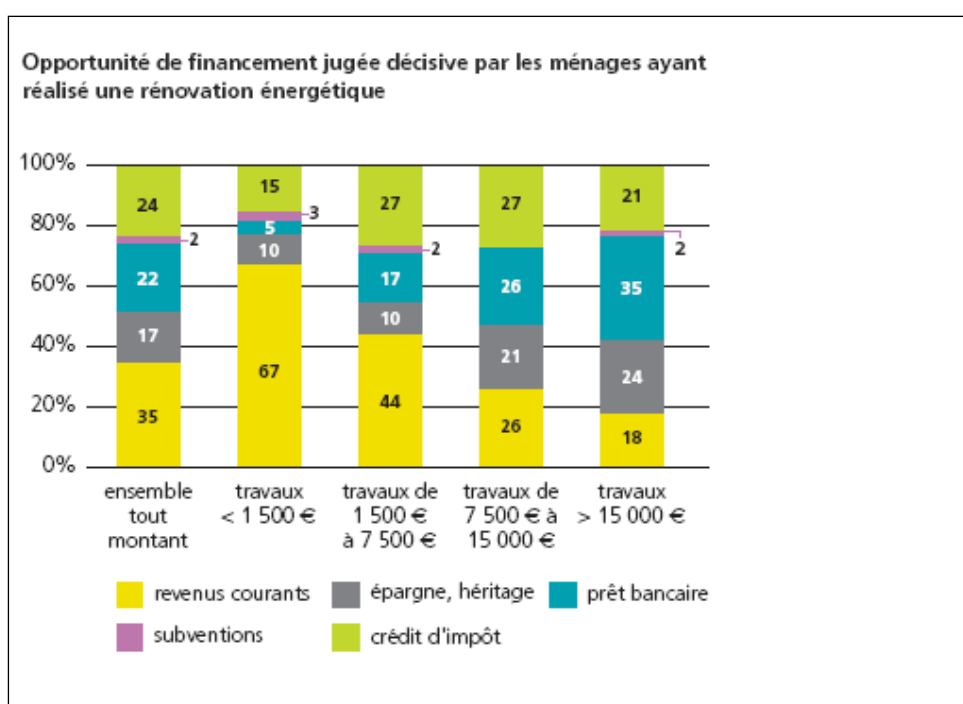
D. Documents tirés de la Brochure OPEN 2009

Tableau 0-2 : Segmentation du marché de l'amélioration énergétique par type de travaux

Figure
crédit
moins
que le prêt
pour les
travaux

	Poste de travaux	Année 2006	%	Année 2008	%
Dépenses Engagées millions d'€ hors taxes	Ouverture	5 880	14,5	5 985	14,6
	Chauffage	3 920	9,7	5 455	13,4
	Intérieur	1 640	4,1	2 055	5
	Toiture	1 340	3,3	1 320	3,2
	Façade			280	0,7
	Ensemble	12 780	31,6	15 095	36,9

0-1 : Le
d'impôt
décisif
bancaire
gros



V. BIBLIOGRAPHIE

- BALMES C. (2007), « Défi climatique et croissance économique », Chambre de Commerce et d'Industrie de Paris, 13 septembre
- CAZALS C., SERGENT A. (2009), « Développement durable et patrimoine productif ligneux... », Colloque de l'ASRDLF, Clermont-Ferrand, juillet
- CHAMPOUILLON S. (2007), « Les éco-matériaux », Polytech'Savoie, Enthalpie (Etudes thermiques et éco-construction), 5 décembre
- COHEN-AKNINE J., HERANT P., CASAMASSIMA M. (2002) « Préparer le bâtiment à l'horizon 2010 », Consultation Bilan 2002 ADEME-PUCA
- DRUCKER-GODARD C., EHLINGER S., GRENIER C. (2007), « Validité et fiabilité de la recherche », in THIETART et al., *Méthodes de recherche en management*, Dunod, Paris, 3^{ème} éd., 586 p., Chapitre 10, p. 263-293
- FIBRA (Fédération forêt-bois Rhône-Alpes) (2008), « Plan pluriannuel 2009-2013 »
- GRELAT A. (2004), « Utilisation de la paille en parois de maisons individuelles à ossature bois », Rapport final – Expérimentations en laboratoire, CEBTP, FFB, ADEME, juillet
- HLADY RISPAL M. (2002), *La méthode des cas. Application à la recherche en gestion*, De boeck université, Coll. Perspectives Marketing, Bruxelles, 250 p
- JARNO B., COURGEY ARCANNE S. (2009), *Analyses de cycle de vie : le casse tête*, La Maison écologique n°49 février-mars
- MILES M.B., HUBERMAN A.M. (2003), *Analyse des données qualitatives*, De Boeck Université, Bruxelles, 2^{ème} ed. 626 p. ; édition originale (1994), *Qualitative Data Analysis, An expanded Sourcebook*, Sage, Thousand Oaks, 2nd ed.
- MOURATOGLU P., THEROND P.G. (2009) *Les enjeux industriels de l'énergie solaire photovoltaïque, Réalités industrielles* , Novembre

NEMRY F., THEUNIS J., BRECHET T., LOPEZ P. (2001), Réduction des émissions de GES et flux de matières, Projet Global change et développement durable, Rapport Final, IW, Vito, IDD

De RAVIGNAN A.,(2009) « Le boom du Photovoltaïque », Alternatives économiques n° 283 pp 36-39

TRINK C. (2009), Mais où en sont les entreprises françaises de fabrication d'équipements pour la production d'électricité solaire ?, *Réalités Industrielles*, Novembre

STERN N. (2006), "The Economics of climate change", Stern Review final report

WACHEUX F. (1996), *Méthodes Qualitatives et Recherche en Gestion*, Economica, Paris, 290 p.

YIN R.K. (2003), *Case Study Research : Design and Methods*, Sage, Thousand Oaks, 3rd ed., 181 p.

CONFERENCES, SALONS SPECIALISES

4^{ème} Journée Internationale de l'Eco-construction (2008), Savoie Technolac, 29 avril

WURTZ E. (2008), « Des bâtiments qui produisent de l'énergie », Conférence, 29 mai

Colloque « Bâtiment 2020 » (2008), Lyon, 28- 29 juin

TASSIN M. (2009), Maison de l'Architecture, « Vers quels changements quotidiens l'architecture nous mène-t-elle ? », 13 mai

Salon SOLAR EVENT (2009), Savoie technolac, 26 juin

Chapitre 3 : Adoption d'une technologie qui économise l'énergie dans le secteur résidentiel en présence d'incertitude

Dorothée Charlier, Alejandro Mosino et
Aude Pommeret

Plan du chapitre :

I. Introduction	156
II. The model	160
III. The optimal path after adoption.....	162
IV. The optimal adoption timing with no discounting	165
A. The marginal value of wealth.....	166
B. Boundary conditions	170
C. Comparative statics	174
V. The optimal adoption time with discounting	176
A. An approximate value function before adoption	176
B. Choosing the coefficients.....	177
C. Results	178
D. Comparative statics	180
VI. Conclusion.....	180
VII. References.....	181
VIII. Appendix	184
A. Solving the optimal program after adoption.....	184
B. Solving the optimal program before adoption	188
C. Comparative Statics.....	192

Liste des figures :

<i>Figure IV-1 : The value functions with $\gamma < 1$ (optimum)</i>	<i>172</i>
<i>Figure IV-2 : The value functions with $\gamma > 1$ (optimum)</i>	<i>174</i>
<i>Figure V-1 : The value functions with $\gamma < 1$ (optimum) and $\gamma > 1$ under the assumption with discounting.</i>	<i>179</i>
<i>Figure VIII-1 : Figures of numerical computation of the effects of σ_2^2</i>	<i>187</i>

Liste des tableaux :

<i>Tableau VIII-1 : Comparative Statics with $\rho=0$</i>	<i>192</i>
<i>Tableau VIII-2 : Comparative Statics with $\rho \neq 0$</i>	<i>193</i>

I. Introduction

Reducing GHG emissions is nowadays becoming one of the priorities of policy makers in many developed countries. For instance, the French government wishes to reduce emissions by four by 2050. Nevertheless, such a concern appears in a context of growing energy demand. This phenomenon is in part due to the importance of residential energy: in France, buildings account for 23% of CO_2 emissions, of which 70% are generated by the residential sector, and for 46% of final energy consumption (ANAH, 2008). Energy demand in the residential sector depends mainly on the intensity of use of energy appliances and on their efficiency (see Hausman, 1979). Indeed, home renovations are generally asserted to be a highly effective means for households to lower expenditures on energy through increased efficiency and they become therefore a key target for environmental policies. For instance, enhanced insulation and energy-efficient ventilation of residential buildings are new technologies that can considerably reduce the energy consumption for indoor heating and cooling (Farsi, 2009). Cost-benefit analyses point to the economic viability of these systems even if the comfort co-benefits such as improvements in indoor air quality and protection against noise are not taken into account (Jakob, 2006, Ott et alii, 2006). However, actual investment in these systems is still relatively rare (Banfi et alii, 2008). This paper aims at carefully explaining the home renovation decision of households in a theoretical model. In particular, we explicitly take into account that such a decision takes place in an uncertain environment, in which there exist arbitrages between consumption, savings, and investment in home renovation.

The literature has already tried to explain the slow diffusion of energy efficient investments -the so-called "energy paradox" or "energy-efficiency gap" (Jaffe and Stavins, 1994a). Everything happens as if agents were discounting with unusually high rates to appraise energy-efficiency investment, ranging from 25% to 30% (see Brown 2001 and Sanstad et al. 1995). The usual suspect is the option value generated by the irreversibility of the investment decision in a stochastic environment that

drives a wedge between the investment valuation and the Net Present Value. Hasset and Metcalf (1995) consider models in which households minimize the cost of energy expenditures subject to a given level of comfort (moreover, accommodations are heterogeneous in Hasset and Metcalf, 1993). Investment in renewable energy or in insulation is irreversible and future benefits are uncertain. Based on simulations of this model and energy price data, they obtain that the discount rate should be four times higher for energy-saving investments than for other kinds of investments. In Ansar and Sparks (2009), the potential investor may delay adoption not only because of the joint effect of irreversibility and uncertainty, but also to cash in on future experience-curve effects: with the passage of time, firms gain practical knowledge in producing and installing the energy-saving technology, enabling them to reduce the technology cost per unit of energy saved. Simulations for photovoltaic systems highlight the experience-curve effect as a fundamental reason for which households and firms delay making energy-saving investments until internal rates of return exceed values of 50%, consistent with observations in the Economics literature.

Conversely, for Jaffe and Stavins (1994a,b) delaying energy-saving investment is costly. An example is the difference between incorporation of energy saving technology in a new home as opposed to an existing home. In the case of the new home, forgoing the technology at the time of construction typically means that the cost of installation later (if it is undertaken) will be higher. These investment decisions do not satisfy the assumptions of the option value model, but further development of the option value approach could overcome such shortcomings. Their conclusion is that there may simply be no way, using observations of purchase decisions alone and assuming optimizing behaviour, of disentangling the effects of consumer discounting, energy price expectations, and principal-agent problems, each of which could account for high implicit discount rates. Finally, some literature now turns to explanations such as behavioral and organisational barriers, leading to some bounded rationality (Sanstad and Howarth 1994, Boulanger, 2007, or Diaz-Rainey and Ashton, 2009).

In this paper we go back to the standard assumptions of irreversible energy-saving technology adoption and of uncertain payoffs. Instead of relying on bounded rationality we focus on the characteristics of consumers that take the adoption decision in the residential sector. The existing literature that explains the energy paradox (Hasset and Metcalf, 1995 for instance) considers partial equilibrium settings, and therefore ignores the interaction between optimal consumption and optimal adoption as well as the notions of risk aversion⁵⁹ or intertemporal substitutions: everything happens as if consumers behave like firms when deciding about energy-saving technology adoption. To challenge these results, we reconsider the joint effect of irreversibility and uncertainty on the energy-efficiency investment decision in a general equilibrium framework: is the explanation of the energy paradox based on the existence of an option value still valid in a more realistic and general model? Of course, such a framework may not be specific to the problem of energy-saving technology adoption in the residential sector. But we argue that it is better suited to analyse a decision made by consumers and may be viewed as a generalization of the existing specific models.

Most of the literature on adoption under uncertainty (including that on energy saving technology adoption) remains in partial equilibrium. Adoption reduces profits but there is no arbitrage between consumption and adoption. In such a framework, Abel and Eberly (2002, 2004) study the optimal adoption of the stochastic latest technology. By contrast, in Roche (2003), it may be optimal for an upgrading firm to keep some distance with the frontier technology. In Grenadier and Weiss (1997), adopting an innovation provides the firm with an option value to learn. Pavlova (2001) introduces the leaning-by-doing of Parente (1994) into the firm's choice of under uncertainty. Finally, Alvarez and Stenbacka (2001) studies the optimal timing to adopt a technology that may be updated in the future. Theoretical analyses of technology adoption in general equilibrium and a stochastic environment are very recent and very limited in number. Hugonnier et al. (2008) study the optimal

⁵⁹See Farsi (2009) for the role of risk aversion in the energy efficient investment decision based on an empirical approach.

adoption of a new technology that increases the productivity of capital.⁶⁰ There exists then an optimal adoption timing, and this timing is highly sensitive to the size of uncertainty as well as to the degree of agents' risk aversion. Moreover, Pommeret and Schubert (2009) tackle the specific problem of abatement technology adoption under uncertainty in a general equilibrium. The authors first determine the socially optimal adoption timing that is affected by the existence of pollution. Second, they derive the tax scheme such that in a decentralized economy firms adopt the abatement technology for the same level of economic development as in the centralized economy.

Tackling the specific problem of a homeowner who may invest in new insulation, or double glazing in order to reduce his energy bill is a bit different. The determination of the optimal investment timing is affected by the consumption of goods and services other than residential energy services (called "non-energy goods" in the rest of the paper). Therefore, we extend the general equilibrium model with a real option proposed by Hugonnier et al. (2008). We solve the program corresponding to the optimal adoption of an energy-saving technology adoption by a representative consumer who uses his wealth to save or to consume energy goods and non-energy goods. We assume that the benefits of such energy-saving technologies are uncertain due to the lack of information about them.⁶¹ The financial return on savings is assumed to be stochastic as well. Because of uncertainty, we obtain that it may be optimal to reduce both consumptions in order to foster adoption. As usual (see Hugonnier et al., 2008, or Pommeret and Schubert, 2009) the model can only be solved analytically if the utility discount factor is zero. Nevertheless, we confirm our results in the more general case with non-zero discounting using a numerical procedure based on collocation and Chebyshev polynomials. We show that the threshold triggering adoption depends not only on technological parameters but on preference parameters as well. In particular, the higher the risk aversion parameter,

⁶⁰The latter paper, together with Hugonnier et al. (2005), provides the resolution for the optimal threshold that triggers an irreversible decision in a general equilibrium framework for the first time in the literature.

⁶¹Another interpretation for this uncertainty (that do not perfectly fit our modelling) would come from the great fluctuations in energy prices.

the smaller the level of wealth which is required for adoption. Finally, we also show that while uncertainty on energy-saving technologies efficiency hardly affects adoption timing, uncertainty on financial returns fosters it. The latter result is strikingly different from what is obtained in the existing literature that remains in partial equilibrium and manages to explain the energy paradox with the existence of option values (see for instance Sanstad, Blumstein and Stoft, 1995). In this paper, we consider the proper framework to address the issue of energy-saving technology adoption in the residential sector, namely the arbitrage between consumption and adoption is taken into account. By better describing the decision problem, we manage to challenge the existing result of previous literature: the existence of an option value does not rule out the energy paradox.

The remainder of the paper is as follows. Section 2 presents the general model, and explains the assumptions that will be valid for the whole paper. Because this model is to be solved backwards, we start in section 3 by developing the general equilibrium framework once the energy-efficient technology has been adopted. In Section 4 we analytically solve the model before the technology adoption and derive the optimal adoption timing in the special case of zero discounting. We provide also some sensitivity analysis based on numerical resolutions. We confirm these results in section 5 with the more general case of a strictly positive discount rate. Section 6 concludes.

II. The model

We assume that the homeowner holds risky assets. His income return encompasses a deterministic part, r , and a stochastic one, $\sigma_2 dz_2$. He consumes energy goods C_2 and non-energy goods C_1 . The function of wealth accumulation consists of two components. The deterministic one is $rA_t - C_{1t} - xC_{2t}$, with A_t the level of wealth and x , the relative price of energy. The stochastic component comes from the stochastic financial returns. The function of wealth accumulation writes therefore:

$$dA = (rA - C_1 - xC_2)dt + \sigma_2 Adz_{2t} \text{ for } t < \tau \quad (1)$$

At any time τ , the household can lower the cost x of the energy service by switching to a new technology y . The initial cost of the new technology is β . This cost is unrecoverable. Moreover, there exists an uncertainty σ_1 that is linked to the cost of consumption in energy service after the adoption of the new technology. Indeed, we assume that the benefits of such energy-saving technologies are uncertain due to the lack of information about them. The amount of uncertainty grows with the time horizon. Thus, we learn about the efficiency of the new technology as time passes, but the efficiency in the future will always be unknown.⁶² Note that y must be less than x because the cost of the energy service is otherwise higher with the new technology and the homeowner never adopts. We define the difference between x and y as the savings in energy efficiency. The function of wealth accumulation after the adoption of the new technology is:

$$dA = (rA - C_1 - yC_2)dt - \sigma_1 yC_2 dz_{1t} + \sigma_2 Adz_{2t} \text{ for } t \geq \tau \quad (2)$$

The homeowner preferences over consumption plans are represented by the lifetime expected utility functional

$$E_0 \left[\int_0^\infty e^{-\rho t} U(C_{1t}, C_{2t}) dt \right] = E_0 \left[\int_0^\infty e^{-\rho t} \frac{(C_1^a C_2^b)^{1-\gamma}}{1-\gamma} dt \right] \quad (3)$$

To facilitate the presentation, let denote Θ the set of admissible plans, that is, the set of consumption plans and dates of adoption (C, τ) such that

$$E_0 \left[\int_0^\infty e^{-\rho t} U(C_{1t}, C_{2t}) dt \right] < \infty \quad (4)$$

where ρ is the consumer subjective discount factor, γ is the constant relative risk aversion of the household with $\gamma \neq 1$ and $\gamma > 0$. The elasticities a and b are positives. We define the effective coefficient of risk aversion (see Smith and Son, 2005):

⁶²It could be more realistic to assume that after adoption some uncertainty is solved. However, the modelling of uncertainty we have chosen can account for shocks on climate (for instance thinking of solar panels) or on maintenance costs (again for solar panels, see Slade, 2009). And it is anyway well suited to account for the fact that prior to adoption, uncertainty about its efficiency grows with the time horizon.

$$R = 1 - (a + b)(1 - \gamma) \quad (5)$$

The optimal switching time should maximize the intertemporal utility subject to the function of wealth accumulation, the non-negativity constraint and the initial condition A_0 . The value function of the homeowner is :

$$V(A_0) = \sup_{(C, \tau)} E_0 \left[\int_0^\tau e^{-\rho t} \frac{(C_{1t}^a C_{2t}^b)^{1-\gamma}}{1-\gamma} dt + e^{-\rho \tau} W(A_\tau - \beta) \right] \quad (6)$$

where W is the value after having adopted the new technology and τ is the optimal adoption time.

This program can be solved in two stages. First, we solve for the optimal consumption plans of the representative agent after the adoption of the new technology. Then, there is no longer an adoption option in the value of the program. We find the expression of the value function which provides the boundary condition to compute the equilibrium of our general model with a technology adoption opportunity. Note that it also provides a benchmark for the economy with the technology adoption option. Second, we formulate the choice of an optimal consumption plan and an optimal investment time prior to technology adoption.

III. The optimal path after adoption

We assume in this section that the new technology has been adopted. The set of admissible plans collapses to the set of consumption plans such that :

$$E_\tau \left[\int_\tau^\infty e^{-\rho(t-\tau)} |U(C_{1t}, C_{2t})| dt \right] < \infty \quad (7)$$

The value function of the household is :

$$W(A_\tau) = \sup_C E_\tau \left[\int_\tau^\infty e^{-\rho(t-\tau)} \frac{(C_{1t}^a C_{2t}^b)^{1-\gamma}}{1-\gamma} dt \right] \quad (8)$$

The Bellman equation may be written :

$$W(A_t) = \max_{C_{1t}, C_{2t}} \left\{ \frac{(C_{1t}^a C_{2t}^b)^{1-\gamma}}{1-\gamma} dt + e^{-\rho dt} E_t(W(A_{t+dt})) \right\} \text{ with } t \geq \tau \quad (9)$$

The first order conditions yield the optimal consumption of energy and non-energy

goods:⁶³

Proposition 1 *Under assumptions (??) and (??) the representative agent's consumptions and lifetime utility are:*

$$C_{1t}^* = \left[\frac{(a+b)}{a} MB^{-b(1-\gamma)} \right]^{\frac{1}{a(1-\gamma)-1}} A_t \quad (10)$$

$$C_{2t}^* = BA_t \quad (11)$$

$$W(A_t) = W(A_t) = \frac{MA_t^{1-R}}{(1-\gamma)} \quad (12)$$

with:

$$B = \frac{Ry \pm (1-\gamma)\sqrt{\Delta}}{R\sigma_1^2 y^2 [2R - b(1-\gamma)]}$$

$$\Delta = \left[y \left(a + b - \frac{1}{1-\gamma} \right) \right]^2 - 4 \left[\frac{R}{2} \sigma_1^2 y^2 \left(2a + b - \frac{2}{(1-\gamma)} \right) \right] \left[b \frac{R}{2} \sigma_2^2 - br + \frac{b\rho}{1-R} \right]$$

$$M = \frac{a}{a+b} B^{-R} \left[\frac{a}{b} (y + R\sigma_1^2 y^2 B) \right]^{[a(1-\gamma)-1]}$$

We note that the optimal consumptions are both constant fractions of the wealth level. The feasibility condition imposes $B > 0$. Depending on the value of γ relative to unity we consider one or the other root of the second order equation. Moreover The expected optimal wealth growth rate is:

$$\frac{E_t(dA_t/A_t)}{dt} = r - E_t \left[\frac{C_1^*}{A_t} \right] - y E_t \left[\frac{C_2^*}{A_t} \right]$$

⁶³See Appendix A.

$$= r - \left[\frac{M}{a} (a+b) B^{-b(1-\gamma)} \right]^{\frac{1}{a(1-\gamma)-1}} - By$$

Note that this is a more complex expression than usual (see for instance Smith and Son, 2005) since consumption expenditure is itself directly affected by uncertainty in the wealth accumulation equation. The following results can be obtained analytically:

$$\frac{\partial(C_{1t}/K_t)}{\partial\sigma_2^2} = \left[\frac{\partial(C_{1t}/K_t)}{\partial M} \frac{\partial M}{\partial B} + \frac{\partial(C_{1t}/K_t)}{\partial B} \right]_{M=\bar{M}} \frac{\partial B}{\partial \Delta} \frac{\partial \Delta}{\partial \sigma_2^2} > 0 \text{ for } \gamma < 1$$

$$\text{indeterminate for } \gamma > 1$$

$$\frac{\partial(C_{2t}/K_t)}{\partial\sigma_2^2} = \frac{\partial B}{\partial \Delta} \frac{\partial \Delta}{\partial \sigma_2^2} > 0 \text{ for } \gamma < 1$$

$$< 0 \text{ for } \gamma > 1$$

An increase in the uncertainty on the financial returns increases current consumption in both energy and non-energy consumption if the intertemporal elasticity of substitution ($1/\gamma$) is greater than unity. Moreover, current consumption in energy goods decreases when uncertainty σ_2 rises if the intertemporal elasticity of substitution is less than unity. These results are consistent with the usual income and substitution effects: more uncertainty reduces the certainty equivalent of the financial returns which in turn generates an income effect (less current consumption) and a substitution effect (more current consumption). The substitution effect prevails if the intertemporal elasticity of substitution is large enough. Effects of σ_2^2 on C_{1t} for $\gamma > 1$, or of σ_1^2 on both C_{1t} and C_{2t} are analytically indeterminate. Figures providing a numerical computation of these effects can be found at the end of appendix (A).

It is easy to show that the condition on parameters such that the utility function is concave is $(a+b)(1-\gamma)-1 < 0$. The transversality condition requires the convergence of the value function, i.e.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E_0(W(A_t)) = 0$$

It is satisfied if the lifetime utility of wealth does not grow "too fast" in expectation (see Smith (1996)). Applying Itô's lemma to $W(K_t)$, this requires that:

$$E(dA) = W_A E(dA) + \frac{1}{2} W_{AA} E(dA^2) < 0$$

$$\Leftrightarrow M \left[r - \left(\frac{M}{a} (a+b) B^{-b(1-\gamma)} \right)^{\frac{1}{a(1-\gamma)-1}} - yB - \frac{R}{2} (\sigma_1^2 y^2 B^2 + \sigma_2^2) \right] > 0,$$

We assume that this condition is fulfilled.

IV. The optimal adoption timing with no discounting

Considering the analytical resolution helps understanding the mechanisms of the model. However, solving analytically is only possible in the special case in which the consumer's discount rate is equal to zero⁶⁴. This is why we assume zero-discounting in this section. Note that the expressions of the optimal consumption path and of the value function after the switch that have been derived in the previous section remain valid but we now impose $\rho = 0$ in these expressions. Nevertheless, assuming that the consumer does not discount the future is not very realistic. Therefore, we will turn to numerical resolutions in the next section to show that introducing a discount factor does not change the nature of the results.

Recall that the homeowner has to choose both an optimal consumption plan and an optimal technology adoption timing. This choice is given by the maximization of the intertemporal utility function subject to the wealth accumulation equation. Once the new technology has been adopted, the homeowner optimally follows the consumption plan described by equations (10) and (11). Therefore, the value function at the time of adoption is given by the following value matching and smooth pasting conditions :

$$V(A_\tau) = W(A_\tau - \beta) \tag{13}$$

$$V_A(A_\tau) = W_A(A_\tau - \beta) \tag{14}$$

where A_τ is the level of wealth for which is optimal to adopt. It implicitly determines the optimal switching time τ . The value matching condition (13) simply requires that, at the time of the switch (i.e for a level A_τ of wealth), the value before the switch

⁶⁴See next section.

is equal to the value after the switch once paid the initial costs. The smooth pasting condition (14) ensures the smoothness of the value function around the switch (V before the switch and W after the switch). It guarantees that adoption occurs for the optimal level of wealth.

Since it is always possible for the homeowner to indefinitely postpone the adoption of the new technology, another condition has to be satisfied, namely that for any level of wealth, the value with the adoption opportunity V cannot be smaller than W_0 , the value without such an opportunity:

$$W_0(A_t) \leq V(A_t) \quad \forall t \quad (15)$$

The household's program is :

$$V(A_0) = \sup_{C, \tau} E_0 \left[\int_0^\tau \frac{(C_{1t}^a C_{2t}^b)^{1-\gamma}}{1-\gamma} dt + W(A_\tau - \beta)_{\{\tau < \infty\}} \right] \quad (16)$$

$$s.t. \quad dA = (rA - C_1 - xC_2)dt + \sigma_2 A dz_{2t} \quad (17)$$

To solve the program before the switch, we determine the marginal value of wealth which has to satisfy the smooth pasting condition. Integrating this value between zero and the level of wealth at the optimal switching time, we can use the value matching condition to get the optimal adoption date.

A. The marginal value of wealth

The first order condition yields:⁶⁵

$$C_{1t}^* = a^{\frac{1-b(1-\gamma)}{R}} \left(\frac{b}{x} \right)^{\frac{b(1-\gamma)}{R}} V_A^{-\frac{1}{R}} \quad (18)$$

$$C_{2t}^* = a^{\frac{a(1-\gamma)}{R}} \left(\frac{b}{x} \right)^{\frac{1-a(1-\gamma)}{R}} V_A^{-\frac{1}{R}} \quad (19)$$

Using a variable change, the Bellman equation leads to the following expression for

⁶⁵See appendix B.

the marginal value of wealth before the switch (see Appendix B) :

$$V_A(A_t) = \left[D_1 A_t^{-1} + \underbrace{D_2 A_t^{D_3}}_{G(A_t, A_t)} \right]^R \quad (20)$$

$$\text{with } D_1 = \left[\frac{R}{\gamma - 1} a^{\frac{a(1-\gamma)}{R}} \left(\frac{b}{x} \right)^{\frac{b(1-\gamma)}{R}} \right] \frac{1}{\left(r - \frac{1}{2} \sigma_2^2 R \right)} \quad (21)$$

$$\text{and } D_3 = -\frac{2r}{R\sigma_2^2} \quad (22)$$

We note $G(A_t, A_t) = D_2 A_t^{-\frac{r}{2R\sigma_2^2}}$ the option value to switch⁶⁶. D_2 is a constant which must be determined⁶⁷ using the smooth pasting condition (14). We obtain:

$$D_2 = \frac{[M(a+b)]^{\frac{1}{R}}}{(A_t - \beta) A_t^{D_3}} - \frac{D_1}{A_t^{D_3+1}} \quad (23)$$

If the homeowner does not have the opportunity to adopt a new technology, there is no option value to adopt the new technology, $G(A_t, A_t) = 0$, and the value function reduces to:⁶⁸

$$W_0(A_t) = \left[\frac{\frac{R}{\gamma - 1} a^{\frac{a(1-\gamma)}{R}} \left(\frac{b}{x} \right)^{\frac{b(1-\gamma)}{R}}}{\underbrace{\left(r - \frac{1}{2} \sigma_2^2 R \right)}_{D_1}} \right]^R \frac{A_t^{1-R}}{(a+b)(1-\gamma)} \quad (24)$$

$$\Leftrightarrow W_0(A_t) = \frac{D_1^R}{(a+b)(1-\gamma)} \frac{A_t^{1-R}}{A_t^{D_3+1}}$$

where $W_0(A_t)$ is the value function of the homeowner with no opportunity to switch. Moreover, the feasibility condition associated with the program in the absence of adoption opportunity writes:

$$D_1 > 0$$

⁶⁶Recall that under uncertainty, it is possible to delay an irreversible investment. While the homeowner is waiting, he can take advantage of an opportunity to invest, similar to what happens with a financial option. Therefore, there exists an option value of the investment project that is killed at the time of investment (see Dixit and Pindyck, 1994). This option value represents an opportunity cost of investment that must be taken into account.

⁶⁷See appendix B.

⁶⁸See appendix B.

Recall that $W_0(A_t)$ cannot be greater than the lifetime utility of the agent in an economy with the new technology; therefore we must have:

$$W_0(A_t) \leq W(A_t) \quad (25)$$

This condition ensures that there exists an optimal switching date, that is, in the absence of costs of switching to the new technology, the central planner would choose to immediately switch for any current level of wealth accumulation.

Using the expressions for W_{0A} (computed using equation (24)) and for W_A (computed using equation (12)), the marginal value $V_A(A_t)$ can be rewritten:

$$V_A(A_t) = \left[W_{0A}(A_t)^{\frac{1}{R}} + \underbrace{\left([W_A(A_t - \beta)]^{\frac{1}{R}} - W_{0A}(A_t)^{\frac{1}{R}} \right) \frac{A_t \tau^{\frac{2r}{R\sigma^2}}}{A_t}}_{=G(A_t, A_t), \text{part due to the option to switch}} \right]^R \quad (26)$$

The marginal value of wealth differs significantly from the one that can be derived in the absence of technological change. This is due to the existence of an option to switch that generates an option value taken into account in the marginal value of wealth. In the absence of such an option, $G(A_t, A_t) = 0$ and the marginal value of wealth reduces to $W_{0A}(A_t)$. This option value is the difference between the marginal value after the switch (having paid initial cost β) and the marginal value in the absence of opportunity to switch, discounted by the distance to the switch, that is related to the ratio between the current wealth A_t and A_t .

We have two cases :

- If $\gamma < 1$, we have: $W_{0A}(A_t)^{\frac{1}{R}} < W_A(A_t)^{\frac{1}{R}} < W_A(A_t - \beta)^{\frac{1}{R}}$ that ensures that $G(A_t, A_t) > 0$. There is no problem of existence of V_A in this case. The marginal value of wealth in

the economy with an opportunity to switch is greater than the marginal value of wealth in an economy without this opportunity. It means that consumption at each time is smaller in an economy with opportunity to adopt a new technology, compared to the consumption which prevails in an economy in which the opportunity does not exist.

- If $\gamma > 1$, we have $W_{0A}(A_t)^{\frac{1}{R}} > W_A(A_t)^{\frac{1}{R}}$. In this case, the sign of $G(A_t, A_t)$ is ambiguous.

- $G(A_t, A_t) < 0$. It means that the part due to the option to adopt a new technology in the expression of the marginal value of wealth is negative. Therefore, consumption at each period is greater in an economy with an opportunity to switch compared to the consumption which prevails in an economy without such an opportunity. In this case, the homeowner does not like to substitute and the option to adopt a new technology is an incentive to rise his consumption today to smooth his consumption path that is expected to grow more once the technology is adopted. Thus, adoption is delayed. However such a consumption path cannot happen since for small values of A_t , namely for $A_t < (-D_1/D_2)^{1/(1-2r/R\sigma_2)}$, the expression of $V_A^{\frac{1}{R}}$ becomes negative and the program is no longer defined. Therefore, $G(A_t, A_t) < 0$ cannot be considered.

- $G(A_t, A_t) > 0$. It implies that when integrating V_A , the following condition $W_0(A_t) \leq V(A_t) \quad \forall t$ can no longer be satisfied (since for $\gamma > 1$, feasibility condition implies $2r/(\sigma_2^2 R) > 1$). Therefore, $G(A_t, A_t) > 0$ cannot be considered.

- $G(A_t, A_t) = 0$. It ensures both that $V_A^{\frac{1}{R}}$ is positive (the program is defined) and that the condition $W_0(A_t) \leq V(A_t) \quad \forall t$ is satisfied. It is the sole solution that we can consider if $\gamma > 1$. It involves that the consumption is not affected by the existence of

an option to adopt a new technology. We denote A^* the special value of A_t such that $G(A_t, A_t) = 0$.

Therefore, we obtain using equation (24) and (26):

$$A^* = \frac{\beta}{1 - \frac{[M(a+b)]^{\frac{1}{R}}}{D_1}} \quad (27)$$

A^* must be positive, which requires $M(a+b) < D_1^R$ that is ensured by condition (25). Obviously, this threshold raises with the cost to pay for adoption and decreases with the savings in energy efficiency (see numerical resolutions in appendix B). The better the new technology compared to the old one, the smaller the threshold.

B. Boundary conditions

The level of wealth A_t is such that, at the time to the adoption, the value with the initial technology is equal to the value with the new technology once the cost β is paid (this is the value matching condition):

$$V(A_t) = W(A_t - \beta) \quad (28)$$

It is straightforward to obtain propositions 2 for $\gamma < 1$ using equations (18), (19), (26) with $G(A_t, A_t) > 0$ and (28):

Proposition 2 Assume that the problem is undiscounted, that $\gamma < 1$ and that the marginal propensity to consume is positive. The optimal technology adoption threshold is then the unique solution to the non-linear equation:

$$\int_0^{A_t} V_A(A, A_t) dA = W(A_t - \beta) \text{ since } V(0) = 0 \text{ for } \gamma < 1 \quad (29)$$

with

$$V_A(A_t, A_t) = \left[W_{0A}(A_t)^{\frac{1}{R}} + G(A_t, A_t) \right]^R \quad (30)$$

where

$$G(A_t, A_t) = \left(\left[W_A(A_t - \beta) \right]^{\frac{1}{R}} - W_{0A}(A_t)^{\frac{1}{R}} \right) \frac{A_t^{\frac{2r}{R\sigma_2^2}}}{A_t}$$

$G(A_t, A_t)$ is the part of the marginal value which from the option to switch to a new technology. Moreover, the value function and optimal consumptions strategies before technology adoption are given by:

$$V(A_t) = \int_0^{A_t} V_A(A) dA$$

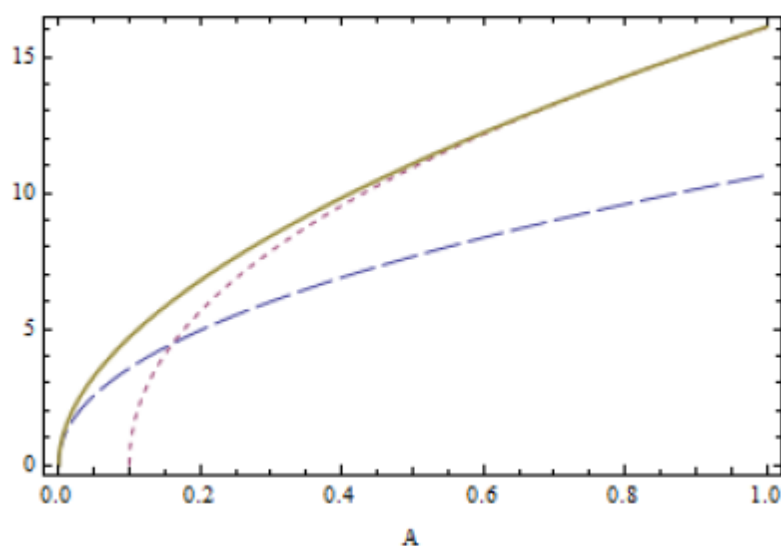
$$C_{1t}^* = a^{\frac{1-b(1-\gamma)}{R}} \left(\frac{b}{x} \right)^{\frac{b(1-\gamma)}{R}} V_A^{-\frac{1}{R}} \quad (31)$$

$$C_{2t}^* = a^{\frac{a(1-\gamma)}{R}} \left(\frac{b}{x} \right)^{\frac{1-a(1-\gamma)}{R}} V_A^{-\frac{1}{R}} \quad (32)$$

We now illustrate this case. Equation (29) can be solved numerically. Simulations are driven using the following values for the parameters: $\sigma_1 = 0.013$; $b = 0.25$; $a = 0.7$; $\gamma = 0.5$; $x = 10$; $y = 0.25$; $r = 0.05$; $\sigma_2 = 0.5$; $\beta = 0.1$. The value of the effective coefficient of risk aversion is $R = 0.525$.

Figure 1 shows the three value functions: $V(A)$ before the switch, $W(A - \beta)$ after the switch, and $W_0(A)$ without the option to switch. The threshold that triggers the switch is $A_t = 0.82$. Note that at the time of adoption, yC_2 (with C_2 computed after adoption) is smaller than xC_2 (with C_2 computed before adoption). It implies that, at least at the time of adoption, the rebound effect does not prevail on energy consumption.

Figure IV-1 : The value functions with $\gamma < 1$ (optimum)



Thick line : $V(A)$

Small dashes : $W(A - \beta)$

Large dashes : $W_0(A)$

It is straightforward to obtain propositions 3 for $\gamma > 1$ using equations (18), (19), (26) with $G(A_t, A_t) = 0$ and (28):

Proposition 3 *Assume that the problem is undiscounted, that $\gamma > 1$, and that the marginal propensity to consume is positive. The optimal technology adoption threshold A_t is then:*

$$A_t = A^* = \frac{\beta}{1 - \frac{[M(a+b)]^{\frac{1}{R}}}{D_1}} \quad (33)$$

Moreover, the value function and optimal consumptions strategies before technology adoption are given by:

$$V(A_t) = \frac{1}{1-R} [D_1^R A_t^{1-R} + [M(a+b)](A_t - \beta)^{1-R} - D_1^R A_t^{1-R}] \quad (34)$$

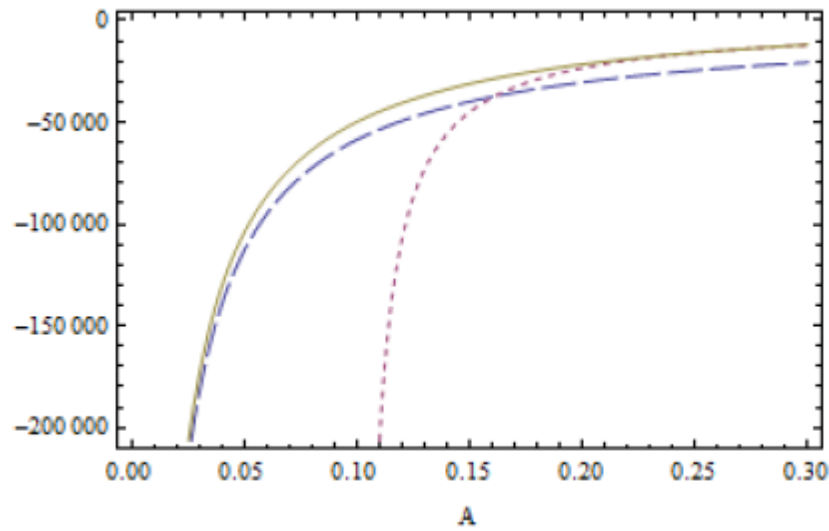
$$C_{1t}^* = a^{\frac{1-b(1-\gamma)}{R}} \left(\frac{b}{x} \right)^{\frac{b(1-\gamma)}{R}} V_A^{-\frac{1}{R}} \quad (35)$$

$$C_{2t}^* = a^{\frac{a(1-\gamma)}{R}} \left(\frac{b}{x} \right)^{\frac{1-a(1-\gamma)}{R}} V_A^{-\frac{1}{R}} \quad (36)$$

We now illustrate this case. Note that both A^* and $V(A_t)$ are analytically defined with $\gamma > 1$. Simulations to draw the value functions are driven using the following values for the parameters : $\sigma_1 = 0.013$; $b = 0.25$; $a = 0.7$; $\gamma = 2$; $x = 10$; $y = 0.25$; $r = 0.05$; $\sigma_2 = 0.1$; $\beta = 0.1$. The value of the effective coefficient of risk aversion is $R = 1.95$.

Figure 2 shows the three value functions: $V(A)$ before the switch, $W(A - \beta)$ after the switch, and $W_0(A)$ without the option to switch. The threshold which triggers the switch is $A^* = 0.265$ (see equation (27)). Contrary to what happens for $\gamma < 1$, one may compute that the rebound effect prevails at the time of adoption.

Figure IV-2 : The value functions with $\gamma > 1$ (optimum)



Thick line : $V(A)$

Small dashes : $W(A - \beta)$

Large dashes : $W_0(A)$

C. Comparative statics

We provide table 1 in appendix (11) to show the effect of each parameters. Parameters' values used to draw the value functions previously are now considered as baseline parameters for the simulations.

The level of wealth for which it is optimal to switch is a decreasing function of x and an increasing function of y . It is quite intuitive that the larger the gain of adoption, the sooner the homeowner wishes to adopt and therefore the lower the level of wealth for which he wishes to adopt. Of course, we obtain that the higher the adoption cost, the higher the threshold wealth and the later the adoption.

Let us consider the effects of preference parameters. As far as parameters a (on non-

energy goods C_1) and b (on energy goods C_2)⁶⁹ are concerned, we obtain the following results: the more sensitive the utility of the household to non-energy consumption (i.e. the higher a), the later the homeowner wants to devote resources to adoption and then, the higher the optimal adoption threshold, but the effect of b depends on the value of γ relative to unity. The relative risk aversion coefficient γ has a complex effect because it summarizes both the attitude with respect to risk and that with respect to intertemporal substitution. Simulations show that the higher γ , the smaller the level of wealth that triggers adoption.

Let us now turn to the effect of uncertainties. The level of wealth for which it is optimal to switch is not sensitive to the uncertainty (σ_1) related to the efficiency of consumption in energy service after the adoption of the new technology. It is an increasing function of the deterministic part of financial return (r) while it is a decreasing function of the uncertainty on the financial returns (σ_2). First, the larger the deterministic return on wealth, the more reluctant the homeowner is to devote part of his wealth to technology adoption. Second, σ_2 reduces the certainty equivalent of the wealth rate of return ($r - \frac{1}{2}\sigma_2^2 R$) and it is no surprise that it affects adoption in the opposite way compared to r . These effects of r and σ_2 only appear for $\gamma < 1$. For $\gamma > 1$ adoption becomes insensitive to these parameters.

This numerical example illustrates that contrary to what happens in partial equilibrium, uncertainty does not increase the adoption threshold. An explanation of the energy paradox based on the existence of option values is therefore no longer valid when one considers more carefully the consumer's decision problem.

⁶⁹Note that we only present the results for values of b between 0.2 and 0.4 because b cannot be greater than a .

V. The optimal adoption time with discounting

It is not possible to go on with the analytical resolution if the consumer discount rate is not equal to zero. Indeed, the Bellman equation before the switch is:

$$\rho V = \max_{C_{1t}, C_{2t}} \left\{ \frac{(C_{1t}^a C_{2t}^b)^{1-\gamma}}{1-\gamma} + V_A(rA - C_1 - xC_2) + \frac{1}{2} \sigma_2^2 A^2 V_{AA} \right\} \quad (37)$$

Maximizing with respect to both C_{1t} and C_{2t} leads to

$$\rho V_A V_A^{\frac{1-R}{R}} = \frac{R}{1-\gamma} a^{\frac{a(1-\gamma)}{R}} \frac{b^{\frac{b(1-\gamma)}{R}}}{x} + rA V_A^{\frac{1}{R}} + \frac{1}{2} \sigma_2^2 A^2 V_A^{\frac{1-R}{R}} V_{AA} \quad (38)$$

Such an equation can no longer be solved using the variable change proposed in appendix B for $\rho = 0$. As this Bellman equation cannot be solved analytically, we turn to a numerical resolution. More precisely, we adapt Judd's methodology (see Judd, 1992) based on Chebyshev polynomials and projection methods as proposed in Dangl and Wirl (2004).

A. An approximate value function before adoption

Using equation (38), let us define L :

$$L(V)(A) = \frac{R}{1-\gamma} a^{\frac{a(1-\gamma)}{R}} \frac{b^{\frac{b(1-\gamma)}{R}}}{x} + rA V_A^{\frac{1}{R}} + \frac{1}{2} \sigma_2^2 A^2 V_A^{\frac{1-R}{R}} V_{AA} - \rho V_A^{\frac{1-r}{R}} V.$$

L is an operator, or a function that maps functions to functions, and $A \in [0, A_t]$. As noted in Judd (1992, 1998), the domain of L includes all the C^1 functions, and its range is C^0 . The differential equation (38), combined with the value matching and smooth pasting conditions, equations (13) and (14) respectively, can be viewed as the problem of finding a C^1 function V such that:

$$L(V)(A) = 0 \quad (39)$$

$$V(A_t) = W(A_t - \beta) \quad (40)$$

$$V'(A_t) = W'(A_t - \beta). \quad (41)$$

The projection method simplifies the original problem (39) by approximating the function $V(A)$ by means of polynomials.⁷⁰ As we decided to use Chebyshev polynomials, our approximation can be written as:

$$\hat{V}(A, \mathbf{c}) = \frac{1}{2} c_0 T_0(A) + \sum_{i=1}^N c_i T_i(A), \quad (42)$$

where $A \in [0, A_r]$, and $T_i(A)$ is the general i th Chebyshev polynomial of the first kind that is defined by the following recurrence relationship:

$$T_0(s(A)) = 1,$$

$$T_1(s(A)) = s(A), \text{ and}$$

$$T_{n+1}(s(A)) = 2s(A)T_n(s(A)) - T_{n-1}(s(A)),$$

or by the trigonometric identity:

$$T_n(s(A)) = \cos(n \arccos s(A)),$$

where $s(A)$ is a linear transformation such that $-1 \leq s(A) \leq 1$. Written in this way, the quality of our approximation is guaranteed by the Chebyshev approximation theorem (see Judd, 1992).

B. Choosing the coefficients

We need to choose $\mathbf{c} = \{c_0, c_1, c_2, \dots, c_N\}$ so that $\hat{V}(A, \mathbf{c})$ nearly solves the differential equation (38). To do this, we first ignore the conditions (40) and (41), and define the residual function:

$$RF(A, \mathbf{c}) \equiv L(\hat{V})(A). \quad (43)$$

Equation (43) is the deviation of $L(\hat{V})(A)$ with respect to the zero target value. The projection method adjusts the set of coefficients until a set $\mathbf{c}$ is found that makes $RF(A, \mathbf{c})$ sufficiently close to the zero function. Equation (42) has then to be inserted

⁷⁰By Weierstrass theorem, we know that any C^1 function can be properly approximated by a large sums of polynomial terms. So, as N becomes larger in our equation (42), we are sure that $\hat{V}(A, \mathbf{c})$ is converging to $V(A)$.

into equation (43). Note that we have $N + 1$ coefficients c_i to be found. Therefore, we choose $N + 1$ collocation values $A_i \in [0, \hat{A}_\tau]$, where $\hat{A}_\tau$ is an arbitrarily chosen value of A_τ . For example, the Chebyshev-Gauss-Lobatto collocation points can be used. They are defined as follows:

$$s_i = \cos\left(\frac{i\pi}{N}\right).$$

Applying such a collocation method, the initial problem is reduced to that of solving a set of $N + 1$ non linear equations:

$$RF_i(A_\tau, c) = 0, i = 0, 1, \dots, N. \quad (44)$$

Boundary conditions, i.e. the value matching and smooth pasting conditions, need then to be considered. For instance, let us start by introducing the value matching condition. Choosing an initial value $\hat{A}_\tau$ for A , equation (42) and equation (40) imply that:

$$\hat{V}(\hat{A}_\tau) - W(\hat{A}_\tau - \beta) = 0. \quad (45)$$

To impose that our solution satisfies the value matching, one condition of the set (44) is then replaced by equation (45). The resulting system can be solved iteratively starting with a guess $c^0 = (c_i^0)$. Specifically, we use Newton's method: $c^{k+1} = c^k - (J_{c^k})^{-1} P(c^k)$, where J_{c^k} is the Jacobian of $RF(A, c)$ evaluated at the respective point c^k . Finally, the optimal switching time A_τ is found using a search algorithm in order to satisfy the smooth pasting condition. We solve for our non-linear system until a value $\hat{A}_\tau = A_\tau$ is found that solves:

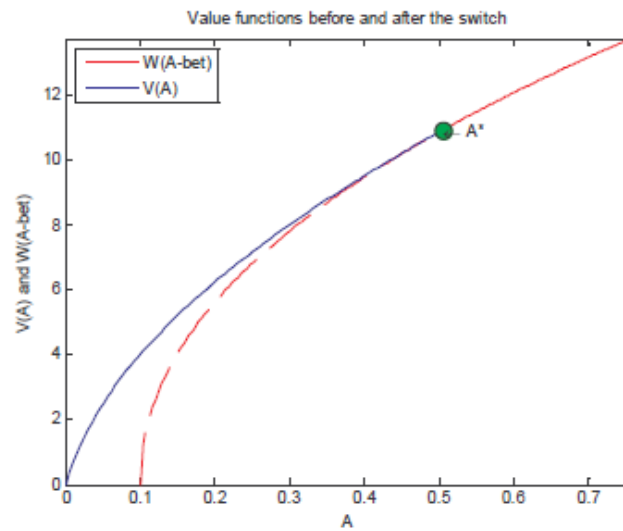
$$\hat{V}'(\hat{A}_\tau) = W'(\hat{A}_\tau - \beta)$$

C. Results

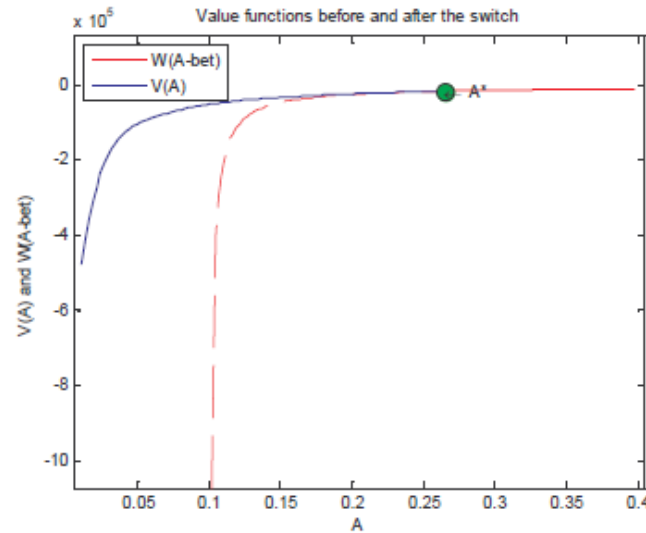
In our computations we are using $N = 10$ and the baseline parameters' values described in the previous section (with no discounting) except that $\rho = 0.0001$. Such a small value allows to compare the results with those obtained under the assumption

of no-discounting.⁷¹ Simulations are driven using MatLab software. In the following figures we show the value functions before and after the switch and the optimal switching level of wealth A_t :

Figure V-1 : The value functions with $\gamma < 1$ (optimum) and $\gamma > 1$ under the assumption with discounting.



$\gamma < 1$. Then $A_t = 0.5049$.



⁷¹A more realistic value for ρ can be found in the sensitivity analysis.

D. Comparative statics

Table 2 in the appendix (C) show the sensitivity of the optimal adoption timing to the model parameters, starting with the usual baseline.

First, this analysis proves to be fully consistent with that driven under the no-discounting assumption. In particular we obtain again that one cannot rely on uncertainty to explain the energy paradox. Second, the table shows that the more concerned about the present the household is (larger ρ), the earlier he adopts the new technology, in order to get the benefits sooner.

VI. Conclusion

In this paper we consider a homeowner who makes an irreversible energy-saving investment under uncertainty. Both financial returns and the energy-saving technology efficiency are stochastic. In a general equilibrium framework, we solve the program corresponding to the optimal adoption of an energy-efficiency technology adoption by a representative consumer who uses his wealth to save or to consume energy goods and non-energy goods. We therefore explicitly take the arbitrage between consumption and adoption into account. This is not the case in the existing literature that explains the energy paradox. The model can only be solved analytically if the utility discount factor is zero. We confirm the results in the more general case with non-zero discounting using a numerical procedure. We show that the threshold triggering adoption depends not only on technological parameters but on preference parameters as well. In particular, the higher the risk aversion parameter, the smaller the level of wealth which is required for adoption. Finally, we also show that while uncertainty on energy-saving technologies efficiency does not affect adoption timing, uncertainty on financial returns fosters it. The latter result is strikingly different from what is obtained in partial equilibrium: we show that the usual explanation of the energy paradox based on the existence of an option value is no longer valid when the analysis is extended to a general equilibrium framework.

VII. References

- Abel, A. and J. Eberly, 2002, " Q for the Long Run" , *Unpublished Manuscript*, University of Pennsylvania.
- Abel, A. and J. Eberly, 2004, " Investment, Valuation and Growth Options" , *Unpublished Manuscript*, University of Pennsylvania.
- Alvarez L. and R. Stenbacka, 2001, " Adoption of Uncertain Multistage Technology Projects: a Real Options Approach" , *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy* 48, 101-135.
- ANAH (2008), "Modélisation des Performances Energétiques du Parc de Logements", Etat énergétique du parc en 2008.
- Ansar, J., and Sparks, R. (2009), "The Experience Curve, Option Value, and the Energy Paradox", *Energy Policy*, 37 (3), 2012:2020.
- Banfi, S. Farsi M., Filippini M. and Jacob M. (2008), "Willingness to Pay for Energy Saving Measures in Residential Buildings", *Energy Economics*, 30 (2), 503:516.
- Brown, M. (2001), " Market Failures and Barriers as a Basis for Clean Energy Policies" , *Energy Policy*, 29(14), 1197:1207.
- Boulanger, P.-M. (2007), "Les Barrières à l'Efficacité Energétique", *Reflets et perspectives de la vie économique*, Tome XLVI, 49:6.
- Dangl, T., & Wirl, F. (2004). " Investment under uncertainty: calculating the value function when the Bellman equation cannot be solved analytically." *Journal of Economic Dynamics & Control* , 28 (7), 1437:1461.
- Diaz-Rainey I. and Ashton J. (2009), "Domestic Energy Efficiency Measures, Adopter Heterogeneity and Policies to Induce Diffusion", *Working Paper SSRN*.
- Dixit, A. K., and Pindyck, R. S. (1994), "Investment under Uncertainty", Princeton University Press.
- Farsi M. (2009), "Risk Aversion and Willingness to Pay for Energy Efficient Systems in Rental Apartments", *Working Paper*, ETH Zurich, Switzerland.
- Grenadier, S., and A. Weiss, 1997, " Investment in Technological Innovations: An Option Pricing Approach," *Journal of Financial Economics* 44, 397-416.
- Hassett, K. A., and Metcalf, G. E. (1993), "Energy Conservation Investment: Do

- Consumers Discount the Future Correctly?", *Energy Policy*, 21 (6), 710:716.
- Hassett, K. A., and Metcalf, G. E. (1995), "Energy Tax Credits and Residential Conservation Investment: Evidence from Panel Data", *Journal of Public Economics*, 57 (2), 201:217.
- Hausman, J. A. (1979), "Individual Discount Rates and the Purchase and Utilization of Energy-Using Durables", *The Bell Journal of Economics*, 10 (1), 33:54.
- Hugonnier, J., Morellec E., and Sundaresan S. (2005), "Irreversible Investment in General Equilibrium", *Working paper FR 05-10*, Simon School of Business.
- Hugonnier, J., Pelgrin, F. and Pommeret A. (2008), "Technology Adoption under Uncertainty in General Equilibrium" *Working Paper*, University of Lausanne.
- Jaffe, A. B., and Stavins, R. N. (1994a), "Energy-Efficiency Investments and Public Policy" *Energy Journal*, 15 (2), 43:65.
- Jaffe, A. B., and Stavins, R. N. (1994b), "The Energy-Efficiency Gap. What Does it Mean?" , *Energy Policy*, 22 (10), 804:810.
- Jakob M. (2006), "Marginal Costs, Cost Dynamics and Co-Benefits of Energy Efficiency Investments in the Residential Buildings Sector", *Energy Policy*, 34 (2), 172:187.
- Judd K;L, (1992), "Projection Methods for Solving Aggregate Growth Models", *Journal of Economic Theory*, 58, 410:452.
- Judd K.L, (1998), "Numerical Methods in Economics", The MIT press.
- Ott , W., M. Baur and Jakob M. (2006), "Direkte und Indirekte Zusatznutzen bei Energie-Effizienten Wohnbauten" (Direct and indirect additional benefits of energy efficiency in residential buildings), Final report (in German) of a joint study by Econcept and ETH-Zurich, Switzerland.
- Parente, S., 1994, "Technology Adoption, learning by doing, and Economic Growth," *Journal of Economic Theory* 63, 346-369.
- Pavlova A., 2001, "Adjustment Costs, Learning-by-Doing, and Technology Adoption under Uncertainty" , *mimeo Sloan Institute of Technology*, MIT.
- Pommeret,A. and Schubert, K. (2009), "Abatement Technology Adoption under Uncertainty" , *Macroeconomic Dynamics*, volume 13, issue 04, 493:522.
- Roche, H., 2003, "Optimal Scrapping and Technology Adoption under Uncertainty"

, *Unpublished Manuscript*, Instituto Tecnológico Autónomo de México.

Sanstad, A.H., Blumstein, C., and Stoft, S.E. (1995), " How High are Option Values in Energy-Efficiency Investments?" , *Energy Policy*, 23(9), 730:743.

Sanstad, A.H., and Howarth, R.B. (1994), " Normal Markets, Market Imperfections and Energy Efficiency" , *Energy Policy*, 22(10): 811:818.

Slade R., (2009), "The Evolution of Solar Photovoltaic Systems", *EC&M Electrical Construction & Maintenance*, 108:5, p28-32.

Smith W. T., 1996, " Feasibility and Transversality Conditions for Models of PortfolioChoice with Non-expected Utility in Continuous Time" , *Economics Letters*, 53:123---131.

Smith W. T. and Y. S. Son, 2005, " Can the Desire to Conserve our Natural Resources be Self-defeating?" , *Journal of Environmental Economics and Management*, 49:52---67.

VIII. Appendix

A. Solving the optimal program after adoption

The Bellman equation is written as:

$$W(A_t) = \max_{C_{1t}, C_{2t}} \left\{ \frac{(C_{1t}^a C_{2t}^b)^{1-\gamma}}{1-\gamma} dt + E_t(W(A_{t+dt})) \right\} \text{ with } t \geq \tau$$

Using Itô's lemma, this equation becomes:

$$\max_{C_{1t}, C_{2t}} \left\{ \frac{(C_{1t}^a C_{2t}^b)^{1-\gamma}}{1-\gamma} dt + W_A(rA - C_1 - yC_2)dt + \left[\frac{\sigma_1^2}{2} y^2 C_2^2 + \frac{\sigma_2^2}{2} r^2 A^2 \right] W_{AA} dt \right\} = 0 \quad (46)$$

The first order conditions yields:

$$C_{1t}^* = \left[W_A \frac{C_{2t}^{-b(1-\gamma)}}{a} \right]^{\frac{1}{a(1-\gamma)-1}} \text{ and } C_{2t}^* = \frac{yW_A}{bC_{2t}^{b(1-\gamma)-2} C_{1t}^{a(1-\gamma)} + \sigma_1^2 y^2 W_{AA}}$$

We guess that $C_{2t}^* = B.A$ and $W(A_t) = W(A_t) = \frac{MA^{1-R}}{(1-\gamma)}$, with B and M being constant

to be determined and $R = 1 - (a+b)(1-\gamma)$ being the effective coefficient of risk aversion (equation (5) in the text). Then:

$$W_A = M(a+b)A^{(a+b)(1-\gamma)-1}$$

$$W_{AA} = M(a+b)[(a+b)(1-\gamma)-1]A^{(a+b)(1-\gamma)-2}$$

By replacing the consumptions by their optimal expressions into the bellman equation we get:

$$0 = \frac{1}{1-\gamma} \left[\left(\frac{W_A (BA)^{-b(1-\gamma)}}{a} \right)^{\frac{a(1-\gamma)}{a(1-\gamma)-1}} (BA)^{b(1-\gamma)} \right] \\ + W_A \left[rA - \left(\frac{W_A (BA)^{-b(1-\gamma)}}{a} \right)^{\frac{1}{a(1-\gamma)-1}} - y(BA) \right] + W_{AA} \left[\frac{\sigma_1^2}{2} y^2 (BA)^2 + \frac{\sigma_2^2}{2} A^2 \right]$$

$$\Leftrightarrow M^{\frac{1}{a(1-\gamma)-1}} B^{\frac{-b(1-\gamma)}{a(1-\gamma)-1}} = \left(\frac{a}{a+b} \right)^{\frac{1}{1-a(1-\gamma)}} \left(\frac{a(1-\gamma)}{1-a(1-\gamma)} \right) \left[\frac{R}{2} (\sigma_1^2 y^2 B^2 + \sigma_2^2) - r + yB \right]$$

Moreover, using the expression of C_{2t}^* we can get:

$$M^{\frac{1}{a(1-\gamma)-1}} B^{\frac{-b(1-\gamma)}{a(1-\gamma)-1}} = \frac{B}{b} a^{\frac{a(1-\gamma)}{a(1-\gamma)-1}} (a+b)^{\frac{1}{1-a(1-\gamma)}} (y + R\sigma_1^2 y^2 B)$$

Hence:

$$\left(\frac{1-\gamma}{1-a(1-\gamma)} \right) \left[(\sigma_1^2 y^2 B^2 + \sigma_2^2) \frac{R}{2} - r + yB \right] = \frac{B}{b} (y + R\sigma_1^2 y^2 B)$$

$$\Leftrightarrow B^2 \left[\frac{R}{2} \sigma_1^2 y^2 \left(\frac{1-\gamma}{1-a(1-\gamma)} - \frac{2}{b} \right) \right] + B \left[y \left(\frac{1-\gamma}{1-a(1-\gamma)} - \frac{1}{b} \right) \right]$$

$$+ \left[\frac{\rho}{1-R} - r + \frac{R}{2} \sigma_2^2 \right] \left(\frac{1-\gamma}{1-a(1-\gamma)} \right) = 0$$

$$\Leftrightarrow B^2 \left[\frac{R}{2} \sigma_1^2 y^2 \left(b - 2 \frac{[1-a(1-\gamma)]}{1-\gamma} \right) \right] + B \left[y \left(b - \frac{[1-a(1-\gamma)]}{1-\gamma} \right) \right] + \left[b \frac{R}{2} \sigma_2^2 - br + \frac{b\rho}{1-R} \right] = 0$$

$$\Leftrightarrow B^2 \left[\frac{R}{2} \sigma_1^2 y^2 \left(2a + b - \frac{2}{1-\gamma} \right) \right] + B \left[y \left(a + b - \frac{1}{1-\gamma} \right) \right] + \left[b \frac{R}{2} \sigma_2^2 - br + \frac{b\rho}{1-R} \right] = 0$$

$$\Delta = \left[y \left(a + b - \frac{1}{1-\gamma} \right) \right]^2 - 4 \left[\frac{R}{2} \sigma_1^2 y^2 \left(2a + b - \frac{2}{1-\gamma} \right) \right] \left[b \frac{R}{2} \sigma_2^2 - br + \frac{b\rho}{1-R} \right]$$

Therefore:

$$\begin{aligned} B &= \frac{-y((a+b)(1-\gamma)-1) \pm (1-\gamma)\sqrt{\Delta}}{R\sigma_1^2 y^2 [(2a+b)(1-\gamma)-2]} \\ &= \frac{-y((a+b)(1-\gamma)-1) \pm (1-\gamma)\sqrt{\Delta}}{R\sigma_1^2 y^2 [2(a+b)(1-\gamma)-2-b(1-\gamma)]} \\ &= \frac{Ry \pm (1-\gamma)\sqrt{\Delta}}{R\sigma_1^2 y^2 [2R-b(1-\gamma)]} \end{aligned}$$

$$W(A_t) = B^{b(1-\gamma)} \left[\frac{B}{b} a^{\frac{a(1-\gamma)}{a(1-\gamma)-1}} (a+b)^{\frac{1}{1-a(1-\gamma)}} (y + R\sigma_1^2 y^2 B) \right]^{[a(1-\gamma)-1]} \frac{A^{(a+b)(1-\gamma)}}{(1-\gamma)}$$

We insert the expression of the effective coefficient of risk aversion in the precedent equation and we obtain (equation 12 of the text):

$$W(A_t) = B^{b(1-\gamma)} \left[\frac{B}{b} a^{\frac{a(1-\gamma)}{a(1-\gamma)-1}} (a+b)^{\frac{1}{1-a(1-\gamma)}} (y + R\sigma_1^2 y^2 B) \right]^{[a(1-\gamma)-1]} \frac{A^{1-R}}{(1-\gamma)}$$

Moreover, consumption expenditure can be affected by uncertainty. Effects of σ_2^2 on C_{1t} if $\gamma > 1$ or of σ_1^2 on both C_{1t} and C_{2t} are analytically indeterminate. The following figures provide a numerical computation of these effects based on the set of parameters' values described in section 4.2.

Figure VIII-1 : Figures of numerical computation of the effects of σ_2^2

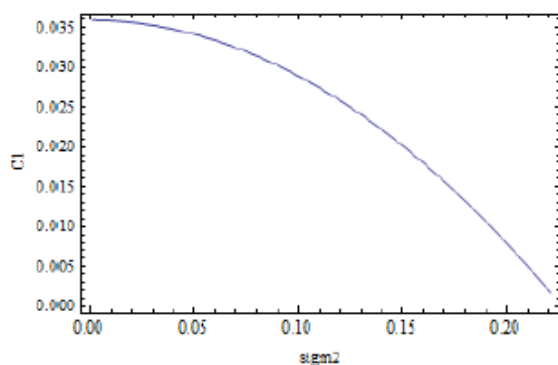


Figure : Effect of σ_2^2 on C_{1t} when $\gamma > 1$

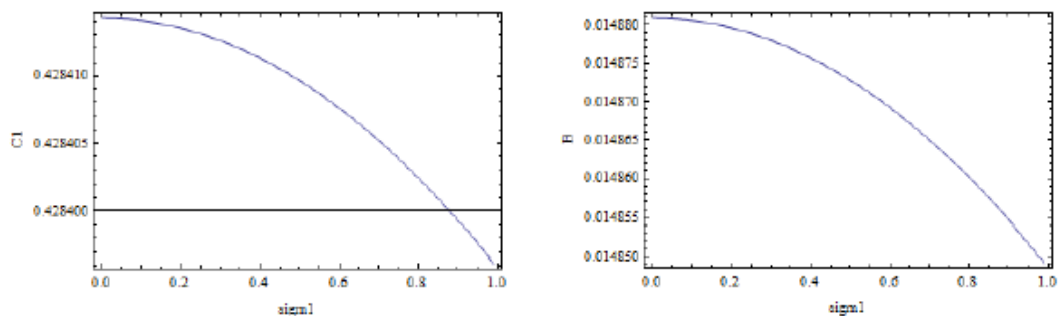
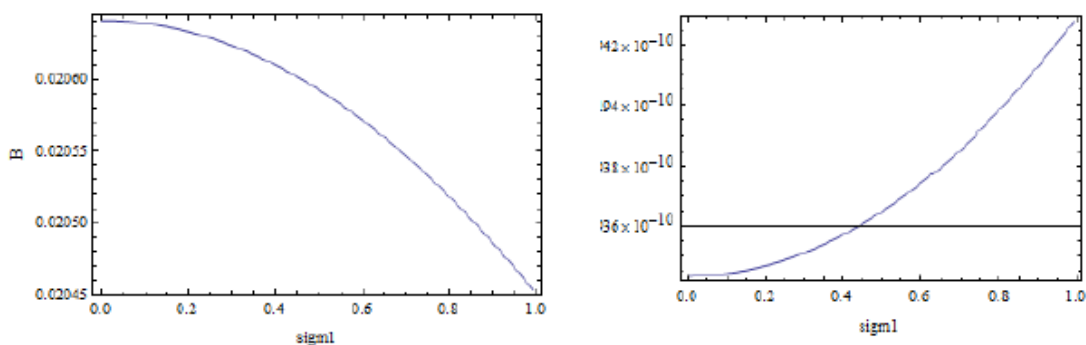


Figure : Effects of σ_1^2 on both C_{1t} and C_{2t} when $\gamma < 1$



B. Solving the optimal program before adoption

Using Itô's lemma, the value function before adoption $V(A\tau)_{\{t < \tau\}}$ has to satisfy:

$$\max_{C_{1t}, C_{2t}} \left\{ \frac{(C_{1t}^a C_{2t}^b)^{1-\gamma}}{1-\gamma} dt + V_A(rA - C_1 - xC_2)dt + \frac{1}{2} \sigma_2^2 A^2 V_{AA} dt \right\} = 0 \quad (47)$$

The first order conditions yield:

$$aC_{1t}^{a(1-\gamma)-1} C_{2t}^{b(1-\gamma)} = V_A$$

$$C_{1t}^{a(1-\gamma)} bC_{2t}^{b(1-\gamma)-1} = xV_A$$

Therefore:

$$C_{1t}^* = \left[a^{1-b(1-\gamma)} \left(\frac{b}{x} \right)^{b(1-\gamma)} \right]^{\frac{1}{R}} V_A^{\frac{-1}{R}}$$

$$C_{2t}^* = a^{\frac{a(1-\gamma)}{R}} \left(\frac{b}{x} \right)^{\frac{1-a(1-\gamma)}{R}} V_A^{\frac{-1}{R}}$$

Replacing consumption by its optimal expression in the Bellman equation and multiplying by $V_A^{\frac{1-R}{R}}$ yields:

$$\frac{R}{1-\gamma} a^{\frac{a(1-\gamma)}{R}} \left(\frac{b}{x} \right)^{\frac{b(1-\gamma)}{R}} + AV_A^{\frac{1}{R}} r + \frac{1}{2} \sigma_2^2 A^2 V_A^{\frac{1-R}{R}} V_{AA} = 0$$

We make the following variable change: $f(A_t) = V_A^{\frac{1}{R}}$ and $f'(A_t) = \frac{1}{R} V_A^{\frac{1-R}{R}} V_{AA}$. Hence, the preceding equation may be written as:

$$\frac{R}{1-\gamma} a^{\frac{a(1-\gamma)}{R}} \left(\frac{b}{x}\right)^{\frac{b(1-\gamma)}{R}} + f(A_t) A_t r + \frac{1}{2} \sigma_2^2 A_t^2 R f'(A_t) = 0$$

We guess that $f(A_t)$ can be written as follows:

$$f(A_t) = \frac{D_1}{A_t} + D_2 A_t^{D_3} \Rightarrow f'(A_t) = -\frac{D_1}{A_t^2} + D_2 D_3 A_t^{D_3-1}$$

where D_1 , D_2 and D_3 are constants to be determined. Then:

$$\frac{R}{1-\gamma} a^{\frac{a(1-\gamma)}{R}} \left(\frac{b}{x}\right)^{\frac{b(1-\gamma)}{R}} + \left(\frac{D_1}{A_t} + D_2 A_t^{D_3}\right) A_t r + \frac{1}{2} \sigma_2^2 R A_t^2 \left(-\frac{D_1}{A_t^2} + D_2 D_3 A_t^{D_3-1}\right) = 0$$

This equation is of the form: $g(A_t) + v = 0$. In order for this condition to be satisfied whatever A_t , one must have: $g(A_t) = 0$ and $v = 0$. Therefore:

$$\frac{R}{1-\gamma} a^{\frac{a(1-\gamma)}{R}} \left(\frac{b}{x}\right)^{\frac{b(1-\gamma)}{R}} + D_1 \left(r - \frac{1}{2} \sigma_2^2 R\right) = 0$$

and

$$r + \frac{1}{2} \sigma_2^2 R D_3 = 0$$

Thus, we obtain D_1 and D_3 :

$$D_1 = \left[\frac{R}{\gamma-1} a^{\frac{a(1-\gamma)}{R}} \left(\frac{b}{x} \right)^{\frac{b(1-\gamma)}{R}} \right] \frac{1}{\left(r - \frac{1}{2} \sigma_2^2 R \right)}$$

$$D_3 = -\frac{r}{\frac{1}{2} R \sigma_2^2}$$

We show that the marginal value of wealth before the switch is:

$$V_A(A_t) = \left[\frac{\frac{R}{\gamma-1} a^{\frac{a(1-\gamma)}{R}} \left(\frac{b}{x} \right)^{\frac{b(1-\gamma)}{R}}}{\underbrace{\left(r - \frac{1}{2} \sigma_2^2 R \right)}_{D_1}} A_t^{-1} + D_2 A_t^{-\frac{r}{\frac{1}{2} R \sigma_2^2}} \right]^R$$

D_2 is a constant which must be determined using the smooth pasting condition (see equation (14) of the text). From the last equation we obtain:

$$\begin{aligned} V_A^{\frac{1}{R}} &= f(A) = \frac{D_1}{A} + D_2 A^{D_3} \\ \Rightarrow V_A &= \left[\frac{D_1}{A} + D_2 A^{D_3} \right]^R \end{aligned}$$

and using the smooth pasting condition (equation (14) in the text):

$$V_A = W_A(A_\tau - \beta) = M(a+b)(A_\tau - \beta)^{-R}.$$

Hence:

$$\begin{aligned} \left[\frac{D_1}{A_\tau} + D_2 A_\tau^{D_3} \right]^R &= M(a+b)(A_\tau - \beta)^{-R} \\ \Leftrightarrow \frac{D_1}{A_\tau} + D_2^{D_3} A_\tau &= \frac{[M(a+b)]^{\frac{1}{R}}}{A_\tau - \beta} \\ \Leftrightarrow D_2 A_\tau^{D_3} &= \frac{[M(a+b)]^{\frac{1}{R}}}{A_\tau - \beta} - \frac{D_1}{A_\tau} \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow D_2 = \frac{[M(a+b)]^{\frac{1}{R}}}{(A_t - \beta)A_t^{D_3}} - \frac{D_1}{A_t^{D_3+1}}.$$

This is the equation (23) in the text.

$$\begin{aligned} \Rightarrow V_A &= \left[\frac{D_1}{A_t} + \left(\frac{[M(a+b)]^{\frac{1}{R}}}{(A_t - \beta)A_t^{D_3}} - \frac{D_1}{A_t^{D_3+1}} \right) A_t^{D_3} \right]^R \\ &= \left[\underbrace{\frac{D_1}{A_t}}_{W_{0A}(A_t)^{1/R}} + \left(\underbrace{\frac{[M(a+b)]^{\frac{1}{R}}}{(A_t - \beta)}}_{W_A(A_t - \beta)^{1/R}} - \underbrace{\frac{D_1}{A_t}}_{W_{0A}(A_t)^{1/R}} \right) \left(\frac{A_t}{A_t} \right)^{D_3} \right]^R \end{aligned}$$

The expression of the marginal value of wealth can be written as follows:

$$V_A(A_t) = \left[\frac{\frac{R}{\gamma-1} a^{\frac{a(1-\gamma)}{R}} \left(\frac{b}{x} \right)^{\frac{b(1-\gamma)}{R}}}{\left(r - \frac{1}{2} \sigma_2^2 R \right)} A_t^{-1} + G(A_t, A_t) \right]^R$$

where $G(A_t, A_t)$ is the option value. It is the equation (20) in the text.

Note that $W_0(A_t)$, the value function of the homeowner in an economy with no technological change, has to satisfy:

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{R}{\gamma-1} a^{\frac{a(1-\gamma)}{R}} \left(\frac{b}{x} \right)^{\frac{b(1-\gamma)}{R}} + A W_{0A} r + \frac{1}{2} \sigma_2^2 A^2 W_{0AA} \\ \Leftrightarrow W_0(A_t) &= \left[\frac{\frac{R}{\gamma-1} a^{\frac{a(1-\gamma)}{R}} \left(\frac{b}{x} \right)^{\frac{b(1-\gamma)}{R}}}{\left(r - \frac{1}{2} \sigma_2^2 R \right)} \right]^R \frac{A^{1-R}}{(a+b)(1-\gamma)} \\ \Leftrightarrow W_0(A_t) &= D_1^R \frac{A^{1-R}}{(a+b)(1-\gamma)} \end{aligned}$$

Finally, notice that in the special case in which $\sigma_1 = 0$ and $x = y$, we have

$$M = D_1^R/(a+b).$$

C. Comparative Statics

Tableau VIII-1 : Comparative Statics with $p=0$

	$\gamma < 1$				$\gamma > 1$		
x	10	20	30	x	2	7	15
A_{τ}	0.82	0.75	0.7	A_{τ}	0.42	0.29	0.24
y	2	4	8	y	0.2	1	1.5
A_{τ}	1.5	2.5	9	A_{τ}	0.25	0.39	0.46
β	0.2	0.4	0.8	β	0.2	0.5	0.8
A_{τ}	1.6	3.4	6.6	A_{τ}	0.53	1.33	2.12
a	0.1	0.4	0.7	a	0.1	0.4	0.7
A_{τ}	0.22	0.39	0.82	A_{τ}	0.20	0.23	0.26
b	0.25	0.30	0.40	b	0.08	0.2	0.4
A_{τ}	0.82	0.90	1.5	A_{τ}	0.65	0.31	0.20
γ	0.45	0.6	0.8	γ	1.2	1.8	2.2
A_{τ}	1.19	0.56	0.41	A_{τ}	0.67	0.29	0.25
σ_1	0.2	0.4	0.8	σ_1	0.5	1	1.5
A_{τ}	0.82	0.82	0.82	A_{τ}	0.265	0.265	0.265
σ_2	0.6	1	1.4	σ_2	0.02	0.06	0.1
A_{τ}	0.76	0.58	0.38	A_{τ}	0.265	0.265	0.265
r	0.01	0.02	0.04	r	0.025	0.035	0.045
A_{τ}	0.36	0.39	0.57	A_{τ}	0.265	0.265	0.265

Tableau VIII-2 : Comparative Statics with $p \neq 0$

	$\gamma < 1$				$\gamma > 1$		
x	5	10	15	x	5	10	15
A_t	0.530	0.505	0.493	A_t	0.314	0.265	0.245
y	0.25	1	1.5	y	0.25	1	1.5
A_t	0.505	0.564	0.589	A_t	0.265	0.392	0.466
β	0.1	0.15	0.2	β	0.1	0.15	0.2
A_t	0.505	0.757	1.009	A_t	0.265	0.399	0.533
a	0.1	0.4	0.7	a	0.1	0.4	0.7
A_t	0.149	0.249	0.505	A_t	0.201	0.233	0.265
b	0.1	0.25	0.5	b	0.1	0.25	0.5
A_t	0.410	0.505	0.828	A_t	0.542	0.265	0.176
γ	0.5	0.6	0.7	γ	1.8	2	2.2
A_t	0.505	0.328	0.229	A_t	0.292	0.265	0.248
σ_1	0.013	1	2	σ_1	0.013	1	2
A_t	0.505	0.505	0.505	A_t	0.265	0.265	0.266
σ_2	0.5	0.75	1	σ_2	0.01	0.1	0.2
A_t	0.505	0.318	0.291	A_t	0.263	0.265	0.244
r	0.02	0.035	0.05	r	0.02	0.035	0.05
A_t	0.311	0.374	0.505	A_t	0.260	0.265	0.265
ρ	0.0001	0.02	0.04	ρ	0.0001	0.02	0.04
A_t	0.505	0.349	0.297	A_t	0.265	0.221	0.200

Chapitre 4 : Modèle Socio- démographique du parc de logement

Dorothée Charlier et Anna Risch

Plan du chapitre :

I.	Introduction	197
II.	Recensement des modèles existants	198
A.	Panorama des différentes méthodologies d'estimation de la consommation énergétique 198	
B.	Les modèles de simulation de la consommation d'énergie.....	203
III.	Modèle d'estimation de la consommation d'énergie primaire du parc et des émissions de gaz à effet de serre français.....	206
A.	Méthodologie générale retenue et la segmentation du parc.....	206
B.	Modélisation de la dynamique du parc de logements	209
1.	Le stock de logements.....	209
2.	Les démolitions	210
3.	Les nouvelles constructions	210
4.	Estimation de l'âge moyen du parc de logements et de leur vétusté énergétique	211
5.	Estimation de la surface des logements	212
C.	Modélisation de la consommation d'énergie	213
1.	La consommation énergétique liée au chauffage et à l'eau chaude	214
2.	La consommation énergétique liée aux appareils électroménagers	219
3.	La consommation énergétique liée à l'éclairage.....	220
IV.	Calibrage.....	223
V.	Résultats	225
A.	Analyse rétrospective	226
B.	Analyse prospective	228
1.	Scénario 1 : la subvention	235
2.	Scénario 2: les primes	236
3.	Scénario 3 : les taxes	238
4.	Scénario 4 : le CIDD	239
5.	Scénario 5 : Combinaisons de mesures.....	240
6.	Résumé	242
VI.	Préconisations	243
VII.	Conclusion	244
VIII.	Bibliographie	246
IX.	Annexes.....	249
A.	Tableau des durées de vie.....	249
B.	Le poids des segments.....	249

Liste des figures et des tableaux :

Figure III-1 : la segmentation du parc	22107
Figure III-2 : le modèle.....	221
Tableau IV-1 : les projections du nombre de ménages.....	223
Tableau IV-2 : prix des énergies	224
Tableau IV-3 : les rénovations en France en 2006 et 2008.....	225
Tableau V-1 : Le nombre de rénovations entre 2006 et 2010 en France.....	228
Figure V-1 : l'évolution de la part des rénovations en France	229
Figure V-2 : l'évolution de la consommation moyenne en France.....	229
Figure V-3 : Evolution du nombre de rénovations	230
Figure V-4 : Evolution de l'âge des bâtiments et de la vétusté	231
Figure V-5 : Evolution des rénovations en fonction des bouquets de travaux et des rénovations par type.	232
Tableau V-2 : le scénario de référence pour la France	234
Tableau V-3 : les plafonds de ressources et les taux applicables par l'ANAH.....	235
Tableau V-3 : les résultats issus de la simulation de la SUBV.....	236
Tableau V-4 : les résultats issus de la simulation de la PRIME1	236
Tableau V-5 : les résultats issus de la simulation de la PRIME2	237
Tableau V-6 : les résultats issus de la simulation de la TAXE1	238
Tableau V-7 : les résultats issus de la simulation de la TAXE2	239
Tableau V-8 : les résultats issus de la simulation du CIDD	240
Tableau V-9 : Les résultats issus du scénario 5.....	241
Tableau IX-1 : le tableau des durées de vie des équipements	249
Tableau IX-2 : le poids des segments.....	249

I. Introduction

Aujourd'hui, au niveau national, le secteur du bâtiment représente 23% des émissions de CO₂ (dont 70% sont générées par le résidentiel) et 46% de la consommation d'énergie finale dont les deux tiers sont consommés dans l'habitat (ANAH, 2008). C'est un secteur qu'il est difficile d'appréhender dans sa globalité et ce, pour plusieurs raisons. Premièrement, il existe une grande variété de bâtiments qui possèdent des caractéristiques techniques très différentes qui sont fonctions des périodes de construction, du type d'habitat (individuel ou collectif), de l'existence ou non de rénovations, de la surface, du climat, ... Deuxièmement, les comportements au sein des habitations peuvent varier d'un ménage à l'autre en fonction du statut d'occupation, du niveau de sensibilité environnementale...

D'autres caractéristiques sont à prendre en compte. La consommation résidentielle totale va dépendre de la capacité des ménages français à investir dans des rénovations énergétiques majeures afin de conduire à une réelle mutation du parc de logements. De plus, au sein de chaque logement, la consommation d'énergie est divisée en trois grandes catégories : la consommation d'énergie dédiée à l'eau chaude et au chauffage, la consommation des appareils électroménagers et la consommation liée à l'éclairage. Le poids de chacune de ces catégories va dépendre des caractéristiques techniques du logement (enveloppe du bâtiment par exemple) et du niveau de confort exigé par chaque ménage (température intérieure).

Afin de comprendre la dynamique inhérente au parc de logements rhônalpin, nous proposons un modèle basé sur une approche bottom-up. Cette approche extrapole la consommation d'énergie estimée d'un ensemble représentatif de résidences principales au niveau régional (et national en annexe). Ce modèle, permettra d'une part, de comprendre la décision de rénovation des ménages mais aussi de mesurer l'impact des politiques sur l'objectif fixé par le gouvernement soit diviser par 4 les émissions de GES d'ici à 2050 et atteindre une consommation énergétique de 50

kWh_{ep}/m²/an.

Nos objectifs sont les suivants :

- réaliser une estimation de la consommation énergétique et des émissions de GES du parc de logements français jusqu'en 2050 ;
- comprendre les mécanismes à l'origine de la décision de rénovation des ménages ;
- évaluer l'impact des politiques environnementales dans une perspective du facteur 4.

L'idée est d'obtenir un niveau de détail suffisant pour permettre la simulation de politiques environnementales, telles que le crédit d'impôt, l'éco-prêt à taux zéro et des éventuelles subventions ou taxes.

L'originalité du modèle réside dans le fait que nos estimations de consommations énergétiques ne sont pas uniquement déterminées par des facteurs physiques ou thermiques. Ainsi, nous introduisons des variables socio-économiques. Dans le cadre de l'estimation de la consommation liée à l'eau chaude et au chauffage, nous tenons compte des rénovations qui affectent les consommations moyennes. Les rénovations sont fonctions du revenu des individus, de leur statut d'occupation et de leur taux d'endettement. L'objectif est d'identifier des strates de population afin d'appliquer des mesures adéquates au public visé. Finalement, pour déterminer la consommation énergétique liée à chaque usage, nous devons comprendre la dynamique inhérente au parc de logements.

A notre connaissance, il n'existe pas de modèle similaire au nôtre à l'échelle régionale comme nationale.

II. Recensement des modèles existants

A. Panorama des différentes méthodologies d'estimation de la consommation énergétique

Pour réaliser notre travail, nous avons, au préalable, essayé de recenser les modèles

qui utilisaient une approche similaire à la nôtre. En effet, pour cerner la dynamique du parc de logements français, nous proposons un modèle basé sur une approche bottom-up. Cette approche se compose de deux méthodologies distinctes : la méthode statistique et la méthode d'ingénierie. La méthode statistique lie l'information historique et les analyses de régression. Ces dernières sont utilisées pour comprendre la consommation d'énergie d'un logement pour un usage final particulier (chauffage par exemple). Une fois la relation établie entre une catégorie de logements et des variables explicatives, l'étude peut être étendue à un stock plus important de logements. Les méthodes d'ingénierie, quant à elles, expliquent la consommation d'énergie en fonction du taux d'utilisation des équipements ou de la thermodynamique du bâti. L'avantage de ce type de méthode est que le niveau de détail permet de cibler assez précisément les points d'amélioration que l'on peut apporter. L'idée sous jacente dans ce type de modèle est qu'il existe un logement représentatif pour un sous-groupe de la population. Il existe 3 grandes familles de méthodes d'ingénierie : les distributions, les archétypes et l'échantillon. Nous allons dorénavant détailler ces méthodes d'ingénierie car nous nous en sommes particulièrement inspirées.

- Les méthodes d'ingénierie
 - L'approche par la distribution

Le premier modèle, ou l'approche par la distribution, permet d'affecter à des appareils électriques un taux d'utilisation en utilisant la répartition des technologies. Nous pouvons citer les travaux de Jaccard et Bailie (1996). Ils partent d'un cadre d'analyse en équilibre partiel et prennent en considération la consommation énergétique des périodes précédentes, le prix, les paramètres de comportement, les niveaux de distribution des technologies, la quantité consommée pour chaque appareil, le coût et la disponibilité. Ils simulent l'achat de nouveaux appareils. Leurs résultats suggèrent que dans l'intérêt de la société, il serait nécessaire de poursuivre les politiques publiques qui favorisent le remplacement des équipements de

chauffage avec une vigueur égale ou supérieure à celle déployer dans l'innovation pour l'amélioration de l'efficacité énergétique en faveur de la réduction des émissions de CO2 dans le secteur résidentiel.

Kadian et al (2007), ont développé quant à eux, un modèle d'estimation de la consommation énergétique du secteur résidentiel à Delhi. Ils étudient les centres urbains car ce sont les principaux consommateurs d'énergie et de pollution de l'air notamment à cause de l'augmentation de la population ces dernières années. Ils ont recours à de nombreux scénarios et hypothèses d'évolution des consommations pour diminuer la pollution d'ici à 2020. Ils obtiennent les meilleurs résultats dans le scénario qui favorise, d'une part, l'amélioration des investissements en économie d'énergie et, d'autre part, qui introduit de nombreuses politiques publiques en faveur de la réduction des émissions.

Huang et Broderick (2000) ont développé un modèle sur l'utilisation du chauffage et de la climatisation aux USA. Ils utilisent un segment par famille soit 16 grandes familles et 45 familles simples. Ces archétypes sont simulés sur 16 régions différentes. L'objectif est de montrer la contribution des murs, du toit, des fenêtres, de l'isolation. Chacun de ces modèles a permis de calculer la consommation électrique liée à chaque utilisation d'appareil. La principale valeur ajoutée de leur travail est qu'ils montrent que pour diminuer la consommation énergétique, il faut renforcer l'efficacité des constructions.

- L'archétype

La deuxième méthode, appelée "archétype" est en fait une méthode de segmentation du stock de logement par des caractéristiques observables comme les vitrages, la taille de l'habitation, le type de maison, etc... Il est possible de définir des archétypes pour chaque classe majeure de logements et d'utiliser ces définitions pour modéliser un logement représentatif tout en multipliant ce dernier par le nombre de logements de chaque segment. Pareck (2005) décrit dans son document l'intérêt de procéder à des archétypes pour la simulation. L'auteur montre qu'il faut disposer des éléments suivants pour créer des archétypes : (i) des caractéristiques géométriques (formes

verticales ou horizontales, en L, ...) (ii) des caractéristiques thermiques (localisation) et des paramètres opérationnels. Des données de chaque archétype sont analysées pour déterminer des caractéristiques représentatives de chaque segment dans le but final de pouvoir faire de la simulation. Ainsi, il montre que cette méthode est pratique pour simuler l'impact de politiques environnementales notamment sur les nouvelles constructions.

Kohler et al (1997), ont développé un modèle pour les bâtiments allemands. Ils ont recours à une double approche : macro-économique pour le calcul de l'ensemble des flux et des évolutions économiques et bottom-up pour ce qui concerne la dynamique du parc (nouvelles constructions, rénovations et démolitions). Ils décomposent le stock de bâtiments et les classent en fonction de leur âge et de leur surface. Ils utilisent une approche stochastique avec pour référence 160 bâtiments. Leur scénario d'évolution du stock de bâtiment est basé sur des tendances de long terme. Ils montrent que pour assurer la dynamique du parc, un taux de rénovation théorique est indispensable ainsi qu'un taux de démolition plus important que celui qu'ils ont actuellement (0.25%).

Finalement, Shimoda et al (2004), ont développé un modèle de consommation finale d'énergie dans le secteur résidentiel à l'échelle de la ville d'Osaka au Japon. Ils ont sélectionné 20 catégories de logements et 23 types de ménages représentatifs à travers la ville. Toutefois, chaque logement a été considéré comme ayant un niveau d'isolation identique. Chaque archétype a été simulé et multiplié par le nombre de logements de ce segment. Ils montrent que la quantité d'énergie consommée est fonction du type de ménage et de la surface du logement. De plus, la consommation énergétique est influencée par les normes gouvernementales. Il existe un effet significatif entre la consommation de chauffage et la réglementation thermique ou entre la consommation d'électricité et la performance des appareils électroménagers. Toutefois, leur étude prend aussi en considération les effets de la consommation énergétique liée à la climatisation, ce qui interfère fortement dans leurs résultats.

Cependant, la méthode de l'archétype a une limite majeure : elle peut être très restrictive si elle se borne uniquement à des données techniques.

- L'échantillonnage

Finalement, la dernière approche est le recours à l'échantillon. Cette méthode permet de prendre en compte une grande variété de logements et donc plusieurs profils de consommation. Farahbaksh et al. (1998) ont développé un modèle pour le stock de logements canadiens basés sur 16 archétypes et des données provenant de 8767 logements issues de la National Housing Survey. En effet, le secteur résidentiel est le troisième secteur le plus consommateur d'énergie au Canada et ils souhaitent simuler l'effet de différents scénarios (notamment celui des réglementations thermiques) sur la consommation énergétique résidentielle. Ils concluent que des économies d'énergie significatives peuvent être réalisées en appliquant ces standards. Toutefois, leur modèle est uniquement basé sur la consommation du stock existant et sur les nouvelles constructions. Ils ne tiennent pas compte des rénovations.

Plus récemment, Larsen et Nesbakken (2004), ont développé un modèle en combinant deux méthodes d'estimation de la consommation d'énergie finale : une méthode par ingénierie fondée sur les données de la Norwegian Energy Survey et une méthode économétrique d'analyse conditionnelle de la demande basée sur la même étude. Leur modèle repose sur un grand nombre d'équations et la consommation d'énergie totale est calculée pour chaque ménage en additionnant la somme d'énergie dédiée au chauffage et à l'eau chaude, à l'éclairage, et aux appareils électroménagers. Ils utilisent une estimation économétrique pour déterminer la consommation d'énergie finale de chaque usage. Ils obtiennent que la consommation d'électricité est significativement plus élevée pour les ménages qui disposent de sèche linge, de lave-vaisselle ou de chauffage électrique d'appoint comparativement à ceux qui en sont dépourvus *ceteris paribus*. Malheureusement, dans leur étude, ils présentent des estimations pour une année uniquement et ne donnent pas de tendance.

B. Les modèles de simulation de la consommation d'énergie

▪ Les déterminants de la consommation d'énergie

Avant de s'intéresser aux différents modèles de simulation recensés dans la littérature, nous nous intéressons dans un premier temps aux déterminants de la consommation d'énergie.

La littérature sur le sujet nous a permis de mettre en évidence les variables clés qui interviendront dans notre modèle et qui sont en grande partie responsables de la consommation énergétique.

Il est couramment admis que la consommation énergétique est influencée d'une part par l'efficacité technique mais aussi d'autre part par des facteurs de style de vie et socio-économiques (c'est-à-dire la taille du ménage, la composition, le revenu, le niveau d'éducation, le type d'emploi, la taille de la municipalité... , (Weber & Perrels, 2000 ; Vandegrift & DiCaro, 1999).

Hausman (1979) montre que la demande en énergie dans le secteur résidentiel dépend de deux éléments :

- du niveau d'utilisation des appareils électriques
- de l'efficacité énergétique de ces équipements.

De plus, des auteurs ont montré que l'une des décisions clés des ménages en matière de consommation énergétique est le choix du combustible pour le chauffage. Ils se sont concentrés sur l'utilisation du gaz et de l'électricité par les ménages pour se chauffer, s'éclairer et faire fonctionner les appareils électroménagers. Nous pouvons notamment citer les travaux de Silk et Joutz (1997). Ils ont procédé à une estimation de la demande énergétique à partir de données américaines pour la période de 1949 à 1993. Leurs résultats suggèrent que les différences de comportements observés sur le long et le court terme sont corrélés avec des modifications des niveaux des variables financières comme les taux d'intérêt de long terme. Par contre, il semblerait qu'il n'y ait pas de substitution entre le pétrole et les autres énergies même quand on assiste une envolée des prix. Visiblement, ils ont pu capté dans leur modèle les effets des politiques en faveur de l'environnement ce qui les laisse supposer que leur approche

puisse être adaptée pour mesurer l'effet des futures mesures.

Vaage (2000) trouve sur des données norvégiennes établies d'après une enquête auprès de 2289 ménages que l'âge du logement et son type influence significativement le choix du mode de chauffage. Dans les bâtiments récents, c'est-à-dire construits après 1975, la probabilité d'utiliser uniquement l'électricité est plus élevée (Van Soest & Bulte, 2001). Par ailleurs, ils montrent clairement l'influence directe, sur la demande d'énergie, des caractéristiques des ménages. Cela comprend la taille du ménage, le type et l'âge du bâtiment, le nombre de personnes dans le ménage, le climat et le statut de l'occupant.

- Les modèles internationaux

Pour commencer notre modèle nous nous sommes basées sur les travaux de Thierry Bréchet (2000) qui ont été réalisés pour la Belgique. Ce dernier a créé un modèle (LOCATELLI) dont l'objectif est de déterminer le nombre de mètres carrés de maisons unifamiliales construits chaque année à l'horizon de 2020. C'est un modèle flux-stock qui décrit le parc de logements en fonction des démolitions, des nouvelles constructions et des rénovations. La taille des nouvelles constructions sont des variables endogènes qui dépendent de l'évolution de la structure de la population. Afin de simuler l'effet de ces différentes variables sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre, il a recourt à deux types de méthodes : une méthode *ceteris paribus* où il neutralise l'effet de certaines variables et une méthode incrémentale où il introduit des variables d'intérêt en laissant les autres constantes. Il utilise des scénarios qui permettent d'observer précisément l'effet de chaque variable d'intérêt sur la surface des habitations et sur les émissions de CO₂. Toutefois, son modèle s'intéresse seulement aux maisons individuelles et non pas à l'intégralité du parc.

Siller, Kost et Imboden (2007), ont développé un modèle décrivant le développement temporel du stock de bâtiment et de la demande d'énergie (chauffage et eau chaude) à l'horizon de 2050. La construction des nouveaux bâtiments et la rénovation des bâtiments existants dépend de standards énergétiques. Le premier scénario présenté est tendanciel et obtenu en extrapolant les valeurs actuelles. Ensuite, ils font varier

ces standards. Ils montrent qu'une stratégie efficace doit consister à réduire les besoins en énergie des bâtiments en rénovant d'une part et en remplaçant les équipements existants par des technologies plus performantes d'autre part. Les nouvelles constructions n'interviennent que très peu sur la consommation d'énergie totale.

- Les modèles réalisés pour la France

Toutefois, en France, il existe très peu de modèles à notre connaissance. Au niveau national, l'Agence Nationale de l'Habitat (ANAH), a tenté de modéliser les performances énergétiques du parc de logements en 2008. Pour réaliser leur étude, ils ont segmenté le parc en 156 segments en fonction des caractéristiques de l'habitat. Ensuite, ils déterminent la distribution des performances énergétiques pour chacun de ces segments. Cela leur permet d'isoler les segments les plus consommateurs d'énergie afin de faire des recommandations de politiques publiques. Malheureusement, leur modèle ne leur permet pas de simuler l'impact des politiques environnementales. Laurent et al. (2006) se focalisent sur des scénarios de rénovation du parc résidentiel à 2030. Ils font la distinction entre trois grands scénarios : un scénario tendanciel, un scénario sur les apports de la construction neuve dans l'évolution des consommations du parc et un scénario basé sur une approche volontariste. Ils comparent les gains énergétiques obtenus au coût engendré par les rénovations et concluent que le marché actuel de la rénovation est peu efficace et ne permet pas d'atteindre le facteur 4 en France. Pour le moment, nous avons recensé uniquement un modèle de simulation qui vise les mêmes objectifs que nous. Il est réalisé au sein de l'ADEME. Toutefois, nos approches sont différentes notamment dans la construction des modèles. Leur modèle a été construit sur la base des étiquettes énergie et a une quantité de bouquet de rénovations très importante (216 bouquets de rénovations possibles). En revanche, ils n'ont pas procédé à une segmentation du parc par quintile de revenu et catégories de ménages. Les simulations sont en cours de réalisations et les résultats ne sont pas encore disponibles, mais à première vue, nos deux modèles semblent donc

complémentaires. Il sera intéressant à l'avenir de confronter nos résultats.

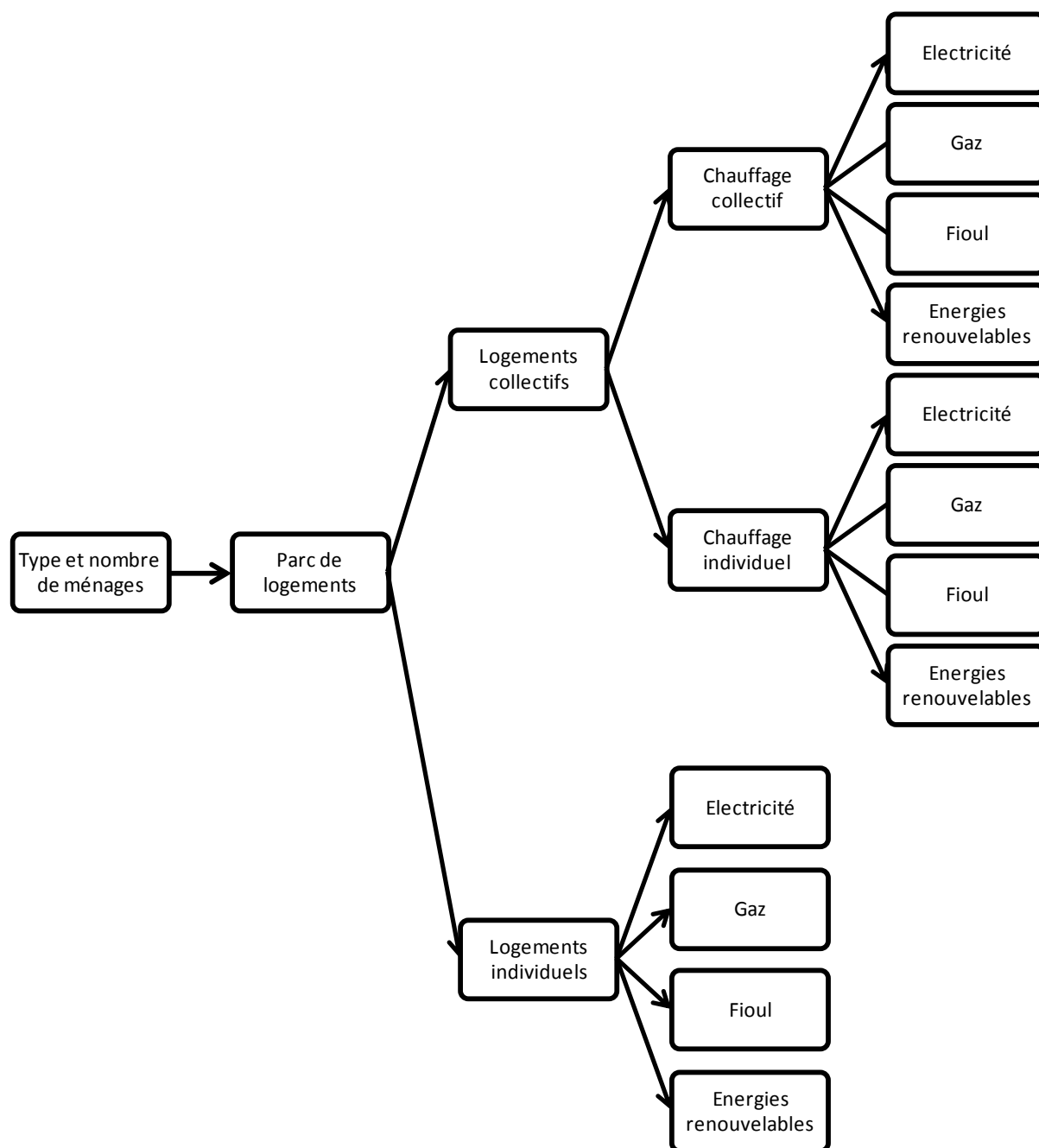
III. Modèle d'estimation de la consommation d'énergie primaire du parc et des émissions de gaz à effet de serre français

A. Méthodologie générale retenue et la segmentation du parc

Pour estimer la consommation énergétique et les émissions de GES nous avons décidé de retenir comme approche méthodologique la méthode bottom-up. L'idée est d'obtenir la consommation énergétique et les émissions de GES pour un logement représentatif et de le multiplier par le poids de cette catégorie dans le parc. Toutefois, pour ce faire, nous devons tenir compte des caractéristiques des ménages et de la demande en énergie liée à ce type de logements.

Nous divisons le parc de logements en 12 segments i , en fonction du type de logement (individuel ou collectif) et du mode de chauffage principal (individuel ou collectif ; électrique, au gaz, au fioul, ou utilisant des énergies renouvelables). Concernant les logements collectifs, pour estimer la consommation énergétique liée au chauffage et à l'eau chaude, nous faisons une distinction entre les logements dont le mode de chauffage est commun à la copropriété et ceux dont le mode de chauffage est individuel. En effet, les comportements des usagers sont différents dans ces deux catégories de logements. Nous estimerons donc l'évolution de chaque segment et leur consommation énergétique de manière séparée. Nous avons donc 12 logements représentatifs. La segmentation générale est résumée dans le schéma ci-dessous.

Figure III-1 : la segmentation du parc



Ensuite, la consommation énergétique totale et les émissions de GES sont calculées séparément en fonction de différents usages finaux. On en retient trois :

-la consommation énergétique et les émissions de GES liées au chauffage et à l'eau chaude sanitaire ;

- la consommation énergétique et les émissions de GES liées aux appareils électroménagers ;
- la consommation énergétique et les émissions de GES liées à l'éclairage.

Au total, nous avons 12 segments dont la consommation énergétique est répartie en 3 usages pour chacun d'eux. Le calcul de la consommation énergétique et des émissions de GES est résumé dans les trois points suivants.

1. Pour calculer la consommation liée à l'utilisation du chauffage et de l'eau chaude, nous devons disposer de caractéristiques techniques comme la consommation moyenne d'un logement en fonction de sa période de construction, de sa surface, de son type, de son isolation (vitrage, toiture, murs et plancher), de sa vétusté, de ses équipements de chauffage... et de caractéristiques socio-économiques sur les occupants des logements (statut d'occupation, quintile de revenu des ménages par exemple) qui vont déterminer la réalisation de rénovation. Le calcul des consommations en fonction des paramètres techniques a été réalisé sur des logiciels de simulations basés la méthode 3CL. Cette consommation énergétique et les émissions de GES sont déterminés pour chaque segment. Nous avons ainsi réalisé un DPE pour chacun des 12 logements représentatifs.

2. Pour estimer la consommation liée aux appareils électroménagers, nous avons divisé la consommation totale en fonction du type d'appareils (8 catégories et une catégorie "autres") et de leur étiquette énergie. Nous tenons compte aussi de la possibilité pour certains d'entre eux comme la télévision ou l'ordinateur d'avoir une consommation supplémentaire liée à la mise en veille.

3. Concernant l'éclairage, la consommation énergétique moyenne pour un logement est liée aux nombres et aux types de lampes (standard, à économie d'énergie ou halogène).

Pour estimer le plus justement possible la consommation énergétique et les émissions

de GES, nous devons tenir compte de la dynamique inhérente au parc de logements. Pour permettre la construction du stock du parc de logements et assurer sa dynamique jusqu'en 2050, nous avons introduit des variables socio-économiques qui viennent modifier le nombre de rénovations et de nouvelles constructions. En effet, dans le cadre des nouvelles constructions, nous tenons compte de l'évolution de la population et des ménages. La dynamique de rénovation, quant à elle, est dépendante du niveau de revenu des individus et d'une analyse coût-bénéfice des solutions présentes sur le marché.

En résumé, nous avons construit notre modèle en deux étapes parallèles. D'une part, il a fallu construire la dynamique du parc de logements et ensuite, il a été nécessaire de modéliser la consommation énergétique par usage pour chaque logement représentatif.

B. Modélisation de la dynamique du parc de logements

1. Le stock de logements

Pour chaque segment, le stock de logements de l'année t ($NTOT_{it}$) correspond au besoin en logements des ménages. Il est donc fonction de l'évolution du nombre et de la structure des ménages.

Nous considérons la population ($POPTOT_t$) comme exogène et répartis en 5 catégories de ménages (nous retenons la même classification que l'INSEE) :

- Personnes célibataires ($SING$),
- Couples sans enfant ($COUP0$),
- Couples avec enfant ($COUPC$),

- Familles monoparentales (*MONO*),
- Autres types de ménages (*OTHR*).

Chaque catégorie de ménages se caractérise par une propension à se loger dans un type défini de logement. La structure des ménages et sa modification dans le temps sont des facteurs qui vont avoir un impact sur la demande en logements.

Dans notre modèle, le stock de logements ($NTOT_t$) correspond au nombre de ménages. Le stock de logements est donc endogène. L'évolution de la structure et de la composition des ménages est, quant à lui, exogène. Pour estimer la demande en logement jusqu'en 2050, nous nous baserons sur des scénarios d'évolution de la population et de la structure des ménages de l'INSEE.

Pour connaître le nombre moyen de personnes par ménage (variable *SIZE*), nous divisons la population totale par le nombre de ménages ($\frac{POPTOT_t}{NTOT_t}$).

2. Les démolitions

Le nombre de logements démolis (ND_{it}) correspond à un pourcentage du parc de logements de l'année précédente ($NTOT_{it-1}$) soit :

$$ND_{it} = nd_{it} \cdot NTOT_{it-1} \quad (1)$$

Avec nd_{it} le taux de démolition qui est exogène et constant sur la période.

3. Les nouvelles constructions

Les nouvelles constructions correspondent au stock de logements auquel on retranche le stock de logements de l'année précédente ($NTOT_{it-1}$) et les démolitions de l'année (ND_{it}), plus ou moins les logements qui ont effectué une rénovation de type 5 en fonction du segment dans lequel on se trouve ($SAUTSEGMENT_{it}$). En effet, pour les logements dont le mode de chauffage principal est soit le gaz, l'électricité ou le fioul, on retranchera de l'équation les logements qui ont choisi le mode de

chauffage principal "énergie renouvelable". Inversement, pour les deux segments dont le mode de chauffage principal est une énergie renouvelable, on les ajoutera au stock de logements. Toutefois, sur les premières années, nous considérons que l'énergie renouvelable est uniquement utilisée en appoint. Nous obtenons donc l'équation suivante :

$$NC_{it} = NTOT_{it} - NTOT_{it-1} + ND_{it} \pm SAUTSEGMENT_{it} \quad (2)$$

(1)

Ainsi, les nouvelles constructions sont la résultante de l'équation ci-dessus.

4. Estimation de l'âge moyen du parc de logements et de leur vétusté énergétique

Nous estimons l'âge moyen des bâtiments (AGE_{it}). Ces derniers évoluent au cours du temps en fonction uniquement des nouvelles constructions (NC_{it}) et des démolitions (ND_{it}). Nous avons donc l'équation suivante :

$$AGE_{it} = \frac{(1 + AGE_{it-1}) \cdot NTOT_{it-1} + NC_{it} - ND_{it} \cdot AGE_{it-1}}{NTOT_{it-1} + NC_{it} - ND_{it}} \quad (3)$$

Nous avons aussi choisi d'estimer la vétusté énergétique du parc. Cette dernière est un indicateur de l'obsolescence d'un logement. Elle est différente de l'âge puisqu'elle évolue en fonction des rénovations qui ont lieu sur une année. (La dynamique de rénovation, quant à elle, est expliquée dans la partie dédiée à La consommation énergétique liée au chauffage et à l'eau chaude page 214). Nous considérons que les nouvelles constructions ont un an et que les démolitions ont l'âge moyen du parc de l'année précédente. Nous calculons le nombre d'année de rajeunissement que l'on peut attribuer aux logement qui viennent de faire une rénovation du type r (RAJ_{rit}) et $RENTOT_{it}$ est le nombre total de rénovations.

Nous avons donc le calcul suivant :

$$\begin{aligned} & \text{VETUSTE}_t \\ &= \frac{(1 + \text{VETUSTE}_{it-1}) \cdot \text{NTOT}_{it-1} + \text{NC}_{it} - \text{ND}_{it} \cdot \text{VETUSTE}_{it-1} + \sum_1^r \text{REN}_{irt} \cdot (\text{VETUSTE}_{it} - \text{RAJ}_{irt})}{\text{NTOT}_{it-1} + \text{NC}_{it} - \text{ND}_{it} + \text{RENTOT}_{it}} \end{aligned} \quad (4)$$

5. Estimation de la surface des logements

a. La surface des nouvelles constructions

Pour déterminer les surfaces nouvellement construites (SC_{it}), nous nous basons sur des données issues de l'INSEE. Nous calculons les taux de croissance moyen du parc individuel et collectif (sc_{it}) depuis 1949 jusqu'en 2006. Nous obtenons donc deux taux, un pour les segments appartenant aux logements individuels et un autre pour les segments appartenant au collectif, que nous appliquons jusqu'en 2050. Le taux de croissance des surfaces des nouvelles constructions (sc_{it}) est une variable exogène et constante sur la période.

$$SC_{it} = sc_{it} * NC_{it} \quad (5)$$

b. Les surfaces moyennes démolies

Nous estimons les surfaces démolies (SD_{it}) en multipliant le nombre de démolitions (ND_{it}) par la surface moyenne des logements en $t - 1$ des logements appartenant au segment i ($SMOY_{i,t-1}$) de la manière suivante :

$$SD_{it} = ND_{it} \cdot SMOY_{i,t-1} \quad (6)$$

c. La surface moyenne et la surface totale des logements

La surface totale des logements en temps t ($STOT_{it}$) est le produit entre surface moyenne du segment i à la période t ($SMOY_{it}$) et le nombre de logements ($NTOT_{it}$). On écrit que :

$$STOT_{it} = NTOT_{it} \cdot SMOY_{it} \quad (7)$$

Et :

$$SMOY_{it} = \frac{NTOT_{it-1} \cdot SMOY_{it-1} + NC_i \cdot SC_{it} - ND_i \cdot SMOY_{it-1}}{NTOT_{it}} \quad (8)$$

C. Modélisation de la consommation d'énergie

Pour rappel, nous avons décidé de retenir comme approche méthodologique la méthode bottom-up. L'idée est d'obtenir la consommation énergétique pour un logement représentatif en kWh_{ep}/m²/an et de le multiplier par le poids de cette catégorie dans le parc.

Dans un premier temps, nous divisons la consommation énergétique du parc en 3 usages finaux : la consommation liée au chauffage et à l'eau chaude, la consommation liée à l'éclairage et la consommation électrique liée aux appareils électroménagers.

Chaque consommation est donc représentée par une variable $USAGE_{jt}$ avec t la période de temps considérée. Dans le cadre de cette étude, nous établissons un modèle pour la période 2006-2050.

$$USAGE_{jt} = \{CHAUFFAGE; ELECTR; ECLAIRAGE\} \quad (9)$$

La consommation énergétique totale en kWh_{ep}/an est donc la somme de la consommation énergétique de chaque usage.

$$CONSOTOT_t = \sum_{j=1}^3 USAGE_{jt} \quad (10)$$

Il en est de même pour les émissions de gaz à effet de serre en kg/CO₂ :

$$GESTOT_t = \sum_{j=1}^3 USAGE_GES_t \quad (11)$$

$USAGE_GES_j$ représente les émissions de gaz à effet de serre.

Ainsi, pour avoir la consommation énergétique totale de chaque usage, il convient d'additionner la consommation énergétique de chaque segment i pour un usage donné. Par exemple, pour obtenir la consommation d'énergie liée au chauffage et à l'eau chaude, nous estimons la consommation propre à chaque logement représentatif que nous pondérons par le poids du segment dans le parc de logement.

$$USAGE_{jt} = \sum_1^{12} USAGE_{ijt} \quad (12)$$

Dorénavant, nous allons évaluer de manière distincte la consommation liée à chaque usage :

- la consommation liée au chauffage et à l'eau chaude en kWh_{ep}/m²/an,
- la consommation liée aux appareils électroménagers en kWh_{ep}/m²/an,
- la consommation liée à l'éclairage en kWh_{ep}/m²/an.

Afin de ne pas alourdir la présentation, la méthodologie présentée ci-dessous sert à calculer la consommation énergétique du parc. Pour le calcul des émissions, la méthode est strictement la même.

1. La consommation énergétique liée au chauffage et à l'eau chaude

La consommation énergétique primaire liée au chauffage et à l'eau chaude en kWh_{ep}/an est la somme de la consommation énergétique de chaque segment :

$$USAGE_CHAUFFAGE_t = \sum_1^8 USAGE_CHAUFFAGE_{it}. \quad (13)$$

Nous allons donc déterminer la consommation de chauffage en kWh_{ep}/m²/an pour chaque segment. Cette dernière est une moyenne annuelle calculée en fonction de :

- la consommation annuelle de référence pour un logement du segment compte tenu de ses caractéristiques (année de construction, surface, âge du logement) en l'absence d'une quelconque rénovation ($CHAUFF_REF_{it}$) en kWh_{ep}/m²/an;
- la consommation annuelle des logements qui ont fait l'objet d'une rénovation

améliorant l'efficacité énergétique en kWh_{ep}/m²/an ;

- la consommation des nouvelles constructions qui est fonction des réglementations thermiques (CHAUFF_NC_{it}).

La consommation moyenne de chauffage dans le segment i à la période t tient compte de la consommation moyenne des nouvelles constructions, de la consommation moyenne de référence (USAGE_CHAUFFAGE_{it}) pour un logement n'ayant subi aucune rénovation (soit l'ensemble des logements du parc: NTOT_{it}, moins les logements rénovés: RENTOT_{it}), de la consommation moyenne d'un logement ayant effectué une rénovation du type r (REN_{rit}) dans le segment i à la période t . Cette dernière se calcule comme une différence entre la consommation moyenne de référence (CHAUFF_REF_{rit}) et le gain apporté par la rénovation r (GAIN_{rit}) en kWh_{ep}/m²/an.

$$\begin{aligned} \text{USAGE_CHAUFFAGE}_{it} = & \text{CHAUFF_REF}_{it} \cdot (\text{NTOT}_{it} - \text{RENTOT}_{it}) + \text{CHAUFF_NC}_{it} \cdot \text{NC}_{it} + \\ & \sum_1^r (\text{CHAUFF_REF}_{rit} - \text{GAIN}_{rit}) \cdot \text{REN}_{rit} \end{aligned} \tag{14}$$

Dans notre modèle, nous considérons 5 catégories de rénovations pour les logements individuels et 6 pour les logements collectifs :

- les mesures de vitrage (REN_1) ;
- l'isolation des murs (REN_2) ;
- l'isolation du toit (REN_3) ;
- le changement des équipements de chauffage, d'eau chaude sanitaire et de ventilation en faveur de technologies plus récentes (REN_4) ;
- le changement du combustible en faveur des énergies renouvelables (REN_5).
- l'individualisation du mode de chauffage pour les logements collectifs avec un mode de chauffage collectif (REN_6).

Chaque ménage peut choisir d'effectuer une seule rénovation ou plusieurs. Toutefois, nous considérons qu'un ménage ne peut pas effectuer simultanément un changement des équipements de chauffage (REN_4) et un changement de combustible (REN_5) car cette dernière rénovation va nécessairement de pair avec le renouvellement des

équipements du ménage. Nous obtenons finalement 23 combinaisons possibles de rénovations dans l'individuel et 35 dans le collectif.

Par ailleurs, chacune des rénovations est fonction :

- de la probabilité qu'un ménage investisse dans une rénovation compte tenu de son quintile de revenu et d'une analyse coût/bénéfice entre le gain potentiel actualisé lié à la rénovation et le coût financier de la mesure (PI_{rit});
- de la probabilité que la copropriété vote la mesure dans les logements collectifs ($PROBA_COPRO_{rit}$).

Nous avons donc l'équation suivante pour les logements individuels :

$$REN_{rit} = NTOT_{it} \cdot PI_{rit} \quad (15)$$

Et pour les logements collectifs :

$$REN_{rit} = NTOT_{it} \cdot PI_{rit} \cdot PROBA_COPRO_{rit} \quad (16)$$

Nous allons donc procéder en deux étapes. Premièrement, nous calculons la probabilité qu'un ménage investisse dans une rénovation en efficacité énergétique et, deuxièmement, nous calculons la probabilité que la copropriété vote la mesure dans les logements collectifs.

Etape 1 : Calcul de la probabilité que les ménages investissent dans une rénovation (PI_{rit})

La probabilité que les ménages investissent dans une rénovation (PI_{rit}) est une fonction logique qui dépend d'une analyse coût-bénéfice (le gain actualisé potentiel d'une rénovation ($GAIN_{rit}$) est confronté à son coût total ($COUT_{rit}$)) et de la contrainte financière des ménages à investir dans une rénovation. Cette probabilité est aussi fonction du statut d'occupation. Elle est plus faible dans le cas où le logement est habité par un locataire, car ces derniers ont moins d'incitation à

rénover. En effet, un propriétaire voit son bien prendre de la valeur à la suite d'une rénovation, ce qui n'est pas le cas d'un locataire.

- Les fonctions de gain

Nous avons donc créé 3 catégories de fonctions de gains :

-les gains en kWh_{ep}/m²/an

-les gains en euros

-les gains en quantité de gaz à effet de serre.

Les équations obtenues pour les gains sont des fonctions qui tiennent compte de la vétusté énergétique du logement. Nous avons établi une relation linéaire entre la vétusté énergétique du logement et les gains engendrés par une rénovation. Il est en effet plus facile de gagner un kWh lorsque le logement n'a jamais été rénové que pour un logement récent. Etant donné que nous allons comparer un gain annuel en euros à un coût total supporté au moment de la rénovation, nous actualisons le bénéfice espéré pour obtenir une valeur actualisée nette :

$$VAN_{it} = \sum_{t=1}^T \frac{GAIN_{it}}{(1+i)^T} \quad (3)$$

Nous avons choisi pour i le taux d'intérêt du marché de long terme et pour t la durée de vie moyenne des équipements. Cette dernière est disponible dans l' Annexe 1.

Pour le calcul des gains en euros, nous tenons compte des évolutions des prix de l'énergie. Ces derniers sont issus des scénarios d'évolution de l'Agence Internationale de l'Energie. Les prix en début de période sont issus de la base de données PEGASE. Le gain correspondant à chaque rénovation et combinaisons de rénovations est recalculé dans le modèle chaque année. Finalement, nous avons pris en compte dans les fonctions de gain en euros, la possibilité d'introduire une taxe carbone. Effectivement, si le gouvernement vient à taxer les logements très consommateurs d'énergie, la taxe viendra s'ajouter comme un gain pour le ménage qui souhaite rénover.

- Les fonctions de coût :

Le coût des rénovations en euros dépend du prix de la rénovation en euro par m². Le ménage peut contracter deux types d'emprunt : un prêt travaux conventionnel et un prêt à taux zéro. Il peut aussi bénéficier d'un crédit d'impôt et d'une subvention. Ces deux dernières mesures viennent donc diminuer le coût de la rénovation. Pour chacune d'entre elles, nous avons introduit des plafonds qui sont soit fonction du montant en euros de la rénovation soit des quintiles de revenu. Nous tenons compte de l'autoproduction et de l'impact de cette dernière sur l'octroi du CIDD, de l'éco-prêt et de la TVA au taux réduit. La part de l'autoproduction est variable dans le temps. Elle dépend du ratio entre le coût total d'une mesure (main d'œuvre comprise) et le coût sans main d'œuvre. Plus le coût de la main d'œuvre est élevé, plus la part de l'autoproduction est forte. Les équations de coûts sont calculées chaque année.

- La contrainte financière des ménages

La contrainte financière des ménages dépend du quintile de revenu, du statut d'occupation, du revenu disponible moyen, du taux d'épargne, de la part de cette épargne consacrée à des mesures d'investissement en économie d'énergie et d'un taux d'endettement possible maximal qui est fonction des quintiles de revenu et du statut d'occupation. Si la contrainte de crédit du ménage est inférieure au coût de la rénovation r , nous fixons $PI_{rit} = 0$.

Sinon, nous calculons la durée qui permet de rentabiliser l'investissement. En effet, nous avons un coût ponctuel total et des gains annuels actualisés. Si nous comparons uniquement le coût au gain, aucun ménage n'investira jamais. Nous devons tenir compte de la valeur actualisée nette du projet et de la durée d'amortissement de l'investissement. Si la valeur actualisée nette est positive, le ménage se pose la question de l'investissement et il regarde la durée nécessaire pour rentabiliser son projet. Il est fixé comme seuil raisonnable celui de 5.2 ans avec une marge jusqu'à 7 ans. Ce seuil correspond à la durée moyenne d'occupation des logements. Au delà de cette durée, les ménages investissent peu dans des mesures en efficacité énergétique quelque soit leur statut d'occupation.

Ainsi, si la contrainte financière des ménages est supérieure au coût de la rénovation

r , nous calculons la durée nécessaire pour rentabiliser l'investissement T_{rit}

En fonction de la durée obtenue, nous attribuons une probabilité PI . Cette probabilité est plus faible dans le cas où l'occupant est locataire. Nous avons choisi de faire décroître cette probabilité au cours du temps. La probabilité PI_{rit} est une valeur comprise entre 0 et 1.

Etape 2 : Calcul de la probabilité que la propriété vote la mesure dans les logements collectifs (*PROBA_COPRO*)

Il nous a semblé pertinent d'introduire un frein dans les logements collectifs. Les investissements qui doivent être votés à la majorité par les assemblées des propriétaires ont une probabilité moindre d'être acceptée. Les raisons à ce refus peuvent être multiples. A titre d'exemple, un individu qui n'a pas la nécessité de beaucoup se chauffer car son appartement est bien situé serait moins enclin à payer pour un investissement économiseur d'énergie.

Etape 3 : Lien avec l'offre

Compte tenu des travaux réalisés sur l'offre, il a été mis en évidence que les acteurs de l'offre (concepteurs, distributeurs, artisans...) ne peuvent pas satisfaire entièrement la demande de rénovations, soit par le manque de main d'œuvre soit par un manque de compétence. C'est pourquoi nous avons considéré que quand le nombre de rénovations est très élevé, l'ensemble des demandes de rénovations ne peuvent pas être toutes satisfaites.

2. La consommation énergétique liée aux appareils électroménagers

Notre objectif est d'avoir la consommation énergétique type d'un segment.

$$USAGE_ELECTRO_t = \sum_1^8 USAGE_ELECTRO_{it} \quad (17)$$

Avec :

$$USAGE_ELECTRO_{it} = \sum_1^n APPAREILS_{it} \quad (18)$$

La consommation électrique liée aux appareils électroménagers dans un logement représentatif ($USAGE_ELECTRO_{it}$) en kWh_{ep}/m²/an est la somme de la consommation moyenne de chaque type d'appareil. Nous tenons compte des appareils suivants : le réfrigérateur, le congélateur, le lave-vaisselle, le lave-linge, le sèche-linge, le four, la télévision, les ordinateurs ainsi qu'une consommation supplémentaire relative aux autres appareils que l'on peut trouver dans un logement (cafetière, boiler, tondeuse...).

Nous attribuons à chaque appareil une consommation moyenne qui est calculée en fonction :

- de leur étiquette énergie,
- de la probabilité que les ménages soient équipés d'un appareil appartenant à une étiquette énergie précise (cette probabilité évolue au cours du temps, pour les étiquettes énergie A ou A+ elle est comprise entre 0 et 1 de 2006 à 2030 et égale à 1 à partir de 2030),
- du taux d'utilisation des appareils (constant au cours du temps),
- et du taux d'équipement des ménages qui est exogène et constant sur la période (source INSEE).

Pour les ordinateurs et les téléviseurs, nous comptabilisons une consommation d'énergie supplémentaire liée à la mise en veille.

3. La consommation énergétique liée à l'éclairage

La consommation énergétique primaire liée à l'éclairage ($USAGE_ECLAIRAGE_t$) en kWh_{ep}/an à la période t peut se calculer de la manière suivante :

$$USAGE_ECLAIRAGE_t = \sum_1^8 USAGE_ECLAIRAGEM_{it} \quad (19)$$

Chaque ménage français possède 22 lampes et consomme environ 350 kWh par an pour son éclairage sachant que le logement a une surface moyenne de 110 m². Les lampes basse consommation consomment 4 à 5 fois moins que les lampes standard (Source : ADEME). Ainsi, nous avons estimé qu'il y a dans un logement environ 0.25

lampes par m^2 , et que la consommation d'une lampe standard est de 16 $kWh_{ep}/m^2/an$ et la consommation d'une lampe à économie d'énergie est environ de 4 $kWh_{ep}/m^2/an$. La consommation d'une ampoule halogène est d'environ 53 $kWh/m^2/an$. Ainsi, la consommation liée à l'éclairage en t dans un logement représentatif en $kWh_{ep}/m^2/an$ ($USAGE_ECLAIRAGE_{it}$) est égale à la somme entre la part des ampoules standards dans le logement ($RLSTAND_{it}$) multipliée par le nombre d'ampoules (NB_LAMPES_{it}) et leur consommation énergétique en $kWh_{ep}/m^2/an$, additionnée à la part des ampoules à économie d'énergie dans le logement ($RLECO_{it}$) fois le nombre d'ampoules (NB_LAMPES_{it}) et leurs consommations énergétiques moyennes et additionnée à la part des ampoules dans le logement ($RHALO_{it}$) fois le nombre d'ampoules (NB_LAMPES_{it}) et leurs consommations énergétiques moyennes en $kWh_{ep}/m^2/an$.

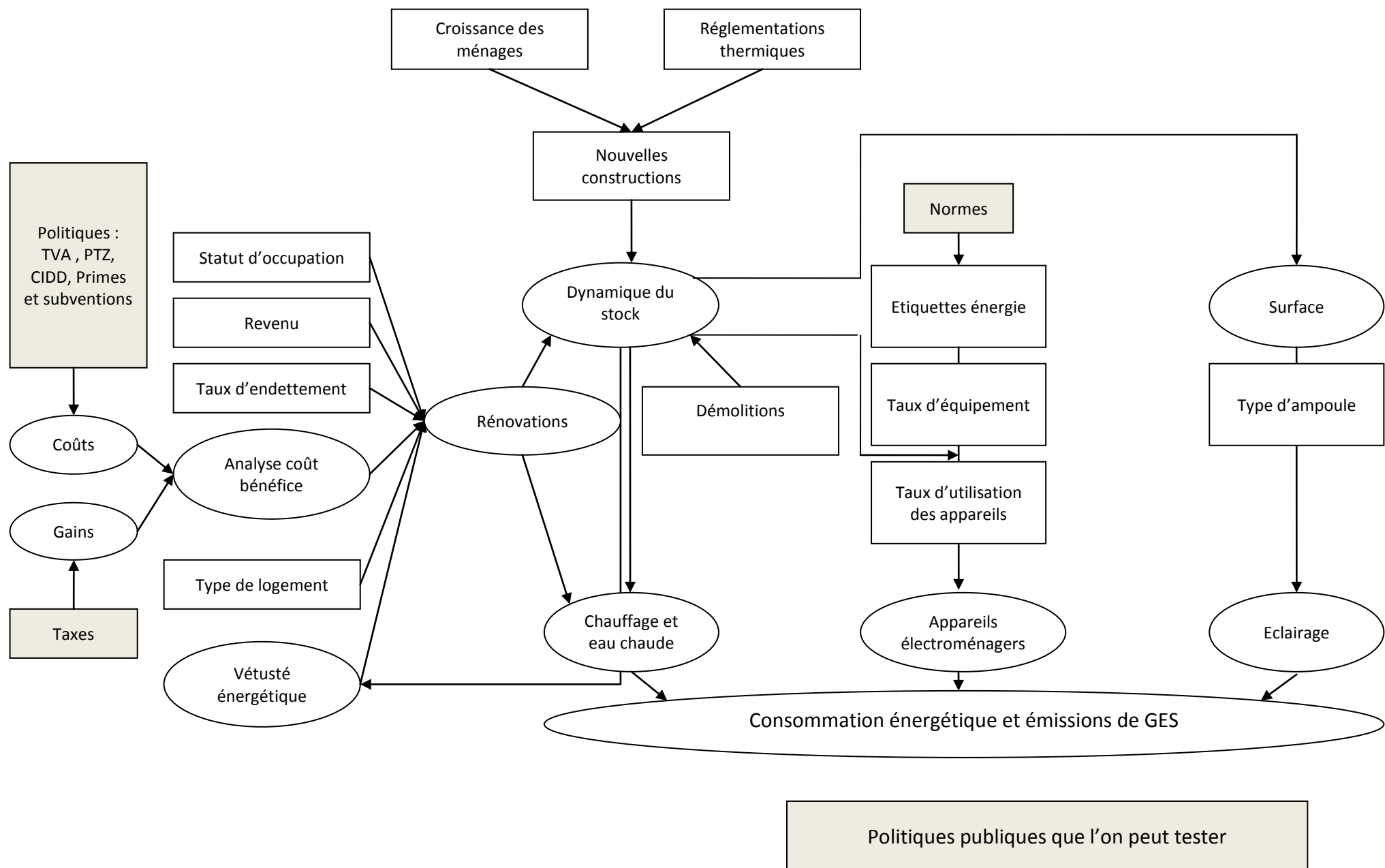
D'où:

$$USAGE_ECLAIRAGE_{it} = RLSTAND_{it} \cdot NB_LAMPES_{it} \cdot 16 + RLECO_{it} \cdot NB_LAMPES_{it} \cdot 4 + RHALO_{it} \cdot NB_LAMPES_{it} \cdot 53 \quad (20)$$

En résumé, nous représentons schématiquement le modèle dans le schéma ci-dessous. Les variables endogènes sont représentées par des cercles tandis que les variables exogènes sont encadrées. Les différentes politiques environnementales qu'il est possible de tester sont surlignées en gris.

La dynamique du stock de logement est fonction des démolitions, des nouvelles constructions et des rénovations. Les nouvelles constructions sont le résultat de la croissance de la population et leur consommation énergétique ainsi que leurs émissions sont déterminées par les réglementations thermiques. Les rénovations, quant à elle, sont la résultante d'une analyse coût bénéfice des ménages et de leur contrainte financière (de leur probabilité d'investir). Les différentes politiques environnementales interviennent dans les coûts et les gains. La dynamique du parc et les surfaces nouvelles construites ont un impact sur la consommation liée à l'éclairage et aux appareils électroménagers.

Figure III-2 : le modèle



IV. Calibrage

Pour estimer la consommation énergétique du parc jusqu'en 2050, nous avons calibré le modèle en 2006 à l'aide de données issues :

- (i) de l'enquête logement 2006 de l'INSEE,
- (ii) du ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer
- (iii) des logiciels de simulation issus de la méthode 3CL.

En ce qui concerne la dynamique du parc de logements, la majorité des données relatives à la population et à la modification de sa structure dans le temps sont issues des projections de l'INSEE. Nous considérons que le poids relatif de chaque catégorie de ménages se modifie dans le temps. L'INSEE projette une augmentation des personnes seules et des familles monoparentales au détriment des couples avec et sans enfant. De plus, elle estime que la population française s'établira à 73 millions d'individus en 2040 et 29,5 millions de ménages. Nous calibrons donc nos évolutions de structure de la population en fonction de ces projections.

Tableau IV-1 : les projections du nombre de ménages

Projections de ménages pour la France métropolitaine, à l'horizon 2030

	1999	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Ménages par type :							
personne seule	30,9%	33,0%	35,4%	37,9%	39,6%	41,5%	43,2%
en couple	59,0%	56,2%	53,8%	51,3%	49,6%	47,8%	46,1%
famille mono-parentale	8,0%	8,2%	8,2%	8,3%	8,3%	8,2%	8,2%
pas de famille	2,0%	2,6%	2,6%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%
Nombre de personnes par ménage	2,41	2,31	2,24	2,19	2,14	2,09	2,04

Champ : France métropolitaine

Source : Insee, projections de ménages

Les données sur le logement et la construction proviennent du service de l'observation et de la statistique du ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer. Les prix de l'énergie retenus sont les suivants :

Tableau IV-2 : prix des énergies

	tarifs domestiques TTC pour 100 kWh en 2006	Hausse anticipée des prix à partir de 2010 (hors inflation)
Fioul domestique €/Mwh	64,90	1,3 %
Gaz naturel €/MWh	63,50	1,6 %
Electricité €/Mwh	117,10	1,1 %

Source : PEGASE (en 2006) et IEA pour les prévisions.

NB : Nous considérons une inflation de 2% par an sur toute la période.

Le taux de démolition retenu est de 0.05% par an dans l'individuel et de 0.005% par an dans le collectif. De plus, nous avons calculé pour l'année de référence l'âge moyen des logements représentatifs et leur vétusté énergétique par segment et par quintile grâce à leur période de construction. Nous obtenons un âge moyen du parc français d'environ 60 ans. Par ailleurs, nous savons qu'en 2006, environ 9.67% des logements ont été rénovés en vue d'une amélioration énergétique (source : OPEN-ADEME). Toutefois, ce résultat est aussi fonction des politiques publiques en faveur des investissements économiseurs d'énergie qui existaient à cette période (crédit d'impôt, prêt à taux zéro, subvention...). Le calibrage des probabilités de rénovations prennent en compte ces dernières. Pour chaque logement représentatif du parc, les consommations énergétiques moyennes ont été estimées à l'aide de logiciels de simulation en fonction des caractéristiques des logements. Ces logiciels se basent sur la méthode 3CL⁷². Des variables de description du parc de logements sont utilisées pour estimer les consommations énergétiques. Nous nous référons à l'âge des logements, à leurs caractéristiques d'isolation (vitrage, toiture, murs et planchers) et à leur équipement de chauffage et eau chaude sanitaire. Ainsi, nous calibrons le modèle pour avoir une consommation d'énergie finale par mètre carré et par an de 196 kWh/m²/an en 2008 (ADEME, 2010).

⁷² Les méthodes de calcul applicables pour la réalisation des DPE, définies par l'arrêté du 15 septembre 2006 sont au nombre de 3: 3CL-DPE, Comfie-DPE et DEL6-DPE. (Source : ADEME). Pour tout renseignement complémentaire, se référer à l'arrêté ministériel portant approbation de diverses méthodes de calcul pour le diagnostic de performance énergétique en France métropolitaine.

Tableau IV-3 : les rénovations en France en 2006 et 2008

	2006	2008
Nombre de rénovations conduisant à une amélioration énergétique	2520000	2360000
Nombre total de logements	26069046	26645721*
Part des rénovations	9.67%	8.86%

Source : OPEN (nombre de rénovations) et INSEE (pour le nombre de logements)

*Résultat provenant d'une estimation

Parallèlement, nous avons utilisé un logiciel de traitement et d'analyse des données afin d'obtenir des données de l'enquête logement 2006 à un niveau très détaillé non disponibles via l'INSEE. Nous pouvons citer comme exemple le pourcentage de propriétaires par quintile de revenu et par segment. Ensuite, nos données sur les consommations de référence en kWh et GES pour un logement représentatif sont issues des logiciels de simulation de DPE.

V. Résultats

Nous allons estimer l'effet des politiques environnementales sur le nombre de rénovations réalisé, la structure du parc, ainsi que sur la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre. Nous testons notamment les effets :

- du crédit d'impôt développement durable, avec les différents plafonds qui sont fonction de la composition du ménage,
- de l'éco-prêt à taux zéro, avec des plafonds qui dépendent du bouquet de rénovations réalisé, sachant que l'éco-prêt est cumulé au crédit d'impôt sous certaines conditions de ressources,
- de l'allègement de la TVA à 5,5% pour les travaux d'économie d'énergie dans le logement,

- de différentes subventions, comprenant les aides de l'ANAH, et des collectivités locales, avec différents taux et plafonds qui peuvent dépendre du niveau de revenu du ménage, du type de rénovations réalisées ou du type de chauffage,
- des primes, qui représentent un montant fonction également du niveau de revenu du ménage, des rénovations réalisées et du type de chauffage, sachant qu'elles ne sont pas toujours cumulables avec les subventions,
- des taxes éventuelles qui peuvent dépendre des émissions de gaz à effet de serre, de la consommation énergétique ou du combustible principal utilisé pour le chauffage,
- des normes, comme par exemple l'utilisation d'appareils électroménagers de rang A et A+ uniquement, ou d'ampoules à économie d'énergie.

Le crédit d'impôt, l'éco-prêt à taux zéro, les subventions et les primes viennent diminuer le coût des rénovations, alors que les taxes viennent diminuer les gains.

Nous pouvons estimer les effets séparés mais également simultanés de plusieurs de ces politiques. Nous serons en mesure de calculer le nombre de rénovations qui auraient de toute façon été réalisées si nous n'avions pas mis en place de politiques (proche de l'effet d'aubaine). Maintenant, nous allons présenter l'ensemble des résultats pour la France.

A. Analyse rétrospective

Nous allons présenter les résultats obtenus à l'horizon en simulant le modèle avec les politiques qui existaient en 2006.

En 2006, l'âge moyen du parc est de 63.5 ans. La consommation énergétique moyenne du parc est identique à la moyenne nationale soit pour rappel $295 \text{ kWh}_{ep}/\text{m}^2/\text{an}$ en 2007 tout usage inclus (chauffage, eau chaude sanitaire, éclairage et eau chaude sanitaire) et $36.3 \text{ kg. CO}_2/\text{m}^2$. Environ 81% des logements rénovés sont des résidences individuelles. Par ailleurs, 8 % des rénovations réalisées par les ménages sont des changements du vitrage tandis que l'isolation des murs et du toit représentent respectivement 23% et 26% des rénovations. Les ménages préfèrent ces mesures car elles permettent d'économiser rapidement de l'énergie à moindre coût. Les appoints ENR semblent des mesures attractives car 33% des rénovations les concernent. Très

peu de ménages changent leur équipement de chauffage et quasiment aucun logement collectif avec chauffage collectif ne choisit l'individualisation du mode de chauffage.

En l'absence de politiques publiques (sauf TVA), nous aurions obtenu un taux de rénovation de 0.56% en 2006 et une consommation énergétique moyenne du parc de 315.9 kWh_{ep}/m²/an en 2007. En comparant le bénéfice actualisé et le coût des mesures, nous remarquons que très peu de solutions énergétiques sont rentables ou finançables par les ménages. La solution la plus accessible est l'isolation du bâti (murs et toit) et le changement des appareils de chauffage et d'eau chaude en faveur des ENR. Toutefois, une combinaison de ces rénovations est rentable dans les logements individuels uniquement. Ce sont les ménages les plus aisés (à partir du 3ème quintile de revenu) et ceux qui vivent dans des logements dont le mode de combustible principal est le fioul et l'électricité qui seront le plus enclin à investir dans ces solutions. Dans les logements collectifs, la solution qui sera le plus souvent adoptée est l'isolation des murs par l'intérieur et uniquement dans les logements collectifs avec un chauffage individuel.

Si on introduit uniquement le crédit d'impôt, la part des rénovations s'élèvent à 3.45% en 2006. Celles-ci sont essentiellement réalisées dans des résidences individuelles dont le mode de combustible principal est le fioul.

En considérant uniquement le prêt à taux zéro, le nombre de rénovations supplémentaires est de 2,917,068 pour la période de 2006 à 2009. Le pourcentage de logements rénovés grâce au prêt chaque année ne cesse de croître sur la période.

Avec la subvention de l'ANAH, la rénovation la plus souvent choisie par les ménages est l'isolation des murs. Les quintiles des revenus les plus faibles ont pu ainsi bénéficier d'une aide ce qui se traduit par des rénovations dans les logements collectifs avec un chauffage électrique. Environ 82% des rénovations concernent l'isolation des murs et du toit.

En totalisant la somme des rénovations politique par politique, 7475853 logements ont été rénovés. Si nous cumulons l'ensemble des trois mesures, nous obtenons 2009634 logements rénovés supplémentaires. De plus, 695008 ménages auraient de toute

façon rénové en l'absence de politiques.

L'ensemble des résultats concernant les rénovations sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V-1 : Le nombre de rénovations entre 2006 et 2010 en France

	2006	2007	2008	2009	TOTAL
FRANCE					
Sans mesure	146079	146356	146651	255922	695008
En % du parc total	0.56%	0.56%	0.56%	0.95%	
Avec crédit d'impôt	898687	947888	977721	974491	3798787
En % du parc total	3.45%	3.6%	3.68%	3.63%	
Avec prêt à taux zéro	609162	645483	742687	919736	2917068
En % du parc total	2.34%	2.45%	2.79%	3.77%	
Avec subvention	167434	168018	168623	255923	759998
En % du parc total	0.64%	0.64%	0.63%	0.95%	
Avec les trois mesures	2518702	2486265	2330845	2149675	9485487
En % du parc total	9.67%	9.44%	8.76%	8%	

Source : Résultats provenant des simulations

B. Analyse prospective

En maintenant de manière tout à fait similaire mais en intégrant jusqu'en 2050 les politiques qui existent en 2010 (tout en tenant compte des réglementations thermiques), nous obtenons une consommation moyenne du parc de 102.4 kWh_{ep}/m²/an en 2050 ce qui est bien supérieur à l'objectif fixé.

La dynamique de rénovation sur la période suit trois grandes étapes :

- on constate une très forte baisse sur les premières années où la mesure est introduite.
- Puis, nous remarquons une période de quasi-stabilisation
- Enfin, le nombre de rénovations augmente progressivement de 2015 à 2050.

Figure V-1 : l'évolution de la part des rénovations en France

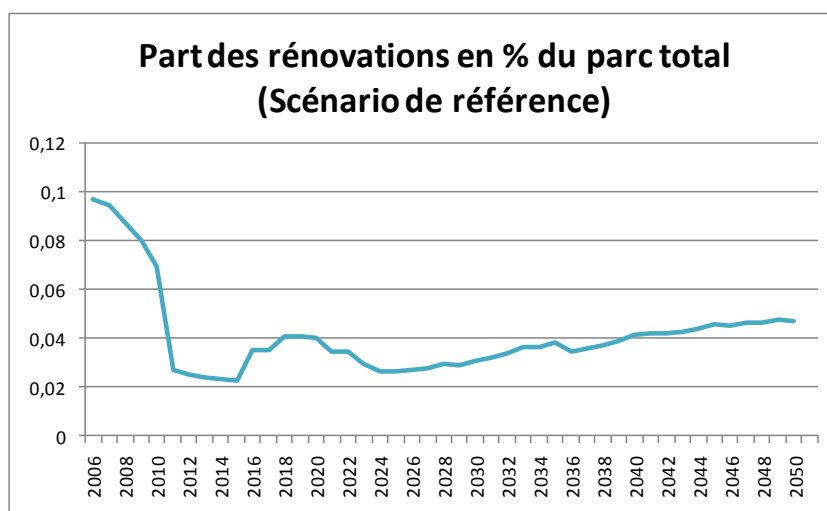
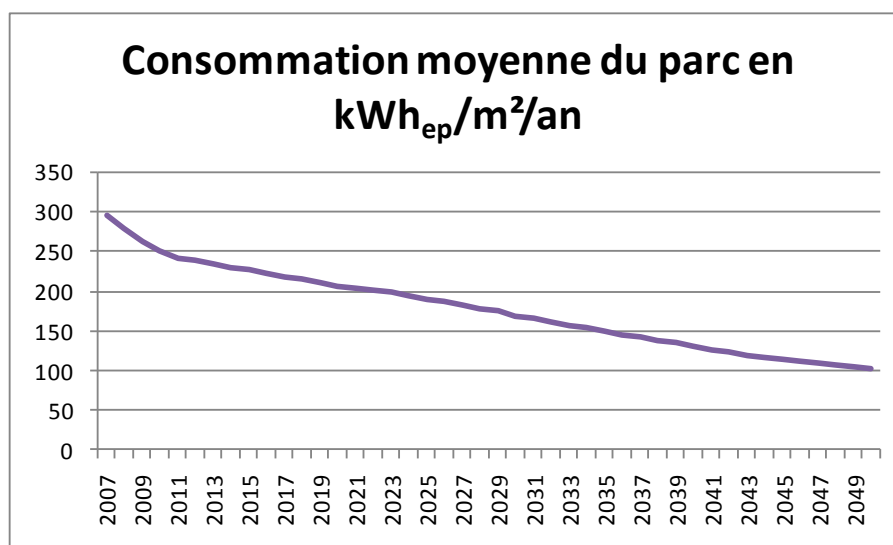


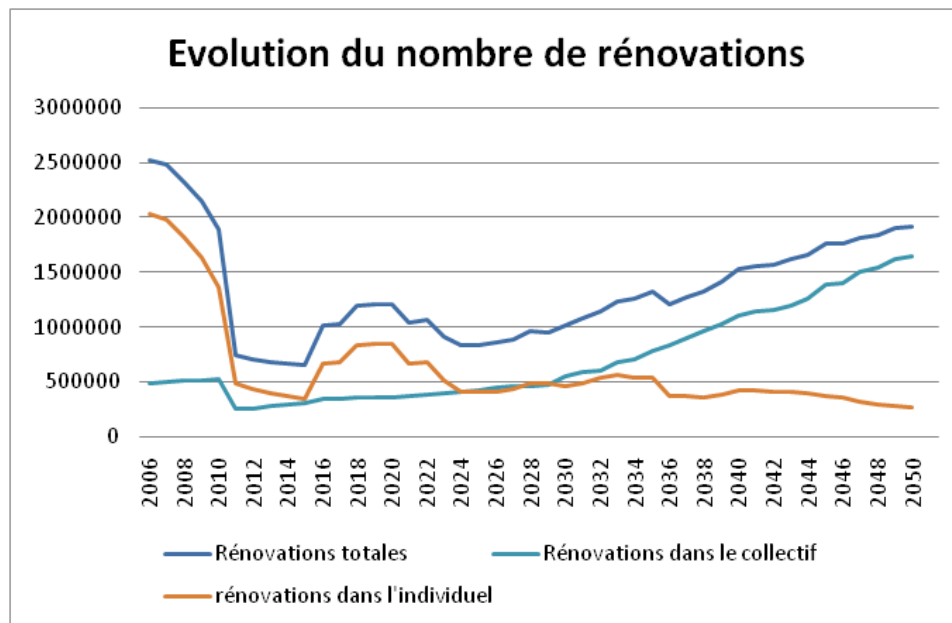
Figure V-2 : l'évolution de la consommation moyenne en France



En analysant le graphique, nous constatons un très fort essoufflement des rénovations les premières années. Par contre, la chute est plus prononcée dans les logements individuels. En France, le nombre de rénovations dans le collectif est moins important que dans l'individuel. En conséquence, la consommation moyenne en 2050 est plus élevée dans le collectif que dans l'individuel. Ce phénomène peut être lié au fait qu'il y a plus de locataire dans les logements collectifs et que les décisions sont plus difficilement prises (car elles doivent être prises à la majorité). Les ménages sont donc moins incités à rénover. En effet, en 2050, la consommation

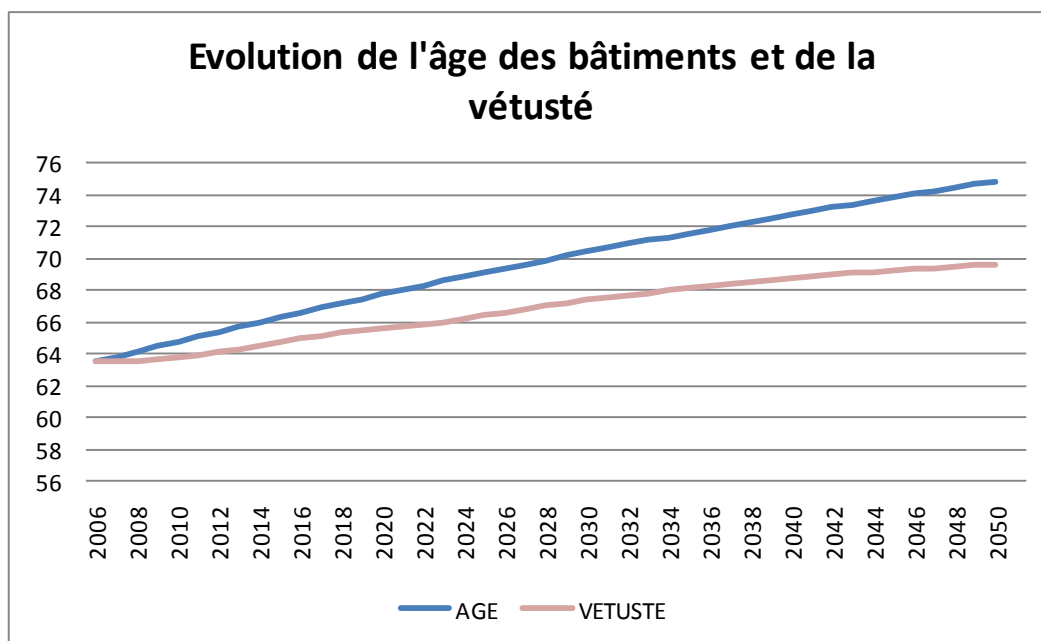
énergétique moyenne dans l'individuel est de $79.05 \text{ kWh}_{ep}/\text{m}^2/\text{an}$ (5.7 kg de CO_2 émis) et dans le collectif de $127.8 \text{ kWh}_{ep}/\text{m}^2/\text{an}$ (19.1 de CO_2 émis) avec une consommation plus forte enregistrée pour le collectif avec chauffage collectif soit $160.6 \text{ kWh}_{ep}/\text{m}^2/\text{an}$ (37.8 kg de CO_2 émis).

Figure V-3 : Evolution du nombre de rénovations



Dans cette configuration, le poids de chacun des segments s'est modifié (cf annexe 2). Comme nous pouvons le constater, les ENR ont pris une place plus importante en 2050. En revanche, ce résultat est nettement plus marqué dans les logements individuels que collectifs. Ce n'est pas très surprenant car il est plus facile de changer ses équipements et son mode de chauffage dans ce type de logement. D'une façon générale, nous voyons que ce sont les logements individuels qui se sont le plus modifiés dans le temps. Compte tenu de l'évolution de la population, le logement collectif représente une part plus importante en 2050 qu'en 2006 (43% contre 48%).

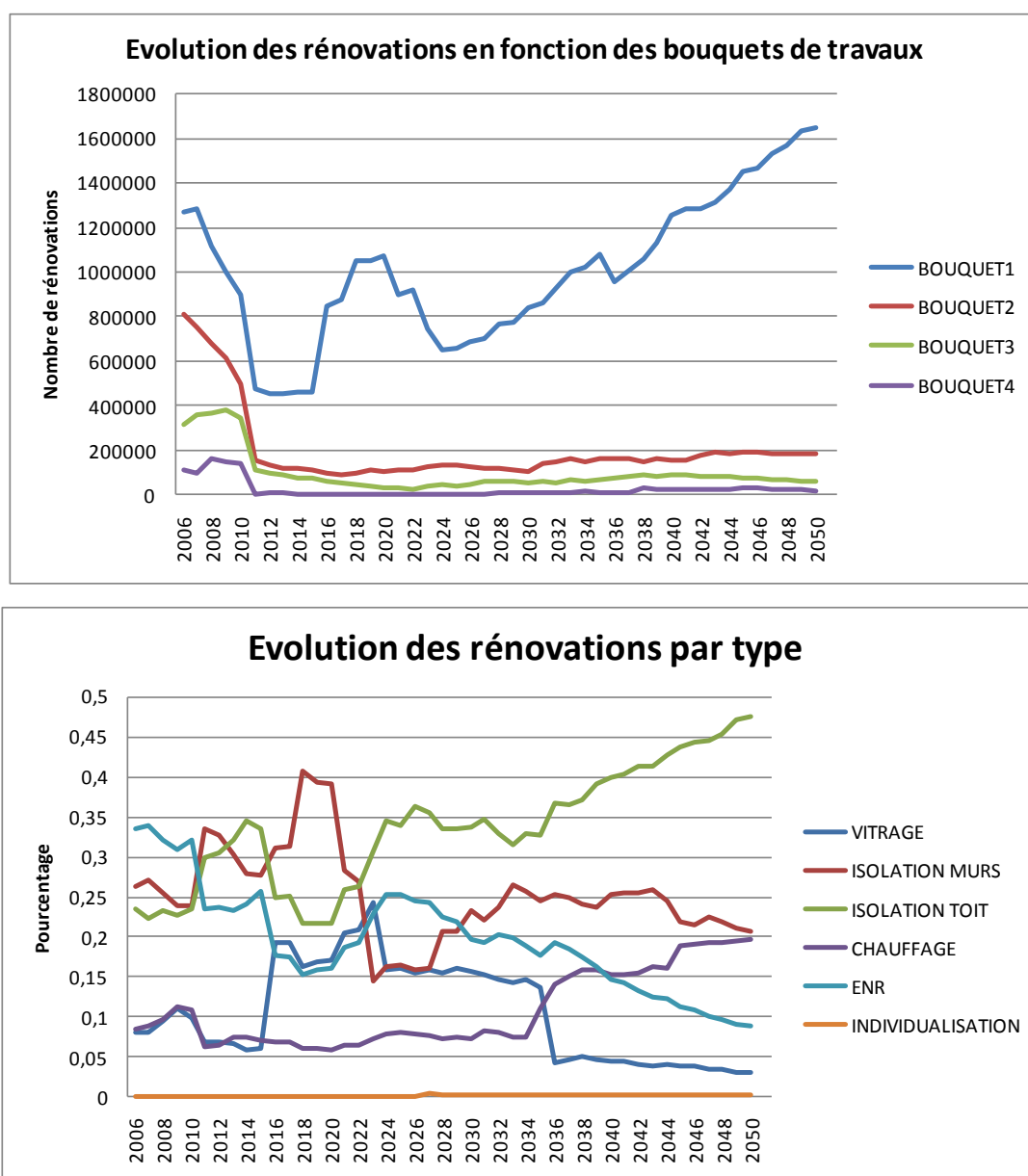
Figure V-4 : Evolution de l'âge des bâtiments et de la vétusté



L'âge moyen du parc et la vétusté ne cesse d'augmenter sur la période. D'un point de vue énergétique, les rénovations ne suffisent pas à éviter l'obsolescence du parc. Ainsi, on assiste à un vieillissement du parc à deux niveaux : au niveau technique et au niveau énergétique.

Dans ce scénario, les ménages réalisent le plus souvent une seule rénovation. Les bouquets de 4 travaux sont très peu choisis et cela sur l'ensemble de la période. De plus, nous voyons que les rénovations préférées des ménages sont l'isolation du toit et des murs. Ceci est assez intuitif car ce sont les rénovations qui permettent d'économiser le plus rapidement de l'énergie à moindre coût. Ainsi, l'isolation du toit représente 50% des rénovations en 2050. Un pic est atteint pour le changement des équipements de chauffage en faveur des énergies renouvelables en 2050 (25% des rénovations effectuées par les ménages).

Figure V-5 : Evolution des rénovations en fonction des bouquets de travaux et des rénovations par type.



Le Grenelle fixe un objectif intermédiaire de diminution de -38% de la consommation d'énergie du parc existant d'ici 2020. Dans un souci de comparaison de nos résultats avec les autres modèles en cours de construction, nous présentons un tableau de résultats intermédiaires pour l'année 2020. En étudiant la consommation énergétique et les émissions de GES d'ici à 2020, nous remarquons que la consommation énergétique baisse de 25.5% par rapport à 2008. La baisse des émissions de GES quant à elle est de 26% entre 2008 et 2020.

	2008	2020
CONSOMMATION MOYENNE D'ENERGIE (En kWh _{ep} /m ² /an)	278	207
Pourcentage de baisse entre 2008 et 2020	-25.5%	

- **Consommation d'énergie, émissions de GES et efficacité économique dans le cadre du scénario de référence**

Dans le cadre de ce scénario de référence, nous avons calculé le coût des mesures par tonne de CO2 évitée. Pour cela, nous avons calculé le coût en prix courants, en moyenne sur la période 2008-2050, en estimant le surplus de rénovations entraîné par la mesure, que nous avons divisé par les émissions de GES économisées. Nous voyons que la politique la moins coûteuse est la subvention de l'ANAH. Cet organisme doit investir 67.3 euros pour économiser une tonne de CO2 en moyenne sur toute la période. Toutefois, cette politique entraîne la diminution de GES la moins importante. De plus, elle ne vise que les propriétaires uniquement sur certains seuils de revenus.

Le CIDD, quant à lui, coûte à l'Etat 172 euros par tonne de CO2 évitée et le prêt à taux zéro 303.7 euros par tonne de CO2 évitée.

A présent, nous allons tester un ensemble de mesures qui visent de manière ciblée certaines catégories de population ou de logements et des mesures plus générales dont l'ensemble des logements pourraient être bénéficiaires. Nous résumons notre démarche dans les scénarios ci-dessous :

- Scénario 1 : Subvention de l'ANAH en fonction des quintiles de revenu (SUBV)
- Scénario 2 : PRIMES - Primes qui peuvent soit soutenir l'effort de ceux qui investissent dans des bouquets de rénovations (PRIME1) ou primes en fonction des quintiles de revenu (PRIME2)
- Scénario 3 : TAXES - taxes qui visent certaines catégories de logements ou certains segments (TAXE1), taxes sur les kilowattheures émis (TAXE2) ou taxes sur les émissions de GES (TAXE3)
- Scénario 4 : CIDD - Crédit d'impôt sur les rénovations (CI1). On peut appliquer différents taux en fonction du type de rénovation. Nous pouvons donc choisir de stimuler la rénovation 5 par exemple (passage au ENR).
- Scénario 5 : Combinaisons de rénovations pour parvenir au facteur 4

Tous les scénarios qui vont être présentés ci-dessous ont été réalisés en comparaison du scénario de référence résumé dans le tableau suivant (horizon à 2050) :

Tableau V-2: le scénario de référence pour la France

CONSOMMATION MOYENNE D'ENERGIE (En kWh _{ep} /m ² en 2050)			EMISSIONS MOYENNES DE GES EN 2050(en kg.CO ₂)			NOMBRE DE RENOVATIONS SUPPLEMENTAIRES SUR LA PERIODE 2010-2050		
Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel
102.4	127.8	79.05	12.1	19.1	5.7	64732057	31362763	33369294

Nous soulignons le fait que nous tenons compte de toutes les rénovations. Cela signifie qu'un bouquet de 2 travaux compte pour 2 rénovations.

1. Scénario 1 : la subvention

Nous constatons précédemment dans l'analyse rétrospective que la subvention de l'ANAH avait permis d'augmenter légèrement le nombre de rénovations (1.28% contre 1.04% sans aucune mesure entre 2006 et 2009). Nous décidons donc de simuler les effets d'une augmentation des taux applicables (SUBV). Les taux et les plafonds appliqués aujourd'hui sont présentés dans le tableau ci-après :

Tableau V-3 : les plafonds de ressources et les taux applicables par l'ANAH

PLAFONDS DE RESSOURCES MAXIMUM - PROVINCE			
Nombre de personnes composant le ménage	Plafonds "de base"	Plafonds "prioritaires"	Plafonds "majorés"
1	11 187	8 606	17 211
2	16 362	12 586	25 172
3	19 679	15 136	30 271
4	22 989	17 684	35 366
5	26 314	20 241	40 482
Par personne supplémentaire	3 315	2 548	5 098

TAUX MAXIMUM DE SUBVENTION			
	Plafonds de travaux par logement	Taux applicables aux propriétaires sous plafonds de ressources "de base"	Taux applicables aux propriétaires sous plafonds de ressources "prioritaires"
Cas général	13 000 euros	20 %	35 %
OPAH rénovation urbaine, revitalisation rurale ou copropriétés dégradées	13 000 euros	30 %	35 %
Insalubrité	30 000 euros	50 %	50 %
Saturnisme /handicap	8 000 euros	70 %	70 %

Nous remarquons que la consommation d'énergie moyenne, quant à elle, a très peu diminué par rapport au scénario de départ.

A première vue, la subvention ne semble pas être la mesure la plus efficace. Les individus vivant dans des logements collectifs sont souvent les moins riches et c'est pour cela que la subvention n'est pas suffisante pour inciter ces individus à rénover

et donc à faire diminuer de manière significative la consommation dans le collectif. De plus, les individus des deuxièmes quintiles bénéficient rarement de l'aide et ne rénovent presque jamais. Finalement, dans l'individuel, cette mesure n'incite aucun ménage. Nous sommes face à un problème de pauvreté énergétique.

Tableau V-3 : les résultats issus de la simulation de la SUBV

	CONSOMMATION MOYENNE D'ENERGIE (En kWh _{ep} /m ² en 2050)			EMISSIONS MOYENNES DE GES EN 2050(en kg.co ₂)			NOMBRE DE RENOVATIONS SUPPLEMENTAIRES SUR LA PERIODE 2010-2050		
	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel
REF	102.4	127.8	79.05	12.1	19.1	5.7			
SUBV **	102	127	79.05	12.03	18.9	5.7	438678	438678	0

**Les taux applicables passent de 0.35 à 0.5 et de 0.20 à 0.40

2. Scénario 2: les primes

a. PRIME1

Nous avons introduit des primes qui viennent subventionner les individus qui font des bouquets de rénovations (c'est à dire 2 rénovations ou plus) avec des montants pouvant atteindre 10 000 euros et sans introduire de plafond. En analysant le tableau, nous constatons que les primes ont très peu d'effet sur la consommation énergétique. Elles ont seulement un effet sur le nombre de rénovations. Toutefois, ce chiffre est quand même très bas sur l'intégralité de la période. En conséquence, cette mesure peut s'avérer coûteuse et peu efficace.

Tableau V-4 : les résultats issus de la simulation de la PRIME1

	CONSOMMATION MOYENNE D'ENERGIE (En kWh _{ep} /m ² en 2050)			EMISSIONS MOYENNES DE GES EN 2050(en kg.co ₂)			NOMBRE DE RENOVATIONS SUPPLEMENTAIRES SUR LA PERIODE 2010-2050		
	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel
REF	102.4	127.8	79.05	12.1	19.1	5.7			
PRIME 1A*	101.9	127.6	78.3	12.07	19.08	5.63	1381611	1090696	290915
PRIME 1B**	101.67	127.52	77.95	12.05	19.06	5.61	2878970	2008410	870560

* Une prime de 500 euros est versée aux ménages réalisant 2 ou 3 travaux et une prime de 1000 euros pour 4 travaux ou plus (sans plafond minimum).

** Une prime de 1000 euros est versée aux ménages réalisant 2 ou 3 travaux et une prime de 2000 euros pour 4 travaux ou plus

(sans plafond minimum).

b. PRIME2

Nous testons l'efficacité de primes destinées aux individus des deuxième et troisième premiers quintiles de revenu. Contrairement à la prime précédente, celle-ci a un fort impact sur la consommation énergétique et notamment sur celle dans les logements collectifs dans le scénario PRIME2C. Ce résultat n'est pas surprenant. Précédemment, nous avons souligné le fait que les individus les moins aisés vivent plus souvent dans les logements collectifs que les autres. Ainsi, subventionner ces individus revient de manière indirecte à subventionner les logements collectifs. Toutefois, même si la consommation en kWh de ces logements diminuent, en regardant les émissions de GES, ils restent les plus pollueurs. En regardant les résultats obtenus plus attentivement, nous remarquons que ces logements effectuent le plus souvent des rénovations de type 2 (isolation des murs), de type 3 (isolation du toit) et de type 6 (individualisation du mode de chauffage). Ils optent très rarement pour des équipements de chauffage plus performants ou pour des énergies renouvelables. Ceci peut expliquer que nous gagnons des kilowattheures tout en continuant d'émettre fortement contrairement aux logements individuels qui changent plus facilement en faveur des ENR et qui réduisent donc leurs émissions de GES.

Tableau V-5 : les résultats issus de la simulation de la PRIME2

	CONSOMMATION MOYENNE D'ENERGIE (En kWh _{ep} /m ² en 2050)			EMISSIONS MOYENNES DE GES EN 2050(en kg _e .CO ₂)			NOMBRE DE RENOVATIONS SUPPLEMENTAIRES SUR LA PERIODE 2010-2050		
	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel
REF	102.4	127.8	79.05	12.1	19.1	5.7			
PRIME 2A*	95.24	115.79	76.37	10.57	16.10	5.49	14682138	9778178	4903960
PRIME 2B**	87.11	101.37	74.02	8.72	12.44	5.31	38279647	16502448	21777199
PRIME 2C***	84.27	95.63	73.85	7.91	10.78	5.27	47011455	29670328	17341127

* Une prime de 1000 euros est versée aux ménages appartenant aux deux premiers quintiles de revenu, quelque soit les travaux réalisés.

** Une prime de 2000 euros est versée aux ménages appartenant aux deux premiers quintiles de revenu, quelque soit les travaux réalisés.

***La prime de 2000 euros est étendue aux ménages appartenant au troisième quintile de revenu.

3. Scénario 3 : les taxes

a. TAXE1

Nous taxons de 500 euros les logements collectifs avec chauffage collectif. Nous obtenons des résultats très significatifs. Cette conclusion n'est pas surprenante. Comme nous le disions précédemment, les logements collectifs sont les plus consommateurs d'énergie. Introduire une taxe augmente le gain et favorise la décision de rénovation. Avec cette mesure, nous divisons par 1.23 la consommation énergétique totale du parc, et de 1.9 la consommation des logements avec chauffage collectif.

Tableau V-6 : les résultats issus de la simulation de la TAXE1

	CONSUMMATION MOYENNE D'ENERGIE (En kWh _{ep} /m ² en 2050)			EMISSIONS MOYENNES DE GES EN 2050(en kg.CO ₂)			NOMBRE DE RENOVATIONS SUPPLEMENTAIRES SUR LA PERIODE 2010-2050		
	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel
REF	102.4	127.8	79.05	12.1	19.1	5.7			
TAXE1*	82.82	86.94	79.05	7.8	10.10	5.7	12971511	12971511	0

*Taxe sur les logements collectifs avec chauffage collectif d'un montant de 500 euros.

b. TAXE2

Dans ce scénario, nous introduisons une taxe sur les kilowattheures consommés et les émissions émises. Cela nous permet de comparer l'effet de chacune de ces deux taxes. Nous supposons que la taxe sur la consommation d'énergie va concerner en priorité les logement avec un chauffage électrique qui sont pourtant le moins émetteurs. La taxe sur les GES, quant à elle, va cibler les logements collectifs avec un chauffage collectif au gaz ou au fioul. Nous appliquons trois montants de taxe différents en fonction de l'étiquette énergie du logement (E, F et G). Les logements appartenant aux trois premières étiquettes ne sont pas concernés.

En analysant les résultats présentés dans le tableau, nous constatons que l'introduction de la TAXE2A produit des effets assez similaires au scénario TAXE2B. Par contre, une taxe sur la consommation d'énergie a plus d'impact sur les logements individuels tandis qu'une taxe carbone a plus d'effet sur les logements collectifs.

D'une manière générale, la taxe carbone est plus efficace.

Tableau V-7 : les résultats issus de la simulation de la TAXE2

	CONSUMMATION MOYENNE D'ENERGIE (En kWh _{ep} /m ² en 2050)			EMISSIONS MOYENNES DE GES EN 2050(en kg.co2)			NOMBRE DE RENOVATIONS SUPPLEMENTAIRES SUR LA PERIODE 2010-2050		
	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel
REF	102.4	127.8	79.05	12.1	19.1	5.7			
TAXE2A*	91.48	110.83	73.74	10.42	15.63	5.63	11608936	4200723	7408213
TAXE2B**	87.70	98.52	77.78	8.85	12.32	5.66	11183742	2632159	8551583

* Les logements sont taxés sur la consommation d'énergie. Ce sont ceux des étiquettes énergie E, F et G à hauteur de 400, 600 et 800 euros par logement.

***Les logements sont taxés sur les émissions de GES. Ce sont ceux des étiquettes énergie E, F et G à hauteur de 400, 600 et 800 euros par logement.

4. Scénario 4 : le CIDD

Dans cette configuration, nous testons deux effets complètement opposés : le retrait du CIDD et l'augmentation des taux du crédit d'impôt (à partir de 2010). Etant donné que l'Etat souhaite retirer le crédit d'impôt, nous étudions l'impact de cette démarche sur la consommation. Dans un deuxième temps, nous augmentons le crédit d'impôt qui existe aujourd'hui de dix points de pourcentage. Cela signifie que les rénovations qui bénéficiaient d'un crédit d'impôt de 0.25 vont maintenant bénéficier d'un crédit d'impôt de 0.35. Si le gouvernement supprime le crédit d'impôt, le nombre de rénovations d'ici à 2050 risque de très fortement diminuer. Nous avons vu que le crédit d'impôt était d'ores et déjà la mesure la plus efficace entre 2006 et 2009. Son efficacité semble perdurer dans le temps. En revanche, si nous augmentons le crédit d'impôt, le nombre de rénovations supplémentaires seraient d'environ 17,898,478 sur la période 2010-2050 et la consommation énergétique en 2050 passerait de 102.4 kWh_{ep}/m²/an à 98.77 kWh_{ep}/m²/an. Ce résultat, quant à lui, n'est pas très significatif.

En se basant sur ces résultats, il ne semble pas nécessaire d'augmenter le crédit d'impôt. Par contre, le supprimer engendrait une forte baisse de la dynamique de rénovation du parc.

Tableau V-8 : les résultats issus de la simulation du CIDD

	CONSOMMATION MOYENNE D'ENERGIE (En kWh _{ep} /m ² en 2050)			EMISSIONS MOYENNES DE GES EN 2050(en kg.CO ₂)			NOMBRE DE RENOVIATIONS SUPPLEMENTAIRES SUR LA PERIODE 2010-2050		
	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel
REF	102.4	127.8	79.05	12.1	19.1	5.7			
CIDDA*	126.25	140.93	112.78	14.33	21.56	7.69	- 24909045	- 14934700	- 9974345
CIDDB**	98.77	122.36	77.13	11.41	17.84	5.51	17898478	7694070	10204408

* Dans ce scénario, le crédit d'impôt est retiré après 2010.

** Le crédit d'impôt est augmenté de 0.1 point de pourcentage pour l'ensemble des mesures

5. Scénario 5 : Combinaisons de mesures

Pour parvenir aux objectifs fixés par le gouvernement, soit diviser par 4 la consommation énergétique d'ici à 2050 (consommation moyenne de 50 kWh_{ep}/m²/an), il est nécessaire de combiner plusieurs mesures. Nous simulons un ensemble de configurations soit :

- une augmentation du CIDD de 10 points de pourcentage sur l'ensemble des mesures,
- une taxe sur les émissions de GES émises en fonction de l'étiquette énergie des logements E, F et G,
- une taxe sur les émissions de GES émises en fonction de l'étiquette énergie des logements D,
- une prime de 2000 euros aux ménages qui appartiennent aux trois premiers quintiles de revenu.

Même si une telle configuration n'est pas réaliste, nous voulons montrer par le biais des résultats obtenus, qu'il sera très difficile de parvenir aux objectifs fixés par la

France.

Tableau V-9 : Les résultats issus du scénario 5

	CONSUMMATION MOYENNE D'ENERGIE (En kWh _{ep} /m ² en 2050)			EMISSIONS MOYENNES DE GES EN 2050(en kg.CO ₂)			NOMBRE DE RENOVATIONS SUPPLEMENTAIRES SUR LA PERIODE 2010-2050		
	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel	Au total	Dans le collectif	Dans l'individuel
REF	102.4	127.8	79.05	12.1	19.1	5.7			
S5*	81.6	85.37	78.17	7.02	8.54	5.64	34812663	22605389	12207274

* Le crédit d'impôt est augmenté de 0.1 point de pourcentage pour l'ensemble des mesures par rapport au scénario de référence + une taxe sur les GES dont les logements taxés sont ceux des étiquettes énergie E, F et G à hauteur de 400, 600 et 800 euros par logement + une taxe de 100 euros est introduite sur les étiquettes énergie D + une prime de 2000 euros destinés aux ménages appartenant au trois premier quintile de revenu, pour toutes rénovations réalisées+taux de démolition des logements de 0.5%.

Premièrement, nous constatons que cette combinaison est efficace car nous atteignons une consommation de 81.6 kWh_{ep}/m²/an (et 7.02 kg. CO₂ émis). Nous avons donc divisé la consommation d'énergie par 1.25 par rapport au scénario de référence. Les logements individuels consomment moins que les logements collectifs.

En multipliant le taux de démolition par 10, nous n'atteignons ni les 50 kWh_{ep}/m²/an ni le facteur 4. En effet, pour le secteur résidentiel, nous devrions atteindre les 13.75 millions de tonnes de CO₂. Dans notre modèle, avec ce scénario, nous enregistrons 28.55 millions de tonnes soit une division par 2 à l'horizon de 2050. Nous assistons à une diminution plus marquée de la consommation moyenne dans les logements collectifs que dans les logements individuels. Plus de la moitié du parc a recours à des énergies renouvelables.

En revanche, à l'horizon de 2020, ce scénario permet d'atteindre les objectifs du gouvernement soit une diminution de 38% de la consommation d'énergie.

	2008	2020
CONSUMMATION MOYENNE D'ENERGIE (En kWh _{ep} /m ² /an)	278	161.14
Pourcentage de baisse entre 2008 et 2020	-42%	

6. Résumé

	CONSOMMATION MOYENNE D'ENERGIE EN 2050 (En kWh _{ep} /m ²)	EMISSIONS MOYENNES DE GES EN 2050 (en kg _{CO2})
REF	102.4	12.1
Objectifs	50 (soit une diminution de 51.7% par rapport au scénario de référence)	
	DIMINUTION PAR RAPPORT AU SCENARIO DE REFERENCE	DIMINUTION PAR RAPPORT AU SCENARIO DE REFERENCE
SUBV	-0.39%	-0.57%
PRIME 1A*	-0.48%	-0.24%
PRIME 1B**	-0.71%	-0.41%
PRIME 2A*	-6.99%	-12.6%
PRIME 2B**	-14.93%	-27.9%
PRIME 2C***	-17.70%	-34.9%
TAXE1*	-19.12%	-35.53%
TAXE2A	-10.66%	-19.88%
TAXE2B	-14.35	-26.85%
CIDDA	+23.29%	+18.43%
CIDDB	-3.54%	-5.70%
S5*	-20.3%	-41.98%

SUBV : Les taux applicables passent de 0.35 à 0.5 et de 0.20 à 0.40

PRIME1A : Une prime de 500 euros est versée aux ménages réalisant 2 ou 3 travaux et une prime de 1000 euros pour 4 travaux ou plus (sans plafond minimum).

PRIME1B : Une prime de 1000 euros est versée aux ménages réalisant 2 ou 3 travaux et une prime de 2000 euros pour 4 travaux ou plus (sans plafond minimum).

PRIME2A : Une prime de 1000 euros est versée aux ménages appartenant aux deux premiers quintiles de revenu, quelque soit les travaux réalisés.

PRIME2B : Une prime de 2000 euros est versée aux ménages appartenant aux deux premiers quintiles de revenu, quelque soit les travaux réalisés.

PRIME2C : La prime de 2000 euros est étendue aux ménages appartenant au troisième quintile de revenu.

TAXE1 : Taxe sur les logements collectifs avec chauffage collectif d'un montant de 500 euros.

TAXE2A : Les logements sont taxés sur la consommation d'énergie. Ce sont ceux des étiquettes énergie E, F et G à hauteur de 400, 600 et 800 euros par logement.

TAXE2B : Les logements sont taxés sur les émissions de GES. Ce sont ceux des étiquettes énergie E, F et G à hauteur de 400, 600 et 800 euros par logement.

CIDDA : Dans ce scénario, le crédit d'impôt est retiré après 2010.

CIDDB : Le crédit d'impôt est augmenté de 0.1 point de pourcentage pour l'ensemble des mesures

S5 : Le crédit d'impôt est augmenté de 0.1 point de pourcentage pour l'ensemble des mesures par rapport au scénario de référence + une taxe sur les GES dont les logements taxés sont ceux des étiquettes énergie E, F et G à hauteur de 400, 600 et 800 euros par logement + une taxe de 100 euros est introduite sur les étiquettes énergie D + une prime de 2000 euros destinés aux ménages appartenant au trois premier quintile de revenu, pour toutes rénovations réalisées+taux de démolition des logements de 0.5%.

VI. Préconisations

Aujourd'hui, le constat le plus important que nous pouvons émettre, est qu'il est indispensable de conserver les politiques qui sont actuellement mises en place (soit le crédit d'impôt, le prêt à taux zéro, la TVA à 5.5% et la subvention) pour au moins parvenir à 102 kWh/m²/an. En l'absence de ces politiques, tout le problème vient du fait que les durées pour rentabiliser les investissements économeurs d'énergie sont bien trop longues au regard de la durée d'occupation moyenne des logements. De plus, le marché des énergies renouvelables et de la rénovation étant assez complexe, les ménages préfèrent différer ce type d'investissement pour disposer d'informations supplémentaires. Dans une telle configuration, ils peuvent repousser indéfiniment la rénovation de leur logement. Cette situation est d'autant plus vraie pour les logements collectifs qui sont souvent habités par des locataires. Ces derniers n'ont aucune incitation à rénover. En France, étant donné qu'une partie de la population reste locataire à vie, c'est alors tout une partie des ménages qui ne sera jamais concerné par les investissements en matière d'économie d'énergie. Il faudrait alors agir, probablement légalement, pour réformer le statut des copropriétés afin que les propriétaires bailleurs soient plus enclins à rénover. L'introduction d'une taxe peut s'avérer injuste, sauf si elle vient taxer les propriétaires pour qu'ils soient incités à louer des logements plus performants ou si elle est redistribuée.

De plus, il pourrait être pertinent de vanter les bienfaits des nouveaux équipements pas nécessairement d'un point de vue écologique mais aussi d'un point de vue sanitaire (qualité de l'air par exemple). L'Etat devra aussi agir sur la dynamique de renouvellement du parc : il est plus facile de construire écologique que de rénover efficacement.

Même si ne sommes pas en mesure de prendre en compte l'effet rebond⁷³ dans notre

⁷³Une fois que les ménages ont adopté des investissements économeurs d'énergie, ils ne diminuent pas forcément leur consommation énergétique car ils peuvent préférer augmenter leur confort par une température plus élevée dans le logement par exemple.

modèle, il faudra néanmoins informer les populations par le biais de campagnes de sensibilisation.

Les politiques à elles seules semblent insuffisantes pour parvenir aux objectifs fixés, il faut donc les combiner avec d'autres mesures comme l'incitation de la recherche et développement dans le secteur des énergies renouvelables ou des équipements en faveur de la réduction d'énergie.

Finalement, afin que l'offre puisse satisfaire la demande, il faut axer des politiques de formation sur ce domaine. C'est aussi un moyen de créer de nouveaux emplois des professionnels. Il est aussi possible qu'une augmentation du nombre d'offres sur le marché conduise à une baisse des prix et donc à une analyse coût-bénéfice plus favorable pour les ménages.

VII. Conclusion

Nous pouvons voir que les politiques mises en place actuellement sont efficaces mais pas suffisantes pour parvenir au facteur 4 et à une consommation d'énergie de 50 kWh_{ep}/m²/an (consommation moyenne en 2050 de 102 kWh_{ep}/m²/an avec le scénario de référence). Ces résultats sont de même nature que ceux de Laurent et al. (2006). En 2006, nous avons enregistré un taux de rénovation de 9.67% alors que sans ces mesures, nous aurions obtenu 0.56% de rénovations. L'effet groupé des politiques semble plus important que l'effet cumulé qu'elles produisent individuellement. Le crédit d'impôt est la mesure la plus efficace si nous nous intéressons uniquement au nombre de logements rénovés.

D'un point de vue budgétaire, ce constat peut être nuancé. En effet, le CIDD et le prêt à taux zéro ont une forte incidence sur le nombre de rénovations tandis que la subvention de l'ANAH, moins coûteuse, ne permet pas de diminuer significativement la consommation d'énergie et les émissions de GES.

Ce sont les ménages à forts revenus qui rénovent le plus. Cependant, une fois le seuil des 80 kWh_{ep}/m²/an atteint, ces derniers arrêtent de rénover car ce n'est plus avantageux financièrement pour eux.

Il a donc été mis en évidence que pour maintenir un rythme de rénovations élevé, il

faut aider les ménages à faibles revenus. En effet, ces derniers vivent dans les logements les plus énergivores et en l'absence de mesures, ils ne rénovent pas du tout. Nous pouvons parler de pauvreté énergétique. Il est par exemple plus efficace de mettre en place une prime pour les faibles revenus que pour récompenser les ménages qui ont effectué des bouquets de travaux.

Nous remarquons que d'une manière générale, les taxes sur les logements les plus énergivores ont un impact plus important sur le nombre de rénovations et la consommation d'énergie que des primes ou des subventions. De plus, l'impact du crédit d'impôt est très significatif sur le nombre de rénovations. Toutefois, l'augmenter n'a pas un effet considérable.

Par ailleurs, en simulant une combinaison peu réaliste de mesures, nous montrons qu'il n'est pas possible d'atteindre le facteur 4 en 2050. Ces résultats semblent se confirmer même en accélérant le taux de renouvellement du parc de logements (taux de démolition et de nouvelles constructions).

A première vue, les politiques publiques seules ne suffisent pas à diminuer significativement la consommation énergétique. Ces mesures doivent être combinées à une politique de recherche et développement active en faveur des équipements économeurs d'énergie.

Il est à noter que les estimations de consommations énergétiques (consommations de référence et gains liés aux rénovations) reposent sur des analyses techniques que nous avons prises comme telles via les logiciels 3CL. En particulier, ces méthodes d'estimation ne tiennent pas compte de l'effet rebond. De plus, nous avons été amenées à faire plusieurs hypothèses fortes. Par exemple, nous avons considéré que les réglementations thermiques étaient immédiatement appliquées ou nous avons fait des hypothèses d'évolution sur la répartition des différents appareils électroménagers dans les étiquettes énergétiques jusqu'en 2050. Nous pouvons aussi nuancer nos résultats car il a été évidemment impossible de tenir compte des innovations techniques majeures qui surviendront dans le futur ou de l'évolution de la sensibilité environnementale des ménages.

A l'avenir, il sera intéressant de comparer nos résultats avec ceux issus d'autres modèles.

VIII. Bibliographie

ADEME, 2010, Bâtiment, Energie- environnement, Collection Chiffres Clés.

ANAH, 2008, Modélisation des performances énergétiques du parc de logements -- Etat énergétique du parc en 2008.

Bréchet T., 2000, Réduction des émissions de gaz à effet de serre et flux de matières, Rapport de l'Institut pour un Développement Durable, Belgique.

Centre d'Analyse Stratégique, 2008, Perspective énergétique de la France à l'horizon 2020-2050, Commission Energie

ENERDATA, 2005, Etude pour une prospective énergétique concernant la France.

Farahbakhsh, H., Ugursal, V.I., & Fung, A.S. (1998) A residential end-use energy consumption model for Canada (English). *International journal of energy research*, **22**, 1133-1143.

Hausman, J.A. (1979) Individual Discount Rates and the Purchase and Utilization of Energy-Using Durables. *The Bell Journal of Economics*, **10**, 33-54.

Huang, Y.J. & Brodrick, J. (2000) *A bottom-up engineering estimate of the aggregate heating and cooling loads of the entire U.S. building stock.*

Jaccard, M., Bailie, A., & Nyboer, J. (1996) CO₂ Emission Reduction Costs in the Residential Sector: Behavioral Parameters in a Bottom-Up Simulation Model. *Energy Journal*, **17**, 107-134.

Kadian, R., Dahiya, R.P., & Garg, H.P. (2007) Energy-related emissions and mitigation opportunities from the household sector in Delhi. *Energy Policy*, **35**, 6195-6211.

Kohler N, Schwaiger B, Barth B, Koch M.(1997) Mass flow, energy flow and costs of the German building stock. CIB, 2nd international conference on buildings and the environment, Paris, France.

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

Laurent M.H. , Osso D. ,Mandrou P. , Bouia H.(2006) Scénarios de rénovation du parc résidentiel à 2030 en France dans un contexte « MDE », Département Energies dans les Bâtiments et Territoires, IBPSA France 2006 à La Réunion -- 2&3 novembre.

Parekh A. (2005) Development of archetypes of building characteristics libraries for simplified energy use evaluation of houses, IBPSA, ninth international conference, Montreal, Canada ; 2005:921--8.

Shimoda, Y., Fujii, T., Morikawa, T., & Mizuno, M. (2004) Residential end-use energy simulation at city scale. *Building and Environment*, **39**, 959-967.

SOFRES et ADEME, 2009, Matrise de l'énergie-Bilan 2009, Attitude et comportement des particuliers, Note de Synthèse.

Siller, T., Kost, M., & Imboden, D. (2007) Long-term energy savings and greenhouse gas emission reductions in the Swiss residential sector. *Energy Policy*, **35**, 529-539.

Silk, J.I. & Joutz, F.L. (1997) Short and long-run elasticities in US residential electricity demand: a co-integration approach. *Energy Economics*, **19**, 493-513.

Vaage, K. (2000) Heating technology and energy use: a discrete/continuous choice approach to Norwegian household. *Energy Economics*, **22**, 649.

Van Soest, D.P. & Bulte, E.H. (2001) Does the Energy-Efficiency Paradox Exist? Technological Progress and Uncertainty. *Environmental and Resource Economics*, **18**, 101-112.

Vandegrift, D. & DiCaro, V. (1999) Income, Population Density, and Residential Energy Use: An Analysis of U.S. States. *Journal of Energy and Development*, **25**, 37-45.

Weber, C. & Perrels, A. (2000) Modelling lifestyle effects on energy demand and related emissions. *Energy Policy*, **28**, 549-566.

IX. Annexes

A. Tableau des durées de vie

Tableau IX-1 : le tableau des durées de vie des équipements

Type de rénovations	Description	Durée de vie
REN1	Vitrage	15
REN2	Isolation des murs	10
REN3	Isolation du toit	10
REN4	Changement des équipements ECS et chauffage	15
REN5	Panneaux solaires, poêles à bois et chauffe-eau solaire	30
REN6	Compteur individuel	30

Source : Agence Locale de l'Energie de l'agglomération lyonnaise et ADEME.

B. Le poids des segments

Tableau IX-2 : le poids des segments

	2006	2050
Logements collectifs		
Electricité	0.13	0.13
Gaz	0.208	0.18
Fioul	0.09	0.11
ENR	0.002	0.05
Total	0.43	0.48
Logements individuels		
Electricité	0.18	0.02
Gaz	0.18	0.01
Fioul	0.17	0.01
ENR	0.04	0.48
Total	0.57	0.52

Conclusion

Dans le cadre de ce projet nous avons simulé, sur un parc de logements, les effets de différentes politiques visant à réduire la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre émanant du logement résidentiel dans la région Rhône-Alpes. D'un point de vue pratique, nous avons tout d'abord procédé à la description de l'état des lieux du parc de logements en Rhône-Alpes, avant d'étudier l'offre et la demande en équipements économeurs d'énergie. Nous avons finalement fourni des projections de l'évolution du parc compte tenu des déterminants de l'offre et de la demande ainsi que de scénarios de politiques économiques.

Nous avons obtenu grâce à l'état des lieux réalisé, que parmi les gros consommateurs d'énergie et les gros émetteurs de GES, on trouve essentiellement des logements individuels, construits avant 1974, chauffés au fioul et habités par leur propriétaire. L'étude de l'offre a montré que l'action des pouvoirs publics joue certes un rôle notable dans le développement de l'offre, mais qu'elle est diversement appréciée par les acteurs, et que 4 freins principaux au développement de l'offre peuvent être identifiés : (i) les freins techniques et de coût, (ii) la formation insuffisante des artisans, (iii) le retard des producteurs français, (iv) la coordination insuffisante de l'offre. L'étude de la demande a montré que lorsque les ménages arbitrent entre consommation, épargne et rénovation du logement en présence d'incertitude, l'incertitude sur l'efficacité énergétique de la rénovation n'affecte pas leur décision de rénovation. Cela remet en cause l'habituelle explication, en équilibre partiel, du paradoxe énergétique mais permet de faire abstraction de cette incertitude dans le modèle de simulation qui conclut ce rapport.

Grâce aux simulations, nous montrons que les politiques mises en place actuellement sont efficaces mais pas suffisantes pour parvenir au facteur 4. Le crédit d'impôt est la mesure la plus efficace si nous nous intéressons uniquement au nombre de logements rénovés. Par ailleurs, ce sont les ménages à forts revenus qui rénovent le plus, mais une fois atteint le seuil des $70 \text{ kWh}_{ep}/\text{m}^2/\text{an}$, ces derniers arrêtent de rénover car ce n'est plus avantageux financièrement pour eux. Il a donc été mis en évidence que pour maintenir un rythme de rénovations élevé, il faut aider les

ménages à faibles revenus. Nous remarquons que d'une manière générale, les taxes sur les logements les plus énergivores ont un impact plus importants sur le nombre de rénovations et la consommation d'énergie que des primes ou des subventions. Finalement, même une combinaison de mesures trop importantes pour être réalistes, ne permet pas d'atteindre le facteur 4 en 2050 et ce, même si le taux de renouvellement du parc de logements (taux de démolition et de nouvelles constructions) est accéléré.

ANNEXE : Demande d'énergie en France dans le résidentiel. Analyse micro- économétrique de la consommation d'énergie

*French residential energy demand: Micro-econometric
analysis of household multi-fuel energy consumption*

Anna Risch*^δ and Claire Salmon*

*IREGE, Université de Savoie, France

^δADEME, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, France

claire.salmon@univ-savoie.fr

anna.risch@univ-savoie.fr

Keywords : energy consumption, continuous/discrete choice model, elasticity,
French households

JEL classification : Q41, D12, R21

Abstract:

In this paper, we explore patterns of French household energy consumption using the 2006 Enquête Logement, a disaggregate household level survey data set. Information on the physical characteristics of residential buildings and household socio-demographics is particularly rich. The residential sector is divided into 3 types: individual houses, privately owned units in collective residences, and public housing units in collective residences. We estimate a total energy demand equation of households for each housing type. The model incorporates a continuous/discrete decision framework which allows for interactions between decisions on the heating system (the discrete choice) and the consumption of energy (the continuous choice). The model parameters are estimated using a two-stage approach. In the first stage, decisions regarding heating systems are modelled with a multinomial probit model. Households are supposed to choose between three heating system modalities: (i) electricity v.s (ii) oil v.s (iii) natural gas when households live in individual houses or (i) electricity v.s (ii) individual natural gas heating v.s (iii) collective heating when household live in collective buildings. In the second stage, the demand for energy conditional on the chosen heating system then is estimated using a double least squares approach. Results show that the intensity of energy used per m^2 is almost completely determined by the technological properties of the dwelling and the climate. The part played by socio-demographic variables is particularly weak. This means that, in the short run, energy demand per m^2 is determined little by the household itself. The possibility for a given household to control its level of energy consumption per m^2 in a given dwelling is extremely weak in the absence of investment in the quality of the residence.

I. Introduction:

In France, there is a growing interest in reducing energy consumption and the associated CO² emissions in every sector of the economy. The residential sector accounts for approximately 13% of total carbon emissions (ANAH, 2008). To achieve a low carbon society, an in-depth understanding of energy consumption in this sector is needed to devise efficient energy policies. Such an understanding is only possible if household energy consumption is assessed by taking into account dwelling types (e.g. individual house/collective residential building, private property/public housing, owner occupied/leased unit). Paradoxically, the literature on energy demand in the French residential sector is not very extensive. To our knowledge, no study has addressed the question using a household level micro-data set. The main contribution of this paper is to estimate energy demand, price-elasticity and income-elasticity in the French housing sector at a micro-level.

We explore patterns of French household energy consumption using the 2006 *Enquête Logement*, a disaggregated, household-level survey data set representative of the French residential sector. It provides information on 36 955 households, including the amount of energy used by each over the last 12 months. For each household, it also describes the living space (dwelling type, surface area, insulation, presence of double-glazing...), heating system (type of energy used, collective or individual system), household information (number of persons living in the same residence, age of respondent, owner or tenant, income, profession...) and geographical information (climate category, rural or urban area). This information enables energy demand to be estimated while controlling for all of these characteristics.

A special feature of this study is the classification of the residential sector into 9 segments according to three modalities: (i) the type of dwelling (collective building or individual house), (ii) the type of fuel used in the heating system (electricity, oil, natural gas) and (iii) the type of control exercised by the household over the heating system (collective heating, individual heating). This last modality is rarely taken into account in the literature whereas it could have an impact on a household's level of energy consumption and ability to react to changes in energy prices.

The aim of this paper is to determine the main determinants of energy consumption in each residential sector category. To achieve this objective, we use a continuous/discrete model framework: parameters are estimated using a two-stage approach. Specifically, the model estimates demand for energy conditional to the heating system, which is characterized by a multinomial probit model. We then explore which of the main determinants of energy demand, when manipulated, is most efficient at reducing energy consumption per m². Particularly, we investigate, by using nested models, the ability of household socio-demographic characteristics to explain energy consumption per m² compared to the technical properties of the dwelling and the climatic specificities of the surrounding area. In sum, we examine a household's capacity to reduce energy demand in a given dwelling with given technical properties.

II. French housing characteristics

A. Main features of the French housing sector

The data set that we used is supposed to be representative of the entire French residential sector; we briefly present some of the sector's main characteristics in Table 1.

In France, the residential sector may be divided into two main types: individual houses and collective residential buildings. The latter may be divided further into privately owned units and subsidized public housing. Individual houses account for 56% of all dwellings. In collective residential buildings, it is interesting to note that one third of the units are public housing.

Housing buildings in France are quite old, despite the "building boom" that followed WWII, with nearly one third built before 1948. However, collective buildings tend to be of more recent construction, with 60% built in the forty year period between 1949 and 1989. In terms of ownership, 80% of individual houses are owner-occupied

compared to only 27% of the units in collective buildings. Unsurprisingly, individual houses are significantly larger than collective building units (111 m² *versus* 65 m²). Globally, nearly 90% of French dwellings are heated with one of the three main fuels: electricity (31%), natural gas (38%), and fuel oil (20%). However, as shown in Table 1, the fuel used differs sharply according to the dwelling type. For individual houses, 35% of households use an electric heater, 31% a natural gas heater, and 25% an oil heater. For collective residential buildings, the distribution can be broken down further between privately owned and public housing units. First, a larger portion of households living in public housing have a collective rather than an individual heating system (59% *versus* 35%). Electric heaters consequently are found more often in private dwellings than in public housing (37% *versus* 14%). Most households living in public housing heat with a natural gas system.

Table 1 - French dwelling characteristics

	Individual housing	<i>c. Collective housing</i>			Total
		Public	Private	Total	
Construction period					
Before 1948	34.80%	7.22 %	33.95%	25.08%	30.55%
Between 1949 and 1974	22.27%	54.79%	34.44%	41.20%	30.54%
Between 1975 and 1989	24.53%	24.70%	15.69%	18.68%	21.97%
Between 1990 and 2006	18.40%	13.28%	15.92%	15.05%	16.93%
Total	100%	100%	100%	100%	100%
Household occupancy statute					
Owner	80.51%	0%	40.70%	27.20%	57.20%
Tenant	16.50%	100%	52.76%	68.44%	39.21%
Free housing	2.92%	0%	6.53%	4.36%	3.55%
Tenant farmer	0.07%	0%	0%	0%	0.04%
Total	100%	100%	100%	100%	100%
Others housing characteristics					
Dwelling area (m ²)	111.96 m ²	67.37 m ²	65.04 m ²	65.81 m ²	91.79 m ²
Double glazing	71.82%	79.43%	59.69%	66.24%	69.38%
Heating system:					
Collective heating	0.38%	59.34%	35.80%	43.61%	19.28%
Mixed heating (collective + individual)	0.02%	2.45%	1.34%	1.70%	0.76%
Individual heating	99.60%	38.21%	62.86%	54.68%	79.96%
Total	100%	100%	100%	100%	100%
Heating energy*:					
Electricity	35.56%	14.74%	37.64%	30.04%	31.46%
Natural gas	31.52%	57.33%	42.63%	47.51%	38.51%
Fuel oil	24.82%	14.70%	13.30%	13.77%	19.99%
Liquefied Petroleum Gas	4.12%	0.60%	0.46%	0.51%	2.54%
Wood and/or coal	7.81%	0.92%	0.62%	0.72%	4.71%
Others	2.05%	12.84%	5.75%	8.10%	4.70%
Individual heating:					
Electricity	32.56%	11.66%	36.19%	28.05%	30.59%
Natural gas	31.43%	26.10%	24.06%	24.74%	28.50%
Fuel oil	24.71%	≈ 0%	1.21%	0.83%	14.27%
Collective heating:					
Electricity	≈ 0%	1.28%	0.78%	0.95%	0.42%
Natural gas	≈ 0%	30.89%	18.26%	22.45%	9.87%
Fuel oil	0.11%	14.54%	11.74%	12.67%	5.60%
Total Number	14 790 132	3 813 117	7 676 570	11 489 687	26 279 819
%	56.28%	14.51%	29.21%	43.72%	

Source: Enquête logement 2006 INSEE – Results for the France

Note: *Percentages are higher than 100% as some household use several kinds of fuels for their heater. The "others" category mainly includes urban heating and geothermic system.

B. Energy expenditures and final energy demand

As the aim of this paper is to estimate the final energy demand, we have to consider the energy expenditures of each household by type of fuel and calculate their actual fuel consumption in kWh/m². The 2006 *Enquête logement* provides information on energy expenditures by type of fuel: natural gas, electricity, oil, wood, district

service, coal. Fifteen percent of households rely exclusively on electricity, while 85% of households use at least two types of fuels. As nearly 90% of households use oil, electricity or natural gas, we focused our analysis on these three fuel types. Households which mainly use wood, coal or a district service to heat therefore were excluded.

As shown in Table 1, the distribution of heating systems is significantly different in the three housing categories (individual, collective public housing, and collective private housing). We consequently chose to study the process by which households chose their heating system separately from the effect of the system on energy demand. Crossing the category of dwelling with the type of heating system, we obtained 9 different segments.

Table 2 – Weights of different segments

Category of housing	Segment by type of heating system	Weight in the total sector*	Weight in the category of dwelling
Individual house	1. Electricity heating	21.54%	38.17%
	2. Natural gas heating	18.50%	32.79%
	3. Fuel oil heating	16.38%	29.04%
	<i>Total</i>	56.42%	100%
Collective public housing	4. Individual electricity heating	1.62%	12.23%
	5. Individual natural gas heating	2.96%	22.36%
	6. Collective natural gas heating (natural gas or fuel oil)	8.67%	65.41%
	<i>Total</i>	13.25%	100%
Collective private housing	7. Individual electricity heating	13.45%	44.34%
	8. Individual natural gas heating	7.96%	26.27%
	9. Collective heating (natural gas or fuel oil)	8.91%	29.39%
	<i>Total</i>	30.33%	100%
<i>Total</i>		100%	

Note 1: *the total considered does not include households who do not use one of these three types of fuels for their heating system.

Note 2: * weights are applied to keep the sample representative.

Fuel prices in 2006, depending on the type of housing and the type of heat, were

obtained from the *Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie* (Pegase Data set). The combination of fuel expenditures in euros and their unit price by kW/h allowed us to calculate household consumption by type of fuel.

This step of the work was particularly delicate and led us to eliminate a significant part of the sample, particularly households using collective heating systems. About 44% of such households are totally unable to declare their actual energy expenditures in the survey because the energy bill is combined and paid with other shared charges (expenditures for the lift, cleaning of common space, gardening, etc...). This is an interesting result *per se* as we can thereby deduce that about 7% of French households cannot properly react to any kind of price-signal because they do not perceive the real cost of their fuel use. In the rest of the paper, our sample is composed of 20 301 dwellings.

Table 3 presents the total energy consumption by type of heating system (in kWh/m²). We estimate that final energy demand is significantly higher for individual houses than for collective housing: 201 kW/h/m² per year for individual houses *versus* 183 kW/h/m² for collective public housing units and 176 kW/h/m² for collective private housing units. These results are in the range of what commonly is calculated in the French residential sector (ANAH, 2008).

It is noteworthy that households equipped with an electric heater consume significantly less energy compared to those heating with other fuels. The difference in energy consumption per m² between users of electric and oil heating is particularly sharp in households living in an individual house. This result already has been demonstrated by Nesbakken (1999) in a study in Norway. Households which only have electric heaters use far less energy than households using other heating systems.

Table 3 - Final energy consumption for individual and collective housing:

	Individual housing		Collective housing			
			Public		Private	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Energy expenditure (euros/m ² , all energies taken together)	15.21	5.67	13.95	5.32	14.86	6.37
Final energy consumption (kWh/m ² , all energies taken together)	203.22	89.42	-	-	178.42	84.02
Owners	189.79	87.72	183.18	86.88	173.19	86.87
Tenants	200.97	89.42	183.18	86.89	176.16	85.42
Total						
Final energy consumption by heating system (kWh/m ²):						
Individual heating:						
Electricity	158.27	74.51	132.82	70.10	149.69	78.97
Natural gas	216.58	84.27	194.20	91.05	194.87	88.56
Fuel	239.48	89.85	-	-	-	-
Total	200.97	89.42	172.49	89.19	166.50	85.49
Collective heating:						
Electricity	-	-	-	-	-	-
Natural gas	-	-	192.14	87.40	204.53	85.13
Fuel	-	-	181.49	79.86	191.66	72.91
Total	-	-	188.83	85.13	199.39	80.67
Number of observations	11 731		3 097		5 473	

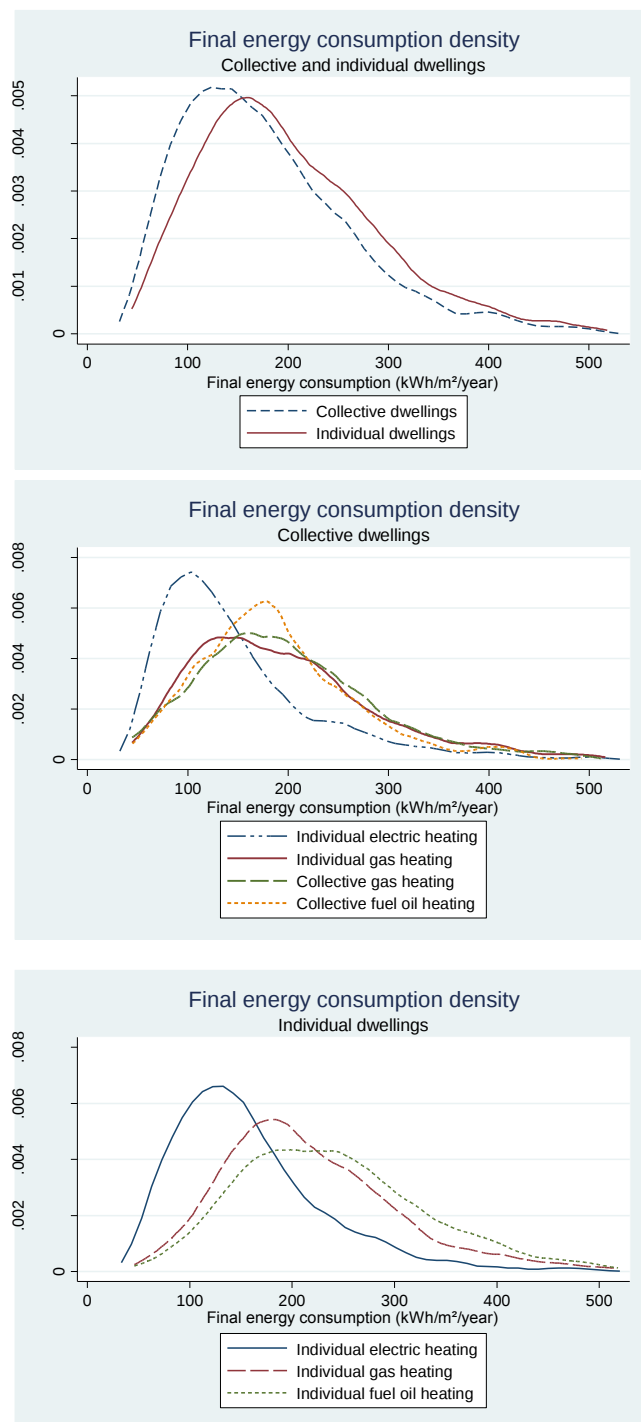
Source: Enquête logement 2006 INSEE

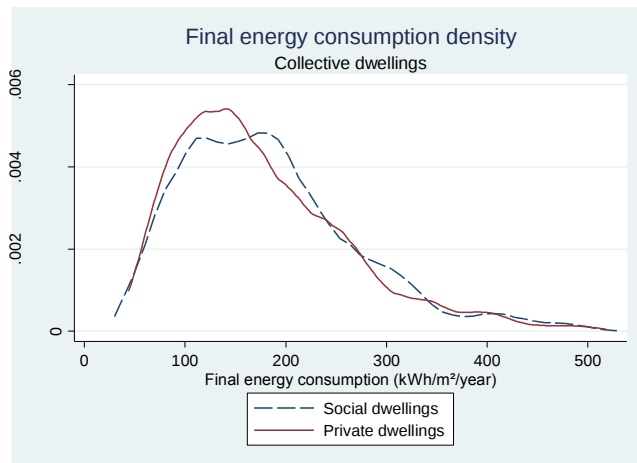
Interestingly, in collective dwellings, households using a collective heating system register a significantly higher energy consumption on average than those using an individual heating system. This result is explained both by the higher level of energy used when the energy is a public good (the incitation to reduce consumption is weak) and the difference of energy type used. Household that use individual systems often heat their dwellings with an electrical heater, which generally is associated with significantly lower consumption. However, when one considers natural gas, the energy demand of households equipped with a collective heating system is not significantly higher than that of households equipped with an individual meter.

Finally, it is noteworthy that, on average, we do not register a large difference of consumption between households living in collective public housing units and those living in collective private housing despite large differences in terms of heating systems. For instance, 71% of households in the private sector have an individual heater *versus* 35% in the social sector. Yet with the exception of households equipped with electric heaters, the consumption per m² of households living in private units is

broadly the same as that of households living in public housing.

Figure 1 : Final energy consumption density, by type of dwellings.





source : author's calculations. Enquête
Logement 2006.

III. Discrete-continuous choice model of energy demand: literature and methodology

A. Literature

Techniques used to model residential energy consumption can be grouped broadly into two main categories: “top-down” and “bottom-up” models. The top-down approach considers the residential sector as a whole and does not distinguish energy consumption due to individual end-uses. The bottom-up approach includes all models which use input data. A precise review of these techniques can be found in Swan and Ugursal (2009) and Zagamé (2008).

Within the bottom-up approach, there are three general methodological frameworks employed to model residential energy demand (Newell and Pizer, 2008). The first is a standard OLS or generalized least squares (GLS) methodology that estimates energy consumption by taking into account its main determinants (e.g. energy prices, household income, climate, house structure and type of insulation, appliance stock variables, etc...). The weakness of this approach is that it fails to address the issue of fuel choice and appliances stock (Branch, 1993).

The second estimates an energy demand equation and an appliance stock equation simultaneously (Garbacz, 1984a, 1984b) to address endogeneity in appliance stock. These equations are generally estimated using two-stage least squares.

The third category uses a multiple-stages model involving both discrete and continuous choice analysis (Dubin and McFadden, 1984; Baker and Blundell, 1991; Bernard et al., 1996; Nesbakken, 1999; Vaage, 2000; Nesbakken, 2001; Newell and Pizer, 2008). This approach is based on a framework in which energy provides utility not directly but indirectly through the use of a stock of appliances (common appliances such as refrigerators, lighting, but also cooling and heating system of space and water). Due to this dependency on appliance use, elasticities should not be

estimated exclusively on the basis of one energy equation, but also on the choice of fuels for heating, cooling, and the stock of other appliances. This model category differs from the second approach because the models are sequential.

Most literature using discrete-continuous models have focused on the impact of price and income on energy consumption. Table 4 compares the results of studies which used disaggregate cross-sectional data and discrete and continuous models.

On one hand, in most studies, income-elasticity is estimated to be very low at less than 0.14. Energy consumption is a normal good, but remains weakly responsive to an increase of income.

On the other hand, there is a considerable variation in estimates of energy price elasticities, ranging from -0.26 to -1.14 for own-price elasticity of electricity, and from -0.04 to -1.6 for own-price elasticity of natural gas. The own-price elasticity of fuel oil has rarely been estimated: the estimate obtained by Newell and Pizer (2008) in the commercial sector is particularly high, reaching -2.95.

Table 4 : Estimates of income elasticities and price elasticities for energy consumption in the literature using discrete-continuous models and micro data.

	Price elasticity	Income elasticity
Bernard, J. T., D. Bolduc and D. Bélanger (1996). Quebec residential demand for electricity. Discrete-continuous choice model (heating equipment), from IV-method. Short-run results.		
Own-price elasticity of electricity	-0.67	0.14
Cross-price elasticities of: Oil	0.04	
Gas	0.08	
Dubin, J. A. and D. L. McFadden (1984). USA. Discrete-continuous choice model (heating equipment). Elasticities of household electricity demand, including portfolio shift.		
Own-price elasticity of electricity	-0.26	0.02
Cross-price elasticity of gas	0.39	
Halvorsen B. and B.M. Larsen (2001). Norway. Longitudinal approach. Analysis of flexibility of household electricity demand over time. Discrete-continuous choice model (main appliances). Norway Survey of Consumer Expenditure. 1974-1994.	-0.43	
Short run electricity elasticity	-0.44	
Long run electricity elasticity		
Labandeira X., Labeaga J. M., and M. Rodriguez (2006). Spain, household micro-data. Demand model for a simultaneous analysis of energy goods, IV-method. Results from whole sample, uncompensated own-price elasticities of:	-0.79	-
electricity	-0.04	
natural gas	-0.36	
LPG		
Nesbakken R. (2001). Norwegian micro-data. Simultaneous discrete-continuous choice model (heating equipment). Short-run results.	-0.21	0.06
Nesbakken R. (1999). Norway. Simultaneous discrete-continuous choice model (heating equipment). Short run results, from pooled data 1993-95.	-0.50	0.01
Newell R. G. and W. A. Pizer (2008). US commercial sector. Discrete-continuous choice of multi-fuel energy demand. Long-run results, from a detailed model then aggregated with fuel choice variable.		
Own-price elasticities of: electricity	-1.14	-
natural gas	-1.60	
fuel oil	-2.95	
district services	-0.88	
Vaage K. (2000). Norway. Household's energy demand estimated with a discrete-continuous choice model (heating equipment). Long-run results, from a reduced model.	-1.24	-

B. Model

Our approach belongs to the category of discrete-continuous choice models (Heckman et Robb, 1985). The first decision involved in energy consumption is generally the choice of energy appliances. Due to data limitations in 2006 *Enquête Logement*, we can only examine in this study heating system choices. However, given

the considerable weight of heating expenditures in French households' total residential energy expenditures, which was assessed at about 70% of total energy consumption by INSEE, one may consider that this constraint is not too restrictive.

In France, in the collective housing sector (private and public), households have to choose between three mutually exclusive modalities for their heating system:

- collective heating system with gas or fuel
- individual system with electricity
- individual system with gas

In the individual housing sector, all houses have an individual heating system, thus households have to choose between three types of fuel for their main heating system:

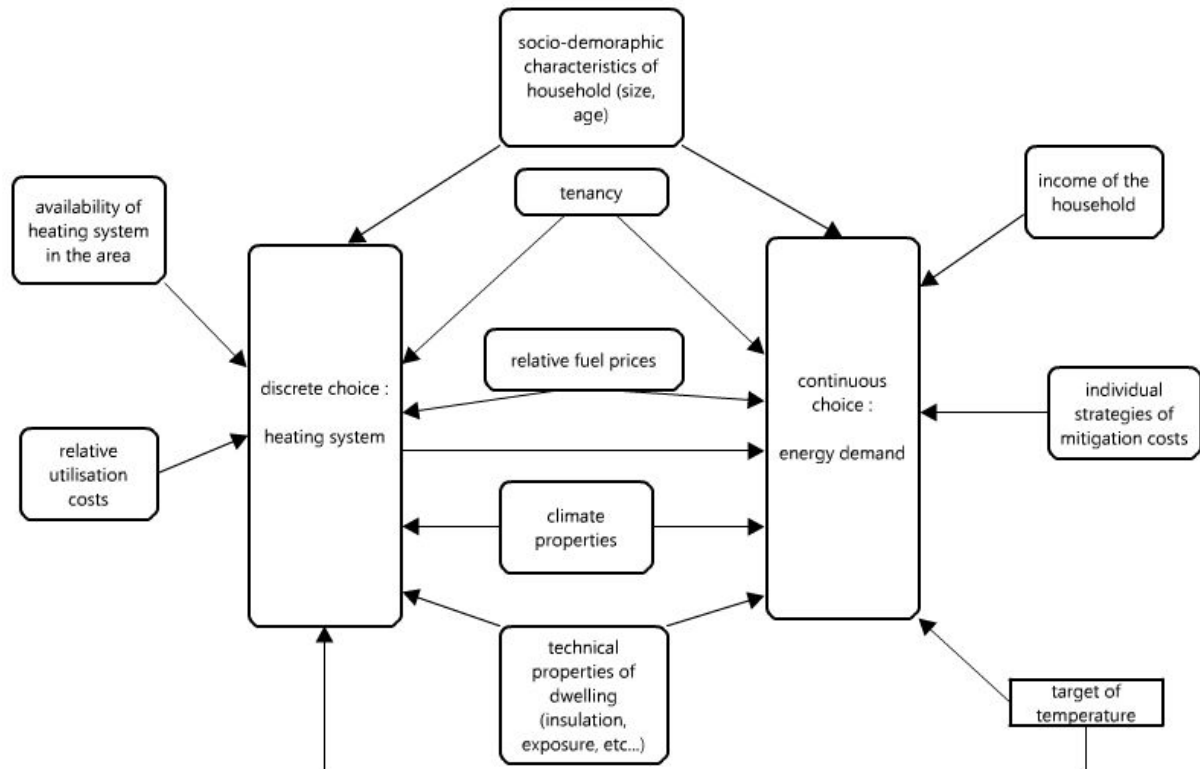
- natural gas
- electricity
- oil

Conditional on this choice, a household then decides how much energy to consume. Since these decisions are related, the two choices must be modeled jointly to avoid biased and inconsistent parameter estimates.

In the first stage of our model, decisions regarding space heating systems are modeled with a multinomial probit. This is the "heating system choice". In the second stage, demand for energy (the logarithm of the consumption in kW/h/m² per year) conditional on the chosen heating system then is estimated using a double least squares model to treat the possible endogeneity of energy price. This is the "energy demand choice". Finally, the model captures the possibility of correlation between unobservable variables in the discrete and the continuous stages⁷⁴. The main determinants used in our model are presented in Chart 1.

⁷⁴ A correction bootstrap is applied in the second step to eliminate a potential estimation bias due to this methodology in two steps (Murphy et Topel, 1985).

Chart 1: Main determinants of heating system choice and energy demand included in the model.



The decision to use a discrete-continuous model was based on the hypothesis that there is a relationship between a heating technology and the intensity of use of the technology. Our model includes variables which are supposed to explain both choices, such as some particular properties of dwelling (exposure, vintage, dwelling size), relative fuel prices, and type of tenancy. We assume that the relative utilization cost of the heating system (which includes fixed costs such as subscription and working costs) and the availability of the type of fuel in the area explain the discrete choice but do not explain the level of utilization of the equipment. The energy demand itself is explained by building properties, such as the level of insulation, some socio-demographic variables, such as household size, the income per unit of consumption, the climate, and a household's cost mitigation strategies.

C. Description of data and variables

The variables collected in the *Enquête-Logement 2006* can be organized into the five main categories described in Table 5: (1) technical properties of the dwelling, (2) climate areas (France is divided into 7 different climate areas, see Map in appendix), (3) socio-demographic variables of the household, (4) average price of energy depending on fuels used by the household, (5) heating system. The influence of a household's preferences or habits such as room temperature, restricted heated space, airing, and strategies of mitigation costs are not observed and their influence could not be measured in the following regressions.

Table 5: Variables description

Explained variables	Name of Vector	Description
Energy consumption (by m ²)		Final energy consumption in kwh par m ² , for all types of fuels (natural gas, electricity and fuel)
1. Technical properties of dwelling		
<i>Individual house type</i>	DW	Dummies: gathered houses, semi detached houses, detached houses
<i>Collective dwelling characteristics</i>		Number of dwellings in block of flats; floor
<u>Size</u>		Dwelling size in m ² ;
<i>Specificities</i>		Dummies: roof<3m, professional room in the dwelling; veranda, damp, cellar not converted, attic, swimming pool
<i>Construction date (vintage)</i>		Dummies: Before 1948; between 1949 and 1974; between 1975 and 1989; between 1990 and 2005
<i>Insulation characteristics</i>		Dummies: double glazing, recent roof insulation, sufficient roof insulation, insufficient roof insulation, nonexistent roof insulation
<i>Exposure (according to households)</i>		Dummies: poor exposure, medium exposure, good exposure
<u>Location</u>		Dummies: downtown, suburb, rural town.
2. Climate Areas	CL	Dummies: mountain climate, semi continental climate, cooler oceanic climate, mixed oceanic climate, oceanic climate, mild oceanic climate, mediterranean climate

3.	Heating system	HS	Dummies: collective heating system with gas or fuel, individual system with electricity, individual system with gas, individual system with fuel
4.	Price of energy	PE	<i>Fuel prices</i> considered for each household are those that would have been applied if households had chosen this fuel. Price of kW/h is 0.0645 € for oil, 0.0594 € on average for natural gas, and 0.1005 € on average for electricity. In France, fuel price for each household is conditional on its stock of appliances and heating system. <i>Average energy price</i> : weighted average of different fuel prices; weights depending on the specific mix of fuels used by each household.
5.	Socio-demographic variables of the household	SDH	
	<i>Demographic characteristics</i>		Nb of persons in the dwelling, age of household member answering the questions in the survey
	<i>Occupancy statute</i>		Dummies: own, renter, social-rent, private rent, free housed
	<i>Educational level of household member answering the questionnaire</i>		Dummies: without certificate, less than baccalaureate, baccalaureate, more than baccalaureate.
	<i>Income</i>		Monthly income per consumption unit

IV. Main determinants of energy demand in individual houses and in collective housing

The sample was divided into three main categories: individual houses, collective private housing and collective public housing. In this section, we focus on the second step of our model: continuous choice. To predict the probability of each modality, we use the results obtained in the first step (the discrete choice probit multinomial model, details of which are in the Appendix). Briefly, our estimates show that electric heat is mainly chosen by dwellings and houses built after 1975 that are equipped with double glazing; these dwelling are relatively small, mainly located in rural areas and often occupied by tenants rather than their owners. Natural gas heating generally is found in town in rather large, semi-detached houses built between 1949 and 1975 that rarely are equipped with double-glazing and are owner-occupied. Fuel heating mainly is found in large detached houses in rural areas that were built before 1974, rarely are equipped with double-glazing, and are occupied by their owner.

A. Process of estimations in the second step

We try to explore both the main determinants of energy demand per m² and the main contribution of each variable category to explain energy consumption per m². Particularly, we want to compare the ability of a household's socio-demographic characteristics (**SDH**) and the energy price (**P**) to explain energy consumption per m² with those of the technical properties of the dwelling (**DW**), heating system (**HS**), and climatic specificities of the area (**CL**).

In order to achieve this goal, four models were tested to compare the prediction power of the five different categories of variables (F-Test) and the goodness of the fit of the reduced model (Adjusted R squared).

(i) *Complete model*: logarithm of energy consumption per m² in the dwelling i and in the type k explained by technical properties of dwelling (**DW**), climatic areas (**CL**), predicted heating system ($\hat{\mathbf{HS}}$), Price of energy used (**P**), household socio-demographic characteristics (**SDH**)

$$\ln(C_{i,k}) = \beta_o + \beta_1 \mathbf{DW}_{i,k} + \beta_2 \mathbf{CL}_{i,k} + \beta_3 \hat{\mathbf{HS}}_{i,k} + \beta_4 \mathbf{P}_{i,k} + \beta_5 \mathbf{SDH}_{i,k} + \varepsilon_{i,k}$$

(ii) *technological model*: reduced model, consumption explained by characteristics of building (**DW**), heating system (**HS**) and climate dummies (**CL**)

$$\ln(C_{i,k}) = \beta_o + \beta_1 \mathbf{DW}_{i,k} + \beta_2 \mathbf{CL}_{i,k} + \beta_3 \hat{\mathbf{HS}}_{i,k} + \varepsilon_{i,k}$$

(iii) *eco-technological model*: reduced model, technological model including the average price (**P**)

$$\ln(C_{i,k}) = \beta_o + \beta_1 \mathbf{DW}_{i,k} + \beta_2 \mathbf{CL}_{i,k} + \beta_3 \hat{\mathbf{HS}}_{i,k} + \beta_4 \mathbf{P}_{i,k} + \varepsilon_{i,k}$$

(iv) *socio-demographic model*: reduced model, consumption explained by the household characteristics only (**SDH**)

$$\ln(C_{i,k}) = \beta_o + \beta_5 \mathbf{SDH}_{i,k} + \varepsilon_{i,k}$$

These four different models (reduced and complete) were estimated on the three different residence types. Results are presented in the tables that follow.

B. Main determinants of energy demand in individual houses: results

Table 6a shows that about 35% of variance is explained by the complete model. Nineteen percent of variance is explained by technical properties of the house, the type of heating system and the climatic characteristics of its area (model ii). Substantially higher R^2 were obtained by adding the average energy price (model iii) in order to explain the level of energy consumption per m^2 . It is striking to observe how the socio-demographic model (iv) registers a low R^2 , emphasizing that the influence of socio-economic factors on energy consumption is weak compared to that of building features and climate. Only 2% of the variance could be explained by the sole observed socio-demographic characteristics of the household.

Table 6a: Comparison of goodness of fit of different models. Variable to explain: consumption per m^2 (in $\ln$) in individual houses. F-test and Adjusted R-squared

Variables included	Complete model (i)	Technologic model (ii)	Economic and technologic model (iii)	Socio-demographic model (iv)
Group 1: Technical properties of dwelling DW	F: 90.78***	F: 66.39***	F: 80.08***	-
Group 2: climatic dummies CL	F: 62.35***	F: 56.36***	F: 61.77***	-
Group 3: heating system HS	F: 14.96***	F: 52.00***	F: 33.29***	-

Group 4: price of energy P	F: 439.51***	F: 422.99***	-
	-		
Group 5: socio-demographic variables SDH	F: 13.42***	-	F: 33.66***
	-		
Adj R-squared	0.3543	0.3273	0.0271
	0.1991		
observations	11731	11737	11737
	11737		

Note: the complete list of each group of variables is shown in Table 4.

Table 6b shows the detailed results for the complete model. It appears that among the technical properties of an individual house, the factors that significantly increase the level of consumption per m² include being a detached house rather than an attached one, being built between 1949 and 1974 rather than before 1948, having a swimming-pool, a professional room, a cellar or an unconverted attic. In contrast, the factors that decrease the level of consumption per m² include being a large house or one with few rooms. The quality of roof insulation decreases the level of consumption per m², but surprisingly double-glazing has no impact, *ceteris paribus*. This surprising result may be due to the "rebound effect", which holds that investment in a new technology such as double-glazing could entail a change in household behavior (increase of temperature target, for instance) which offsets the beneficial effects of the technology. It could be interesting to corroborate this interpretation with further research.

Climate dummies conformed to expectation. *Ceteris paribus*, the level of consumption per m² is lower in a house heated by electricity than in a house heated by fuel oil. However, there is no significant difference in consumption per m² between a dwelling heated by natural gas and one heated by electricity. Energy-elasticity is equal to -0.47, which is in the range of estimates reported in Table 4. With cross-section data, this means that households facing higher average energy prices demand less energy than others.

Income-elasticity is particularly low (0.02), which is similar to the average estimates obtained in other studies using micro-data on households (see Table 4). Among socio-demographic characteristics, the age of the head of household and the number of persons living in the dwelling increase the intensity of energy used per m². Owners have a higher level of energy consumption compared to tenants. Education level is not significant.

Table 6B : Estimates of household energy consumption by m² in a year: Individual dwellings⁷⁵

Linear regression for individual dwellings, all heating system taken together. Double least-squared			
Explained variable: Household energy consumption by m ² a year (in logarithm)			
Explanatory factors	Coeff.	Bootstrap correction	Student
1. Technical properties of dwelling			
<i>House type</i>			
gathered_houses	ref		
semi_detached_houses	-0.0050	-0.43	
detached_houses	0.0760	6.93	***
<i>Dwelling area</i>			
ln_dwelling_area (m ²)	-0.4995	-27.40	***
<i>Specificities</i>			
roof_less_3meters	-0.0288	-1.96	*
professional_room	0.0494	2.07	**
veranda	0.0161	1.29	
damp	-0.0021	-0.21	
cellar_not_converted	0.0557	5.38	***
attic	0.0306	4.06	***
swimming_pool	0.1432	9.59	***
<i>Dwelling construction period</i>			
construction_before48	ref		
construction49_74	0.0482	2.63	***
construction75_89	-0.0147	-0.50	
construction90_05	-0.0167	-0.25	
<i>Insulation characteristics</i>			
recent_roof_insulation	-0.0668	-3.44	***
adequate_roof_insulation	-0.0222	-1.25	
inadequate_roof_insulation	-0.0106	-0.56	
nonexistent_roof_insulation	ref		
recent_roof_insulation*construction75_89	0.0374	1.31	
recent_roof_insulation*construction90_05	-0.0621	-1.54	
adequate_roof_insulation*construction75_89	-0.0326	-1.44	
adequate_roof_insulation*construction90_05	-0.0349	-0.84	
double_glazing	-0.0259	-1.64	
double_glazing*construction49_74	-0.0306	-1.46	
double_glazing*construction75_89	-0.0438	-1.83	*
double_glazing*construction90_05	-0.0708	-1.15	
<i>Dwelling exposure (according to households)</i>			
poor_exposure	ref		
medium_exposure	-0.0140	-0.50	
good_exposure	-0.0142	-0.53	
2. Climatic areas			
mountain_climate	ref		
semi_continental_climate	0.0501	2.57	**
fresh_oceanic_climate	-0.0411	-2.19	**
oceanic_climate_range	0.0134	0.73	
oceanic_climate	-0.1621	-9.26	***
soft_oceanic_climate	-0.1217	-6.03	***
mediterranean_climate	-0.1331	-6.72	***
3. Heating type			
predicted probability to choose an electric heating	ref		
predicted probability to choose an gas heating	0.0512	1.18	

predicted probability to choose a fuel oil heating	0.2563	4.20	***
4. Energy price			
average energy price	-0.4774	-21.79	***
5. Households socio-demographic characteristics			
<i>Households demographic characteristics</i>			
ln_nb_persons	0.4450	4.40	***
ln_age_ref_person (age of household member answering the questions in the survey)	0.1950	7.04	***
ln_nb_persons*ln_age_ref_person	-0.0682	-2.67	***
<i>Household occupancy statute</i>			
ownership	ref		
social_rent	-0.0384	-2.33	**
private_rent	-0.0527	-3.34	***
free_housed	-0.0634	-2.36	**
<i>Educational level of household member answering the questions in the survey</i>			
without_certificate	ref		
brevet_diploma or vocational_training_qualification	.0062	0.57	
baccalaureat	0.0016	0.11	
baccalaureat+2 years or more	-0.0042	-0.34	
<i>Income</i>			
annual_income_per_consumption_unit	0.0245	3.58	***
constant	7.2807	47.47	***
Number of observations	11731		
R ²	0.3568		

Note: *** Significant at 1 per cent. ** Significant at 5 per cent. * Significant at 10 per cent.

C. Main determinants of energy demand in collective housing units: results

Table 7a and 7b present estimations of logarithm of energy consumption per m² in collective housing, separating results for private and public housing units. Table 7a shows once again that consumption per m² in collective units is determined strongly by technical and climate properties of the dwelling, as in individual houses. Income and household socio-demographic characteristics only play a small part in explaining the variance (about 6% in the private sector 1% in the social sector). Once again, it appears that energy demand is almost completely determined by technology and climate. Without major investments in building characteristics, households cannot modulate their energy bill.

Table 7a: Comparison of goodness of fit of different models. Variable to explain : consumption by m² (in ln) in collective dwellings F-test and Adjusted R-squared.

Table 7a: Comparison of goodness of fit of different models. Variable to explain : consumption by m² (in ln) in collective dwellings F-test and Adjusted R-squared.

Variables included	Complete model (i)	Technologic model (ii)	Economic and technologic model (iii)	Socio-demographic model (vi)
Private collective dwellings				

Group 1: Technical properties of dwelling DW	31.21***	64.56***	76.24***	-
Group 2: climatic dummies CL	21.83***	31.60***	35.69***	-
Group 3: heating system HS	4.78***	9.62***	2.14 ^{ns}	-
Group 4: price of energy P	498.17***	-	481.16***	-
Group 5: socio-demographic variables SDH	39.66***	-	-	52.02***
Adj R-squared	0.3575	0.2042	0.3214	0.0613
Observations	5 473	5 473	5 473	5 473
Social collective dwellings				
Group 1: Technical properties of dwelling DW	26.77***	12.95***	16.86***	-
Group 2: climatic dummies CL	15.31***	13.54***	16.46***	-
Group 3: heating system HS	0.89 ^{ns}	6.42***	4.23**	-
Group 4: price of energy P	64.87***	-	40.80***	-
Group 5: socio-demographic variables SDH	30.54***	-	-	8.76***
Adj R-squared	0.2969	0.1030	0.2444	0.0148
Observations	3 097	3 097	3 097	3 097

Table 7b shows the detailed results for the complete model. It appears that among the technical properties of a unit, the larger the collective building, the higher the unit in the building, the better the exposure, the more recent the construction (built after 1990), the lower is the consumption per m². Similar to individual houses, the

size of the flat has a negative impact on consumption. Double-glazing has no impact in the social sector whereas its impact is ambiguous in the private sector. Among climate dummies, the level of consumption is found to be lower only in the oceanic climate. *Ceteris paribus*, in the private housing sector, there is a strong effect of collective heating on energy consumption. Dwellings equipped with a central heater (either natural gas or oil) have a significantly higher consumption than those equipped with an individual heater (either natural gas or electricity). This effect is not significant in the public housing sector.

Results show that price-elasticity is significantly higher in the collective dwelling than in the individual dwelling category (0.71-0.78 *v.s.* 0.47). This means that households are responsive to the price of energy. A household whose average energy price is 1% higher than that of another will demand less energy per m², *ceteris paribus*. On this topic, there is almost no difference between the public and private sector. Income elasticity is not significant in collective dwellings, neither in the public housing category, nor in the private one. In the private sector, older households demand more energy per m² than younger ones. Education also changes demand: more educated people demand less energy than less educated ones.

Table 7b: Estimates of household energy consumption by m² in a year: collective dwellings

Linear regression for collective dwellings. Continuous choice. Double least				
Explained variable: Household energy consumption by m² a year (in logarithm)				
Explanatory factors	Private collective dwelling		Social collective dwelling	
	Coefficient	Student t	Coefficient	Student t
1. Technical properties of dwelling				
Collective dwelling characteristics				
nb of dwellings in collective blocks of flats (ln)	-0.0338	-4.14 ***	-0.0220	-1.63
floor (ln)	-0.0544	-5.06 ***	-0.0794	-4.06 ***
Dwelling area				
ln dwelling area (m ²)	-0.4550	-10.97 ***	-0.5650	-16.98 ***
Specificities				
roof less 3meters	0.0302	1.27	0.0184	0.27
veranda	0.0168	0.41	0.0287	0.59
damp	0.0221	1.60	0.0612	3.54 ***
Dwelling construction period				
construction before48	ref		ref	
construction49 74	-0.0449	-1.36	-0.1328	-1.19
construction75 89	-0.0513	-1.61	-0.0895	-1.24
construction90 05	-0.2297	-2.76 ***	-0.2087	-1.98 **
Insulation characteristics				
double glazing	-0.0611	-2.77 ***	-0.0355	-0.49
double glazing*construction49 74	0.0796	2.75 ***	0.0139	0.19
double glazing*construction75 89	0.0063	0.16	0.0065	0.08
double glazing*construction90 05	0.1444	1.74 *	0.0534	0.48

Dwelling exposure (according to households)

poor exposure	ref		ref	
medium exposure	-0.0294	-1.18	-0.0729	-2.00 **
good exposure	-0.0334	-1.41	-0.0551	-1.68 *
2. Climatic areas				
mountain climate	ref		ref	
semi continental climate	0.1093	2.73 ***	0.0569	1.16
fresh oceanic climate	-0.0564	-1.31	-0.0002	-0.00
oceanic climate range	0.0633	1.84 *	0.0157	0.36
oceanic climate	-0.1692	-4.63 ***	-0.2066	-4.64 ***
soft oceanic climate	-0.0206	-0.54	-0.0630	-1.26
mediterranean climate	-0.0393	-1.03	-0.0406	-0.80
3. Heating system choice				
predicted probability to choose an individual	ref		ref	
predicted probability to choose an individual gas	0.0554	0.54	-0.0793	-0.67
predicted probability to choose an collective	0.2854	2.53 **	0.1613	0.74
4. Energy price				
ln average price	-0.7167	-22.19 ***	-0.7837	-8.08 ***
5. Households socio-demographic characteristics				
Households demographic characteristics				
ln nb persons	0.1940	15.04 ***	0.2055	13.34 ***
ln age ref person (age of household member	0.0828	4.10 ***	0.0908	3.43 ***
Household occupancy statute				
rent and free housed	0.5180	4.19 ***		
rent and free housed*area	-0.1241	-4.20 ***		
Educational level of household member				
without certificate	ref		ref	
less than baccalaureat	-0.0484	-2.57 **	-0.0159	-0.84
baccalaureate	-0.0578	-2.54 **	-0.0187	-0.64
more than baccalaureate	-0.0346	-1.67 *	0.0105	0.38
Income				
ln annual income per consumption unit	-0.0020	-0.24	0.0051	0.39
constant	8.0858	42.15 ***	8.6554	26.51 ***
number of observations	5473		3097	
R ²	0.3613		0.3037	

Note: *** Significant at 1 per cent. ** Significant at 5 per cent. * Significant at 10 per cent.

V. Conclusion

The residential energy demand of French households, conditional on their heating system, was estimated in the study using a micro data-set. It was assumed that their heating systems are endogenous. This means that households face a two-stage decision process when determining their energy demand. In the first step, they choose which energy to use for their heating system (electricity, individual or collective natural gas, individual or collective fuel). This is the "fuel choice" which is assumed to be based on household characteristics, dwelling properties, and location. Conditional on this first step, households then determine how much energy to use in a second step. This is the "energy demand". We estimated energy demand for three different types of dwellings: individual houses, privately owned units in collective buildings and public housing in collective buildings. We compared the prediction

power of four different models for each category of housing: (i) complete model, (ii) technological model (consumption explained by characteristics of building, heating system and climate dummies), (iii) eco-technological model (technological model with average level of energy price), (iv) socio-demographic model (consumption explained by household characteristics alone).

The first result is the weak part played by household socio-demographic characteristics in explaining the intensity of energy used per m². The number of household members, their income, their education, and the age of the head of the household are broadly significant, but these variables are unable to explain more than 6% of variance in the intensity of energy used. Almost all of the explained variance is attributed to the quality of the dwelling (insulation, double-glazing, exposure, quality of the roof, etc...), the type of heating technology, and the climate dummies. This means that, in the short run, the possibility for a given household in a given dwelling to reduce its intensity of energy consumption is extremely weak in the absence of investment in the quality of the lodging. The main policy implication of this result is that France only can reach its objective of reducing energy consumption and associated CO₂ emissions by adopting a very ambitious policy of building renovation. In the short run, without large investments in insulation and in new types of efficient appliances, changes in energy consumption will be weak.

The second contribution of our study is to propose an estimation of the price-elasticity and the income-elasticity of energy demand per m², an issue which is not very well documented in the literature for French households. Results show that price-elasticities are in the range of what is generally found in other countries with the same methodology and the same kind of micro cross-section data-set. Price-elasticity reaches -0.71 in the private sector, -0.78 in the social sector and -0.47 in individual houses. This result means that, in the short run, households are responsive to an increase of their average energy price. In contrast, we find almost no variation of energy used per m² with the level of household income. This result also is common in the literature using the same type of methodology.

The third contribution of this paper is to identify some of the main sources of energy conservation in the French housing sector. In addition to standard measures such as

roof insulation and the improvement of exposure in new buildings, it appears that the replacement of collective systems by individual heating systems could be helpful in the private sector. Energy consumption of households who live in collective buildings equipped with collective heating is significantly higher than others, *ceteris paribus*. In contrast, the effect of double-glazing is surprisingly ambiguous, which raises a possible "rebound effect" problem.

Acknowledgement :

We thank INSEE and Centre Maurice Halbwachs for providing the data set (Enquête Logement 2006), Mareva Sabatier for her advices and Grace Delobel for providing language help.

VI. References

- ANAH, 2008. Modélisation des performances énergétiques du parc de logements. Etat énergétique du parc en 2008. Rapport détaillé, étude réalisée par J. Marchal sous la tutelle d'E. Lagandre.
- Baker, P., Blundell, R., 1991. The microeconomic approach to modeling energy demand: some results for UK households. *Oxford Review of Economic Policy* 7 (2), 54-76.
- Bernard J.Th., Bolduc, D., Bélanger, D., 1996. Quebec residential electricity demand: a micro-econometric approach, *Canadian Journal of Economics*, XXIX (1), 92-113.
- Branch, E.R., 1993. Short run income elasticity of demand for residential electricity using consumer expenditure survey data, *The Energy Journal*, 14 (4), 227-236.
- Dubin, J.A., McFadden, D.L., 1984. An Econometric Analysis of Residential Electric Appliance Holdings and Consumption, *Econometrica*, 52(2), 345-362.
- Garbacz, C., 1984a. Residential electricity demand: a suggested appliance stock equation. *The Energy Journal*, 5 (2), 150-154.
- Garbacz, C., 1984b. A national micro-data based model of residential electricity demand: new evidence on seasonal variation, *Southern Economic Journal* 51. (1), 235-249.
- Heckman, J., Robb, R., 1985, Alternative Methods for Evaluating the Impact of Interventions: An Overview, *Journal of Econometrics* 30(1-2), 239-267.
- Labandeira, X., Labeaga, J.M., Rodriguez M., 2006. A Residential Energy Demand System for Spain, *The Energy Journal*, 27(2), 87-111.
- Larsen, B.M, Nesbakken, R., 2004. Household electricity end-use consumption: results from econometric and engineering models, *Energy Economics*, 26(2), 179-200.
- Murphy, K., Topel, R., 1985, Estimation and Inference in Two-step Econometric Models, *Journal of Business and Economic Statistics* 4, 370-379.
- Nesbakken, R., 1999. Price Sensitivity of Residential Energy Consumption in Norway, *Energy Economics*, 21(6), 493-515.
- Nesbakken, R., 2001. Energy Consumption for Space Heating: A Discrete-Continuous

Approach, *Scandinavian Journal of Economics*, 103(1), 165-184.

Newell, R. G., Pizer, W. A., 2008. Carbon mitigation costs for the commercial building sector: Discrete-continuous choice analysis of multifuel energy demand, *Resource and Energy Economics*, 30(4), 527-539.

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

Vaage, K., 2000. Heating technology and energy use: a discrete/continuous choice approach to Norwegian household energy demand, *Energy Economics*, 22(6), 649-666.

Zagamé, P., 2008. Modèles de l'énergie et nouvelles théories du progrès technique, communication au Conseil Français de l'Energie.

VII. Appendix

Table A1. Data description

	Individual		Collective housing			
	Mean	SD	Social		Private	
			Mean	SD	Mean	SD
House type						
gathered_houses	0.1292	0.3354				
semi_detached_houses	0.2972	0.4570				
detached_houses	0.5736	0.4946				
Collective dwelling characteristics						
co_ownership	0.0512	0.2204	0.0953	0.2937	0.8060	0.3954
ln_nb_dwellings_in_block_of_flats			2.9869	1.0166	2.6148	1.0657
ln_floor			1.0946	0.6402	1.0136	0.6004
Dwelling characteristics						
ln_dwelling_area	4.6309	0.3369	4.1936	0.2759	4.1392	0.4361
roof_less_3meters	0.9432	0.2214	0.9855	0.1196	0.9190	0.2728
professional_room	0.0246	0.1548	0.0026	0.0512	0.0101	0.0999
veranda	0.1171	0.3216	0.0186	0.1350	0.0284	0.1661
damp	0.1784	0.3829	0.2720	0.4450	0.1982	0.3987
cellar_not_converted	0.2064	0.4047				
attic	0.5346	0.4988				
swimming_pool	0.0494	0.2167				
Dwelling construction period						
construction_before48	0.3011	0.4587	0.0747	0.2629	0.3510	0.4773
construction49_74	0.2377	0.4257	0.6178	0.4860	0.3351	0.4721
construction75_89	0.2651	0.4414	0.1928	0.3946	0.1624	0.3689
construction90_00	0.1962	0.3971	0.1147	0.3187	0.1514	0.3585
Insulation characteristics						
double_glazing	0.7517	0.4321	0.7999	0.4002	0.6159	0.4864
recent_roof_insulation	0.3292	0.4699				
sufficient_roof_insulation	0.4627	0.4986				
insufficient_roof_insulation	0.1247	0.3304				
nonexistent_roof_insulation	0.0834	0.2765				
Dwelling exposure (according to households)						
bad_exposure	0.0229	0.1497	0.0457	0.2088	0.0526	0.2233
medium_exposure	0.1268	0.3328	0.1649	0.3711	0.1576	0.3644
good_exposure	0.8502	0.3569	0.7894	0.4078	0.7898	0.4075
Localization						
town	0.3234	0.4678	0.5456	0.4980	0.6445	0.4787
suburbs	0.3364	0.4725	0.4201	0.4937	0.3304	0.4704
rural_town	0.3402	0.4738	0.0343	0.1821	0.0250	0.1562
Climatic areas						
mountain_climate	0.0918	0.2887	0.0879	0.2832	0.0736	0.2611
semi_continental_climate	0.1366	0.3434	0.1473	0.3544	0.1245	0.3302
cooler_oceanic_climate	0.1607	0.3673	0.1220	0.3273	0.0597	0.2369
Mixed_oceanic_climate_	0.2699	0.4439	0.4375	0.4962	0.4162	0.4930
oceanic_climate	0.1091	0.3117	0.0598	0.2372	0.0520	0.2221
mild_oceanic_climate	0.1250	0.3307	0.0492	0.2164	0.0743	0.2623
mediterranean_climate	0.1069	0.3090	0.0963	0.2951	0.1997	0.3998
Energy price						
ln_average_energies_price	1.9074	0.2329	1.8548	0.2238	1.9566	0.2477
price_of_electricity_(for_100kWh)	9.8842	0.8224	10.7179	1.1795	10.0694	1.1549
price_of_gas_(for_100kWh)	6.1693	1.3467	5.1882	1.3098	5.8280	1.4111
price_of_fuel_oil_(for_100kWh)	6.45	0	6.45	0	6.45	0
Households demographic characteristics						
ln_person	0.7827	0.5296	0.6550	0.5905	0.4804	0.5124
ln_age_ref_person (age of household member	3.9845	0.3032	3.8444	0.3368	3.8785	0.3797
Household occupancy statute						
ownership	0.8303	0.3754			0.5191	0.4997
social_rent	0.0457	0.2088			0	0
private_rent	0.0981	0.2974			0.4294	0.4950
free_housed	0.0256	0.1579			0.0515	0.2210
Educational level of household member						

less_than_baccalaureat	0.5159	0.4998	0.4841	0.4998	0.3712	0.4832
baccalaureat	0.1194	0.3242	0.1069	0.3090	0.1432	0.3503
more_than_baccalaureat	0.2127	0.4092	0.1355	0.3423	0.3793	0.4853
Standard living of households						
ln_monthly_income_per_consumption_unit	9.7412	0.6225	9.3552	0.6430	9.7611	0.7495
ln_energy_consumption (by m²)	5.2040	0.4623	5.0978	0.4879	5.0589	0.4829
nb observations	11731		3097		5473	

Map A.1. Climatic Areas of France

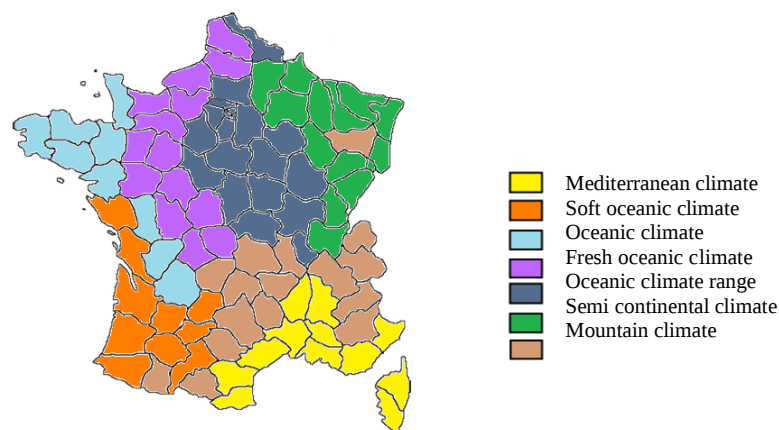


Table A2. Multinomial probit regression: Individual houses

Discrete choice	Electricity heating			Gas heating			Fuel oil heating		
	Coeff	Student t		Coeff	Student t		Coeff	Student t	
1. Technical properties of dwelling									
<i>House type</i>									
gathered_houses	ref			ref			ref		
semi_detached_houses	-0.0133	-0.84		0.0406	2.50	**	-0.0273	-2.13	**
detached_houses	0.0481	3.24	***	-0.1207	-7.87	***	0.0726	6.15	***
<i>Dwelling area</i>									
ln_dwelling_area (m²)	-0.2789	-15.31	***	0.1127	6.26	***	0.1662	12.76	***
<i>Specificities</i>									
co_ownership	0.0491	2.41	**	0.0247	1.18		-0.0738	-4.87	***
roof_less_3meters	-0.0045	-0.22		-0.0232	-1.07		0.0277	1.89	*
cellar_not_converted	-0.0759	-5.63	***	-0.0166	-1.16		0.0925	7.92	***
attic	-0.0290	-2.82	***	0.0018	0.17		0.0273	3.43	***
<i>Dwelling construction period</i>									
construction_before48	ref			ref			ref		
construction49_74	-0.1184	-8.10	***	0.0647	4.25	***	0.0537	4.60	***
construction75_89	0.3130	20.30	***	-0.1823	-12.14	***	-0.1307	-14.89	***
construction90_06	0.2046	11.69	***	-0.0494	-2.84	***	-0.1552	-15.79	***
<i>Insulation characteristics</i>									
double_glazing	0.1378	11.12	***	-0.0613	-4.53	***	-0.0765	-7.00	***
recent_roof_insulation	-0.0368	-1.55		0.0943	3.95	***	-0.0575	-3.58	***
adequate_roof_insulation	-0.0062	-0.27		0.0482	2.13	**	-0.0420	-2.75	***
inadequate_roof_insulation	0.0035	0.14		0.0354	1.36		-0.0389	-2.41	**
nonexistent_roof_insulation	ref			ref			ref		
<i>Dwelling localization</i>									
downtown	ref			ref			ref		
suburbs	0.0101	0.84		-0.0076	-0.64		-0.0025	-0.26	
rural_town	0.2050	14.49	***	-0.3965	-35.00	***	0.1914	14.99	***
2. Climatic areas									
mountain_climate	ref			ref			ref		
semi_continental_climate	-0.1511	-6.37	***	0.1757	6.16	***	-0.0246	-1.40	
cooler_oceanic_climate	-0.0448	-1.81	*	0.1425	5.34	***	-0.0978	-7.70	***
Mixed_oceanic_climate_range	-0.0652	-2.85	***	0.2328	9.61	***	-0.1676	-13.72	***
oceanic_climate	-0.0070	-0.29		0.0649	2.47	**	-0.0579	-4.00	***

mild_oceanic_climate	0.0345	1.30		0.0971	3.53 ***	-0.1316	-12.29 ***
mediterranean_climate	0.1742	6.62 ***		-0.1488	-5.83 ***	-0.0254	-1.54
3. Household characteristics							
<i>Households demographic characteristics</i>							
ln_nb_persons	-0.0430	-3.65 ***		0.0384	3.18 ***	0.0046	0.49
ln_age_ref_pers	-0.0728	-3.40 ***		0.0075	0.33	0.0653	3.74 ***
<i>Household occupancy statute</i>							
ownership	ref			ref		ref	
social_tenant	-0.1718	-10.07 ***		0.3094	15.82 ***	-0.1376	-10.18 ***
private_tenant	0.1518	7.95 ***		-0.0972	-5.21 ***	-0.0547	-4.30 ***
free_housed	0.0511	1.51		0.0065	0.20	-0.0576	-2.52 **
Rate of correct predictions	61.64%						
Number of observations	11731						

Note : *** Significant at 1 per cent. ** Significant at 5 per cent. * Significant at 10 per cent.

Table A3. probit multinomial. Social collective dwellings

Discrete choice	Individual heating				Collective heating	
	Electricity heating		Gas heating		Coeff	Student t
	Coeff	Student t	Coeff	Student t		
1. Technical properties of dwelling						
<i>Number of dwelling in apartment</i>						
ln_nb_dwellings	-0.0234	-3.61 ***	-0.0542	-5.34 ***	0.0777	7.34 ***
floor (ln)	-0.0181	-1.92 *	-0.0745	-4.68 ***	0.0926	5.55 ***
<i>Dwelling area</i>						
ln_dwelling_area (m ²)	-0.0967	-3.84 ***	0.0292	0.70	0.0675	1.55
<i>Specificities</i>						
co_ownership	0.0896	3.61 ***	-0.0252	-0.77	-	-1.91 *
roof_less_3meters	-0.0534	-0.98	-0.0266	-0.30	0.0800	0.82
<i>Dwelling construction period</i>						
construction_before48	ref		ref		ref	
construction49_74	-0.1801	-7.44 ***	-0.2924	-7.48 ***	0.4725	13.14 ***
construction75_89	0.0181	0.76	-0.1185	-2.62 ***	0.1004	2.00 **
construction90_00	0.0322	1.21	0.1383	2.84 ***	-	-3.42 ***
<i>Insulation characteristics</i>						
double_glazing	0.0155	1.11	0.0051	0.21	-	-0.83
<i>Dwelling localization</i>						
downtown	ref		ref		ref	
suburbs	-0.0011	-0.08	0.0231	0.99	-	-0.92
rural_town	0.3625	3.65 ***	-0.3319	-5.97 ***	-	-0.26
2. Climatic areas						
mountain_climate	ref		ref		ref	
semi_continental_climate	-0.0356	-1.14	0.1250	2.22 **	-	-1.56
cooler_oceanic_climate	-0.0338	-1.12	0.0121	0.21	0.0217	0.36
Mixed_oceanic_climate	0.0223	0.64	-0.1188	-2.38 **	0.0965	1.80 *
oceanic_climate	-0.0272	-0.88	0.1070	2.01 **	-	-1.46
mild_oceanic_climate	0.0772	1.46	0.0290	0.47	-	-1.73 *
mediterranean_climate	0.1095	2.28 **	0.1009	1.91 **	-	-4.23 ***
3. Household characteristics						
Households demographic						
ln_nb_persons	0.0108	0.90	-0.0226	-1.15	0.0118	0.58
ln_age_ref_pers	0.0186	0.96	-0.0125	-0.38	-0.0062	-0.18
Rate of correct predictions	63.42%					
Number of observations	3097					

Note : *** Significant at 1 per cent. ** Significant at 5 per cent. * Significant at 10 per cent.

Table A4. probit multinomial Private collective dwelling

Discrete choice	Individual heating				Collective heating	
	Electricity heating		Gas heating		Coeff	Student t
	Coeff	Student t	Coeff	Student t		
1. Technical properties of dwelling						
<i>Number of dwelling in apartment buildings</i>						
ln_nb_dwellings	-0.0377	-3.96 ***	-0.0108	-1.20	0.0486	10.23 ***
floor (ln)	-0.0158	-1.11	-0.0054	-0.40	0.0212	3.07 ***
<i>Dwelling area</i>						

ln_dwelling_area (m ²)	-0.4726	-19.39 ***	0.4044	17.74 ***	0.0682	5.50 ***
<i>Specificities</i>						
co_ownership	-0.0184	-0.80	0.0456	2.14 **	-0.0272	-1.84 *
roof less 3meters	0.0254	0.81	-0.0083	-0.28	-0.0171	-0.83
<i>Dwelling construction period</i>						
construction before48	ref		ref		ref	
construction49 74	-0.2730	-13.56 ***	0.0467	2.24 **	0.2263	12.14 ***
construction75 89	0.0746	2.79 ***	-0.1121	-4.68 ***	0.0375	2.10 **
construction90 00	0.2356	9.67 ***	-0.2124	-9.71 ***	-0.0231	-1.62
<i>Insulation characteristics</i>						
double glazing	0.1604	9.25 ***	-0.0761	-4.59 ***	-0.0842	-8.45 ***
<i>Dwelling localization</i>						
downtown	ref		ref		ref	
suburbs	-0.0134	-0.73	-0.0010	-0.06	0.0144	1.55
rural town	0.3086	5.98 ***	-0.2674	-5.85 ***	-0.0411	-1.39
2. Climatic areas						
mountain climate	ref		ref		ref	
semi continental climate	-0.1826	-3.49 ***	0.0773	1.52	0.1053	2.68 ***
cooler oceanic climate	0.0251	0.41	-0.0180	-0.31	-0.0071	-0.29
Mixed oceanic climate	0.1294	2.88 **	-0.1044	-2.49 **	-0.0250	-1.41
oceanic climate	-0.0757	-1.57	0.1331	2.85 ***	-0.0573	-5.07 ***
mild oceanic climate	0.0903	1.86 *	-0.0140	-0.29	-0.0762	-9.94 ***
mediterranean climate	0.2539	6.13 ***	-0.1620	-4.09 ***	-0.0919	-8.04 ***
3. Household characteristics						
Households demographic characteristics						
ln_nb_persons	0.0152	0.94	-0.0093	-0.61	-0.0059	-0.77
ln_age_ref_pers	-0.0079	-0.31	-0.0289	-1.20	0.0368	2.95 ***
Household occupancy statute						
ownership	ref		ref		ref	
tenant, free_housed	0.1228	6.25 ***	-0.0431	-2.30 **	-0.0797	-7.19 ***
Rate of correct predictions	67.64%					
Number of observations	5473					

Note: *** Significant at 1 per cent. ** Significant at 5 per cent. * Significant at 10 per cent.

Table A4. Tests of overidentifying restrictions:

	Individual dwelling estimation	Private collective dwelling	Social collective dwelling
Instruments	Gas city price in 1986 and 1996		Electricity price in 1986 and price of the electricity subscription
Sargan test	P-value = 0.2393	P-value =0.5078	P-value =0.9013
Basman test	P-value = 0.2402	P-value =0.5091	P-value =0.9018