



HAL
open science

Evaluation ex-post de l'efficacité de solutions de rénovation énergétique en résidentiel

Maxime Raynaud

► **To cite this version:**

Maxime Raynaud. Evaluation ex-post de l'efficacité de solutions de rénovation énergétique en résidentiel. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2014. Français. NNT : 2014ENMP0003 . pastel-00973727

HAL Id: pastel-00973727

<https://pastel.hal.science/pastel-00973727>

Submitted on 4 Apr 2014

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

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

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École nationale supérieure des mines de Paris

Spécialité "Énergétique"

présentée et soutenue publiquement par

Maxime RAYNAUD

le 11 février 2014

Evaluation ex-post de l'efficacité de solutions de rénovation énergétique en résidentiel

Directeurs de thèse : **Jérôme ADNOT** et **Bernard BOURGES**

Co-encadrement de la thèse : **Bruno DUPLESSIS**

Jury

Mme Laure ITARD, Associate Professor, Research Institute OTB, Delft University of Technology

M. Bernard LACHAL, Professeur, Institut F.-A. FOREL, Université de Genève

M. François BOURRIOT, CEREN

M. Laurent MEUNIER, Docteur, ADEME

M. Jérôme ADNOT, Professeur, MINES ParisTech

M. Bernard BOURGES, Professeur, GEPEA, MINES Nantes

M. Bruno DUPLESSIS, Docteur, CES, MINES ParisTech

M. Dominique OSSO, Docteur, EDF R&D

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

Examineur

**T
H
È
S
E**

MINES ParisTech

Centre Efficacité énergétique des Systèmes

60 boulevard Saint-Michel 75272 Paris Cedex 06

“If you can not measure it, you can not improve it.”

Lord Kelvin

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Laure ITARD et Bernard LACHAL d'avoir accepté d'être rapporteur de ce travail et François BOURRIOT et Laurent MEUNIER d'avoir accepté d'en être examinateur. Merci à chacun d'entre eux pour la qualité de la discussion que nous avons eu lors de la soutenance.

Si une thèse est un travail personnel, elle n'est pas un travail en solitaire ainsi je tiens à remercier l'ensemble de mes encadrants : Jérôme ADNOT, Bernard BOURGES, Bruno DUPLESSIS et Dominique OSSO. Merci à Jérôme pour avoir été mon contact d'entrée pour cette thèse et pour ces remarques pertinentes notamment sur mes présentations orales. Merci à Bernard pour m'avoir appris la modélisation statistique et surtout son application rigoureuse. Merci à lui également pour son intervention quantitative et qualitative sur notre article (voir Annexe), sans celle-ci son contenu n'en serait pas aussi intéressant. Merci à Bruno pour ces remarques formulées de manière toujours constructive notamment sur ce manuscrit et pour m'avoir offert l'opportunité d'une expérience d'enseignement. Enfin, merci à Dominique pour ses corrections et ses remarques sur l'ensemble de ma production au cours de cette thèse. Le résultat final de celle-ci n'aurait pas été ce qu'il est sans son soutien et sans nos nombreux échanges au quotidien.

Cette thèse CIFRE a été financée par le département ENERBAT d'EDF R&D. Dans ce cadre, je tiens à adresser des remerciements en particulier à Emmanuelle CAYRE et Frédéric MARTEAU, chefs des projets ayant respectivement financé ma thèse et les enquêtes exploitées au cours de celle-ci. Il va sans dire que sans leur contribution, la thèse soit n'aurait pas eu lieu, soit n'aurait pas été aussi riche de ces retours terrains rares et précieux.

Au jour le jour, j'ai travaillé très majoritairement au centre des Renardières d'EDF R&D et plus particulièrement dans le bâtiment partagé par les groupes Résidentiel et Tertiaire du département ENERBAT. Je tiens à remercier l'ensemble de ces équipes, mes excuses pour ne pas les nommer mais la liste serait trop longue, pour le cadre particulièrement plaisant dans lequel ils m'ont permis d'évoluer. Un remerciement en particulier à mon collègue de bureau Jean pour m'avoir supporté, pour nos riches discussions sur les sujets les plus divers et pour son humour permettant de relativiser toute chose. Egalement un merci spécifique à Charlotte, Arnaud, Benoit pour leur partage de l'expérience d'une thèse et pour tous les agréables moments passés ensemble. Merci également à Aurélie pour nos nombreux échanges portant notamment sur nos thèses respectives, soutenues à un jour d'intervalle. Enfin, merci à Marielle pour nos discussions distrayantes dans les trains de retour vers Paris.

Même si au cours de la thèse, j'y ai passé moins de temps, l'environnement était tout aussi agréable et riche en échange au sein de l'équipe MDE du CES de MINES ParisTech. Merci pour cela aux membres permanents de l'équipe (Dominique, Pascal, Philippe, Marie-Laure), aux anciens doctorants devenus docteurs (Marcello, Julien, David, Toan, Cyril, Thomas) et aux doctorants (Ozlem, Sinziana, Lisa, Alberto, Charles, Hubert, Olivier, Shuqing). Courage à ces derniers, le jour de la soutenance viendra... Merci également à Rocio pour son aide dans la réalisation des démarches administratives.

Ma gratitude va également à mes amis pour leur encouragement au cours de ces trois années de thèse. Des remerciements spéciaux à Laurent et à Yann pour leur écoute attentive et pour leurs conseils avisés tirés de leur propre expérience d'une thèse. Un grand merci également à ma famille et plus particulièrement à mes parents pour leur soutien inconditionnel et incessant. Sans leur aide à différents moments dans le passé, je n'en serais pas là aujourd'hui.

Enfin, je tiens à témoigner de ma profonde reconnaissance à Giuliana pour son soutien du début jusqu'à la fin de la thèse et pour sa patience notamment sur la période de la rédaction où mon esprit a été particulièrement pris. Son appui moral, il est pour beaucoup dans le fait d'avoir réussi de mener à bout cette thèse.

Table des matières générale

Liste des figures	4
Liste des tableaux	6
Liste des abréviations	9
Chapitre 1. Introduction	11
1.1. Contexte	13
1.2. Enjeux	16
1.3. Objet, objectifs et approche de la thèse.....	16
Bibliographie.....	18
Chapitre 2. Opérations étudiées, enquêtes réalisées et échantillons obtenus	21
Introduction	23
2.1. Opération « Ensemble, économisons l'énergie ! » en Meuse et Haute-Marne	23
2.1.1. Présentation de l'opération	23
2.1.2. Enquêtes réalisées	24
2.1.3. Nettoyage des données recueillies et échantillons disponibles	26
2.1.4. Description des situations avant travaux.....	27
2.2. Opération « Solution Bien-Etre » en Provence-Alpes-Côte d'Azur	34
2.2.1. Présentation de l'opération	34
2.2.2. Enquête réalisée	34
2.2.3. Nettoyage des données recueillies et échantillons disponibles	36
2.2.4. Description des situations avant travaux.....	37
2.3. Conclusions	43
Bibliographie.....	45
Chapitre 3. Evaluation <i>ex-post</i> d'actions de rénovation énergétique en maison individuelle	47
Introduction	50
3.1. Méthode de calcul des économies d'énergie	50
3.1.1. Calcul des économies d'énergie unitaires annuelles.....	50
3.1.2. Conversion des consommations énergétiques issues des enquêtes.....	52
3.1.3. Corrections climatiques	53
3.2. Quantification et qualification des économies d'énergie réalisées.....	56
3.2.1. Histogramme des économies d'énergie	56
3.2.2. Etude de la robustesse des économies d'énergie	57
3.2.3. Etude des économies d'énergie par action.....	69
3.3. Modélisation statistique de la consommation après travaux	79
3.3.1. Echantillons étudiés	80
3.3.2. Méthode statistique	80

3.3.3. Variables explicatives	82
3.3.4. Résultats.....	91
3.3.5. Discussions	95
3.4. Conclusions.....	103
Bibliographie.....	107
Chapitre 4. Analyses statistiques des écarts entre évaluations <i>ex-ante</i> et <i>ex-post</i>	109
Introduction	111
4.1. Echantillons étudiés, modèle de calcul <i>ex-ante</i> utilisé et résultats <i>ex-post</i> exploités	111
4.1.1. Echantillons étudiés	111
4.1.2. Modèle de calcul <i>ex-ante</i> utilisé.....	112
4.1.3. Résultats <i>ex-post</i> exploités.....	124
4.2. Quantification des écarts	124
4.2.1. Ecarts sur les consommations en situation avant travaux	125
4.2.2. Ecarts sur les consommations en situation après travaux	128
4.2.3. Ecarts sur les économies d'énergie	131
4.3. Modélisation statistique des écarts	134
4.3.1. Détection par modélisation statistique des sources d'écart entre consommations calculées et observées : revue de la littérature.....	135
4.3.2. Modélisation des écarts de consommations avant travaux	136
4.3.3. Modélisation des écarts de consommations après travaux.....	156
4.4. Conclusions	166
Bibliographie.....	170
Chapitre 5. Pistes d'amélioration des modèles utilisés	173
Introduction	175
5.1. Pistes d'amélioration des évaluations <i>ex-ante</i> par modèle de calcul.....	175
5.1.1. Amélioration concernant l'estimation de la performance thermique des logements .	176
5.1.2. Amélioration concernant la prise en compte de la gestion spatiale du chauffage par les ménages	180
5.1.3. Amélioration concernant la prise en compte des consommations de bois d'appoint très élevées	181
5.2. Pistes d'amélioration des modèles statistiques des écarts	183
5.2.1. Amélioration du modèle statistique des écarts avant travaux	183
5.2.2. Amélioration du modèle statistique des écarts après travaux	186
5.3. Conclusion.....	189
Bibliographie.....	193
Chapitre 6. Conclusion générale et perspectives	195
6.1. Conclusion générale	197
6.2. Perspectives.....	198

Annexes.....	201
Annexe 1 : Article soumis à la revue Energy and Buildings.....	203
Annexe 2 : Carte des zones climatiques de la RT	221
Annexe 3 : Liste complète des paramètres d'entrée de Diag Serie	223

Liste des figures

Chapitre 2.

Figure 2.1 Répartition par période de construction de l'échantillon MDE 52-55.....	28
Figure 2.2 Répartition par énergie principale de chauffage avant travaux de l'échantillon MDE 52-55 et données nationale et régionales	28
Figure 2.3 Répartition par système principal de chauffage avant travaux de l'échantillon MDE 52-55	29
Figure 2.4 Histogramme des surfaces habitables de l'échantillon MDE 52-55	29
Figure 2.5 Histogrammes des températures intérieures déclarées pour les périodes de présence avant travaux de l'échantillon MDE 52-55	30
Figure 2.6 Répartition par période de réduction de la température de chauffage avant travaux de l'échantillon MDE 52-55	31
Figure 2.7 Histogramme des consommations annuelles surfaciques d'énergie finale tous usages à climat normal avant travaux de l'échantillon MDE 52-55	32
Figure 2.8 Répartition par période de construction de l'échantillon MDE PACA.....	37
Figure 2.9 Répartition par énergie principale de chauffage avant travaux de l'échantillon MDE PACA et données nationale et régionales.....	38
Figure 2.10 Répartition par système principal de chauffage avant travaux de l'échantillon MDE PACA	39
Figure 2.11 Répartition par système de climatisation avant travaux de l'échantillon MDE PACA	39
Figure 2.12 Histogramme des surfaces habitables de l'échantillon MDE PACA.....	40
Figure 2.13 Histogrammes des températures intérieures déclarées pour les périodes de présence avant travaux de l'échantillon MDE PACA	41
Figure 2.14 Répartition par période de réduction de la température de chauffage avant travaux de l'échantillon MDE PACA.....	42
Figure 2.15 Histogramme des consommations annuelles surfaciques d'énergie finale tous usages à climat normal avant travaux de l'échantillon MDE PACA	42

Chapitre 3.

Figure 3.1 Distributions des écarts relatifs en termes d'EE entre les deux estimations de la fraction de la consommation tous usages liée au chauffage	55
Figure 3.2 Histogramme des économies d'énergie surfaciques de l'échantillon MDE 52-55	57
Figure 3.3 Histogramme des économies d'énergie surfaciques de l'échantillon MDE PACA.....	57
Figure 3.4 Histogramme des économies d'énergie de l'échantillon MDE 52-55 exprimées en pourcentage de la consommation initiale	58
Figure 3.5 Histogramme des économies d'énergie de l'échantillon MDE PACA exprimées en pourcentage de la consommation initiale	58
Figure 3.6 Actions réalisées et nombres de cas associés dans l'échantillon MDE 52-55	70
Figure 3.7 Types de travaux réalisés par les ménages français en 2010	71
Figure 3.8 Actions réalisées et nombres de cas associés dans l'échantillon MDE PACA.....	72
Figure 3.9 Moyennes des économies d'énergie par action réalisée et leur intervalle de confiance à 95 % dans l'échantillon MDE 52-55.....	73
Figure 3.10 Moyennes des économies d'énergie par action réalisée et leur intervalle de confiance à 95 % dans l'échantillon MDE PACA	76

Figure 3.11 Distributions des économies d'énergie par action réalisée pour l'échantillon MDE 52-55	78
Figure 3.12 Distributions des économies d'énergie par action réalisée pour l'échantillon MDE PACA	79
Figure 3.13 Histogrammes des températures intérieures déclarées pour les périodes de climatisation après travaux de l'échantillon MDE PACA	90
Figure 3.14 Résidus normalisés en fonction des valeurs prédites par chacun des modèles	92
Figure 3.15 Droite de Henry des résidus de chacun des modèles	92

Chapitre 4.

Figure 4.1 $F_écart_{i,conso,av}$ et leur intervalle d'un niveau de confiance d'environ 95 % en fonction des consommations simulées	125
Figure 4.2 $F_écart_{i,conso,av}$ en fonction de $F_écart_{i,conso,elec\ sp\acute{e},elec\ cuis,av}$ pour les 119 cas de l'échantillon ne présentant pas d'usage de l'électricité pour le chauffage, la production d'ECS ou la climatisation.....	127
Figure 4.3 $F_écart_{i,conso,ap}$ et leur intervalle d'un niveau de confiance d'environ 95 % en fonction des consommations simulées	128
Figure 4.4 $F_écart_{Qk,conso,av}$, $F_écart_{Qk,conso,ap}$ et leur intervalle d'un niveau de confiance d'environ 95 % en fonction des consommations simulées pour chaque quartile de $F_écart_{i,conso,av}$	130
Figure 4.5 $F_écart_{Qk,EE}$ et leur intervalle d'un niveau de confiance d'environ 95 % en fonction des économies d'énergie simulées pour chaque quartile de $F_écart_{i,conso,av}$	132
Figure 4.6 Résidus normalisés en fonction des valeurs de $\ln(F_écart_{i,conso,av})$ prédites par le modèle	146
Figure 4.7 Droite de Henry des résidus du modèle $\ln(F_écart_{i,conso,av})$	147
Figure 4.8 Résidus normalisés en fonction des valeurs de $F_écart_{i,conso,ap}$ prédites par le modèle	161
Figure 4.9 Droite de Henry des résidus du modèle $F_écart_{i,conso,ap}$	162

Chapitre 5.

Figure 5.1 Répartitions moyennes des déperditions thermiques calculées par quartile de coefficient G	177
Figure 5.2 Croisement entre les températures intérieures déclarées pour les pièces de vie avant travaux et les changements de température pour ces mêmes pièces déclarés suite aux travaux pour l'échantillon MDE 52-55 avant et après	189

Liste des tableaux

Chapitre 2.

Tableau 2.1 Répartition des cas éliminés par motif d'élimination.....	27
Tableau 2.2 Répartition par motif d'élimination des cas éliminés.....	36

Chapitre 3.

Tableau 3.1 DJU pour les climats normaux utilisés.....	54
Tableau 3.2 Fractions des consommations de chauffage sur les consommations totales tous usages toutes énergies par région et par énergie principale de chauffage.....	54
Tableau 3.3 Résumé des trois <i>scenarii</i> d'incertitudes.....	63
Tableau 3.4 Moyennes des limites et des incertitudes-types sur les trois <i>scenarii</i> d'incertitudes pour l'échantillon MDE 52-55.....	64
Tableau 3.5 Moyennes des limites et des incertitudes-types sur les trois <i>scenarii</i> d'incertitudes pour l'échantillon MDE PACA.....	65
Tableau 3.6 Grandeurs intermédiaires pour les trois <i>scenarii</i> d'incertitudes pour l'échantillon MDE 52-55.....	67
Tableau 3.7 Grandeurs intermédiaires pour les trois <i>scenarii</i> d'incertitudes pour l'échantillon MDE PACA.....	68
Tableau 3.8 Ventilation (en %) des économies d'énergie en fonction de leur robustesse pour l'échantillon MDE 52-55.....	68
Tableau 3.9 Ventilation (en %) des économies d'énergie en fonction de leur robustesse pour l'échantillon MDE PACA.....	68
Tableau 3.10 Résultats des tests de Mann-Whitney pour l'échantillon MDE 52-55.....	74
Tableau 3.11 Résultats des tests de Mann-Whitney pour l'échantillon MDE PACA.....	77
Tableau 3.12 Coefficients de variation des distributions des économies d'énergie par action réalisée pour l'échantillon MDE 52-55.....	78
Tableau 3.13 Coefficient de variation des distributions des économies d'énergie par action réalisée pour l'échantillon MDE 52-55.....	79
Tableau 3.14 Domaines de définition de la variable $C_{i,av}^{normal,m^2}$ pour les deux échantillons.....	83
Tableau 3.15 Domaines de définition de la variable « changement déclaré de température de chauffage » pour les deux échantillons.....	84
Tableau 3.16 Représentativité des modalités de la variable « déclaration de changement dans l'occupation » pour les deux échantillons.....	85
Tableau 3.17 Représentativité des modalités de la variable « déclaration de malfaçons » pour les deux échantillons.....	86
Tableau 3.18 Représentativité des modalités de la variable « déclaration de travaux de rénovation énergétique » hors opération pour les deux échantillons.....	87
Tableau 3.19 Représentativité des modalités de la variable « action de l'opération énergétique » pour l'échantillon MDE 52-55.....	88
Tableau 3.20 Représentativité des modalités de la variable « type de PAC installée via l'opération » pour l'échantillon MDE PACA.....	88
Tableau 3.21 Représentativité des modalités de la variable « nature du second lot réalisé via l'opération » pour l'échantillon MDE PACA.....	88

Tableau 3.22 Représentativité des différentes utilisations de la climatisation après travaux parmi les différentes situations d'action concernant la climatisation	89
Tableau 3.23 Représentativité des modalités de la variable « utilisation déclarée de la climatisation après travaux » pour l'échantillon MDE PACA	90
Tableau 3.24 Modèle statistique de $C_{i,ap}^{normal,m^2}$ pour MDE 52-55	94
Tableau 3.25 Modèle statistique de $C_{i,ap}^{normal,m^2}$ pour MDE PACA.....	94
Tableau 3.26 Moyennes des consommations avant travaux suivant le type de PAC installée et leur intervalle de confiance à 95 % pour l'échantillon MDE PACA	103

Chapitre 4.

Tableau 4.1 Tableau de détermination des U pour les ouvrants.....	115
Tableau 4.2 Tableau de détermination des ΔU_{volets} par type de volets	116
Tableau 4.3 Tableau de détermination des U et τ pour les murs.....	116
Tableau 4.4 Tableau de détermination des U et τ pour les toitures.....	116
Tableau 4.5 Tableau de détermination des U et τ pour les planchers bas	116
Tableau 4.6 Tableau de détermination des \dot{v} pour la ventilation.....	117
Tableau 4.7 Tableau de détermination des ψ pour les ponts thermiques	117
Tableau 4.8 Statistiques descriptives des $F_écart_{i,conso,av}$ et de leur intervalle d'un niveau de confiance d'environ 95 %	126
Tableau 4.9 Statistiques descriptives des $F_écart_{i,conso,ap}$ et de leur intervalle d'un niveau de confiance d'environ 95 %	128
Tableau 4.10 Domaines de définition des variables « surface habitable » et « hauteur sous-plafond »	139
Tableau 4.11 Domaine de définition de la variable G.....	140
Tableau 4.12 Résultats de la discrétisation des consommations annuelles de bois d'appoint de l'échantillon	141
Tableau 4.13 Représentativité des modalités de la variable « système de chauffage »	142
Tableau 4.14 Représentativité des modalités de la variable « présence d'un appoint de chauffage hors bois ».....	142
Tableau 4.15 Représentativité des modalités de la variable « système de production d'ECS »	142
Tableau 4.16 Représentativité des modalités de la variable « énergie principale de cuisson »	143
Tableau 4.17 Représentativité des modalités de la variable « type d'éclairage »	143
Tableau 4.18 Domaine de définition de la variable « nombre d'équipements électriques ».....	143
Tableau 4.19 Domaine de définition de la variable « DJU réels ».....	143
Tableau 4.20 Domaine de définition de la variable « nombre d'occupants »	144
Tableau 4.21 Représentativité des modalités de la variable « occupation en journée en semaine du logement ».....	144
Tableau 4.22 Domaine de définition de la variable $T_{i,av}^{ch,moy,p}$	145
Tableau 4.23 Représentativité des modalités de la variable « gestion des réduits de température »	145
Tableau 4.24 Représentativité des modalités de la variable « temps moyen journalier d'ouverture des fenêtres ».....	145

Tableau 4.25 Modèle statistique de $\ln(F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{av}}})$	148
Tableau 4.26 Domaine de définition de la variable $F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{av}}}$	158
Tableau 4.27 Domaine de définition de la variable « changement de G ».....	158
Tableau 4.28 Représentativité des modalités de la variable « travaux sur le système de chauffage »	159
Tableau 4.29 Domaine de définition de la variable « changement déclaré de consommation de bois d'appoint »	159
Tableau 4.30 Représentativité des modalités de la variable « déclaration de malfaçons ».....	160
Tableau 4.31 Domaines de définition de la variable « changement déclaré de température de chauffage ».....	160
Tableau 4.32 Représentativité des modalités de la variable « déclaration de changement dans l'occupation ».....	160
Tableau 4.33 Modèle statistique de $F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{ap}}}$	163
Tableau 4.34 Moyennes des changements de G et de la variable « changement de G » par quartile de facteur d'écart avant travaux.....	164

Chapitre 5.

Tableau 5.1 Tableau de détermination des U des murs non isolés.....	178
---	-----

Liste des abréviations

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AFD : Agence Française de Développement
AFNOR : Agence Française de NORmalisation
ANCOVA : ANalyse de la COVARiance
ANDRA : Agence Nationale pour la gestion des Déchets RadioActifs
BBC : Bâtiment Basse Consommation
CEE : Certificats d'Economies d'Energie
CEREN : Centre d'Etudes et de Recherches Economiques sur l'éNergie
CESI : Chauffe-Eau Solaire Individuel
CGDD : Commissariat Général au Développement Durable
COSTIC : Comité Scientifique et Technique des Industries Climatiques
Cv : Coefficient de variation
DPE : Diagnostic de Performance Energétique
ECS : Eau Chaude Sanitaire
EDF : Electricité De France
EE : Economies d'Energie unitaires annuelles
EPC : *Energy Performance Certificate*
ErDF : Electricité Réseau Distribution France
GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié
GrDF : Gaz Réseau Distribution France
GRTGaz : Gestionnaire Réseau de Transport de Gaz
IEA: International Energy Agency
INSEE : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
IPMVP : *International Performance Measurement and Verification Protocol*
ITE : Isolation Thermique par l'Extérieur
MDE : Maîtrise De l'Energie
MEDDE : Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie
MI : Maison Individuelle
OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques
OPEN : Observatoire Permanent de l'amélioration ENergétique du logement
OQAI : Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur
PAC : Pompe A Chaleur
PACA : Provence-Alpes-Côte d'Azur
PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur
PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur
RMCE : Racine carrée de la Moyenne des Carrés des Erreurs
RTE : Réseau de Transport de l'Electricité
VIF : *Variance Inflation Factor*

Chapitre 1. Introduction

Table des matières

1.1. Contexte 13

1.2. Enjeux 16

1.3. Objet, objectifs et approche de la thèse..... 16

Bibliographie..... 18

1.1. Contexte

Trois des principaux enjeux de la politique énergétique européenne sont le changement climatique, la sécurité d'approvisionnement et la performance économique. Face à ces enjeux qui demandent de réduire les émissions de gaz à effet de serre, la dépendance et les consommations énergétiques, les Etats membres de l'Union européenne se sont notamment mis d'accord, en mars 2007, sur un objectif pour 2020 dit de « 3*20 » (CONSEIL DE L'UNION EUROPEENNE, 2007) :

- 20 % de réduction des émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990,
- 20 % de la consommation d'énergie finale provenant de sources renouvelables,
- 20 % de diminution de la consommation d'énergie primaire par rapport à un scénario tendanciel.

Pour satisfaire cette première étape sur la voie du « facteur 4¹ » pour 2050, il est indispensable de devoir agir sur le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire). Ce dernier représentait à lui seul, en 2008 à l'échelle de l'Union européenne (27 pays), environ 40 % de la consommation d'énergie finale et environ 36 % des émissions de CO₂ (EUROPA, 2009). De plus, le potentiel d'économies d'énergie évalué dans ce secteur est considéré comme important (TUOMINEN, et al., 2012) et ceci tout particulièrement pour le parc de logements existants (IEA et AFD, 2008) (DE T'SERCLAES, 2007).

En France, pour satisfaire les objectifs fixés, les principaux efforts d'efficacité énergétique doivent également concerner le bâtiment et plus particulièrement le secteur résidentiel. En 2011, ce dernier représentait environ 60 % des 44 % de la consommation nationale d'énergie finale attribués au bâtiment (secteur le plus consommateur²) (ADEME, 2012). Comme au niveau européen, il est nécessaire en France d'agir en particulier sur le parc de logements existants. Chaque année, le nombre de logements neufs mis en chantier représente environ 1 % du parc national existant (en 2011, 421 036 logements mis en chantier parmi 33,3 millions de logements (ADEME, 2012)) tandis que seulement 0,1 % de celui-ci est détruit (SAHEB, et al., 2013).

D'ailleurs, la France au travers de la loi portant « engagement national pour l'environnement » dite Grenelle 2 (LOI 12 JUILLET, 2010) s'est fixé un objectif de réduction de la consommation d'énergie concernant le parc existant : réduction de 38 % de la consommation d'énergie primaire en 2020 par rapport à 2008.

Pour mener à bien sa politique, la France a également transposé la directive européenne relative à la performance énergétique des bâtiments (première version en 2002 (DIRECTIVE 2002/91/CE, 2003) revisitée en 2010 (DIRECTIVE 2010/31/UE, 2010)) par la création en 2007 d'une Réglementation Thermique pour les bâtiments existants rénovés (RT Existant globale ou par élément) (ARRETE 3 MAI, 2007) (ARRETE 13 JUIN, 2008). A cette disposition s'est ajoutée la mise en place du Diagnostic de Performance Energétique (DPE) en 2006 lors des transactions immobilières (ARRETE 15 SEPTEMBRE, 2006).

De plus, les pouvoirs publics ont mis en place en 2006 (LOI 13 JUILLET, 2005) le dispositif des certificats d'économies d'énergie (CEE) dans le cadre de la directive européenne relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales et aux services énergétiques (DIRECTIVE 2006/32/CE, 2006). Celui-ci repose sur une obligation de réalisation d'économies d'énergie imposée par l'Etat aux vendeurs d'énergie appelés les « obligés » (électricité, gaz, chaleur, froid, fioul domestique et plus récemment les carburants pour automobiles). Ces derniers sont incités à promouvoir activement l'efficacité énergétique auprès de leurs clients parmi lesquels le secteur résidentiel représente une part prépondérante (80 % des économies d'énergie issues du dispositif entre son début et le 30 septembre 2013 (MEDDE, 2013)).

¹ Objectif de division par quatre, par rapport au niveau de 1990, des émissions de gaz à effet de serre.

² Deuxième secteur en termes d'émission CO₂ avec 24 % des émissions nationales en 2011 (ADEME, 2012).

L'ensemble de ces dispositifs a recours à des méthodes de calcul dites *a priori*. La méthode de calcul pour la RT Existant globale³ (moteur de calcul Th-C-E ex (ARRETE 8 AOUT, 2008)) réalise des estimations *ex-ante*⁴ des consommations énergétiques annuelles du bâtiment avant et après travaux de rénovation. Dans le cadre du DPE, les pouvoirs publics ont mis à disposition une méthode simplifiée d'estimation des consommations (la plus utilisée : 3CL (ARRETE 17 OCTOBRE, 2012)). Ces deux méthodes n'ont pas vocation à faire un calcul de la consommation réelle d'un bâtiment se basant sur des conventions notamment pour le climat, les apports gratuits, les températures de consigne et les horaires d'occupation. Elles visent plutôt une estimation de la performance énergétique d'un bâtiment.

En ce qui concerne les CEE, le principe de calcul est de définir *ex-ante* un forfait standard d'économies d'énergie par type d'action unitaire sur la base de calculs simplifiés (ATEE CLUB C2E, 2012).

En parallèle de ces méthodes, dans le cadre d'offres commerciales de solutions d'efficacité énergétique à leurs clients, certains fournisseurs d'énergie ont créé leurs propres modèles (*e.g.* SimFast ou Papter pour EDF). La logique de développement de ces derniers étant de permettre à partir d'un nombre modéré d'entrées, dont des comportements réels déclarés, de faire des calculs de consommations et d'économies d'énergie se rapprochant le plus possible de la réalité.

D'autres outils de modélisation plus complexes (*e.g.* TRNSYS, EnergyPlus...) sont également utilisés, notamment par les centres de recherche et les bureaux d'études, pour évaluer *ex-ante* l'efficacité énergétique d'une rénovation d'un logement existant. Toutefois, au regard du nombre de paramètres d'entrée et du niveau de détail de ces paramètres, leur utilisation semble adaptée pour des rénovations importantes visant des hautes performances énergétiques.

Parallèlement à ces outils prévisionnels (aide à la décision et à la préparation) que sont les évaluations *ex-ante*, se sont développées des méthodologies (SRC, 2001) (EVO, 2009) d'évaluations *ex-post* qui se basent sur des données récupérées après la mise en place de la solution d'efficacité énergétique pour juger de son impact *a posteriori* (BROC, 2006). Aujourd'hui, la pratique de ce type d'évaluation est également encadrée par des normes (AFNOR, 2012) (AFNOR, 2010).

Les évaluations *ex-post* sont applicables aussi bien à l'échelle d'une action de rénovation pour un seul bâtiment que d'une opération locale (BROC, 2006), d'un programme régional ou de la politique d'un pays⁵. Par exemple, celles-ci peuvent être utilisées par les Etats membres de l'Union européenne dans le cadre de l'évaluation obligatoire qu'ils doivent faire de l'objectif d'économies d'énergie de 1 %/an entre 2008 et 2016 imposé par la directive 2006/32/CE (DIRECTIVE 2006/32/CE, 2006).

A l'heure actuelle en France, les rénovations énergétiques de logement font très peu l'objet d'évaluations *ex-post*, en dehors des mesures et vérifications d'économies d'énergie prévues contractuellement dans des contrats de performance énergétique⁶. Ce constat est particulièrement avéré pour les rénovations de maison individuelle.

³ Ne s'applique que pour des bâtiments présentant une surface hors œuvre nette supérieure à 1000 m², construits après 1948 dont les travaux envisagés représentent un coût supérieur à 25 % de la valeur du bâtiment. Si l'une de ces trois conditions n'est pas satisfaite, la RT Existant par élément définissant une performance minimale pour l'élément remplacé s'applique.

⁴ Evaluation qui intervient avant que la mise en œuvre n'a pas encore commencé (BROC, 2006).

⁵ Nous retiendrons pour définir les différents niveaux d'intervention les définitions proposées par Broc (BROC, 2006). « L'action est la plus petite unité, la réalisation concrète attendue. » « L'opération est un groupe d'actions réalisées conjointement (déroulement et organisation communs). » « Le programme est un groupe d'opérations définies pour atteindre des objectifs généraux communs. » « La politique est un ensemble de programmes concernant un même domaine d'intervention. »

⁶ « Contrat de performance énergétique, un accord contractuel entre le bénéficiaire et le fournisseur d'une mesure visant à améliorer l'efficacité énergétique, vérifiée et surveillée pendant toute la durée du contrat, aux termes duquel les investissements (travaux, fournitures ou services) dans cette mesure sont rémunérés en fonction d'un niveau d'amélioration de l'efficacité énergétique qui est contractuellement défini ou d'un autre

Nous pouvons néanmoins citer :

- pour quelques rénovations visant une très basse consommation d'énergie sont mises en place, par des bureaux d'études spécialisés, des campagnes de mesures poussées (e.g. mesures au pas de temps de 10 minutes des consommations de différentes énergies mais aussi des températures dans diverses pièces) (ENERTECH, 2010),
- certaines études du Centre d'Etudes et de Recherches Economiques sur l'énergie (CEREN)⁷ (CEREN, 2008) (CEREN, 2013),
- quelques travaux académiques en partenariat avec EDF (SUERKEMPER, et al., 2012).

Si deux enquêtes annuelles servent à l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) pour observer les travaux d'efficacité énergétique effectués par les ménages français dans leur logement (TNS SOFRES, 2012) (OPEN, 2011), elles ne permettent « que » d'estimer à l'échelle nationale le nombre de ménages réalisant des travaux, la nature de ces travaux et leurs coûts. Elles n'abordent pas la question des économies d'énergie réalisées grâce aux travaux. Notons qu'il en est de même pour le volet « travaux » de l'Enquête Nationale Logement⁸ de l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE).

Ainsi, dans le récent rapport de la Cour des comptes relatif au dispositif des CEE, la première recommandation est la suivante : [rendre obligatoires les études *a posteriori* auprès des obligés pour améliorer la connaissance des économies « réellement » obtenues grâce aux opérations financées par les CEE] (COUR DES COMPTES, 2013).

Au regard de cet état des lieux, un travail d'évaluation *ex-post* de solutions de rénovation énergétique en résidentiel semble particulièrement pertinent.

Lors du déroulement idéal d'un projet de rénovation (i.e. évaluation *ex-ante* des différentes solutions techniques, réalisation des mesures retenues puis évaluation *ex-post*), l'un des retours d'expérience possibles consiste à confronter les résultats de l'évaluation *ex-post* à ceux présumés par l'évaluation *ex-ante*. Via une revue des études anglaises s'intéressant aux différences entre économies d'énergie mesurées et théoriques pour des actions d'isolation de logement, Sanders et Phillipson (SANDERS, et al., 2006) trouvent des économies mesurées de l'ordre de -40 % à -67 % par rapport à celles estimées par le calcul (sur la base de quatre études). Scheer et al. (SCHEER, et al., 2013), au travers l'évaluation *ex-post* de 210 actions de rénovation énergétique de logement menées en Irlande, quantifient en moyenne 36 % de moins d'économies d'énergie par logement qu'estimées *ex-ante* par un modèle d'ingénieur. En France, dans le cadre d'une comparaison de résultats de différents modèles de calcul (modèle thermique simplifié avec comportement conventionnel, modèle thermique dynamique avec comportement déclaré et modèle statistique linéaire multiple) et d'observations pour un échantillon d'environ 900 logements, Allibe et al. (ALLIBE, et al., 2010) montrent pour tous les modèles des écarts pouvant dépasser à l'échelle d'un logement plus de la moitié de la consommation énergétique liée au chauffage. A la vue de ces différences significatives, un travail d'amélioration des méthodes d'évaluation *ex-ante* semble également justifié.

critère de performance énergétique convenu, tel que des économies financières » (DIRECTIVE 2012/27/UE, 2012)

⁷ Le CEREN est un groupement d'intérêt économique créé en 1958 pour mutualiser les ressources nécessaires à la collecte et au traitement d'informations statistiques sur les consommations d'énergie en France. Ses membres sont EDF, GDF Suez, leurs filiales ErDF, GrDF, RTE et GRTGaz, et l'ADEME.

⁸ Dernière enquête en 2006. « C'est la source statistique majeure pour décrire le parc de logements et les conditions d'occupation par les ménages de leur résidence principale. Elle permet également de mesurer le coût du logement que supportent les différents types de ménages » (INSEE).

1.2. Enjeux

L'une des premières finalités des évaluations *ex-post* de solutions de rénovation énergétique est d'obtenir un retour sur l'efficacité réelle de ces solutions. Ceci peut permettre une sélection de celles à reproduire, à arrêter ou à modifier. Il est également possible de déterminer les facteurs de succès ou d'échec, ceci dans le but de mieux maîtriser la causalité des effets observés afin d'assurer la reproductibilité des actions positives. La généralisation efficace de solutions de performance énergétique ne pouvant se faire qu'à cette condition.

Une seconde utilisation possible des résultats d'une évaluation *ex-post* d'action d'efficacité énergétique est de les comparer à ceux présumés par une évaluation *ex-ante*. Ceci permet tout d'abord de vérifier si les performances estimées *a priori* ont été atteintes (objectif principal des études habituelles) mais également de comprendre la nature des écarts (objectif plus difficile à atteindre). Plus généralement, ce dispositif permet de répondre à l'exigence de résultats, tendant vers la garantie de la performance énergétique, présente aujourd'hui dans les opérations d'efficacité énergétique.

Toute une partie de la recherche dans le domaine de l'énergie du bâtiment, notamment celle sur les outils (modélisation ou méthode) d'aide à la décision et prévisionnels, nous semble s'effectuer dans ce sens-là. Le processus de retour d'expérience d'un projet de rénovation consistant à confronter les résultats de la performance énergétique déterminés lors d'un calcul *ex-ante* à ceux observés en *ex-post* est une étape nécessaire dans cette démarche d'amélioration.

Cette dernière au-delà de son intérêt scientifique présente des enjeux économiques, voire politiques. En effet, la progression des outils de conception sous-entend une approche plus juste des retombées des moyens mis en œuvre, soit de la rentabilité de ces derniers. A partir de là, les investissements pourraient se faire avec moins d'incertitudes sur leurs gains et ainsi faciliter la financiarisation des activités d'efficacité énergétique que ce soit par les ménages eux-mêmes⁹ ou par des tiers sur la base d'un contrat de performance énergétique. Concernant les politiques énergétiques, de meilleurs outils prévisionnels permettraient de dimensionner de façon plus efficiente ces dernières et de réaliser des études prospectives plus robustes.

1.3. Objet, objectifs et approche de la thèse

Cette thèse se propose d'effectuer l'évaluation *ex-post* de l'efficacité de solutions de rénovation énergétique dans le résidentiel et plus particulièrement en maison individuelle. Le travail est mené à partir de données issues d'enquêtes réalisées auprès de plusieurs centaines de ménages, propriétaires occupants, ayant participé à des opérations de maîtrise de la demande en énergie. Ces enquêtes permettant de connaître les situations avant et après les travaux (caractéristiques des logements, des ménages et de leurs comportements ainsi que des consommations d'énergie) de ces ménages mais également les travaux réalisés eux-mêmes sont ainsi la source de données extrêmement rares notamment à cette échelle (deux échantillons d'une centaine de cas chacun).

De plus, notons que le type de logement et le statut d'occupation associés aux panels étudiés sont similaires à ceux de la très grande majorité des travaux d'efficacité énergétique réalisés par les ménages français (en 2011, 76 % et 91 % des travaux ont été réalisés respectivement dans des maisons individuelles et par des propriétaires occupants (TNS SOFRES, 2012)).

Un des objectifs de la thèse est de fournir un retour d'expérience quant à l'efficacité réelle d'actions de rénovation en maison individuelle et d'en déterminer les facteurs explicatifs. En plus de la nature des actions effectuées, il sera, entre autres, étudié l'effet de la modification des comportements

⁹ [A l'occasion du sondage réalisé pour la journée citoyenne du débat national sur la transition énergétique le 25 mai 2013, 32 % des sondés identifiaient le manque de garantie de performance (« Je n'ai aucune garantie qu'un investissement sur un équipement plus performant soit rentable et réduise ma facture ») comme un frein à l'action.] (CHANUT, et al., 2013)

suite aux actions d'efficacité énergétique, appelé effet rebond (SORRELL, et al., 2008) (GREENING, et al., 2000).

Un autre but de la thèse est d'identifier les causes des distorsions entre les consommations d'énergie observées et simulées par un modèle de calcul *ex-ante*, aussi bien dans les situations avant qu'après travaux. Il s'agira de quantifier les différences avant d'aborder leurs origines, ceci en tâchant de distinguer celles liées aux performances du bâti, aux performances des systèmes énergétiques et aux composantes comportementales. Les écarts sur les économies d'énergie seront également étudiés.

Nous utiliserons un modèle de calcul, développé par EDF, permettant d'évaluer *ex-ante* l'impact d'une solution d'efficacité énergétique à l'échelle d'un logement en tenant compte de comportements réels déclarés. Ceci tout en présentant un compromis en termes de nombre et de niveau de détail des paramètres à entrer par rapport aux modèles de calcul plus complexes que sont les outils de simulation énergétique dynamique (e.g. TRNSYS, EnergyPlus...).

Enfin, le dernier objectif de la thèse est de contribuer à l'amélioration du modèle de calcul *ex-ante* utilisé à partir, entre autres, des éléments tirés de l'étude des écarts avec les données réelles.

Disposant d'échantillons avec un nombre significatif de cas (de l'ordre de la centaine), une approche statistique tant descriptive que de modélisation sera employée pour ce travail. La modélisation statistique doit permettre d'étudier les différents facteurs explicatifs, que ce soit de l'efficacité réelle des actions de rénovation ou des écarts entre résultats observés et simulés, indépendamment les uns des autres. Pour ceux identifiés comme statistiquement significatifs, leur effet sera ainsi quantifié.

Un travail préliminaire, à ce qui est présenté dans ce manuscrit (voir Annexe 1), nous a permis de nous familiariser avec les méthodes de modélisation statistique employées au travers, entre autres une revue de la littérature concernant les modèles statistiques expliquant la consommation d'énergie d'un logement. Cette étude annexe ayant consisté en la réalisation d'un modèle statistique de la consommation énergétique tous usages d'une maison individuelle. Ceci à partir d'un échantillon représentatif à l'échelle nationale de 420 maisons individuelles, extrait d'une enquête, menée par EDF R&D en 2009 (CAYLA, et al., 2010), permettant de récupérer une année de consommation énergétique tous usages pour chaque cas, plus des informations techniques et d'environnement concernant les logements et des informations de pratiques et socio-économiques concernant les ménages. Bien qu'ayant permis de mettre en avant un certain nombre de déterminants de la consommation d'énergie liée à une maison individuelle, ce modèle s'est révélé inadapté à l'évaluation de l'effet de travaux d'efficacité énergétique en trouvant non significative la variable relative à la réalisation de tels travaux au cours de la dernière année. D'où notre choix de nous concentrer uniquement dans ce manuscrit à l'évaluation *ex-post* d'actions de rénovation énergétique en maison individuelle à partir des panels de données dédiés.

Dans le Chapitre 2, nous présenterons, tout d'abord, les données sur lesquelles repose l'ensemble du travail de thèse.

Dans le Chapitre 3, nous réaliserons l'évaluation *ex-post* de l'efficacité effective d'actions de rénovation énergétique en maison individuelle.

Dans le Chapitre 4, nous mènerons des analyses statistiques pour quantifier et expliquer les écarts entre les résultats des évaluations *ex-ante* et *ex-post*.

Dans le Chapitre 5, nous proposerons des pistes d'amélioration, premièrement, du modèle de calcul *ex-ante* utilisé et deuxièmement, des modèles statistiques établis pour étudier les écarts de celui-ci avec la réalité.

Enfin dans le Chapitre 6, nous exposerons les conclusions générales de ce travail ainsi que les perspectives qui nous semblent intéressantes de lui donner.

Bibliographie

ADEME Les chiffres clés du bâtiment. Energies-Environnement [Rapport]/ Centre de Sophia Antipolis. - Valbonne (06) : [s.n.], 2012. - p. 98.

AFNOR Calcul des économies d'énergie et de l'efficacité énergétique - Méthode descendante (*top-down*) et ascendante (*bottom-up*). - [s.l.] : Agence Française de Normalisation (AFNOR), 2012. - NF EN 16212.

AFNOR Services d'efficacité énergétique. Définitions et exigences.. - [s.l.] : Agence Française de Normalisation (AFNOR), 2010. - NF EN 15900.

ALLIBE B, OSSO D et LAURENT M-H Modélisation thermique du chauffage individuel : d'un logement unique à l'ensemble du parc [Conférence] // International Building Performance Simulation Association Conference. - Moret sur Loing (France) : [s.n.], 2010.

ARRETE 13 JUIN Arrêté du 13 juin 2008 relatif à la performance énergétique des bâtiments existants de surface supérieure à 1 000 mètres carrés lorsqu'ils font l'objet de travaux de rénovation importants [Revue] // Journal officiel de la République française. - 8 août 2008. - Texte 1.

ARRETE 15 SEPTEMBRE Arrêté du 15 septembre 2006 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants proposés à la vente en France métropolitaine [Revue] // Journal officiel de la République française. - 28 septembre 2006. - Texte 10.

ARRETE 17 OCTOBRE Arrêté du 17 octobre 2012 modifiant la méthode de calcul 3CL-DPE introduite par l'arrêté du 9 novembre 2006 portant approbation de diverses méthodes de calcul pour le diagnostic de performance énergétique en France métropolitaine [Revue] // Journal officiel de la République française. - 10 novembre 2012. - 0262. - p. 17780. - texte n°9.

ARRETE 3 MAI Arrêté du 3 mai 2007 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments existants [Revue] // Journal officiel de la République française. - 17 mai 2007. - Texte 31.

ARRETE 8 AOUT Arrêté du 8 août 2008 portant approbation de la méthode de calcul Th-C-E ex et son annexe [Revue] // Journal officiel de la République française. - 24 septembre 2008.

ATEE CLUB C2E Certificats d'économies d'énergies - Mémento du Club C2E - 8^e édition [Ouvrage]. - 2012.

BROC J-S L'évaluation ex-post des opérations locales de maîtrise de la demande en énergie - Etat de l'art, méthodes *bottom-up*, exemples appliqués et approche du développement d'une culture pratique de l'évaluation [Rapport] : Thèse de doctorat / MINES ParisTech. - 2006.

CEREN Consommations d'énergie en 2011 des maisons existantes équipées de pompe à chaleur [Rapport]. - 2013. - Étude 2106.

CEREN Effets de l'isolation du bâti et de la rénovation de l'installation de chauffage sur les consommations d'énergie dans les logements construits avant 1975 [Rapport]. - 2008. - Etude 7152.

CHANUT J et CLAUSTRE R Explorer l'obligation de rénovation énergétique dans le secteur résidentiel; Tome 1 - Propositions [Rapport] : Rapport du groupe de travail dans le cadre du Plan Bâtiment Durable. - 2013.

CONSEIL DE L'UNION EUROPEENNE Conseil européen - Bruxelles 8&9 mars 2007 Conclusions de la présidence. - Bruxelles (Belgique) : [s.n.], 9 mars 2007. - D/07/1.

COUR DES COMPTES Les Certificats d'Economies d'Energie [Rapport] : Communication au Premier Ministre. - 2013.

CAYLA J-M, ALLIBE B et LAURENT M-H From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption [Conférence] // ACEEE Summer Study. - Pacific Grove (United States) : [s.n.], 2010.

DE T'SERCLAES P Financing energy efficient homes: Existing policy responses to financial barriers [Rapport] / International Energy Agency (IEA). - 2007.

DIRECTIVE 2002/91/CE Directive 2002/91/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments [Revue] // Journal officiel des Communautés européennes. - 4 janvier 2003. - L 1/65.

DIRECTIVE 2006/32/CE Directive 2006/32/CE du Parlement européen et du Conseil du 5 avril 2006 relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales et aux services énergétiques et abrogeant la directive 93/76/CEE du Conseil [Revue] // Journal officiel de l'Union européenne. - 27 avril 2006. - L 114/64.

DIRECTIVE 2010/31/UE Directive 2010/31/UE du Parlement européen et du Conseil du 19 mai 2010 sur la performance énergétique des bâtiments (refonte) [Revue] // Journal officiel de l'Union européenne. - 18 juin 2010. - L 153/13.

DIRECTIVE 2012/27/UE Directive 2012/27/UE du Parlement européen et du Conseil du 25 octobre 2012 relative à l'efficacité énergétique, modifiant les directives 2009/125/CE et 2010/30/UE et abrogeant les directives 2004/8/CE et 2006/32/CE [Revue] // Journal officiel de l'Union européenne. - 14 novembre 2012. - L 315/1.

ENERTECH MULHOUSE, Quartier Franklin, Evaluation technico-économique de réhabilitations "basse consommation" d'immeubles d'habitation [Rapport]. - 2010.

EUROPA L'efficacité énergétique à l'horizon 2020 [En ligne]. - 3 mars 2009. - octobre 2011. - http://europa.eu/legislation_summaries/energy/energy_efficiency/en0002_fr.htm.

EVO Protocole International de Mesure et de Vérification de la Performance énergétique - Concepts et options pour l'évaluation des économies d'énergie et d'eau - Volume 1 [Rapport] = EVO 10000 - 1:2009 (Fr). - 2009.

GREENING L A, GREENE D L et DIFIGLIO C Energy efficiency and consumption - the rebound effect - a survey [Revue] // Energy Policy. - 2000. - 28. - pp. 389-401.

IEA et AFD Promoting energy efficiency investments: case studies in the residential sector [Rapport] / Head of Publications Service ; International Energy Agency (IEA). - 2008.

INSEE Définitions et méthodes - Logement (Enquête) [En ligne]. - novembre 2013. - <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/enquete-logement.htm>.

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

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

MEDDE Lettre d'information "Certificats d'économies d'énergie". - [s.l.] : Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE), octobre 2013. - p. 4.

SAHEB Y, SAUSSAY A, JOHNSON C et ROZITE V Renovation of the EU buildings stock: an opportunity for the EU gas dependency [Conférence] // ECEEE Summer Study. - Presqu'île de Gien (France) : [s.n.], 2013.

SANDERS C et PHILLIPSON M Review of differences between measured and theoretical energy savings fo insulation measures [Rapport] / Centre for Resarch on Indoor Climate and Health ; Glasgow Caledonian University. - 2006.

SCHEER J, CLANCY M et HOGAIN S N Quantification of energy savings from Ireland's Home Energy Saving scheme: an *ex-post* billing analysis [Revue] // Energy Efficiency. - 2013. - 6. - pp. 35-48.

SORRELL S et DIMITROPOULOS J The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions [Revue] // Ecological Economics. - 2008. - 65. - pp. 636-649.

SRC An European *ex-post* evaluation guidebook for DSM and EE service programmes [Rapport]. - [s.l.] : SRC International A/S, 2001.

SUERKEMPER F, THOMAS S, OSSO D et BAUDRY P Cost-effectiveness of energy efficiency programmes-evaluating the impacts of a regional programme in France [Revue] // Energy Efficiency. - 2012. - 5. - pp. 121-135.

TNS SOFRES Maîtrise de l'énergie - Bilan 2011 - Phase 2 [Rapport] : Note de synthèse. - 2012.

TUOMINEN P, KLOBOT K, TOLMAN A, ADJEI A et DE BEST-WALDHOBBER M Energy savings potential in buildings and overcoming market barriers in member states of the European Union [Revue] // Energy and Buildings. - 2012. - 51. - pp. 48-55.

Chapitre 2. Opérations étudiées, enquêtes réalisées et échantillons obtenus

Table des matières

Introduction.....	23
2.1. Opération « Ensemble, économisons l'énergie ! » en Meuse et Haute-Marne	23
2.1.1. Présentation de l'opération	23
2.1.2. Enquêtes réalisées	24
2.1.2.1. Deux premières vagues d'enquêtes : 2009 & 2010	24
2.1.2.2. Troisième vague d'enquêtes : 2011	25
2.1.3. Nettoyage des données recueillies et échantillons disponibles	26
2.1.4. Description des situations avant travaux.....	27
2.1.4.1. Période de construction	27
2.1.4.2. Isolation du bâti avant travaux	28
2.1.4.3. Energie principale de chauffage avant travaux.....	28
2.1.4.4. Système principal de chauffage avant travaux	29
2.1.4.5. Surface habitable	29
2.1.4.6. Températures intérieures et gestion spatiale du chauffage avant travaux	30
2.1.4.7. Occupation du logement et gestion temporelle du chauffage avant travaux.....	30
2.1.4.8. Consommation totale d'énergie avant travaux	31
2.1.4.9. Comparaison par rapport aux caractéristiques des logements français pour lesquels ont été effectués des travaux.....	32
2.2. Opération « Solution Bien-Etre » en Provence-Alpes-Côte d'Azur	34
2.2.1. Présentation de l'opération	34
2.2.2. Enquête réalisée	34
2.2.3. Nettoyage des données recueillies et échantillons disponibles	36
2.2.4. Description des situations avant travaux.....	37
2.2.4.1. Période de construction	37
2.2.4.2. Energie principale de chauffage avant travaux.....	38
2.2.4.3. Système principal de chauffage avant travaux	38
2.2.4.4. Système de climatisation avant travaux	39
2.2.4.5. Surface habitable	40
2.2.4.6. Part de la surface habitable non chauffée	40
2.2.4.7. Températures intérieures durant la saison de chauffage avant travaux	40
2.2.4.8. Occupation du logement et réduit de température de chauffage avant travaux.....	41
2.2.4.9. Utilisation de la climatisation avant travaux	42
2.2.4.10. Consommation totale d'énergie avant travaux	42
2.2.4.11. Comparaison par rapport aux caractéristiques des logements français pour lesquels ont été effectués des travaux.....	43
2.3. Conclusions.....	43
Bibliographie	45

Introduction

Dans ce chapitre, il s'agit de présenter les données sur lesquelles repose l'ensemble du travail de thèse.

Les données sont issues de différentes vagues d'enquêtes réalisées auprès de ménages¹⁰ ayant participé à une opération de Maîtrise de la Demande en Energie (MDE), promouvant la réalisation d'actions de rénovation énergétique de leur Maison Individuelle (MI). Les enquêtés ont participé soit à l'opération « Ensemble, économisons l'énergie ! » en Meuse (55) et Haute-Marne (52) soit à l'opération « Solution Bien-Etre » en Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA). Nous présenterons les deux opérations liées aux actions étudiées, les enquêtes réalisées ainsi que les échantillons de données obtenus. Une description de la situation avant travaux des cas étudiés sera effectuée.

2.1. Opération « Ensemble, économisons l'énergie ! » en Meuse et Haute-Marne

Trois des quatre vagues d'enquêtes exploitées dans le cadre de ce travail ont été réalisées auprès de participants à l'opération « Ensemble, économisons l'énergie ! »¹¹ en Meuse (55) et Haute-Marne (52) ainsi nous commencerons par une présentation de celle-ci.

2.1.1. Présentation de l'opération

L'opération « Ensemble, économisons l'énergie ! » en Meuse (55) et Haute-Marne (52) s'inscrit dans le cadre du programme d'accompagnement économique du Laboratoire ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des Déchets RadioActifs) de Bure (52) et de Saudron (55). Elle a été lancée en 2006 par EDF avec « pour ambition d'apporter aux habitants, aux bailleurs sociaux et aux collectivités territoriales une réduction de leur consommation d'énergie et un meilleur confort, et aux acteurs économiques une activité nouvelle porteuse d'avenir, de développement et de créations d'emplois » (EDF, 2010). Cette opération est conduite en lien avec les entreprises et artisans, les organisations professionnelles du bâtiment et les Conseils généraux des deux départements.

Dans ce cadre, EDF fournit notamment, via sa filiale Domofinance¹², des conditions d'emprunt favorisées (prêt à taux 0 % avec prise en charge du coût du crédit ou éco-avantage) aux particuliers (propriétaires occupants ou bailleurs), des départements de la Haute-Marne et de la Meuse, pour effectuer des travaux de rénovation énergétique de leur logement (MI, appartement ou immeuble). L'opération inclut les actions suivantes :

- amélioration de l'isolation de l'enveloppe (isolation par l'intérieur ou l'extérieur des murs, isolation en sous face du plancher bas, isolation de la toiture, remplacement des ouvrants),
- remplacement d'un système de chauffage par un système efficace (chaudière à condensation gaz ou fioul, pompe à chaleur de tout type, poêle bois ou chaudière bois),
- installation d'un chauffe-eau solaire individuel,
- bouquet de travaux avec *a minima* deux améliorations d'isolation ou une amélioration d'isolation associée à un remplacement du système de chauffage.

¹⁰ Nous utiliserons dans le cadre de cette thèse la définition donnée par l'INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques) : « De manière générale, un ménage, au sens statistique du terme, désigne l'ensemble des occupants d'un même logement sans que ces personnes soient nécessairement unies par des liens de parenté (en cas de cohabitation, par exemple). Un ménage peut être composé d'une seule personne. » (INSEE_a).

¹¹ Cf. www.grenelplus.fr.

¹² Cf. www.domofinance.com/.

Les travaux doivent être réalisés par des professionnels partenaires du réseau commercial Bleu Ciel¹³ d'EDF qui s'engagent à respecter le référentiel technique de l'opération. Celui-ci définit des niveaux de performance minimale à satisfaire quant aux gestes d'efficacité énergétique réalisés. Les niveaux exigés correspondent, *a minima*, à ceux demandés pour pouvoir bénéficier du crédit d'impôt développement durable¹⁴. Ainsi, en fonction de ces derniers, les exigences ont été appelées à évoluer depuis le lancement de l'opération¹⁵.

Entre 2006 à 2010, période sur laquelle les enquêtés ont participé à l'opération, 17500 actions ont été conduites au total chez des particuliers (EDF, 2010).

Dans la suite de ce manuscrit, par souci de simplification, nous référencerons cette opération « Ensemble, économisons l'énergie ! » en Meuse (55) et Haute-Marne (52) par l'appellation réduite : opération MDE 52-55.

2.1.2. Enquêtes réalisées

2.1.2.1. Deux premières vagues d'enquêtes : 2009 & 2010

Deux vagues d'enquêtes téléphoniques¹⁶ ont été menées¹⁷, avant le commencement de cette thèse, en 2009 et 2010, auprès respectivement de 305 et 80 participants de l'opération MDE 52-55. Tous ces participants sont des propriétaires occupants d'une MI, comme la très large majorité des particuliers participant à l'opération. Rappelons qu'à l'échelle nationale, les travaux d'efficacité énergétique effectués par les ménages le sont également très majoritairement par des propriétaires occupants (à 88 % en 2010 et à 91 % en 2011 (TNS SOFRES, 2012)) et dans des MI (à 75 % en 2010 et à 76 % en 2011 (TNS SOFRES, 2012)).

Le recrutement des enquêtés a été réalisé en fonction de la nature des travaux effectués. Ainsi, la première vague de 2009 avait pour but de balayer la totalité des actions proposées au sein de l'opération en se fixant un échantillon minimum de 30 cas par catégorie. La deuxième vague de 2010 s'est concentrée sur les remplacements de système de chauffage par une Pompe A Chaleur (PAC) et sur les bouquets de travaux (*i.e.* au moins deux types de travaux conjoints). Ceci afin d'augmenter le nombre de cas présentant ces actions, recueillis lors de la première enquête. Il est donc important de noter que les échantillons enquêtés n'ont pas été constitués selon un objectif de représentativité de la totalité des actions menées au travers l'opération.

Ces enquêtes sont basées sur un questionnaire (la version utilisée en 2010 est une amélioration de celle de 2009) composé de 9 parties :

- Information générale sur le logement et le ménage : nombre de personnes, surface habitable, année de construction, forme de la maison...
- Niveau d'isolation des fenêtres, des murs, de la toiture et du plancher bas : épaisseur de l'isolation, type de vitrage, matériaux...

¹³ Cf. www.mamaisonbleuciedf.fr/.

¹⁴ Cf. www.developpement-durable.gouv.fr/Le-credit-d-impot-developpement.html

¹⁵ Les PAC air/air ont été maintenues au sein de l'opération après leur exclusion à l'éligibilité au crédit d'impôt au 01/01/2009. En 2009, le référentiel de l'opération demandait un COP 7/20 \geq 3,6, un COP -7/20 \geq 2,0, un fonctionnement à -15 °C garanti par le fabricant, une puissance calorifique thermodynamique restituée \geq à 5 kW à une température extérieure de +7 °C et une déperdition du logement \leq 110 W/m².

¹⁶ Les enquêtes ont été réalisées par téléphone car cette démarche comparativement à une enquête par voie postale permet une meilleure maîtrise des questionnés au fur et à mesure du déroulement de la vague d'enquête, un accompagnement dans la réponse et la possibilité de recueil d'informations supplémentaires.

¹⁷ Pour toutes les enquêtes exploitées dans ce travail de thèse, l'enquête téléphonique à proprement dite a été réalisée par l'institut d'études sociomarketing Etéicos (cf. www.eteicos.fr). Ainsi, pour chaque vague d'enquête, l'entreprise Etéicos a fourni à EDF-R&D une base de données brutes et les questionnaires papiers associés.

- Chauffage (principal et appoint) : énergie (électricité, gaz, fioul, bois, GPL), système (chaudière standard, chaudière basse température, chaudière à condensation, pompe à chaleur, convecteurs...), système de programmation...
- Eau chaude sanitaire (ECS) : énergie, nature du système (instantané, à accumulation, solaire...)...
- Ventilation : type (naturel, ventilation mécanique contrôlée simple flux...), comportement d'ouverture des fenêtres...
- Appareils électroménagers et éclairage : équipements, type d'éclairage.
- Consommation d'énergie sur les 3 dernières années¹⁸ : électricité (en kWh), gaz (en kWh Pouvoir Calorifique Supérieur), fioul (en litres), GPL (en tonnes) et bois (en stères en cas de bûches ou en tonnes en cas de granulés).
- Comportement et gestion du confort : températures intérieures moyennes dans les pièces de vie et dans les autres pièces avant et après travaux, gestion des réduits de température, habitude en termes d'usage de l'ECS...
- Bilan de la démarche de rénovation : facteurs déclenchant la décision des travaux, acteurs qui ont conseillé, impacts des travaux...

Pour tous les éléments ayant pu faire l'objet de travaux de rénovation (ouvrants, isolation des parois opaques, système de chauffage, système de production d'ECS, ventilation), le questionnaire comprend des descriptions de l'état du logement avant et après travaux. Le questionnaire est construit de manière à ce que soient prises en compte les rénovations réalisées avec et hors l'opération. Ces travaux hors opération correspondent soit à des actions effectuées en dehors de l'opération pendant les trois années de consommation énergétique récupérées, soit à des actions accomplies avant ces trois années (sans limite d'antériorité). L'ensemble des questions, à de rares cas, opère de façon fermée (choix parmi des propositions).

Par ailleurs, précisons qu'en plus de ces résultats d'enquêtes, un fichier clients avec des détails techniques sur les travaux effectués au sein de l'opération a été mis à notre disposition par les responsables de l'opération.

Notons, qu'un premier travail d'évaluation coût-bénéfice de l'opération a été effectué par (SUERKEMPER, et al., 2012) à partir de ces deux vagues d'enquêtes.

2.1.2.2. Troisième vague d'enquêtes : 2011

La troisième vague d'enquête téléphonique portant sur cette opération a été réalisée en 2011 auprès de 193 participants, également propriétaires occupants d'une MI. Elle a été focalisée sur les actions d'isolation du bâti faiblement représentées dans les deux enquêtes précédentes.

Pour cette nouvelle vague d'enquêtes, nous avons apporté des modifications à la version antérieure du questionnaire :

- Information générale sur le logement et le ménage : pour une meilleure compréhension des structures du ménage et du logement, passages du nombre de personnes aux nombres d'adultes et d'enfants et du nombre de pièces aux nombres de pièce à vivre, de chambre et de salle de bain.
- Niveau d'isolation des fenêtres, des murs, de la toiture et du plancher bas : afin d'alléger le questionnaire, prise en compte des travaux réalisés seulement à partir de 2006 (début de l'opération).
Dans le cadre de travaux d'isolation de la toiture, rajout d'une question pour savoir si ceux-ci ont été réalisés ou non lors d'un aménagement de combles.
- Chauffage (principal et appoint) : prise en compte aussi des travaux réalisés seulement à partir de 2006.

¹⁸ Pour la vague 2009 de l'enquête : 2006, 2007 et 2008. Pour la vague 2010 de l'enquête : 2007, 2008 et 2009.

Rajout d'une question de détail technique sur le type d'émetteur (radiateur, ventilo-convecteur ou plancher) associé aux PAC air/eau et aux PAC eau/eau.

Pour mieux connaître l'utilisation de l'appoint de chauffage, ajout d'une question ouverte mais guidée sur la saisonnalité et la fréquence de l'usage et aussi sur l'emplacement de l'appoint.

- Eau chaude sanitaire (ECS) : prise en compte aussi des travaux réalisés seulement à partir de 2006.

Dans un but de simplification, refonte des questions en énergie principale, énergie d'appoint, si oui ou non production couplée au système de chauffage, présence ou non d'un ballon, si oui volume de celui-ci. Ajout de questions sur la surface des capteurs solaires quand présence d'un système solaire thermique et sur le passage ou non à une production d'ECS électrique lors de l'été quand la production est couplée au système de chauffage.

- Ventilation : prise en compte des travaux réalisés seulement à partir de 2006.
- Appareils électroménagers et éclairage : ajout d'une question sur le nombre d'halogènes.
- Consommation d'énergie : Elargissement de la période de récupération des consommations aux quatre dernières années (2007 à 2010).

Ajout de questions sur le nombre de bouteilles de GPL consommées annuellement pour la cuisson et sur la taille des bouteilles (6 kg ou 13 kg).

- Comportement et gestion du confort : modification de la question sur le temps de présence en jours de semaine du ménage dans leur logement en questions sur le nombre de personne présente toute la journée et sur le nombre de personne présente partiellement la journée. Changement des questions sur la gestion du confort en questions sur les températures avant et après travaux dans les pièces à vivre et dans les autres pièces durant les périodes de présence en journée, d'absence en journée et durant la nuit.
- Bilan de la démarche de rénovation : création d'une question sur l'observation de malfaçons et si oui, leur description. Dans les versions antérieures du questionnaire, ces observations étaient faites au travers des commentaires.

La structure de ce questionnaire permet toujours de prendre en compte les travaux réalisés hors l'opération mais cette fois-ci, seulement pour ceux effectués à partir de 2006. En effet, demander aux enquêtés les travaux effectués antérieurement à une année avant la première année de consommation énergétique récupérée (2007) complique le déroulement de l'enquête téléphonique, en faisant appel à des souvenirs plus ou moins lointains et plus ou moins certains.

Enfin, notons que pour cette troisième vague d'enquêtes, nous avons également pu avoir accès à un fichier clients de l'opération avec des détails techniques sur les travaux effectués via l'opération.

2.1.3. Nettoyage des données recueillies et échantillons disponibles

La totalité des 578 questionnaires obtenus ne peut être utilisée à l'état brut, un « nettoyage » des données est nécessaire. Lors d'une première étape, 254 cas (44 % de la totalité des enquêtés) sont éliminés car ni leur situation avant travaux, ni leur situation après travaux¹⁹ ne peuvent être exploitées. Les principaux motifs d'élimination (voir Tableau 2.1) sont la non déclaration de consommations, des problèmes liés aux données (non déclaration de certaines grandeurs de type surface habitable ou température, déclaration de température intérieure aberrante...) ou des problèmes sur les consommations déclarées (présence de valeurs aberrantes, incohérence entre les systèmes énergétiques et les consommations déclarés...).

¹⁹ L'avant travaux fait référence à la situation avant la réalisation des travaux liés à l'opération et l'après travaux fait référence à la situation après la réalisation des travaux liés à l'opération. Il en sera ainsi pour toute la suite du manuscrit.

Tableau 2.1 Répartition des cas éliminés par motif d'élimination

Motif d'élimination	Nombre de cas concernés	Part des cas éliminés (%)
Non déclaration de consommations	85	34
Problème avec les données	66	26
Problème avec les consommations déclarées	39	15
Emménagement sur la période de consommation évaluée puis travaux lors de l'année ou des années suivantes	23	9
Travaux sur toute la période de consommation évaluée	21	8
Emménagement lors de la dernière année de la période de consommation évaluée	10	4
Autre (maison louée, maison secondaire...)	10	4
Total	254	100

Parmi les cas restants (324 cas), nous identifions ceux utilisables seulement pour leur situation avant travaux (135 cas)²⁰, ceux utilisables seulement pour leur situation après travaux (70 cas)²¹ et enfin ceux utilisables à la fois pour leurs situations avant et après travaux (119 cas). Par souci de simplification, dans la suite du manuscrit, nous référencerons ces échantillons par la terminologie : échantillon MDE 52-55. Dans le cadre de ce chapitre, nous nous concentrerons sur les 119 cas « avant et après travaux ».

2.1.4. Description des situations avant travaux

Dans ce paragraphe nous décrivons quelle était la situation des enquêtés avant les travaux liés à l'opération. Pour cela, nous étudierons aussi bien les caractéristiques techniques des logements (*i.e.* période de construction) que les comportements des ménages, qui sont des facteurs importants de la demande énergétique d'un logement (CAYLA, et al., 2010) (ALLIBE, 2012) (GUERRA-SANTIN, et al., 2009). Pour finir, nous détaillerons leur consommation totale d'énergie avant travaux en les repositionnant par rapport aux moyennes nationale et régionale.

2.1.4.1. Période de construction

Les 119 MI étudiées ont été très majoritairement construites avant 1974 (62 %, voir Figure 2.1), soit avant la première Réglementation Thermique (RT) en France. Il s'agit donc d'un échantillon plutôt de maisons anciennes d'un point de vue de l'efficacité énergétique. En cela, il correspond à la typologie du parc des MI de chacune des régions auxquelles appartiennent les départements 52 et 55 (66 % de logements d'avant 1975 pour la Champagne-Ardenne région du département 52 et 64 % de logements d'avant 1975 pour la Lorraine région du département 55) (CEREN, 2009)²². Pour rappel, les logements anciens (avant 1975) parmi le parc français de MI sont légèrement moindres avec une part de 57 % (CEREN, 2009).

²⁰ Cas pour lesquels est disponible durant la période avant travaux au moins une année complète de consommation d'énergie sans perturbation (réalisation de travaux hors de l'opération).

²¹ Ibid. pour la période après travaux.

²² Les MI analysées dans (CEREN, 2009) sont des résidences principales ne présentant pas de chauffage et de production d'ECS collectives. Les données analysées proviennent de l'enquête « Logement 2006 » de l'INSEE ainsi elles représentent l'état du parc au cours de l'année 2006. Sachant que les enquêtés ont réalisé les travaux liés à l'opération MDE 52-55 entre 2006 et 2010, il y a bien concordance entre la période juste avant travaux des cas étudiés et l'année des données exploitées par le CEREN (Centre d'Etudes et de Recherches Economiques sur l'éNergie).

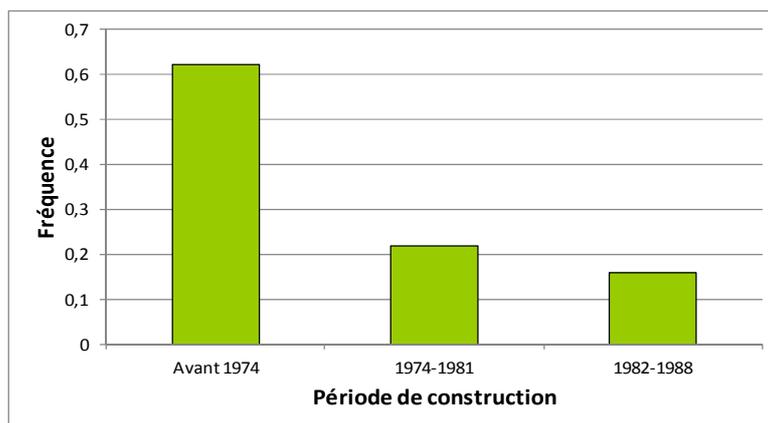


Figure 2.1 Répartition par période de construction de l'échantillon MDE 52-55

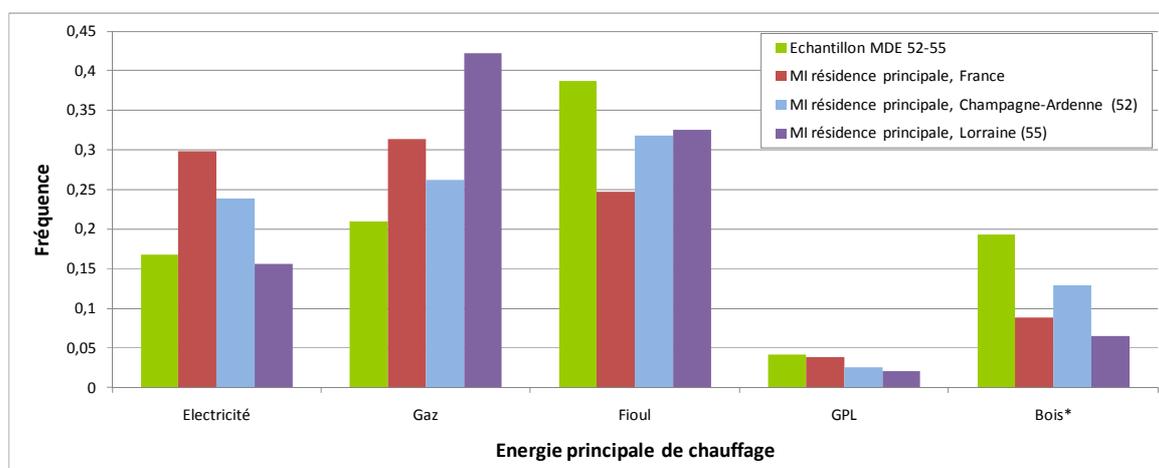
2.1.4.2. Isolation du bâti avant travaux

Etudions de plus près le niveau d'isolation avant travaux du bâti des logements d'avant 1974 afin de savoir si celui-ci avaient déjà fait ou non l'objet de travaux d'amélioration.

Avant travaux, seulement 22 % des logements étaient encore équipés de simple vitrage et 45 % et 32 % ne possédaient respectivement aucune isolation des murs extérieurs et aucune isolation de la toiture ou des combles. Par conséquent, une majorité des MI d'avant 1974 enquêtés a fait l'objet d'une rénovation au moins partielle de l'isolation du bâti avant les travaux liés à l'opération MDE 52-55.

2.1.4.3. Energie principale de chauffage avant travaux

Les cas étudiés utilisaient majoritairement avant les travaux du fioul ou du gaz comme énergie principale de chauffage (39 % pour le fioul et 21 % pour le gaz, voir Figure 2.2). Le bois avec 19 % représentait néanmoins une part non négligeable. La répartition obtenue dans l'échantillon diffère sensiblement des répartitions observées sur les régions Champagne-Ardenne (52) et Lorraine (55), de part notamment une surreprésentation des logements chauffés au fioul et au bois. Elle diffère encore plus de la répartition observée à l'échelle nationale, ce qui s'explique principalement par une part des logements anciens (avant 1975) moindre à l'échelle de la France. Ainsi, notons que les 119 cas vérifient bien le fait que les MI anciennes (avant 1974) sont plutôt chauffées avec du gaz ou du fioul (en France, 67 % des MI en construite avant 1975 sont chauffées avec du gaz ou du fioul) (CEREN, 2009).



* Y compris le charbon pour les données France, Champagne-Ardenne et Lorraine.

Figure 2.2 Répartition par énergie principale de chauffage avant travaux de l'échantillon MDE 52-55 et données nationale et régionales (CEREN, 2009)

2.1.4.4. Système principal de chauffage avant travaux

Observons maintenant quels étaient les systèmes de chauffage associés à ces énergies.

La chaudière standard était le système de chauffage le plus répandu parmi l'échantillon (voir Figure 2.3). De plus, ces dernières étaient anciennes puisque 75 % d'entre elles avaient plus de 10 ans. Les autres systèmes installés étaient des convecteurs électriques et des poêles ou inserts bois. Les systèmes performants (PAC ou chaudière à condensation) étaient peu présents (6 % de l'échantillon).

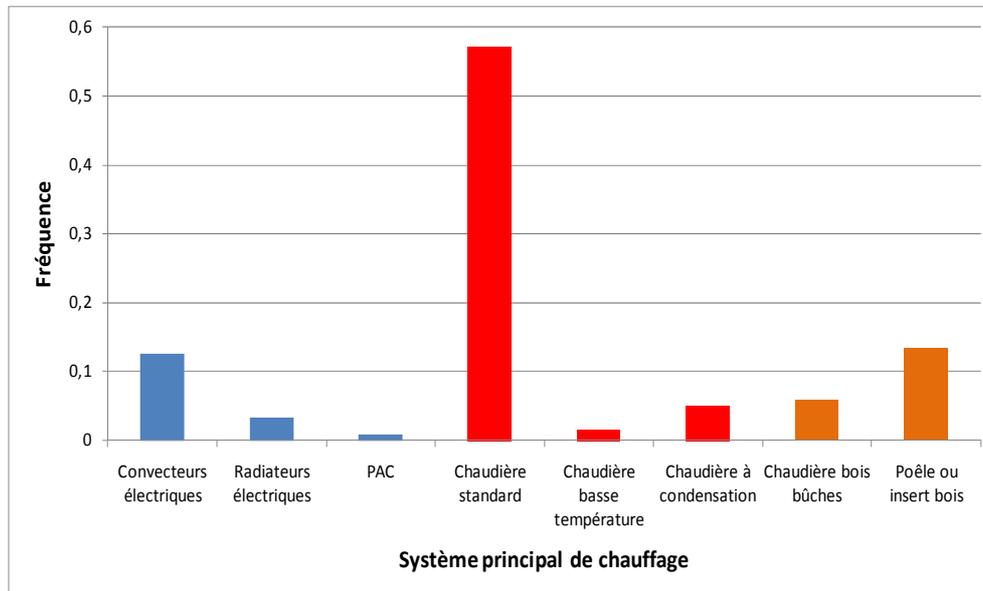


Figure 2.3 Répartition par système principal de chauffage avant travaux de l'échantillon MDE 52-55

2.1.4.5. Surface habitable

Avec une surface habitable moyenne de 137,3 m² (voir Figure 2.4), les logements de l'échantillon présentent une valeur supérieure aux moyennes nationale (111 m²) et régionales (116 m² pour les deux régions) (CEREN, 2009). Cette moyenne se rapproche, bien que restant supérieure, des moyennes nationale (125 m²) et régionales (131 m² pour les deux régions) des maisons chauffées avec du fioul (CEREN, 2009), qui présentent la surface moyenne la plus grande au sein d'un classement selon l'énergie principale de chauffage.

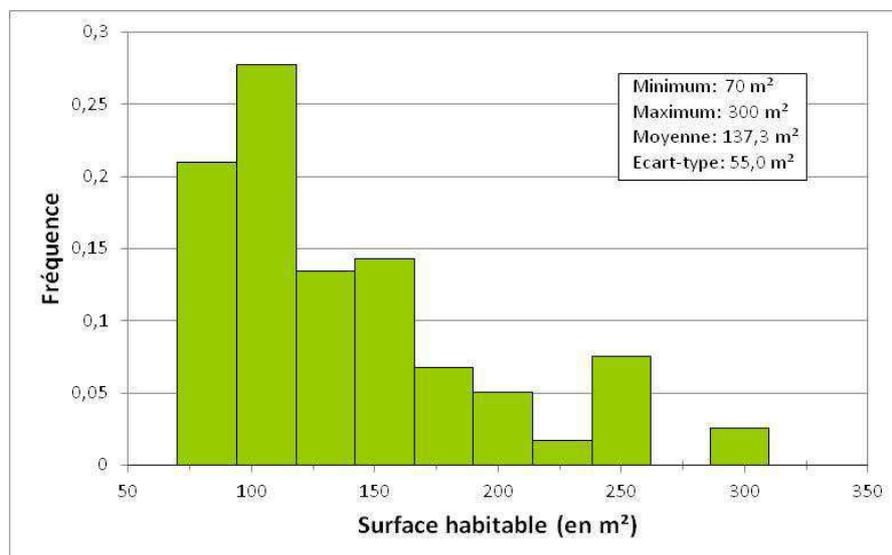


Figure 2.4 Histogramme des surfaces habitables de l'échantillon MDE 52-55

2.1.4.6. Températures intérieures et gestion spatiale du chauffage avant travaux

Après avoir étudié les principales caractéristiques techniques des logements de l'échantillon, nous nous intéressons aux comportements des ménages et plus particulièrement à leur gestion du chauffage.

Environ 75 % des 119 ménages déclarent qu'ils avaient, durant la saison de chauffage avant travaux, une température dans les pièces de vie sur les périodes de présence entre 19 °C et 21 °C (voir Figure 2.5). Ces mêmes ménages déclarent en moyenne qu'ils chauffaient, sur les mêmes périodes de présence, les autres pièces (*e.g.* les chambres) à des niveaux de température plus faibles. Ainsi, il semble que les ménages appliquaient majoritairement une gestion spatiale du chauffage.

Pour chacune des distributions de température, notons des valeurs minimales extrêmement basses²³. Elles correspondent à des cas où les espaces en question étaient peu ou très peu chauffés. Si leurs valeurs en soi sont à considérer avec précaution, elles traduisent avec une forte probabilité de l'inconfort thermique.

A l'opposé, nous observons la présence de 9 cas avec une température dans les pièces de vie déclarée de 23 °C et plus²⁴. Ces derniers sont à rapprocher du fait qu'un certain nombre de logements utilise un poêle ou un insert bois comme système principal de chauffage, susceptible d'occasionner des surchauffes en raison d'une difficulté à réguler ce type de système.

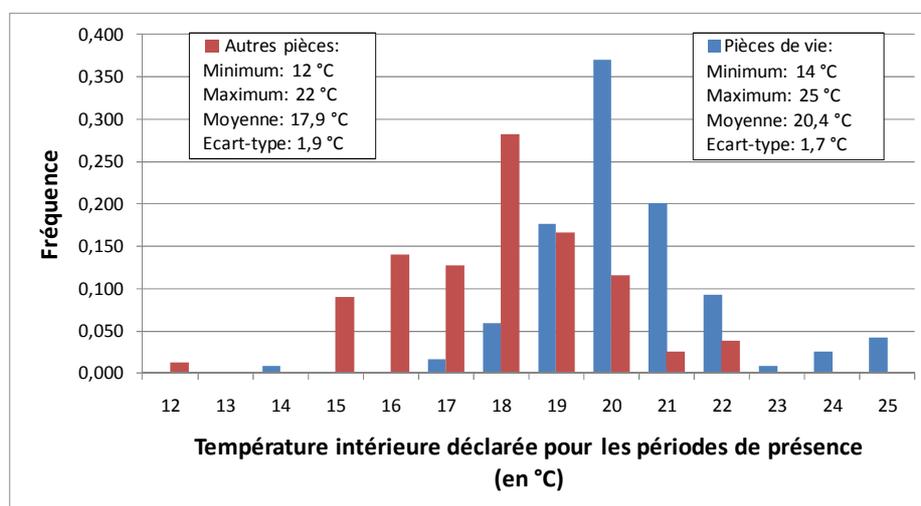


Figure 2.5 Histogrammes des températures intérieures déclarées pour les périodes de présence avant travaux de l'échantillon MDE 52-55

2.1.4.7. Occupation du logement et gestion temporelle du chauffage avant travaux

L'étude de la gestion temporelle des températures de chauffage ne peut avoir du sens que si elle est mise en regard d'une étude de l'occupation du logement²⁵ selon les différentes périodes composant

²³ Le Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), dans le cadre de l'exploitation d'une campagne nationale menée par l'Observatoire de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) auprès de ménages habitant une MI ou un appartement, fournit des valeurs de températures mesurées durant la saison de chauffage (pas de temps de 10 min et sur une semaine) dans trois pièces (séjour, chambre et cuisine) (CGDD, 2013). Les valeurs minimums trouvées par cette étude pour le séjour (263 logements) et la chambre (308 logements) sont respectivement de 14,9 °C et 5,4 °C. Au regard de ces dernières, les valeurs minimums déclarées par les ménages de l'échantillon MDE 52-55 ne semblent pas aberrantes.

²⁴ L'étude du CGDD (CGDD, 2013) trouve pour le séjour une température maximum de 25,5 °C. En comparaison de ces dernières, les valeurs maximums déclarées au sein de l'échantillon ne semblent pas aberrantes.

²⁵ Par réduit de température de chauffage, nous entendons réduction de la température intérieure des pièces de vie ou de la température intérieure des autres pièces.

une journée. Parmi les 119 ménages, les absences en semaine dans la période avant les travaux²⁶ étaient les suivantes :

- 55 % déclarent qu'ils étaient présents (au moins une personne du ménage),
- 22 % qu'ils n'étaient présents que partiellement.
- et 23 % qu'ils étaient absents durant les journées.

Au regard des 45 % des ménages au moins en partie absents sur la journée, les 19 % des ménages qui réduisaient au moins la température de chauffage durant leur absence sur la journée (voir Figure 2.6) paraissent un pourcentage relativement faible (un peu plus de 2 sur 5). Environ 20 % déclarent qu'ils ne réduisaient jamais la température du chauffage. Par contre, une grande majorité (77 %) réduisait la température durant la nuit.

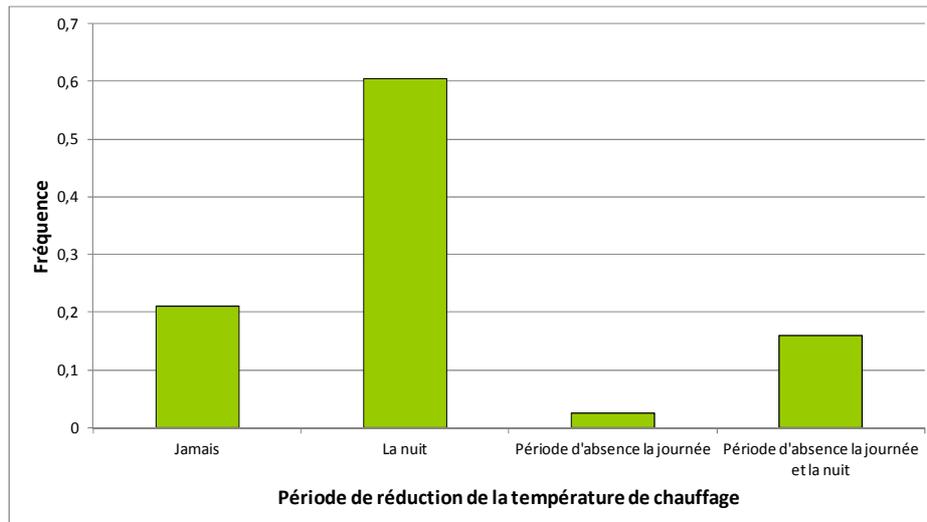


Figure 2.6 Répartition par période de réduction de la température de chauffage avant travaux de l'échantillon MDE 52-55

2.1.4.8. Consommation totale d'énergie avant travaux

Après avoir présenté certains facteurs impactant les consommations, examinons les consommations annuelles surfaciques d'énergie finale tous usages à climat normal avant travaux des 119 cas²⁷ (voir Figure 2.7).

²⁶ Lors des enquêtes, l'occupation les jours de semaine du logement par les ménages a été demandée sans faire de distinction entre avant et après les travaux. Les cas de différence d'occupation entre avant et après travaux sont identifiés au travers des commentaires récupérés.

²⁷ Il s'agit d'une consommation déduite des données de consommations et de la surface habitable fournies lors des enquêtes (voir Chapitre 3, sous-partie 3.1 pour plus de détails quant à la méthode de calcul appliquée).

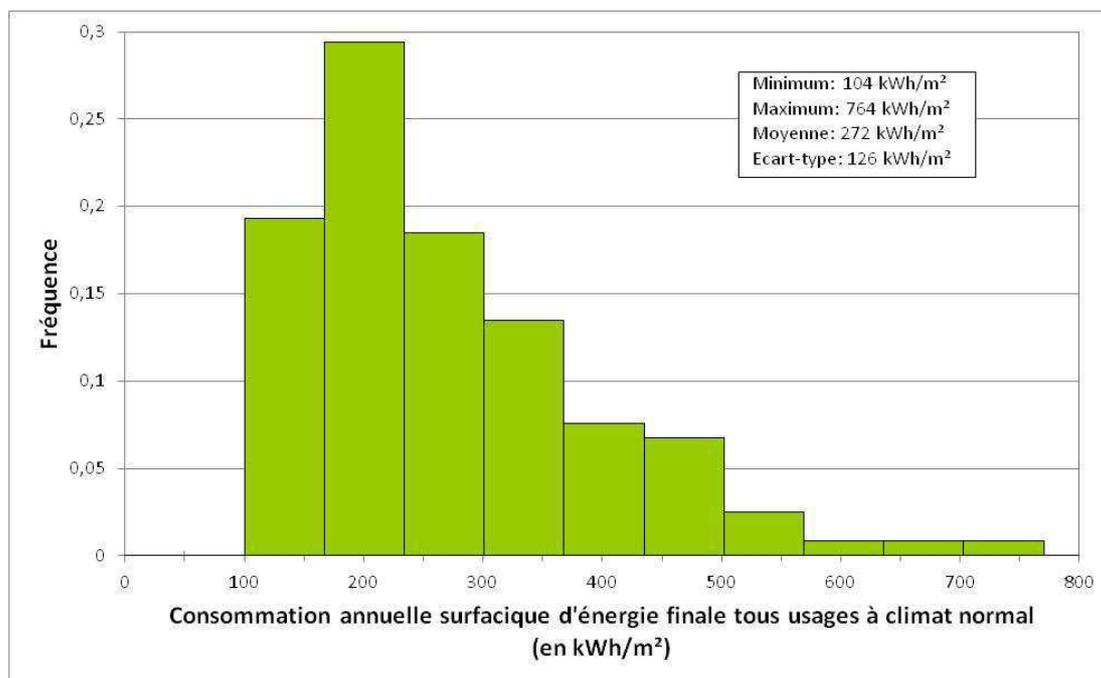


Figure 2.7 Histogramme des consommations annuelles surfaciques d'énergie finale tous usages à climat normal avant travaux de l'échantillon MDE 52-55

Considérant le climat hivernal rigoureux des deux départements (zone climatique RT H1b, voir Annexe 2) et des caractéristiques des logements (majoritairement des MI d'avant 1974 chauffées à partir de chaudières standards anciennes à des niveaux de température entre 19 °C et 21 °C pour les pièces de vie), il paraît cohérent d'avoir une consommation moyenne relativement élevée (272 kWh/m²), notamment par rapport à la moyenne nationale des MI (212 kWh/m² à climat normal) (CEREN, 2009). La moyenne des consommations surfaciques de l'échantillon est aussi supérieure, aux moyennes observées pour les MI des régions Champagne-Ardenne (52) (244 kWh/m² à climat normal) et Lorraine (55) (234 kWh/m² à climat normal) (CEREN, 2009). Ceci semble pouvoir s'expliquer par une surreprésentation parmi les 119 cas des logements chauffés avec du fioul et du bois²⁸.

Enfin, notons l'absence de logement avec une consommation inférieure à 100 kWh/m² et à l'opposé, 6 cas de consommation supérieure à 500 kWh/m². Ces derniers sont des logements qui étaient chauffés soit au bois avec un appoint électrique, soit au fioul avec un appoint bois. Ces données traduisent une forte dispersion des consommations avant travaux (Cv=46 %) ²⁹.

2.1.4.9. Comparaison par rapport aux caractéristiques des logements français pour lesquels ont été effectués des travaux

Ci-dessus, nous avons comparé les caractéristiques techniques des logements avant les travaux de l'échantillon MDE 52-55 avec celles des parcs régionaux et national de MI. S'agissant d'un échantillon de logements ayant réalisé des travaux d'efficacité énergétique, il nous semble également intéressant de comparer ses caractéristiques avec celles des logements français pour lesquels ont été

²⁸ Sur la Champagne-Ardenne (52), moyenne pour les MI fioul 268 kWh/m² à climat normal et moyenne pour les MI bois 344 kWh/m² à climat normal. Sur la Lorraine (55), moyenne pour les MI fioul 250 kWh/m² à climat normal et moyenne pour les MI bois 335 kWh/m² à climat normal. (CEREN, 2009)

²⁹ Le coefficient de variation (Cv) est défini comme le rapport entre l'écart-type et la moyenne.

effectués des travaux à même finalité. Pour se faire, nous utiliserons les résultats de la vague 2010³⁰ de l'enquête « Maîtrise de l'énergie » menée par la TNS Sofres pour l'ADEME (TNS SOFRES, 2012).

Sur les 10 000 ménages enquêtés, échantillon conçu afin d'être représentatif des ménages et des logements français, 14,4 % ont déclaré avoir effectué durant l'année 2010 des travaux de MDE dans leur résidence principale (TNS SOFRES, 2012). C'est par rapport aux caractéristiques de ce sous-échantillon que nous allons comparer celles de l'échantillon MDE 52-55 avant les travaux.

Toutefois, il faut noter dès maintenant l'existence d'un biais entre les chiffres fournis par l'enquête (TNS SOFRES, 2012) et ceux relatifs à l'échantillon MDE 52-55. L'analyse faite par la TNS Sofres est à l'échelle des travaux, *i.e.* qu'un ménage ayant réalisé deux interventions (*e.g.* isolation des combles et remplacement du système principal de chauffage) est comptabilisé deux fois. Tandis que l'analyse que nous menons est à l'échelle des ménages, *i.e.* qu'un ménage ayant réalisé deux interventions n'est comptabilisé qu'une seule fois. Sachant que le nombre moyen d'intervention par ménage est de 1,6 dans le cadre de l'enquête nationale (TNS SOFRES, 2012), celle-ci surestime les caractéristiques des ménages et des logements pour lesquels ont été effectués plus d'une intervention. Par conséquent, les résultats des comparaisons seront à considérer avec précautions.

De part l'implantation des logements étudiés dans les départements 52 et 55 (zone climatique H1, seulement deux villes présentant plus de 20 000 habitants : Saint-Dizier dans le 52 avec 25 526 habitants en 2010 (INSEE_b) et Chaumont dans le 52 avec 23 011 habitants en 2010 (INSEE_c)), l'échantillon MDE 52-55 ne peut représenter toutes les situations géographiques et climatiques du territoire français. Cependant, notons qu'en 2010 à l'échelle nationale, 61 % des travaux ont été effectués dans la zone climatique H1 et 53 % ont été réalisés dans des villes de moins de 20 000 habitants (TNS SOFRES, 2012). Par conséquent, les caractéristiques géographique et climatique de l'échantillon MDE 52-55 correspondent aux caractéristiques majoritaires à l'échelle nationale sur ces aspects.

En 2010 à l'échelle nationale, 75 % des travaux ont été effectués dans des MI dont 65 % ont été construites avant 1975 (TNS SOFRES, 2012). En cela, l'échantillon MDE 52-55 constitué uniquement de MI et parmi celles-ci d'une très grande majorité construite avant 1974 (62 %) est plutôt concordant avec ces caractéristiques.

Par contre, les logements de l'échantillon MDE 52-55 présentent dans une proportion plus importante des surfaces de 150 m² et plus (38 %) qu'à l'échelle nationale (13 % des travaux effectués à l'échelle nationale en 2010 l'ont été dans des logements de 150 m² et plus (TNS SOFRES, 2012)).

De même, l'échantillon MDE 52-55 présente des surreprésentations en termes de MI utilisant avant les travaux, comme énergie principale de chauffage, le fioul (39 % contre 23 % des travaux effectués à l'échelle nationale dans des MI l'ont été dans des MI chauffées au fioul (TNS SOFRES, 2012)) et le bois ou le GPL (23 % au lieu de 17 % (TNS SOFRES, 2012)). Ces surreprésentations entraînant des sous-représentations concernant les MI se chauffant, avant les travaux, principalement avec de l'électricité (17 % pour l'échantillon MDE 52-55 au lieu de 30 % pour l'enquête nationale (TNS SOFRES, 2012)) et du gaz (21 % l'échantillon MDE 52-55 au lieu de 30 % pour l'enquête nationale (TNS SOFRES, 2012)).

Concernant les comportements des ménages et les consommations d'énergie avant travaux, faute d'informations apportées par l'enquête « Maîtrise de l'énergie », il n'est pas possible de faire de comparaison avec l'échantillon MDE 52-55.

En conclusion, l'échantillon MDE 52-55 présente sur un certain nombre de caractéristiques générales une relativement bonne concordance avec les caractéristiques majoritaires des logements ayant effectué des travaux de MDE à l'échelle nationale mais des discordances avec ces dernières sur

³⁰ 2010 est la dernière année de l'intervalle durant lequel les enquêtés ont réalisé les travaux liés à l'opération MDE 52-55, soit entre 2006 et 2010.

les caractéristiques plus détaillées que sont la surface et l'énergie principale de chauffage avant travaux.

2.2. Opération « Solution Bien-Etre » en Provence-Alpes-Côte d'Azur

Après avoir présenté les données issues des trois vagues d'enquêtes auprès des participants à l'opération MDE 52-55, intéressons-nous maintenant à la dernière vague d'enquêtes exploitée au cours de ce travail et ceci en soulignant entre autres sa différence.

2.2.1. Présentation de l'opération

Une seule vague d'enquêtes a été réalisée auprès de particuliers ayant participé, entre 2009 et 2010, à l'opération « Solution Bien-Etre ». Cette opération fait partie du programme « Energie Efficace » en PACA³¹. Ce programme d'EDF a été lancé en septembre 2009 pour une durée de six années. Il a pour objectif de limiter la croissance de la demande d'électricité, de diversifier les sources de production énergétique et de favoriser une évolution des comportements individuels et collectifs, la région ne produisant sur son territoire que 40 % de l'électricité qu'elle consomme et se trouvant en bout de chaîne du réseau électrique d'alimentation haute tension (*i.e.* en situation de « péninsule électrique ») (EDF, 2013). Ce programme a entre autre pour cible l'économie de 1,5 GWh sur ces six ans d'existence (EDF, 2013). L'opération « Solution Bien-Etre » a débuté en octobre 2009 et fait partie de la composante maîtrise de la demande d'électricité et plus largement d'énergie du programme.

Dans le cadre de cette opération, EDF fournit une éco-prime de 1000 € aux particuliers (propriétaires occupants ou bailleurs) de la région PACA pour la réalisation de travaux de rénovation énergétique en multi-lots (*i.e.* au moins deux travaux distincts) de leur logement (MI ou appartement). L'opération exige la réalisation de deux lots de travaux :

- remplacement d'un système de chauffage par un système plus efficace (PAC air/air³², PAC air/eau³³ ou chauffage à bois hors insert³⁴),
- amélioration de l'isolation de l'enveloppe (Isolation des Murs par l'Extérieur (ITE), isolation de la toiture³⁵ ou remplacement des ouvrants) ou installation d'un Chauffe-Eau Solaire Individuel (CESI).

Les travaux doivent être réalisés par des professionnels partenaires du réseau commercial Bleu Ciel d'EDF. Il est à noter que cette opération n'a pas de référentiel technique propre et repose sur le référentiel EDF Bleu Ciel.

Durant la période d'octobre 2009 à mars 2012, selon les responsables de l'opération un peu plus de 4200 logements ont été rénovés au travers de celle-ci.

De façon similaire à l'opération MDE 52-55, dans la suite de ce manuscrit, nous référencerons l'opération « Solution Bien-Etre » en PACA par le vocable : MDE PACA.

2.2.2. Enquête réalisée

La vague d'enquêtes téléphoniques portant sur cette opération a été réalisée en 2012 auprès de 212 participants. Les personnes interrogées sont des propriétaires occupants d'une MI comme la très

³¹ Cf. www.fr.edf.com/demarche-en-regions/energie-efficace-en-paca/accueil-81197.html.

³² Dans le cadre de l'opération, celle-ci peut être réversible.

³³ Ibid.

³⁴ La surface traitée doit être au moins égale à 60 % de la surface habitable ou 80 m² au minimum.

³⁵ Ibid.

grande majorité des participants de l'opération et plus globalement des ménages français réalisant des travaux d'efficacité énergétique (TNS SOFRES, 2012). L'enquête a été restreinte aux ménages localisés dans les départements les plus contributeurs à l'opération : Bouche du Rhône (13), Var (83) et Alpes-Maritimes (06).

Nous avons également appliqué une sélection des enquêtés sur la base des travaux réalisés. En effet, les enquêtes ont été menées auprès de particuliers ayant effectué en premier lot de travaux, l'installation d'une PAC et en deuxième lot de travaux, soit une ITE, soit une isolation de la toiture ou l'installation d'un CESI.

Nous n'avons pas retenu les cas de premier lot de travaux d'installation d'un système de chauffage au bois car ils présentent un risque d'incertitude dans les consommations déclarées plus élevé que pour des consommations d'électricité, ce qui nécessiterait la réalisation d'un questionnaire adapté pour limiter ce risque. Par ailleurs, ces cas sont minoritaires au sein de l'opération (selon les responsables de l'opération, 20 % des participants). Les cas de second lot de travaux de remplacement des ouvrants n'ont aussi pas été étudiés car c'est une action qui est appelée à disparaître de l'opération en raison d'un marché de la rénovation des ouvrants déjà structuré. Par conséquent, les évaluer présentait un intérêt moindre. Au final, il faut noter que l'échantillon enquêté n'a pas été constitué selon un objectif de représentativité de la totalité des actions menées au travers l'opération.

Le questionnaire utilisé pour cette vague d'enquêtes est basé sur la version employée pour la vague d'enquêtes 2011 de l'opération MDE 52-55. Toutefois, des compléments et des adaptations à celui-ci ont été apportés en raison de la question de l'usage de la climatisation présente en région PACA (climat méditerranéen) et dans l'opération étudiée (installation d'une PAC potentiellement réversible) :

- Information générale sur le logement et le ménage : spécification des nombres d'adultes et d'enfants du ménage avant et après les travaux. L'évolution de la structure du ménage était dans les versions antérieures du questionnaire récupérée à travers les commentaires.
Ajout d'une question sur la surface non chauffée du logement.
Elargissement de la question sur l'agrandissement du logement à la totalité des travaux sur la période évaluée (aménagement des combles et/ou extension) et indication de la surface ajoutée.
- Niveau d'isolation des fenêtres, des murs, de la toiture et du plancher bas : prise en compte des travaux réalisés à partir de 2009 (début de l'opération).
Dans le cadre de travaux de remplacement des ouvrants, ajout d'une question sur la proportion d'ouvrants remplacés.
Dans le cadre de travaux d'isolation des murs, remplacement de la question sur le nombre de pièces isolées (difficilement traduisible en surface de murs extérieurs isolée) par des questions sur le nombre de façades isolées et sur le nombre de niveaux isolés. Ajout d'une question pour savoir, en cas de travaux, si l'isolation d'avant travaux a été conservée ou remplacée.
Dans le cadre de travaux d'isolation de la toiture, rajout d'une question là aussi pour savoir, en cas de travaux, si l'isolation d'avant travaux a été conservée ou remplacée.
- Chauffage (principal et appoint) : prise en compte aussi des travaux réalisés seulement à partir de 2009.
Rajout d'une question de détail technique sur le type de PAC air/air (mono-split, multi-splits ou gainable).
- Eau chaude sanitaire (ECS) : prise en compte aussi des travaux réalisés seulement à partir de 2009.
- Climatisation : création d'une nouvelle partie consacrée à la climatisation. Définitions du système de climatisation, de sa date d'installation et de la surface habitable climatisée. De façon identique aux autres postes de travaux, prise en compte des travaux réalisés seulement à partir de 2009 avec description des situations avant et après travaux.
- Ventilation : prise en compte aussi des travaux réalisés seulement à partir de 2009.

- Appareils électroménagers et éclairage : rajout d'une question sur la présence d'une piscine et si oui, si elle est chauffée ou non. Dans les versions antérieures des questionnaires, ce type d'équipement était défini dans la catégorie « Autre ».
- Consommation d'énergie : récupération des consommations depuis 2009.
- Habitudes : les questions concernant les comportements non relatifs au chauffage sont séparées des questions en lien avec la gestion du confort de chauffage.
- Gestion du confort de chauffage : voir ci-dessus. Ajout d'une question sur la période de chauffage.
- Gestion du confort de climatisation : création d'une nouvelle partie consacrée à la gestion du confort de climatisation. Cette partie opère de façon identique à celle sur la gestion du confort de chauffage ainsi sont demandées les températures avant et après travaux dans les pièces à vivre et dans les autres pièces durant les périodes de présence en journée, d'absence en journée et durant la nuit. Toutefois, la question sur la période de chauffage est remplacée par une question sur la durée, d'utilisation de la climatisation sur l'été (ne l'utilise pas, utilisation que les jours les plus chauds soit moins d'une semaine en cumulé, utilisation fréquente soit de 2 à 3 semaines en cumulé ou utilisation en continue soit 1 mois et plus en cumulé).
- Bilan de la démarche de rénovation : ajouts de différentes questions sur la délivrance de conseils par les entreprises ayant réalisé les travaux dans l'opération.

De la même manière que pour les versions antérieures du questionnaire, les travaux hors opération sont pris en compte (réalisés à partir de 2009).

Pour finir, notons que pour cette opération, nous n'avons pas eu à notre disposition d'autre source d'information sur les travaux réalisés via l'opération que les résultats de l'enquête. Ceci explique l'ajout de quelques questions au sein du questionnaire (*e.g.* proportion d'ouvrants remplacés).

2.2.3. Nettoyage des données recueillies et échantillons disponibles

Un nettoyage de ces données est réalisé et dans un premier temps, 54 cas (soit 25,5 % de la totalité des enquêtés) sont éliminés car inexploitable. Notons un taux de perte moindre que lors des enquêtes sur l'opération MDE 52-55 (44 % des cas éliminés). Les principaux motifs d'élimination (voir Tableau 2.2) sont la non déclaration de consommations, l'emménagement sur la période de consommation évaluée suivi de travaux (pas de situation avant travaux et pas d'année entière de consommation après travaux sans perturbation) et des problèmes avec les données (non déclaration de certaines grandeurs de type surface habitable ou température...). Ces motifs d'élimination sont de même nature que ceux rencontrés lors du nettoyage des données d'enquêtes de l'opération MDE 5255.

Tableau 2.2 Répartition par motif d'élimination des cas éliminés

Motif d'élimination	Nombre de cas concernés	Part des cas éliminés (%)
Non déclaration de consommations	17	32
Emménagement sur la période de consommation évaluée puis travaux lors de l'année ou des années suivantes	12	22
Problème avec les données	8	15
Problème avec les consommations déclarées	6	11
Maison divisée en plusieurs logements	5	9
Travaux sur toute la période de consommation évaluée	2	4
Autre (appartement...)	4	7
Total	54	100

Dans un second temps, nous repérons parmi les 158 cas restant les cas utilisables seulement pour leur situation avant les travaux (25 cas)³⁶, ceux utilisables seulement pour leur situation après travaux (42 cas)³⁷ et enfin ceux utilisables pour les deux situations (91 cas). Nous référencerons dans la suite du manuscrit ces échantillons par la terminologie : échantillon MDE PACA. C'est sur les 91 cas « avant et après travaux » que nous nous concentrerons dans ce chapitre.

2.2.4. Description des situations avant travaux

Comme pour les données récupérées lors des vagues d'enquêtes sur l'opération MDE 52-55, nous allons décrire quelle était la situation avant les travaux des 91 cas recueillis. Cela nous permettra entre autres de souligner la différence entre les deux échantillons.

2.2.4.1. Période de construction

A l'inverse de l'échantillon MDE 52-55, les 91 MI étudiées ont été très majoritairement construites après 1974 (80 %, voir Figure 2.8), soit après la première RT française. La majorité (54 %) ayant été construite entre les périodes 1974-1981 et 1982-1988, soit durant les périodes où la RT 1974 (ARRETE 10 AVRIL, 1974) et la RT 1981 (ARRETE 24 MARS, 1982) étaient respectivement en vigueur. Ainsi, l'échantillon est assez différent de la situation du parc de MI de la région PACA (48 % de MI d'avant 1975 et 30 % de MI entre 1975 et 1989) (CEREN, 2009)³⁸. La situation est encore plus dissemblable comparée à celle du parc national (57 % de MI d'avant 1975 et 25 % de MI entre 1975 et 1989) (CEREN, 2009)³⁹.

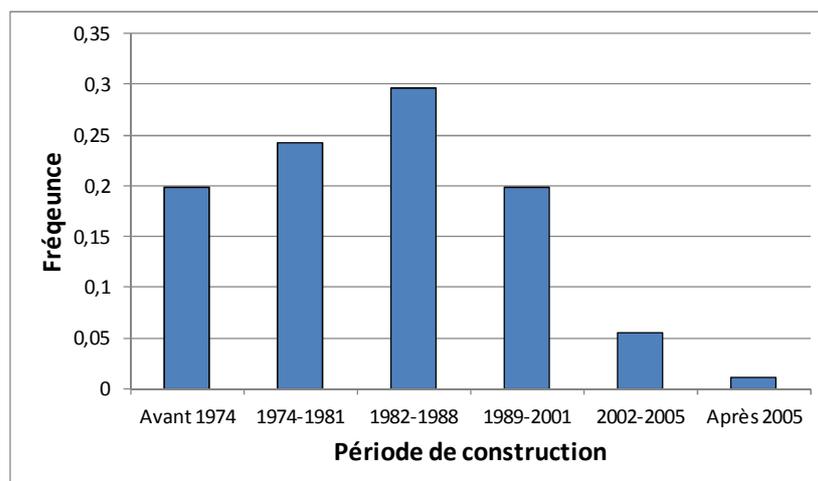


Figure 2.8 Répartition par période de construction de l'échantillon MDE PACA

³⁶ Cas pour lesquels est disponible durant la période avant travaux au moins une année complète de consommation d'énergie sans perturbation (réalisation de travaux hors de l'opération).

³⁷ Ibid. pour la période après travaux.

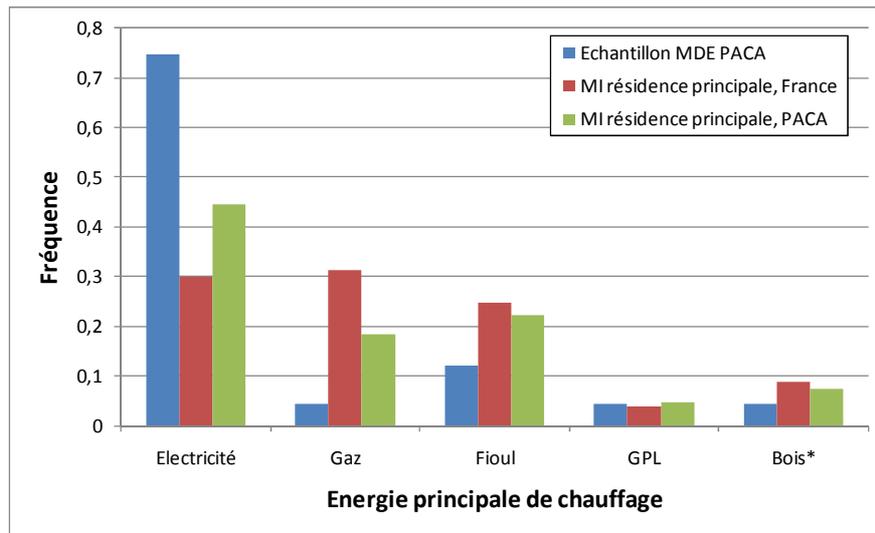
³⁸ Pour rappel, les MI analysées dans (CEREN, 2009) sont des résidences principales ne présentant pas de chauffage et de production d'ECS collectives. Les données analysées proviennent de l'enquête « Logement 2006 » de l'INSEE ainsi elles représentent l'état du parc au cours de l'année 2006. Sachant que les enquêtés ont réalisé les travaux liés à l'opération MDE PACA entre 2009 et 2010, il y a un léger décalage (maximum de 3 années) entre la période juste avant travaux des cas étudiés et l'année des données exploitées par le CEREN. Toutefois, n'existant pas à notre connaissance de données plus récentes sur le parc de logements à l'échelle régionale et leurs consommations énergétiques unitaires, nous ne pouvons utiliser une autre source.

³⁹ Bien qu'il existe des références analysant la situation du parc national en 2008 ou en 2009 (années juste avant les travaux des cas étudiés), nous avons préféré conserver pour une raison de cohérence la même référence pour les données nationales et régionales.

2.2.4.2. Energie principale de chauffage avant travaux

Parmi les cas étudiés, l'électricité était très majoritairement l'énergie principale de chauffage utilisée avant les travaux (75 %, voir Figure 2.9). La répartition obtenue diffère très fortement de celle pour l'échantillon MDE 52-55 (17 % des logements chauffés à l'électricité). Il en est de même par rapport aux répartitions observées tant aux échelles nationale que régionale.

Rétrospectivement, notons que les 91 cas vérifient bien le fait que les MI chauffées avec de l'électricité ont été majoritairement construites après 1975 (en France, 64 % des MI chauffées avec de l'électricité comme énergie de chauffage ont été construites après 1975) (CEREN, 2009).



* Y compris aussi le charbon pour les données France et PACA.

Figure 2.9 Répartition par énergie principale de chauffage avant travaux de l'échantillon MDE PACA et données nationale et régionales (CEREN, 2009)

2.2.4.3. Système principal de chauffage avant travaux

Dans l'échantillon PACA, les logements chauffés avec de l'électricité étaient majoritairement équipés de convecteurs électriques (44 % des 91 cas soit 59 % des MI chauffées à l'électricité, voir Figure 2.10). 92,5 % de ces convecteurs avaient plus de 10 ans, ils s'agissaient donc plutôt de systèmes anciens. Les MI restantes, chauffées avec une autre énergie, étaient quant à elles majoritairement pourvues de chaudière standard (20 % des 91 cas soit 78 % des MI chauffées à une autre énergie que l'électricité). Ces dernières étaient également anciennes puisque 90 % de celles-ci avaient plus de 10 ans. Les systèmes performants (PAC ou chaudière à condensation) étaient légèrement plus présents dans cet échantillon (11 % de l'échantillon dont 10 % de PAC air/air) que dans l'échantillon MDE 52-55 (6 % de l'échantillon). Toutefois, ces parts de systèmes performants étaient dans l'absolu relativement faibles.

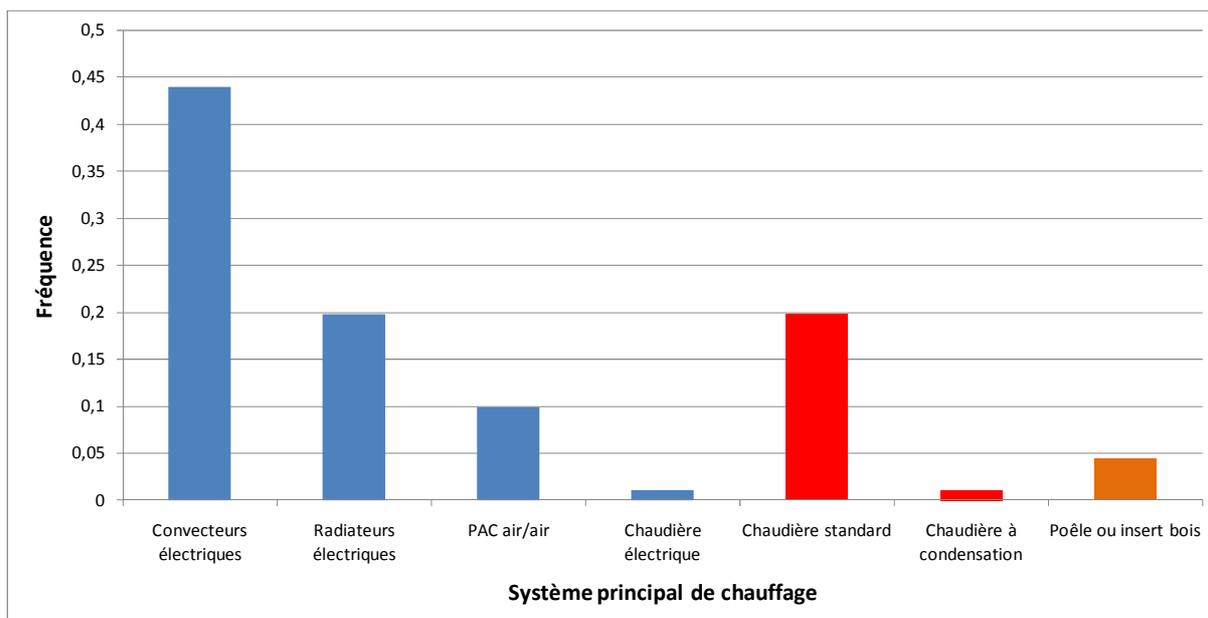


Figure 2.10 Répartition par système principal de chauffage avant travaux de l'échantillon MDE PACA

2.2.4.4. Système de climatisation avant travaux

Les ménages de l'échantillon étant situés sous un climat méditerranéen (zone H3 de la RT, voir Annexe 2, la question de la présence ou non d'un système de climatisation doit être posée. Ce dernier point est d'autant plus important que les travaux effectués consistent pour une partie à l'installation d'une PAC potentiellement réversible.

84 % de l'échantillon n'avaient pas de système de climatisation avant les travaux (voir Figure 2.11). Parmi les 16 % équipés, nous retrouvons pour un peu plus de la moitié des systèmes dédiés uniquement à la climatisation. Par ailleurs, notons que 78 % des PAC air/air présentes avant travaux étaient des systèmes réversibles.

Ce pourcentage de cas équipés avant travaux d'un système de climatisation est très supérieur au taux de climatisation observé sur le parc résidentiel français (3,3 % d'après l'enquête « Logement 2006 » de l'INSEE) (FOUCARD, 2012). Certaines caractéristiques de l'échantillon permettent de corroborer ce taux important : la zone climatique H3 et des propriétaires de MI construites majoritairement après 1974 et utilisant majoritairement un chauffage principal électrique (FOUCARD, 2012).

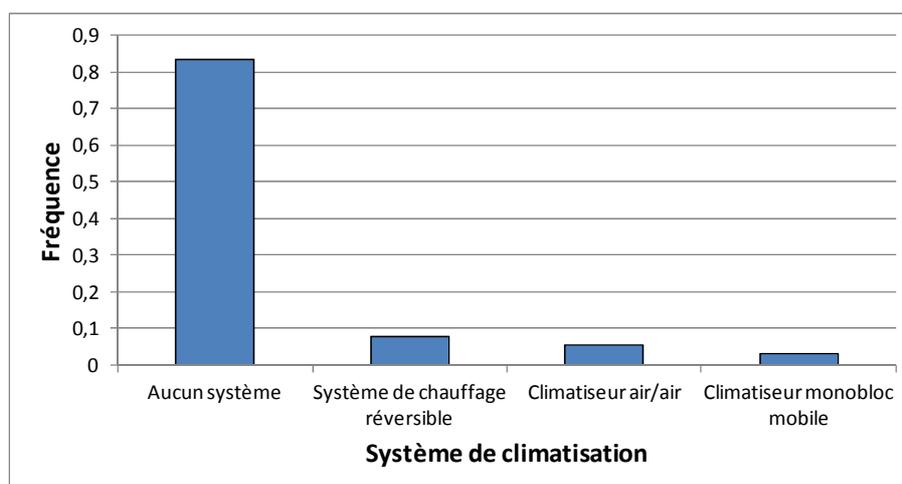


Figure 2.11 Répartition par système de climatisation avant travaux de l'échantillon MDE PACA

2.2.4.5. Surface habitable

Les 126,5 m² de moyenne de surface habitable des logements de l'échantillon (voir Figure 2.12) sont supérieurs aux moyennes nationale et régionale (111 m² pour la France entière et 106 m² pour la région PACA) (CEREN, 2009). Les écarts sont encore plus importants par rapport aux moyennes pour les MI chauffées à l'électricité (104 m² pour la France entière et 99 m² pour la région PACA) (CEREN, 2009).

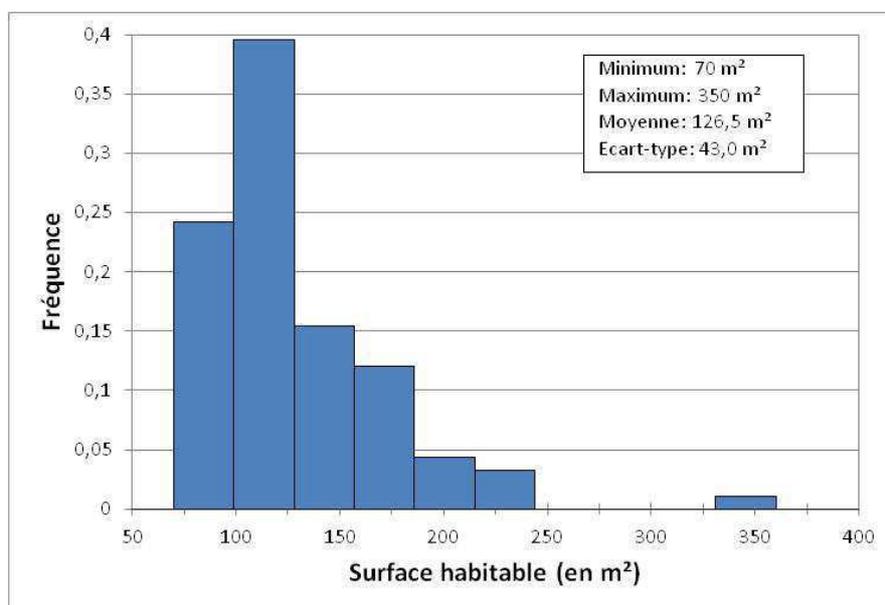


Figure 2.12 Histogramme des surfaces habitables de l'échantillon MDE PACA

2.2.4.6. Part de la surface habitable non chauffée

Intéressons-nous maintenant aux comportements des ménages et plus particulièrement à leur gestion spatiale du chauffage. Nous disposons d'une donnée que nous n'avons pas obtenue lors des enquêtes sur l'opération MDE 52-55, à savoir la part de la surface habitable non chauffée au sein du logement.

32 % des 91 ménages déclarent ne pas chauffer une partie de leur logement⁴⁰. Cette part non chauffée de la surface habitable représente en moyenne 29 % de la surface totale (écart-type de 12,5 %, minimum de 10 % et maximum de 50 %).

2.2.4.7. Températures intérieures durant la saison de chauffage avant travaux

Concernant les températures intérieures déclarées par les ménages, 75 % des ménages déclarent qu'ils avaient, durant la saison de chauffage avant travaux, une température dans les pièces de vie sur les périodes de présence entre 19 °C et 21 °C (voir Figure 2.13). Ce pourcentage est identique à celui observé sur l'échantillon MDE 52-55 sur la même plage de température. De plus, nous remarquons que les ménages de l'échantillon MDE PACA déclarent également des gestions différenciées du chauffage suivant les pièces (température moindre pour les autres pièces). Par conséquent, d'après les déclarations des ménages, ces derniers semblent se chauffer à des niveaux de température similaires que ce soit dans le nord-est ou dans le sud-est de la France.

⁴⁰ Lors des enquêtes, la présence d'une part non chauffée du logement a été demandée sans faire de distinction entre avant et après les travaux. Les cas de différence d'occupation entre avant et après travaux sont identifiés au travers des commentaires récupérés.

Notons également la présence de cas à des niveaux de température extrêmement bas⁴¹ (17 °C et moins) et à l’opposé des niveaux de température très élevés (23 °C et plus)⁴².

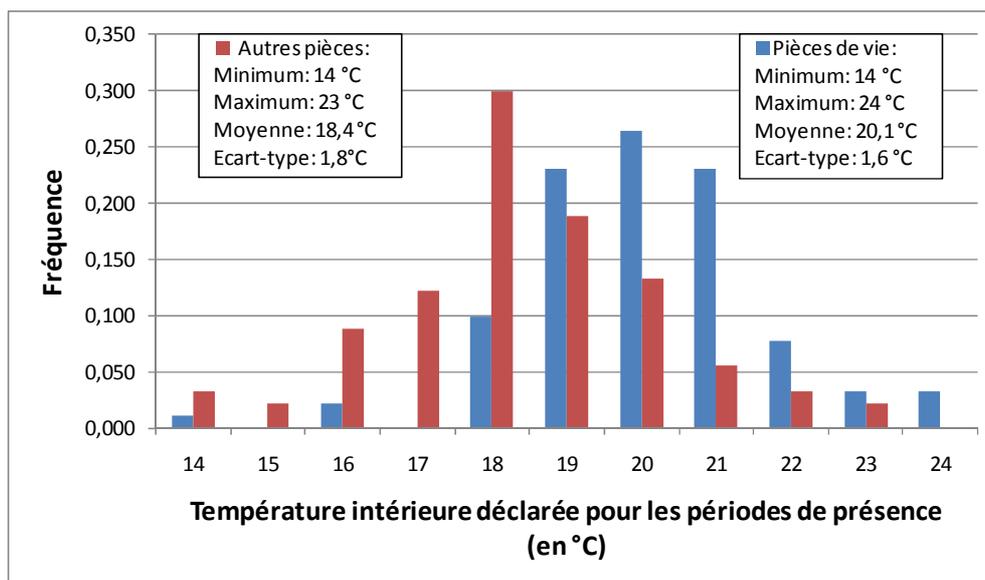


Figure 2.13 Histogrammes des températures intérieures déclarées pour les périodes de présence avant travaux de l’échantillon MDE PACA

2.2.4.8. Occupation du logement et réduct de température de chauffage avant travaux

Au sein de l’échantillon MDE PACA, la grande majorité (64 %) déclare qu’elle était présente (au moins une personne du ménage) durant les journées en semaine dans la période avant les travaux⁴³ mais ceci de façon plus importante que pour l’échantillon MDE 52-55 (55 % des ménages présents en journée). Par conséquent, les pourcentages des ménages au moins en partie absents sont moindres, 22 % déclarent qu’ils étaient partiellement présents et 14 % qu’ils étaient absents. Parmi ces derniers, les ménages appliquant un réduct durant leur absence en journée étaient plus nombreux (voir Figure 2.14), un peu moins de 2 sur 3 pour l’échantillon MDE PACA et un peu plus de 2 sur 5 pour l’échantillon MDE 52-55. Mais au final, les parts des ménages qui réduisaient la température durant leur absence en journée sont relativement proches entre les deux échantillons (22 % pour MDE PACA et 19 % pour MDE 52-55).

Par contre, la proportion des ménages qui ne réduisaient jamais la température de chauffage (27 %) est supérieure aux 21 % observés pour l’échantillon MDE 52-55. De plus, bien que majoritaire, la part des ménages qui réduisaient la température durant la nuit (64 %) est moindre dans cet échantillon.

⁴¹ Un ménage déclare même ne pas du tout chauffer les autres pièces (non pris en compte dans l’histogramme des températures pour les autres pièces).

⁴² En comparaison des valeurs observées par le CGDD (CGDD, 2013) (voir notes de bas de page 23 et 24, page 30), les valeurs déclarées au sein de l’échantillon ne semblent pas aberrantes.

⁴³ De façon identique aux enquêtes auprès des participants de l’opération MDE 52-55, lors des enquêtes auprès des participants de l’opération MDE PACA, l’occupation les jours de semaine du logement par les ménages a été demandée sans faire de distinction entre avant et après les travaux. Les cas de différence d’occupation entre avant et après travaux sont identifiés au travers des commentaires récupérés.

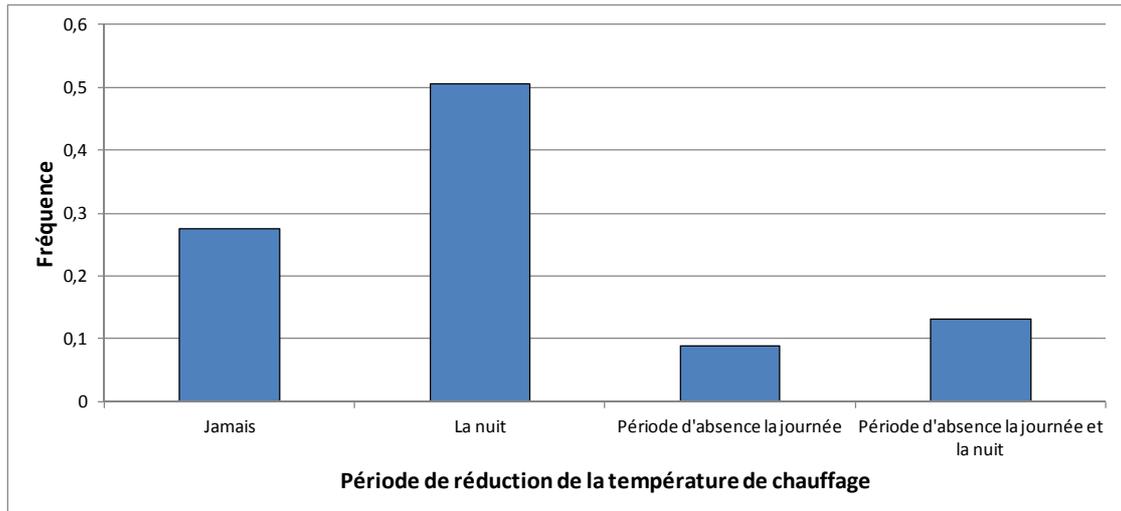


Figure 2.14 Répartition par période de réduction de la température de chauffage avant travaux de l'échantillon MDE PACA

2.2.4.9. Utilisation de la climatisation avant travaux

Parmi les 16 % (soit 15 cas) des ménages équipés d'une climatisation avant les travaux, 47 % (soit 7 cas) et 27 % (soit 4 cas) déclarent qu'ils l'utilisaient respectivement peu (seulement les jours les plus chauds) et fréquemment ou en continue sur la saison estivale.

2.2.4.10. Consommation totale d'énergie avant travaux

Examinons les consommations annuelles d'énergie finale tous usages à climat normal par m² habitable avant travaux des 91 cas⁴⁴ (voir Figure 2.15).

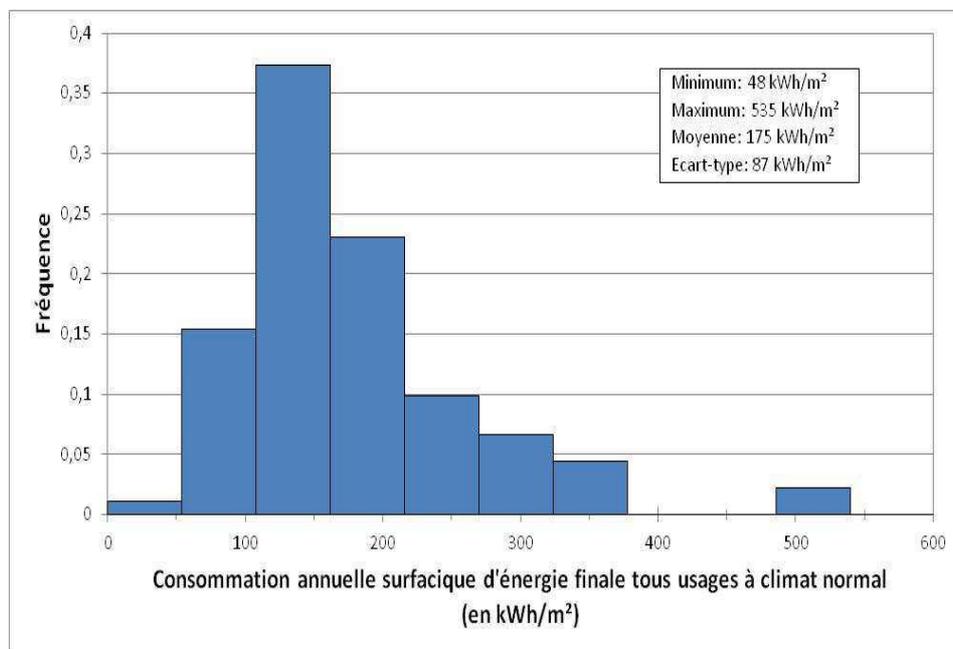


Figure 2.15 Histogramme des consommations annuelles surfaciques d'énergie finale tous usages à climat normal avant travaux de l'échantillon MDE PACA

⁴⁴ De façon identique à l'échantillon MDE 52-55, il s'agit d'une consommation déduite des données de consommations et de la surface habitable fournies lors des enquêtes (voir Chapitre 3, sous-partie 3.1 pour plus de détails quant à la méthode de calcul appliquée).

Dû au climat hivernal relativement clément de la région PACA (zone climatique RT H3) et des caractéristiques des logements (majoritairement, MI d'après 1974 chauffées à l'électricité également à des niveaux de température entre 19 °C et 21 °C pour les pièces de vie), il apparaît cohérent que la consommation moyenne (175 kWh/m²) soit largement inférieure aux moyennes nationale et régionale pour les MI (pour la France entière et 197 kWh/m² à climat normal pour la région PACA) (CEREN, 2009).

Enfin, notons la présence d'un ménage présentant une consommation inférieure à 50 kWh/m². Il s'agit d'un logement dont 40 % de la surface n'était pas chauffée et dont la température dans les pièces de vie en période de présence était de 18,5 °C. A l'opposé, 2 cas avaient des consommations supérieures à 490 kWh/m². Ce sont des logements qui étaient chauffés pour l'un au fioul avec un appoint bois et pour l'autre au bois avec un appoint électrique. De même que pour l'échantillon MDE 52-55 (Cv=46 %), les consommations avant travaux sont fortement dispersées (Cv= 50 %).

2.2.4.11. Comparaison par rapport aux caractéristiques des logements français pour lesquels ont été effectués des travaux

Au regard des spécificités de l'échantillon MDE PACA soulignées ci-dessus (majoritairement, MI d'après 1974 chauffées à l'électricité) et des différences existantes par rapport à celles de l'échantillon MDE 52-55, nous pouvons nous douter que l'échantillon MDE PACA est peu concordant avec les caractéristiques majoritaires des logements ayant effectué des travaux de MDE à l'échelle nationale. Toutefois, regardons dans le détail ces différences. Ceci en sachant que les résultats des comparaisons entre l'échantillon MDE PACA et l'échantillon national, issu de la vague 2010⁴⁵ de l'enquête « Maîtrise de l'énergie » (TNS SOFRES, 2012), seront à considérer comme indicatifs en raison du biais évoqué précédemment (voir sous-partie 2.1.4.9).

En 2010, seulement 7 % des travaux effectués à l'échelle nationale l'ont été en zone climatique H3, zone à laquelle appartient la région PACA. L'échantillon MDE PACA étant constitué uniquement de MI, il correspond au type de logement ayant majoritairement réalisé des travaux à l'échelle nationale (75 % (TNS SOFRES, 2012)). Toutefois, avec 80 % de MI construite après 1974, il présente une importante surreprésentation de ces années de construction par rapport à la situation nationale (35 % des travaux effectués dans des maisons individuelles l'ont été dans des maisons construites après 75 (TNS SOFRES, 2012)). Les logements de l'échantillon MDE PACA présentent également dans des proportions plus importantes des surfaces de 100 à 149 m² (52 %) et de 150 m² et plus (24 %) qu'à l'échelle nationale (respectivement 36 % et 13 % des travaux effectués à l'échelle nationale en 2010 l'ont été dans des logements de 100 à 149 m² et de 150 m² et plus (TNS SOFRES, 2012)). Enfin, avec 75 % des logements utilisant avant les travaux comme énergie principale de chauffage l'électricité, l'échantillon montre une nette discordance avec les 30 % de travaux réalisés, à l'échelle nationale, dans des logements chauffés principalement avec de l'électricité (TNS SOFRES, 2012).

En conclusion, l'échantillon MDE PACA est très spécifique par rapport aux caractéristiques majoritaires des logements ayant effectué des travaux de MDE à l'échelle nationale. Cette observation est d'autant plus logique que l'opération MDE PACA tâche de répondre à une problématique propre à la région PACA et son réseau électrique (voir sous-partie 2.2.1).

2.3. Conclusions

En conclusion, ce chapitre a permis la présentation des deux échantillons étudiés, extraits d'enquêtes auprès de propriétaires occupants de leur MI ayant participé à l'opération de MDE « Ensemble, économisons l'énergie ! » en Meuse (55) et Haute-Marne (52) (échantillon MDE 52-55, 119 cas avec avant et après travaux) ou à l'opération de MDE « Solution Bien-Etre » en Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) (échantillon MDE PACA, 91 cas avec avant et après travaux).

⁴⁵ 2010 est la dernière année de l'intervalle durant lequel les enquêtés ont réalisé les travaux liés à l'opération MDE PACA, soit entre 2009 et 2010.

Au-delà des différences climatiques liées aux zones géographiques d'implantation des opérations, nous avons mis en avant des différences dans **les situations avant travaux** de chacun des échantillons :

- **majoritairement pour MDE 52-55, des MI construites avant 1974 chauffées à partir d'une chaudière standard gaz ou fioul,**
- **tandis que pour MDE PACA, majoritairement des MI d'après 1974 chauffées à partir de convecteurs ou de radiateurs électriques et utilisant de façon minoritaire une climatisation.**

Ces différences entraînent des consommations énergétiques annuelles tous usages avant travaux en moyenne différentes :

- MDE 52-55, moyenne de 272 kWh/m² habitable,
- MDE PACA, moyenne de 175 kWh/m² habitable.

Par ailleurs, dans le cadre d'une comparaison avec les caractéristiques majoritaires des logements ayant effectué des travaux de MDE à l'échelle nationale en 2010, nous avons pu constater que l'échantillon MDE 52-55 présente sur un certain nombre de caractéristiques générales une relativement bonne concordance qualitative mais des discordances sur les caractéristiques plus détaillées que sont la surface et l'énergie principale de chauffage avant travaux. La même comparaison effectuée avec l'échantillon MDE PACA a souligné la spécificité de ce dernier.

Bibliographie

ALLIBE B Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel français à long terme [Rapport] : Thèse de doctorat / Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales. - 2012.

ARRETE 10 AVRIL Arrêté du 10 avril 1974 relatif à l'isolation thermique et au réglage automatique des installations de chauffage des bâtiments d'habitation [Revue] // Journal officiel de la République française. - 18 avril 1974. - p. 4191.

ARRETE 24 MARS Arrêté du 24 mars 1982 relatif aux équipements et caractéristiques thermiques des bâtiments d'habitation [Revue] // Journal officiel de la République française. - 27 mars 1982. - p. 940.

CAYLA J-M, ALLIBE B et LAURENT M-H From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption [Conférence] // ACEEE Summer Study. - Pacific Grove (United States) : [s.n.], 2010.

CEREN Consommation moyenne d'énergie régionale par usage. Exploitation particulière de l'Enquête Logement 2006 [Rapport]. - 2009. - Etude 8107.

CGDD Les déterminants de la température de chauffage adoptée par les ménages [Article] // Etudes & Documents / éd. Service de l'Économie de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD). - avril 2013. - 83.

EDF Accompagnement économique de Meuse et Haute-Marne, Laboratoire ANDRA de Bure-Saudron, Rapport d'activités 2010 [Rapport] / Direction Production Ingénierie. - 2010. - p. 16.

EDF Energie Efficace en PACA [En ligne]. - 2013. - février 2013. - <http://fr.edf.com/demarche-en-regions/energie-efficace-en-paca/notre-ambition-81216.html>.

FOUCARD M-H Climatisation des locaux résidentiels et tertiaires. Parc installé, consommations et évolutions 2012 [Rapport] : Note Interne / Département EnerBat - Groupe Tertiaire et Collectivités locales ; EDF R&D. - 2012. - H-E11-2012-01793-FR.

GUERRA-SANTIN O, ITARD L et VISSCHER H The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock [Revue] // Energy and Buildings. - 2009. - 41. - pp. 1223-1232.

INSEE_a Définitions et méthodes - Ménage [En ligne]. - octobre 2013. - <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/menage.htm>.

INSEE_b 52448 - Saint-Dizier; Populations légales 2010 de la commune [En ligne]. - octobre 2013. - <http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/recensement/populations-legales/commune.asp?annee=2010&depcom=52448>.

INSEE_c 52121 - Chaumont; Populations légales 2010 de la commune [En ligne]. - octobre 2013. - <http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/recensement/populations-legales/commune.asp?annee=2010&depcom=52121>.

SUERKEMPER F, THOMAS S, OSSO D et BAUDRY P Cost-effectiveness of energy efficiency programmes-evaluating the impacts of a regional programme in France [Revue] // Energy Efficiency. - 2012. - 5. - pp. 121-135.

TNS SOFRES Maîtrise de l'énergie - Bilan 2011 - Phase 2 [Rapport] : Note de synthèse. - 2012.

Chapitre 3. Evaluation *ex-post* d'actions de rénovation énergétique en maison individuelle

Table des matières

Introduction.....	50
3.1. Méthode de calcul des économies d'énergie.....	50
3.1.1. Calcul des économies d'énergie unitaires annuelles.....	50
3.1.2. Conversion des consommations énergétiques issues des enquêtes.....	52
3.1.3. Corrections climatiques	53
3.1.3.1. Correction climatique de la consommation de chauffage	53
3.1.3.2. Correction climatique de la consommation de climatisation.....	55
3.2. Quantification et qualification des économies d'énergie réalisées	56
3.2.1. Histogramme des économies d'énergie	56
3.2.2. Etude de la robustesse des économies d'énergie	57
3.2.2.1. Significativité selon le critère IPMVP.....	57
3.2.2.2. Incertitudes liées aux économies d'énergie.....	59
3.2.3. Etude des économies d'énergie par action.....	69
3.2.3.1. Nature des actions et nombre associé de cas pour l'échantillon MDE 52-55	69
3.2.3.2. Nature des actions et nombre associé de cas pour l'échantillon MDE PACA	71
3.2.3.3. Moyenne des économies d'énergie par action pour l'échantillon MDE 52-55	72
3.2.3.4. Moyenne des économies d'énergie par action pour l'échantillon MDE PACA.....	75
3.2.3.5. Dispersion des économies d'énergie par action pour l'échantillon MDE 52-55	77
3.2.3.6. Dispersion des économies d'énergie par action pour l'échantillon MDE PACA ..	78
3.3. Modélisation statistique de la consommation après travaux.....	79
3.3.1. Echantillons étudiés	80
3.3.2. Méthode statistique	80
3.3.3. Variables explicatives	82
3.3.3.1. Variables explicatives utilisées pour les deux échantillons : consommation avant travaux	82
3.3.3.2. Variables explicatives utilisées pour les deux échantillons : changement déclaré de température de chauffage.....	83
3.3.3.3. Variables explicatives utilisées pour les deux échantillons : déclaration de changement dans l'occupation.....	85
3.3.3.4. Variables explicatives utilisées pour les deux échantillons : déclaration de malfaçons.....	86
3.3.3.5. Variables explicatives utilisées pour les deux échantillons : déclaration de travaux de rénovation énergétique hors opération.....	86
3.3.3.6. Variable explicative utilisée uniquement pour l'échantillon MDE 52-55 : action de l'opération.....	87
3.3.3.7. Variables explicatives utilisées uniquement pour l'échantillon MDE PACA : type de PAC installée via l'opération et nature du second lot réalisé via l'opération	88
3.3.3.8. Variables explicatives utilisées uniquement pour l'échantillon MDE PACA : utilisation déclarée de la climatisation après travaux	89
3.3.3.9. Etude de la multicollinéarité au sein des variables explicatives	91
3.3.4. Résultats.....	91

3.3.4.1. Validation des modèles	91
3.3.4.2. Résultats des modèles.....	93
3.3.5. Discussions	95
3.3.5.1. Qualité des modèles.....	95
3.3.5.2. Constante	95
3.3.5.3. Consommation avant travaux	96
3.3.5.4. Changement déclaré de température de chauffage	96
3.3.5.5. Déclaration de changement dans l'occupation et déclaration de malfaçons	99
3.3.5.6. Déclaration de travaux de rénovation énergétique hors opération	99
3.3.5.7. Utilisation déclarée de la climatisation après travaux	100
3.3.5.8. Action de l'opération.....	101
3.4. Conclusions.....	103
Bibliographie	107

Introduction

Ce chapitre a pour objectif de réaliser une évaluation *ex-post* de l'efficacité effective d'actions de rénovation énergétique en Maison Individuelle (MI) à partir des données présentées dans le Chapitre 2.

Nous aborderons l'évaluation *ex-post* des actions de rénovation énergétique en commençant par décrire la méthode de calcul utilisée pour estimer les économies d'énergie. L'évaluation *ex-post* consistera en une quantification des économies d'énergie unitaires obtenues complétée par une étude de la robustesse des économies observées.

Dans un second temps, nous tâcherons de détecter les facteurs permettant d'expliquer les économies estimées. Au travers de ce dernier point, nous scruterons aussi bien l'influence de facteurs liés aux travaux eux-mêmes (*e.g.* malfaçons) que de facteurs *a priori* indépendants de ceux-ci (*e.g.* changement dans l'occupation du logement). Ce travail se fera par le biais d'une modélisation statistique de la consommation énergétique annuelle après travaux.

3.1. Méthode de calcul des économies d'énergie

Avant d'aborder les résultats de l'évaluation *ex-post* des actions de rénovation énergétique, décrivons la méthode employée pour le calcul des économies d'énergie.

3.1.1. Calcul des économies d'énergie unitaires annuelles

Nous entendons par économies d'énergie unitaires les économies d'énergie obtenues par un participant à l'opération après avoir réalisé une seule action ou plusieurs actions à la fois. Plus particulièrement, nous choisissons d'étudier les consommations totales (tous usages) d'énergie au périmètre du logement des participants (consommations recueillies au travers des enquêtes). En effet, suivre uniquement les consommations des usages impactés par les actions d'efficacité énergétique aurait nécessité la mise en place d'une chaîne de mesure. Au-delà de la difficulté technique, ces dernières par leur coût n'auraient pu être réalisées sur les tailles des échantillons qui ont été enquêtés. Par ailleurs, l'option alternative consistant à décomposer par usage, à l'aide de valeurs forfaitaires ou d'un modèle de calcul, la consommation totale déclarée par les ménages présente un risque d'introduire des incertitudes supplémentaires sur les consommations. Ceci d'autant plus qu'un grand nombre des actions analysées impacte plusieurs usages ou énergies à la fois sans que leurs interactions soient toujours simple à établir.

L'inconvénient de l'approche retenue basée sur l'analyse des consommations totales est l'incorporation des variations aléatoires ou inexpliquées des consommations à l'échelle d'un logement. Ainsi celles-ci doivent être faibles devant les changements des consommations liés à l'action ou aux actions de MDE pour que les économies d'énergie calculées puissent être considérées comme significatives. Selon le protocole IPMVP⁴⁶ (option C, le site entier), si la période de suivi après travaux est inférieure à deux années, les économies doivent dépasser les 10 % des consommations totales concernées pour être significatives (EVO, 2009). Dans le cas des échantillons étudiés, une année de consommation d'énergie après les travaux est en moyenne disponible. Par conséquent, nous nous devons de vérifier la satisfaction de ce critère dans le cadre de notre analyse.

Disposant en moyenne d'une année de consommation après les travaux, nous calculons des économies d'énergie annuelles. Il est usuel de faire de la sorte afin d'étudier les consommations sur un cycle complet de saisons. Comme indiqué dans l'IPMVP, tout autre nombre de mois de suivi des

⁴⁶ L'IPMVP est un protocole international pour la mesure et la vérification de la performance énergétique. Préparé par l'Efficiency Valuation Organization (www.evo-world.org), c'est une référence internationale reconnue.

consommations peut engendrer une sous ou une surreprésentation d'un mode de fonctionnement particulier (EVO, 2009). Par ailleurs, faute d'un suivi après travaux sur le long terme permettant d'évaluer la performance des actions dans le temps, nous préférons ne pas calculer les économies d'énergie sur la durée de vie des actions.

Dans le cadre de ce travail, les économies d'énergie sont calculées par rapport à la situation avant travaux. Afin de pouvoir juger de la performance réelle des actions réalisées et non seulement des changements des consommations entre les états avant et après travaux, nous sommes amenés à ajuster les consommations avant et après travaux à des conditions extérieures communes. Par conditions extérieures, nous entendons tout paramètre influençant la consommation d'énergie dont la variation est indépendante de l'action mise en place et prévisible car fréquente dans le temps⁴⁷.

Dans le cas de logements, le principal paramètre extérieur présumé changer entre les périodes avant et après travaux est le climat. Nous choisissons donc d'appliquer une correction climatique aux consommations afin de les ajuster à un climat dit normal correspondant à une moyenne sur plusieurs décennies. Ainsi, nous ne faisons pas le choix d'une utilisation du climat de la situation avant travaux comme référence commune car celui-ci nous semble trop arbitraire et par conséquent limitant dans la comparaison des résultats des différentes actions⁴⁸. Dans la suite de ce paragraphe, nous reviendrons plus en détail sur la correction climatique appliquée.

Ainsi les économies d'énergie unitaires annuelles sont calculées selon l'équation suivante :

$$EE_i = C_{i,av}^{normal} - C_{i,ap}^{normal} \quad (\text{eq.1})$$

avec EE_i : économies d'énergie unitaires annuelles du cas i , en kWh,

$C_{i,av}^{normal}$: consommation énergétique annuelle tous usages avant travaux ajustée à un climat normal du cas i , en kWh,⁴⁹

$C_{i,ap}^{normal}$: consommation énergétique annuelle tous usages après travaux ajustée à un climat normal du cas i , en kWh.⁵⁰

Couramment l'ajustement des consommations d'un logement se limite à cette seule correction climatique. Un certain nombre d'autres facteurs (*e.g.* nombre d'occupants), *a priori* indépendants de l'action mise en place⁵¹ et supposés être fixes, peuvent être amenés à changer entre les périodes avant et après travaux et ainsi changer les conditions de fonctionnement⁵². Comme ce type de changement n'est pas fréquent et ses conséquences sont le plus souvent difficile à prédire⁵³, il n'existe pas de lois, simples et partagées, permettant de les estimer. Pour cette dernière raison, les lois d'ajustement des consommations à ces changements sont à déterminer en fonction de chaque étude. Dans le cas présent, nous tâchons d'étudier leur impact au travers d'une modélisation statistique de la consommation après travaux, de type « Change Model » (TECMARKET WORKS, et al., 2004 pp. 108-109) :

⁴⁷ Dans le cadre des guides pour la mesure et la vérification des économies d'énergie dont l'IPMVP (EVO, 2009) ou The California Evaluation Framework (TECMARKET WORKS, et al., 2004), les auteurs parlent d'ajustement périodique.

⁴⁸ En effet, dans le cadre des échantillons évalués, la période avant travaux varie au sein même de chacun des échantillons. Les actions liées à l'opération ont été réalisées entre 2006 et 2010 pour l'échantillon MDE 52-55 et entre 2009 et 2010 pour l'échantillon MDE PACA.

⁴⁹ En cas de plusieurs années complètes de consommations disponibles, il est utilisé la moyenne des consommations annuelles ajustées à un climat normal.

⁵⁰ Idid.

⁵¹ Seulement *a priori* indépendant car par exemple les travaux peuvent avoir été motivés par l'arrivée dans le ménage d'un enfant.

⁵² Dans le cadre des guides pour la mesure et la vérification des économies d'énergie dont l'IPMVP (EVO, 2009) ou The California Evaluation Framework (TECMARKET WORKS, et al., 2004), les auteurs parlent d'ajustement non périodique.

⁵³ Pour reprendre l'exemple précédent de l'arrivée d'un enfant au sein du ménage, celui-ci peut avoir des conséquences sur le chauffage via une augmentation généralisée des températures de consigne mais aussi sur la production d'ECS via les baignoires du bébé ou encore sur l'énergie de cuisson via la préparation des biberons...

$$E_{i,post} = B_0 + B_1INSTALL_i + B_2E_{i,pre} + B_3C_{it} + \dots + B_kX_k + e_i \quad (\text{eq.2})$$

avec $E_{i,post}$: consommations d'énergie du client i pour les périodes après réalisation de l'opération,
 B_0 : croissance constante des consommations liées à des équipements non-spécifiés,
 $INSTALL_i$: variable booléenne égale à 1 pour un client réalisant l'action et à 0 pour un client ne réalisant pas l'action,
 $E_{i,pre}$: consommations d'énergie du client i pour les périodes avant réalisation de l'opération,
 C_{it} : variable qui rend compte des conditions climatiques pour le client i au mois t , selon la périodicité des relevés des consommations du client,
 X_k : vecteur pour d'autres variables explicatives,
 e_i : erreur statistique.

Les autres variables explicatives du vecteur X_k permettent de tenir compte des changements de condition de fonctionnement autres que ceux liés aux conditions climatiques. Nous reviendrons ultérieurement sur le but de cette modélisation et sur les différents facteurs étudiés au travers elle.

3.1.2. Conversion des consommations énergétiques issues des enquêtes

Les consommations annuelles d'énergie tous usages avant et après travaux sont directement issues des consommations d'énergie déclarées au cours des enquêtes. Nous choisissons comme unité de consommation l'énergie finale car comme nous l'avons écrit ci-dessus, nous nous plaçons à l'échelle du participant à l'opération et de son logement pour calculer les économies d'énergie ainsi à ce niveau, l'énergie comptabilisée est bien de l'énergie finale.

Les consommations des différentes sources d'énergie (gaz, fioul, GPL et bois) doivent être converties en kWh PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) afin de permettre l'addition de toutes les consommations entre elles. Ceci est fait à partir des facteurs de conversion suivants :

- 0,9 kWh PCI par kWh PCS (Pouvoir Calorifique Supérieur) de gaz,
- 10 kWh PCI par litre de fioul,
- 12720 kWh PCI par tonne de GPL,
- 1710 kWh PCI par stère de bois,
- 4700 kWh PCI par tonne de granulés bois.

Par ailleurs, certaines consommations sont absentes des enquêtes 2009 et 2010. 30 ménages (soit 1/4 de l'échantillon MDE 52-55) utilisant le GPL pour l'usage cuisson n'ont pas déclaré de consommation pour cette énergie. En effet, en raison de l'absence de questions spécifiques pour cette consommation, il était difficile pour les ménages de déclarer l'équivalent en tonne du nombre de bouteilles de GPL utilisées sur l'année. Pour combler ces lacunes, nous utilisons les consommations moyennes⁵⁴ sur l'année 2008 fournies par le CEREN (CEREN, 2009_a) segmenté par type de logement. Celles-ci sont de 700 kWh PCI pour la cuisson seule au GPL et de 465 kWh PCI pour une cuisson mixte GPL/électricité dans le cas des MI.

Toutes les différentes consommations d'énergie (électricité, gaz, fioul, GPL, bois) sont ensuite sommées pour obtenir les consommations annuelles tous usages des logements. Il est à noter que ces consommations sont supposées être valables sur des périodes de temps identiques d'une année complète (mêmes jours de début et donc de fin) par manque d'information précise. Dès que plusieurs énergies sont consommées au sein du même logement, cette hypothèse forte s'avère en partie fautive. Il est peu probable par exemple que les jours de relevé des compteurs d'électricité et de gaz soient les mêmes ou encore que le jour de relevé du compteur d'électricité soit identique à celui de remplissage d'une cuve de fioul (*a priori* les seuls historiques de consommations disponibles par les ménages sont les quantités achetées lors des remplissages). Mais à défaut d'avoir un comptage temporel précis des consommations d'énergie, cette hypothèse est nécessaire bien que contribuant à l'incertitude sur les consommations.

⁵⁴ Elles ne varient quasiment pas à l'échelle des trois années d'observation.

3.1.3. Corrections climatiques

Dans le cas des échantillons étudiés, deux usages sont dépendants des variations climatiques. Il s'agit du chauffage et de la climatisation (usage présent au sein de l'échantillon MDE PACA). Les usages liés à la production d'ECS, à la cuisson et à l'électricité spécifique sont considérés indépendants du climat.

3.1.3.1. Correction climatique de la consommation de chauffage

Le climat se définit au travers de plusieurs grandeurs, toutefois dans le cadre de son influence sur les consommations de chauffage, il est le plus souvent réduit à la température extérieure ou aux degrés-jours (EVO, 2009) (TECMARKET WORKS, et al., 2004). Ces derniers sont définis sur une période donnée (année ou saison de chauffage) comme la somme des écarts positifs⁵⁵ existants entre les moyennes journalières des températures extérieures sèches de cette période et une température seuil appelée base. Ils s'expriment en °C.jour. En France, le seuil de température appliquée est couramment de 18 °C (AFNOR, 2012) et les degrés-jours calculés selon cette base se nomment Degrés-Jours Unifiés (DJU). La valeur de 18 °C est une température de non chauffage⁵⁶ qui correspond à une température intérieure en période de chauffage entre 19 °C et 20°C, les 1 ou 2 °C supplémentaires étant supposés être apportés par les gains internes (métabolisme des occupants et pertes thermiques des appareils électriques) et par les apports solaires. Notons que les moyennes des températures intérieures⁵⁷, pour les périodes de présence en journée durant la saison de chauffage, déclarées par les ménages des échantillons étudiés sont comprises entre 19 °C et 20 °C (19,5 °C pour l'échantillon MDE 52-55 et 19,3 °C pour l'échantillon MDE PACA).

Toutes choses étant égales par ailleurs, les consommations de chauffage sont considérées directement proportionnelles aux DJU (DAY, 1999 pp. 39-50, section 2.5 du Chapitre 2) (BROC, 2006 pp. 352-356, section D.3.2.1 de l'Annexe D.3.2). Ainsi, *a posteriori* une consommation réelle annuelle de chauffage peut être ajustée à un climat normal par la relation suivante :

$$C_{ch}^{normal} = C_{ch}^{réel} * \frac{DJU^{normal}}{DJU^{réel}} \quad (\text{eq.3})$$

avec C_{ch}^{normal} : consommation annuelle de chauffage ajustée à un climat normal, en kWh,
 $C_{ch}^{réel}$: consommation annuelle de chauffage à climat réel de l'année donnée, en kWh,
 DJU^{normal} : degrés-jours unifiés annuels du climat normal, en °C.jour,
 $DJU^{réel}$: degrés-jours unifiés du climat réel de l'année donnée, en °C.jour.

Dans le cadre de ce travail, les DJU sont fournis par le COSTIC⁵⁸. Pour l'échantillon MDE 52-55, nous utilisons les données de la station de Saint-Dizier, station de référence pour les départements 52 et 55. Pour l'échantillon MDE PACA, nous utilisons les données des stations de Nice, de Marignane et de Toulon, respectivement stations de référence pour les départements 06, 13 et 83. Le climat normal est choisi comme la moyenne annuelle sur 20 années entre 1991 et 2010, les valeurs correspondantes de DJU sont résumées dans le Tableau 3.1.

⁵⁵ C'est-à-dire quand la température moyenne d'une journée est inférieure à la température seuil.

⁵⁶ Température extérieure au-dessous laquelle le fonctionnement du système de chauffage n'est pas nécessaire pour satisfaire les conditions de confort intérieur.

⁵⁷ Moyenne non pondérée par les surfaces des températures intérieures dans les pièces de vie et dans les autres pièces.

⁵⁸ Comité Scientifique et Technique des Industries Climatiques.

Tableau 3.1 DJU pour les climats normaux utilisés

Département	DJU^{normal} en °C.jour
52 et 55	2663
06	1372
13	1627
83	1309

Toutefois, nous ne pouvons pas utiliser directement la relation donnée par l'équation 3 car nous n'avons pas à notre disposition uniquement les consommations de chauffage mais les consommations tous usages. Pour déduire de ces dernières les consommations de chauffage, nous sommes dans l'obligation de faire une hypothèse quant à la proportion que représentent celles-ci. Plusieurs estimations existent :

- une estimation simple consiste à supposer que les consommations de chauffage d'une MI représentent 70 % des consommations tous usages (valeur observée en moyenne sur les consommations nationales pour les MI),
- une autre estimation consiste à différencier cette part par région et par énergie principale de chauffage (voir Tableau 3.2), à partir des données régionalisées de consommations fournies par le CEREN (CEREN, 2009_b).

Tableau 3.2 Fractions des consommations de chauffage sur les consommations totales tous usages toutes énergies par région et par énergie principale de chauffage (CEREN, 2009_b)

Région	Energie principale de chauffage				
	Electricité	Gaz	Fioul	GPL	Bois
Champagne-Ardenne (52)	0,74	0,70	0,80	0,69	0,82
Lorraine (55)	0,67	0,74	0,77	0,76	0,79
PACA (06, 13 et 83)	0,63	0,68	0,74	0,71	0,78

A partir de ces deux évaluations, il est possible de déterminer la part des consommations tous usages sur laquelle appliquée la correction climatique décrite par l'équation 3 et donc en déduire les consommations tous usages ajustées au climat normal. En appliquant cette démarche pour les consommations avant et après travaux, nous pouvons ensuite calculer les Economies d'Energie unitaires annuelles (EE) selon l'équation 1. Afin de choisir l'estimation la plus pertinente, observons sur les deux échantillons étudiés les distributions de leurs écarts relatifs en termes d'EE, définis par l'équation 4.

$$\Delta EE_i = \frac{(EE_i^{\text{région et énergie}} - EE_i^{70})}{EE_i^{70}} \quad (\text{eq.4})$$

- avec ΔEE_i : écart relatif entre les deux méthodes en termes d'économies d'énergie pour le cas i ,
 $EE_i^{\text{région et énergie}}$: économies d'énergie calculées pour le cas i à partir de l'estimation par différenciation par région et par énergie principale de chauffage, en kWh,
 EE_i^{70} : économies d'énergie calculées pour le cas i à partir d'une part liée au chauffage de 70 %, en kWh.

Comme le montre les diagrammes « boîtes et moustaches »⁵⁹ de la Figure 3.1, les écarts entre les deux estimations sont relativement faibles (pour l'échantillon MDE 52-55, écart compris entre [-3,5 % ; 8 %] et pour l'échantillon MDE PACA, écart compris entre [-3,5 % ; 4,5 %]). Par ailleurs, les données utilisées (CEREN, 2009_b) par la méthode de différenciation par région et par énergie proviennent d'une seule année de consommation (2006) ainsi il est difficile de juger de leur robustesse

⁵⁹ La ligne inférieure de la « boîte » représente le 1^{er} quartile (Q1, 25 % des valeurs inférieures à ce seuil), la ligne supérieure de la « boîte » représente le 3^{ème} quartile (Q3, 75 % des valeurs inférieures à ce seuil) et la ligne à l'intérieur de la « boîte » représente la médiane (Q2, 50 % des valeurs inférieures à ce seuil). Les limites des « moustaches » fournissent les seuils au-delà desquelles les valeurs sont considérées anormales (limite inférieure= $Q1 - 1,5 * (Q3 - Q1)$ et limite supérieure= $Q3 + 1,5 * (Q3 - Q1)$).

dans le temps. Compte-tenu de ce dernier point et de l'absence de biais entre les deux méthodes, nous choisissons de retenir la méthode la plus simple des deux (70 % des consommations tous usages liées au chauffage).

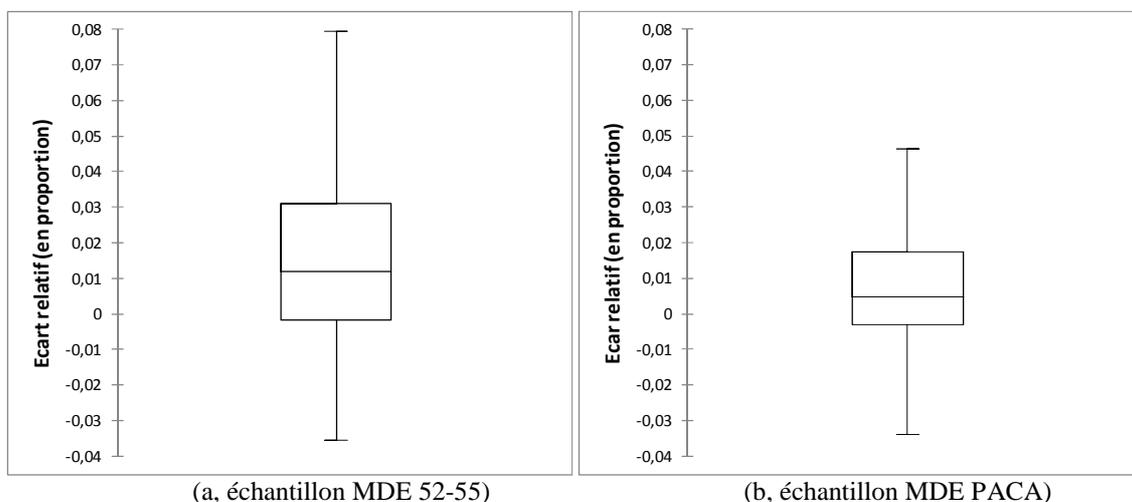


Figure 3.1 Distributions des écarts relatifs en termes d'EE entre les deux estimations de la fraction de la consommation tous usages liée au chauffage

3.1.3.2. Correction climatique de la consommation de climatisation

De façon similaire aux ajustements climatiques des consommations de chauffage, il existe une possibilité de correction des consommations de climatisation par l'utilisation de « degrés-jours froid ». Ces derniers sont définis sur une période donnée (saison de climatisation) comme la somme des écarts négatifs⁶⁰ existants entre les moyennes journalières des températures extérieures sèches de cette période et une température de base (température de non refroidissement⁶¹).

Bien que dans certaines configurations, il existe une corrélation linéaire entre les consommations de climatisation et les « degrés-jours froid », l'ajustement climatique des consommations de climatisation par cette méthode ne semble pas être fiable. Le biais engendré peut devenir important (DAY, 2004). En effet, l'approche est valable tant que les transferts de chaleur par les parois (conduction et convection) et les apports de chaleur sensible sont dominants, ce qui est remis en question en période de climatisation et engendre des problèmes particulièrement dans la détermination de la température de base (DAY, et al., 2000).

Par ailleurs, à notre connaissance, il n'existe pas de référence française permettant de faire une hypothèse justifiée quant à la part liée à la climatisation parmi les consommations tous usages d'une ML. L'une des rares études françaises fournissant des consommations annuelles unitaires de climatisation pour le résidentiel (CEREN, 2004) ne fournit pas les consommations unitaires tous usages correspondantes. Par conséquent, nous n'avons aucune méthode fiable permettant d'appliquer une correction climatique sur les consommations de climatisation. De plus, ces consommations étant *a priori* faibles⁶², tout ajustement non robuste risquerait d'introduire des incertitudes non négligeables par rapport à ces dernières.

⁶⁰ C'est-à-dire quand la température moyenne d'une journée est supérieure à la température de base.

⁶¹ Température extérieure en-dessous laquelle le fonctionnement de la climatisation n'est pas nécessaire pour satisfaire les conditions de confort intérieur.

⁶² Sur la France entière, la consommation annuelle moyenne liée à la climatisation pour un logement équipé est de 470 kWh en énergie finale pour une année avec un climat estival moyen (CEREN, 2004).

3.2. Quantification et qualification des économies d'énergie réalisées

Nous présentons dans ce paragraphe et le suivant les résultats de l'évaluation *ex-post* des actions de rénovation énergétique en MI. Dans un premier temps, nous nous intéresserons à quantifier (analyse statistique descriptive) et à qualifier (étude de la robustesse) les économies d'énergie réalisées. Dans un second temps, nous nous concentrerons sur l'étude des facteurs influant ces dernières au travers d'une modélisation statistiques des consommations après travaux.

La quantification et la qualification des économies d'énergie réalisées a pour but de répondre aux questions suivantes :

- Existe-t-il des économies d'énergie liées aux actions mises en œuvre ? En effet, une partie de la littérature remet en question l'efficacité réelle des actions de rénovation énergétique (HERRING, 2006).
- Quelle est la robustesse des économies d'énergie observées ? Corollaire nécessaire si nous voulons répondre avec rigueur à la première question.
- Quelles actions engendrent le plus d'économies d'énergie ? Les actions réalisées au travers des opérations sont variées (voir Chapitre 2, sous-parties 2.1.1 et 2.2.1) par conséquent, il apparaît comme logique de comparer les résultats obtenus pour les différentes actions.
- Quelle est la variabilité des économies d'énergie unitaires obtenues pour une même action ? Le plus souvent dans la littérature, seule la moyenne des économies d'énergie engendrées par une action est fournie mais dans une logique de reproductibilité de l'action, il convient d'étudier la dispersion des économies d'énergie. De plus, nous pouvons nous demander si certaines actions entraînent des résultats plus homogènes que d'autres, ce qui pourrait signifier une meilleure garantie des résultats lors de leur reproduction.

Comme conseillé par la récente norme sur le calcul des économies d'énergie et de l'efficacité énergétique (AFNOR, 2012), les économies d'énergie réalisées sont ramenées à 1 m² de surface habitable du logement⁶³ afin de faciliter leur comparaison entre plusieurs logements. Ce calcul peut être effectué d'autant plus qu'il n'y a aucun cas d'agrandissement de la surface habitable entre les situations avant et après travaux dans les deux échantillons étudiés.

3.2.1. Histogramme des économies d'énergie

Premièrement, observons les économies d'énergie annuelles surfaciques des 119 cas de l'échantillon MDE 52-55 (voir Figure 3.2). Nous pouvons noter qu'une très grande majorité des cas (86 %) présente une diminution de la consommation suite aux travaux⁶⁴ réalisés. 65 % des cas ont des économies d'énergie calculées comprises entre 0 et 100 kWh/m².

⁶³ La surface habitable des MI est déclarée lors des enquêtes.

⁶⁴ D'après la définition retenue des économies d'énergie (voir équation 1, sous-partie 3.1.1), une valeur positive signifie une consommation après travaux inférieure à la consommation avant travaux tandis qu'une valeur négative signifie l'inverse, une consommation après travaux supérieure à la consommation avant travaux.

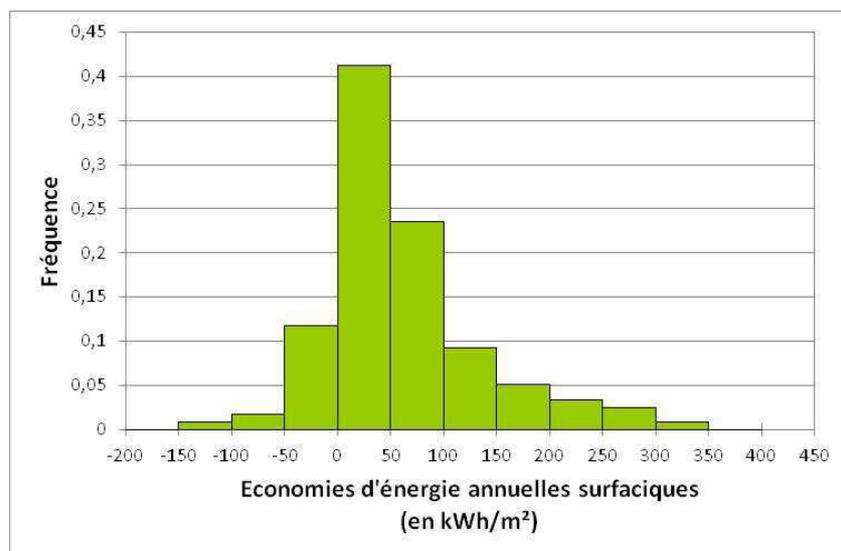


Figure 3.2 Histogramme des économies d'énergie surfaciques de l'échantillon MDE 52-55

En ce qui concerne les économies d'énergie des 91 cas de l'échantillon MDE PACA (voir Figure 3.3), une très grande majorité (85 %) présente un gain énergétique. Bien qu'il s'agisse d'un climat et d'une opération différents de ceux de l'échantillon MDE 52-55, de manière similaire, 68 % des cas ont des économies entre 0 et 100 kWh/m².

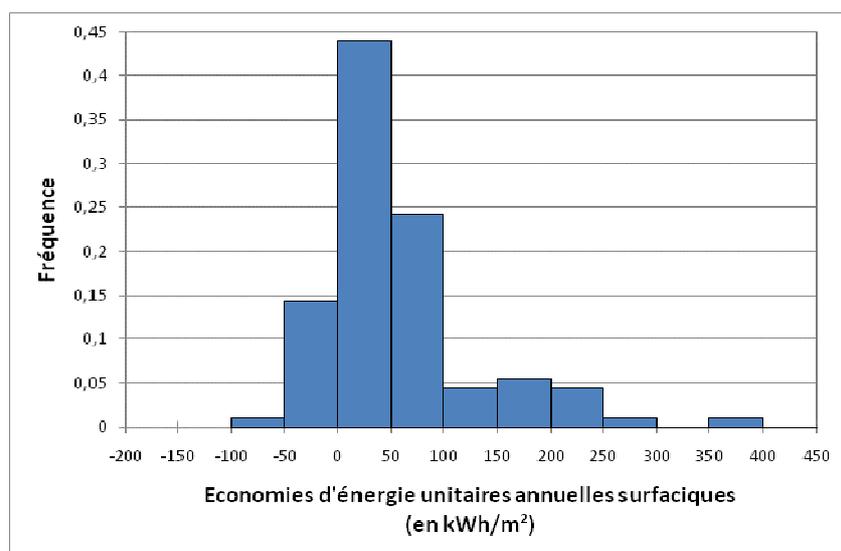


Figure 3.3 Histogramme des économies d'énergie surfaciques de l'échantillon MDE PACA

La majorité des économies d'énergie des deux échantillons est comprise dans un intervalle entre 0 et 100 kWh/m². La question de la robustesse de ces résultats se pose si nous voulons répondre précisément à la question de l'existence ou non d'économies d'énergie liées aux actions réalisées.

3.2.2. Etude de la robustesse des économies d'énergie

3.2.2.1. Significativité selon le critère IPMVP

Pour étudier la question de la robustesse des économies d'énergie obtenues, nous pouvons recourir au critère simple proposé par l'IPMVP pour estimer leur significativité (voir sous-partie 3.1.1) : les économies doivent dépasser les 10 % des consommations totales concernées pour être considérées comme significatives (EVO, 2009).

Exprimons alors les économies d'énergie en pourcentage par rapport à la consommation avant travaux :

$$EE_i^{\%} = \frac{EE_i}{C_{i,av}^{normal}} * 100 \quad (\text{eq.5})$$

avec $EE_i^{\%}$: économies d'énergie unitaires annuelles du cas i , en pourcentage par rapport à la consommation avant travaux,

EE_i : économies d'énergie unitaires annuelles du cas i , en kWh,

$C_{i,av}^{normal}$: consommation énergétique annuelle tous usages avant travaux ajustée à un climat normal du cas i , en kWh.

Examinons alors les économies d'énergies obtenues pour les deux échantillons exprimées non plus en énergie mais en pourcentage par rapport à la consommation initiale (*i.e.* avant travaux) (voir Figures 3.4 et 3.5).

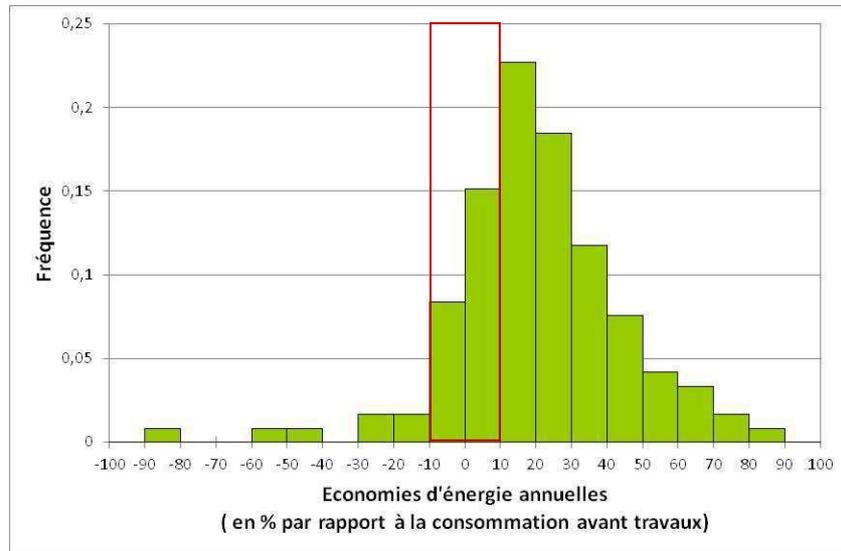


Figure 3.4 Histogramme des économies d'énergie de l'échantillon MDE 52-55 exprimées en pourcentage de la consommation initiale

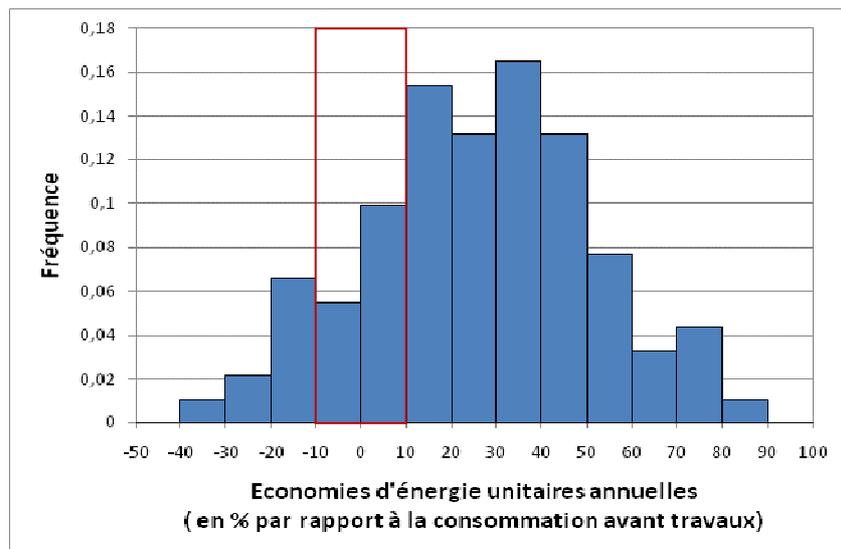


Figure 3.5 Histogramme des économies d'énergie de l'échantillon MDE PACA exprimées en pourcentage de la consommation initiale

Dans le cadre de l'échantillon MDE 52-55, les cas présentant des économies d'énergie non significatives car situés dans la plage [-10 % ; 10 %] représentent 23,5 %. 6 % des cas ont des économies d'énergie négatives et significatives tandis que la majorité (70,5 %) présente des économies d'énergie positives et significatives selon le critère de l'IPMVP.

S'agissant de l'échantillon MDE PACA, les cas avec des économies d'énergie non significatives sont moindres avec seulement 15 %. Par contre, la part des économies d'énergie négatives et significatives est légèrement supérieure avec 10 %. De façon similaire, la part des économies d'énergie positives et significatives est plus grande avec 75 %.

Ainsi selon le critère de significativité de l'IPMVP, dans le cas des deux échantillons étudiés, la majorité (entre 70,5 % et 75,0 %) présente une diminution significative de la consommation suite aux travaux.

Toutefois, ce critère simple présente l'inconvénient de ne tenir compte que du volume d'économies d'énergie réalisées (non significatives si faibles et par contre, significatives si élevées) et absolument pas de l'incertitude liée aux économies d'énergie. En effet, *a priori*, il est possible d'avoir de faibles économies d'énergie avec un faible niveau d'incertitude mais aussi d'importantes économies d'énergie avec un fort niveau d'incertitude. Pour résoudre la question de la robustesse des économies d'énergie obtenues, il est nécessaire de réaliser une étude des incertitudes liées à celles-ci.

3.2.2.2. Incertitudes liées aux économies d'énergie

Pour estimer les incertitudes associées aux économies d'énergie unitaires annuelles (exprimées en kWh), nous ne nous intéresserons pas aux incertitudes liées aux économies d'énergie unitaires annuelles surfaciques (exprimées en kWh/m²) car les surfaces habitables déclarées présentent également des incertitudes dont l'étude ne nous est pas nécessaire pour répondre à la question de la robustesse des économies d'énergie. Les sources des incertitudes associées à ces dernières sont les suivantes :

- Déclarations des enquêtés de leurs consommations d'énergie avant et après travaux. Un risque d'incertitude semble tout particulièrement rattaché aux énergies non de réseau (fioul, GPL et bois) dont les consommations ne font pas l'objet d'un comptage à partir d'un appareil de mesure (type compteur, censé avoir une incertitude de mesure faible). Les incertitudes concernant les consommations d'électricité et de gaz sont ainsi supposées négligeables.
- Consommations des différentes énergies déclarées par un même enquêté supposées être valables sur des périodes de temps identiques d'une année complète (mêmes jours de début et donc de fin). En l'absence d'informations sur les périodes « réelles » de consommation des différentes énergies, nous ne savons pas tenir compte de cette source d'incertitude.
- Les facteurs de conversion en kWh PCI utilisés. Ceux des bûches de bois et des granulés de bois dépendent notamment de leur essence de bois et de leur teneur en humidité, caractéristiques inconnues au travers de l'enquête. Toutefois, les valeurs utilisées pour les différentes énergies étant très proches de celles utilisées par le diagnostic de performance énergétique (ARRETE 8 FEVRIER, 2012)⁶⁵ que nous pouvons considérer comme faisant l'objet d'un relatif consensus, nous supposons que ces incertitudes sont négligeables.
- Les corrections climatiques appliquées aux consommations de chauffage. Si les origines sont diverses (climat d'une station de référence et non climat à proximité du logement, hypothèse d'une température de non chauffage identique chaque jour de la période de chauffage), les incertitudes liées à l'hypothèse sur la part de la consommation de chauffage parmi la consommation tous usages (0,7, voir sous-partie 3.1.3.1) nous semblent être les plus importantes de toutes. Les autres incertitudes sont supposées négligeables.

⁶⁵ Gaz naturel : 1 kWh PCS = 1/1,11 kWh PCI ; Fioul domestique : 9,97 kWh PCI par litre ; GPL (Butane) : 12780 kWh PCI par tonne ; Bûches de bois : 1680 kWh PCI par stère ; Granulés de bois : 4600 kWh PCI par tonne (ARRETE 8 FEVRIER, 2012 pp. 4718-4719, Annexe 3).

- L'absence d'une correction climatique sur les consommations de climatisation pour l'échantillon MDE PACA. A la vue des ordres de grandeurs des consommations de climatisation trouvés dans la littérature (voir note de bas de page 62, page 54), nous supposons ces incertitudes négligeables.

Au final, nous nous retrouvons à étudier la propagation des incertitudes associées aux consommations déclarées de fioul, de GPL et de bois (bûches ou granulés) ainsi que de celles liées à l'hypothèse sur la part de chauffage des consommations tous usages. Ces dernières sont *a priori* très variables d'un enquêteur à l'autre. Par exemple, la précision d'une consommation déclarée de bûches de bois dépend de la provenance du bois (information inconnue), achat à un marchand ayant fait une mesure pour établir sa facture ou fourniture gratuite par ses propres moyens. Ainsi, il nous semble difficile de choisir des valeurs d'incertitude pour chacune des grandeurs, d'autant plus que nous n'avons pas trouvés d'éléments au sein de la littérature. Par conséquent, nous nous proposons d'effectuer une étude de sensibilité sur la base de trois *scenarii* d'incertitudes (un scénario « réaliste » encadré par un scénario « pessimiste » et un scénario « optimiste »).

Etablir ces *scenarii* d'incertitudes passe par la définition des incertitudes-types⁶⁶ associées aux différentes grandeurs. La notation retenue sera la suivante, l'incertitude-type u associée à la consommation de l'énergie e déclarée par le cas i sera notée $u(C_{i,e})$. Ne sachant pas donner une valeur à ces dernières, nous sommes amenés à faire des hypothèses quant aux limites inférieures et supérieures de celles-ci⁶⁷ et à leur loi de probabilité⁶⁸. Commençons par la définition du scénario « réaliste » :

- Incertitudes-types associées aux consommations déclarées de fioul (C_{fioul}), de GPL (C_{GPL}), de bois bûches (C_{boisb}) et de granulés bois (C_{boisg}).
Nous faisons l'hypothèse que les limites de ces grandeurs sont directement proportionnelles aux valeurs déclarées (plus la valeur est grande, plus l'intervalle est grand) et correspondent pour la limite inférieure (a_-) à la valeur déclarée -20 % de celle-ci et pour la limite supérieure (a_+) à la valeur déclarée +20 % de celle-ci⁶⁹.
En l'absence de connaissance spécifique sur les lois de probabilité, nous serions censés supposer la même probabilité d'occurrence pour n'importe quelle valeur à l'intérieur des limites et une probabilité nulle en dehors (loi de probabilité rectangulaire). Toutefois, il est plus réaliste ici, comme la plus part du temps avec des grandeurs physiques, de s'attendre à ce que les valeurs de probabilité autour des limites soient sensiblement inférieures à celles situées vers le milieu. De ce fait, nous utilisons des lois trapézoïdales symétriques de pentes identiques, avec des bases de largeur $a_+ - a_-$ et des sommets de largeur $(a_+ - a_-) * 0,5$. En supposant de telles lois, le rapport (JCGM/WG1, 2008 pp. 14-15, 4.3.9) nous indique que les incertitudes-types associées aux consommations déclarées sont égales à

$$\sqrt{\frac{(a_+ - a_-)^2 * (1 + 0,5^2)}{24}}$$

⁶⁶ L'incertitude-type d'une grandeur se définit comme l'écart-type estimé associé à une estimation de sa valeur. Nous utiliserons la terminologie définie dans le rapport Evaluation des données de mesure - Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure rédigé par le Groupe de travail 1 du Comité commun pour les guides en métrologie (JCGM/WG1, 2008).

⁶⁷ Nous utilisons la définition donnée de ces limites par (JCGM/WG1, 2008 pp. 13, 4.3.7): « la probabilité pour que la valeur mesurée soit située dans l'intervalle compris entre la limite inférieure et la limite supérieure pour toutes les applications pratiques est égale à 1 et est essentiellement égale à zéro en dehors de cet intervalle ».

⁶⁸ Ces lois définissant leur densité de probabilité seront choisies *a priori* et non pas issues d'une série d'observations ainsi le JCGM/WG1 parle dans ce cas d'une évaluation de type B de l'incertitude-type (JCGM/WG1, 2008 pp. 10, 4.1.6).

⁶⁹ Cela sous-entend que lorsque que la consommation déclarée est nulle, les limites sont elles aussi égales à 0 et donc que l'incertitude-type est nulle (pas d'incertitude sur l'utilisation ou non d'une énergie au sein d'un logement).

- Incertitude-type associé à l'hypothèse sur la part de chauffage des consommations tous usages (0,7).

Nous allons différencier les limites pour chacun des trois régions présentes dans les échantillons (Champagne-Ardenne et Lorraine pour MDE 52-55 et PACA pour MDE PACA). En effet, nous pouvons observer (voir Tableau 3.2, sous-partie 3.1.3.1) que les parts de chauffage des consommations tous usages données par énergie principale de chauffage varient d'une région à l'autre. Ainsi, nous définissons les limites pour chaque région par les valeurs minimale et maximale observées pour la région au sein de ce tableau. Pour Champagne-Ardenne (52), limite inférieure a_- à 0,69 et limite supérieure a_+ à 0,82. Pour la Lorraine (55), limite inférieure (a_-) à 0,67 et limite supérieure a_+ à 0,79. Pour PACA (06, 13, 83), limite inférieure a_- à 0,63 et limite supérieure a_+ à 0,78.

Dans les cas où les limites ne sont pas symétriques par rapport à la meilleure estimation supposée de la grandeur (0,7 ici) et en l'absence de connaissances précises des lois de probabilité, le rapport (JCGM/WG1, 2008 pp. 14, 4.3.8) propose d'adopter une loi

engendrant une incertitude-type égale à $\sqrt{\frac{(a_+ - a_-)^2}{12}}$.

Sur cette base, nous définissons les *scenarii* « optimiste » et « pessimiste » en modifiant les limites inférieures et supérieures :

- Pour les incertitudes-types associées aux consommations déclarées, elles sont resserrées par rapport aux valeurs déclarées (division par deux de l'intervalle) pour le cas « optimiste » et au contraire, éloignées des valeurs déclarées (multiplication par deux de l'intervalle) pour le cas « pessimiste ».
- Pour l'incertitude-type associé à l'hypothèse sur la part de chauffage des consommations tous usages (0,7), nous supposons les écarts entre 0,7 et les limites divisés par deux pour le cas « optimiste » et multipliés par deux pour le cas « pessimiste ».

Voir les Tableaux 3.3, 3.4 et 3.5 des pages suivantes pour un résumé des trois *scenarii* d'incertitudes retenus et des valeurs associées pour chacun des deux échantillons.

Intéressons-nous maintenant à la propagation des incertitudes définies par ces *scenarii* pour calculer les incertitudes sur les économies d'énergie estimées. Ces dernières seront définies par des incertitudes-types dites composées car issue d'une composition appropriée des incertitudes-types associées d'une part, aux consommations déclarées et d'autre part, à l'hypothèse sur la part de chauffage des consommations tous usages. L'incertitude-type composée associée aux économies d'énergie estimées pour le cas i sera notée $u_c(EE_i)$.

Ce travail est basé sur la loi de propagation des incertitudes (JCGM/WG1, 2008 pp. 19, 5), définie de façon générale comme suit :

$$\text{Soit } y = f(x_1, x_2 \dots x_N) \quad (\text{eq.6})$$

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_j}\right)^2 u^2(x_j) + 2 \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_j} \frac{\partial f}{\partial x_k} u(x_j) u(x_k) r(x_j, x_k)} \quad (\text{eq.7})$$

avec $u_c(y)$: incertitude-type composée associée à y ,

$u(x_j)$: incertitude-type associée à x_j ,

$r(x_j, x_k)$: coefficient de corrélation entre les variables x_j et x_k , compris entre -1 et +1 (0, si variables indépendantes).

Comme nous venons de le voir pour pouvoir employer la loi de propagation de l'incertitude, il nous faut connaître précisément les relations entre la variable de sortie y et les variables d'entrée x_j . Tâchons d'établir les relations reliant les économies d'énergie estimées et d'une part, les consommations déclarées, et d'autre part, l'hypothèse sur la part de chauffage dans les consommations tous usages.

Partons des consommations déclarées par les enquêtés :

$$C_{i,\vartheta}^{réel} = \sum C_{i,\vartheta,e} \quad (\text{eq.8})$$

avec $C_{i,\vartheta}^{réel}$: consommation énergétique annuelle tous usages non ajustée du climat du cas i , en kWh, avec ϑ = avant (*av*) ou après (*ap*) travaux.

$C_{i,\vartheta,e}$: consommation annuelle avant travaux de l'énergie e déclarée par l'enquêté i , en kWh, avec e = électricité, gaz, bois, fioul, GPL, bois buche ou bois granulé.

La relation permettant l'ajustement climatique sur la base d'une fraction X_{fc} liée au chauffage parmi la consommation tous usages (voir sous-partie 3.1.3.1) est la suivante :

$$C_{i,\vartheta}^{normal} = C_{i,\vartheta}^{réel} * (X_{fc} * \frac{DJU^{normal}}{DJU^{réel}} + (1 - X_{fc})) \quad (\text{eq.9})$$

avec $C_{i,\vartheta}^{normal}$: consommation énergétique annuelle tous usages avant travaux ajustée à un climat normal du cas i , en kWh, avec ϑ = avant ou après travaux,

DJU^{normal} : degrés-jours unifiés annuels du climat normal, en °C.jour,

$DJU^{réel}$: degrés-jours unifiés du climat réel de l'année donnée, en °C.jour,

X_{fc} : part des consommations de chauffage dans la consommation totale tous usages, prise d'une valeur de 0,7.

Avec la relation permettant d'estimer les économies d'énergie du cas i (rappel de l'équation 1) :

$$EE_i = C_{i,av}^{normal} - C_{i,ap}^{normal} \quad (\text{eq.1})$$

avec EE_i : économies d'énergie unitaires annuelles du cas i , en kWh.

et l'ensemble des relations liant les différentes grandeurs, nous pouvons appliquer la loi de propagation des incertitudes.

Tableau 3.3 Résumé des trois scénarii d'incertitudes

		Limites [a ; a ₊]			Incertitude-type
		Optimiste	Réaliste	Pessimiste	
Consommations déclarées de fioul (C _{fioul}), de GPL(C _{GPL}), de bois bûches (C _{boisb}) et de granulés bois (C _{boisg})		[0,9C ; 1,1C]	[0,8C ; 1,2C]	[0,6C ; 1,4C]	$\sqrt{\frac{(a_+ - a_-)^2 * (1 + 0,5^2)}{24}}$
Hypothèse sur la part de chauffage des consommations tous usages (0,7)	Champagne-Ardenne (52)	[0,695 ; 0,76]	[0,69 ; 0,82]	[0,68 ; 0,94]	$\sqrt{\frac{(a_+ - a_-)^2}{12}}$
	Lorraine (55)	[0,685 ; 0,745]	[0,67 ; 0,79]	[0,64 ; 0,88]	
	PACA (06, 13, 83)	[0,665 ; 0,74]	[0,63 ; 0,78]	[0,56 ; 0,86]	

Tableau 3.4 Moyennes des limites et des incertitudes-types sur les trois *scenarii* d'incertitudes pour l'échantillon MDE 52-55

			Moyennes (en kWh pour les consommations, sans unité pour la part de chauffage) : Limites [a. ; a ₊] ; Incertitude-type (u)		
			Optimiste	Réaliste	Pessimiste
Consommations déclarées	Fioul (C _{i,fioul})	Avant travaux (46 cas)	[23159 ; 28305] u=1174,5	[20586 ; 30879] u=2349	[15439 ; 36025] u=4698
		Après travaux (37 cas)	[15009 ; 18345] u=761	[13341 ; 20012] u=1522	[10006 ; 23347] u=3045
	GPL (C _{i,GPL})	Avant (63 cas)	[1659 ; 2028] u=84	[1475 ; 2212] u=168	[1106 ; 2581] u=337
		Après (63 cas)	[979 ; 1196] u=49,5	[870 ; 1305] u=99	[653 ; 1523] u=199
	Bois bûches (C _{i,boisb})	Avant (62 cas)	[20330 ; 24847] u=1031	[18071 ; 27106] u=2062	[13553 ; 31624] u=4124
		Après (59 cas)	[14868 ; 18172] u=754	[13216 ; 19824] u=1508	[9912 ; 23129] u=3016
	Granulés bois (C _{i,boisg})	Avant (1 cas)	[2115 ; 2585] u=107	[1880 ; 2820] u=215	[1410 ; 3290] u=429
		Après (6 cas)	[12443 ; 15208] u=631	[11061 ; 16591] u=1262	[8295,5 ; 19356] u=2524
Hypothèse sur la part de chauffage des consommations tous usages (0,7)	Champagne-Ardenne (52)		[0,695 ; 0,76] u=0,019	[0,69 ; 0,82] u=0,038	[0,68 ; 0,94] u=0,075
	Lorraine (55)		[0,685 ; 0,745] u=0,017	[0,67 ; 0,79] u=0,035	[0,64 ; 0,88] u=0,069

Tableau 3.5 Moyennes des limites et des incertitudes-types sur les trois *scenarii* d'incertitudes pour l'échantillon MDE PACA

			Moyennes (en kWh pour les consommations, sans unité pour la part de chauffage) : Limites [a. ; a ₊] ; Incertitude-type (u)		
			Optimiste	Réaliste	Pessimiste
Consommations déclarées	Fioul (C _{i,fioul})	Avant travaux (12 cas)	[14604 ; 17849] u=741	[12981 ; 19472] u=1481	[9736 ; 22717] u=2963
		Après travaux (4 cas)	[7425 ; 9075] u=377	[6600 ; 9900] u=753	[4950 ; 11550] u=1506
	GPL (C _{i,GPL})	Avant (43 cas)	[2268 ; 2772,5] u=115	[2016 ; 3025] u=230	[1512 ; 3529] u=460
		Après (40 cas)	[462 ; 565] u=23	[411 ; 616] u=47	[308 ; 719] u=94
	Bois bûches (C _{i,boisb})	Avant (41 cas)	[8633 ; 10552] u=438	[7674 ; 11511] u=876	[5756 ; 13430] u=1751
		Après (32 cas)	[4833 ; 5907,5] u=245	[4296 ; 6445] u=490	[3222 ; 7519] u=980,5
	Granulés bois (C _{i,boisg})	Avant (0 cas)	-	-	-
		Après (0 cas)	-	-	-
Hypothèse sur la part de chauffage des consommations tous usages (0,7)	PACA (06, 13, 83)		[0,665 ; 0,74] u=0,022	[0,63 ; 0,78] u=0,043	[0,56 ; 0,86] u=0,087

En supposant que les consommations déclarées par énergie sont indépendantes ($r(x_j, x_k)=0$)⁷⁰, nous pouvons à partir des équations 8 et 7 obtenir l'incertitude-type composée associée à $C_{i,\vartheta}^{réel}$:

$$u_c(C_{i,\vartheta}^{réel}) = \sqrt{u^2(C_{i,\vartheta,fioul}) + u^2(C_{i,\vartheta,GPL}) + u^2(C_{i,\vartheta,boisb}) + u^2(C_{i,\vartheta,boisg})} \quad (\text{eq.10})$$

Poursuivons par la détermination de l'incertitude-type composée associée à $C_{i,\vartheta}^{normal}$. Ayant choisi une fraction liée au chauffage parmi la consommation tous usages fixe (équation 9, $X_{fc}=0,7$), la consommation tous usages et la part du chauffage sont donc supposées indépendantes. De ce fait, nous devons utiliser la loi de propagation des incertitudes donnée par l'équation 7 avec $r(x_j, x_k)$ égale à 0.

$$u_c(C_{i,\vartheta}^{normal}) = \sqrt{\left[X_{fc} \left(\frac{DJU^{normal}}{DJU^{réel}} - 1 \right) + 1 \right]^2 u_c^2(C_{i,\vartheta}^{réel}) + \left[C_{i,\vartheta}^{réel} \left(\frac{DJU^{normal}}{DJU^{réel}} - 1 \right) \right]^2 u^2(X_{fc})} \quad (\text{eq.11})$$

Dans le cadre des guides pour la mesure et la vérification des économies d'énergie (EVO, 2009 pp. 95-116, Annexe B) (TECMARKET WORKS, et al., 2004 pp. 288-315, Chapitre 12), les consommations avant et après travaux sont prises indépendantes pour effectuer le calcul des incertitudes liées aux économies d'énergie. Cette hypothèse peut se justifier dans ces guides pratiques par une volonté de rendre aisé la réalisation du calcul. Toutefois, pour notre étude, il nous semble important de vérifier l'existence possible d'une corrélation linéaire entre les consommations avant et après travaux.

Les coefficients de corrélation obtenus⁷¹ pour les deux échantillons étudiés sont les suivants :

- Echantillon MDE 52-55, $r(C_{i,av}^{normal}, C_{i,ap}^{normal}) = 0,743$ ⁷²,
- Echantillon MDE PACA, $r(C_{i,av}^{normal}, C_{i,ap}^{normal}) = 0,403$ ⁷³.

Au regard de ces valeurs, il existe bien une corrélation linéaire entre les consommations avant et après travaux. L'incertitude-type composée associée aux économies d'énergie est donc définie par la relation suivante :

$$u_c(EE_i) = \sqrt{u_c^2(C_{i,av}^{normal}) + u_c^2(C_{i,ap}^{normal}) + 2 * 1 * (-1) * u_c(C_{i,av}^{normal})u_c(C_{i,ap}^{normal}) * r(C_{i,av}^{normal}, C_{i,ap}^{normal})} \quad (\text{eq.12})$$

Nous pourrions nous limiter à cette incertitude-type composée pour exprimer l'incertitude liée à EE_i . Cependant, afin d'avoir un résultat plus compréhensible, nous donnerons une mesure de l'incertitude définie par un intervalle $\pm U$ autour du résultat EE_i auquel nous puissions associer un niveau de confiance p . Cet intervalle appelée incertitude élargie s'obtient de la façon suivante :

$$U = k * u_c(EE_i) \quad (\text{eq.13})$$

avec k = facteur d'élargissement en lien avec le niveau de confiance p .

⁷⁰ Pour les énergies (fioul, GPL, bois bûches et granulés bois) auxquelles nous attribuons une incertitude, cette hypothèse nous semble justifiée car elles sont rarement utilisées au sein d'un même logement et encore moins pour un même usage (*i.e.* chauffage ou production d'ECS). Dans le cas de l'utilisation de deux énergies pour un même usage, il existerait une relation entre les consommations par le biais d'une répartition entre les deux énergies de la satisfaction d'un seul et même besoin.

⁷¹ Le coefficient de corrélation calculé est celui de Pearson (SAPORTA, 2006 pp. 126, section 6.1.2.1 du Chapitre 6) car le plus communément utilisé pour des données quantitatives continues. Il teste une corrélation linéaire de type $y = a + b * x$. Le calcul est effectué à partir du logiciel XSLTAT version 2010.5.07.

⁷² Avec une p-value < 0,0001.

⁷³ Avec une p-value < 0,0001.

Dans les conditions de cette étude, nous pouvons supposer d'une part que la loi de probabilité caractérisant EE_i est normale en raison du théorème central limite⁷⁴ et d'autre part que $u_c(EE_i)$ est une estimation raisonnablement fiable de l'écart-type de cette loi normale (JCGM/WG1, 2008 pp. 80, Annexe G, 6.6). Selon ces éléments, un $k = 2$ soit une incertitude élargie $U = 2*u_c(EE_i)$ définit un intervalle ayant un niveau de confiance d'environ 95 %.

Nous pouvons alors calculer l'incertitude rattachée aux économies d'énergie de chacun des cas des deux échantillons étudiés et donc juger de leur robustesse au regard des trois *scenarii* d'incertitudes (optimiste, réaliste et pessimiste). Par rapport à notre objectif (déterminer l'existence ou non d'économies d'énergie liées aux actions réalisées), nous définissons comme robustes des économies d'énergie présentant un signe (+ ou -) fiable. Plus précisément, il s'agit de ne pas avoir la valeur zéro au sein de l'intervalle associé à EE_i présentant un niveau de confiance d'environ 95 %.

Les Tableaux 3.6 et 3.7 fournissent respectivement pour les échantillons MDE 52-55 et MDE PACA les valeurs numériques des grandeurs intermédiaires ayant servi aux calculs des incertitudes élargies.

Tableau 3.6 Grandeurs intermédiaires pour les trois *scenarii* d'incertitudes pour l'échantillon MDE 52-55

	Moyenne – Minimum – Maximum (en kWh)		
	<i>Optimiste</i>	<i>Réaliste</i>	<i>Pessimiste</i>
$u_c(C_{i,av}^{réel})$	Moyenne : 952 Min : 0 ; Max : 3903	Moyenne : 1903 Min : 0 ; Max : 7805	Moyenne : 3807 Min : 0 ; Max : 15611
$u_c(C_{i,ap}^{réel})$	Moyenne : 604 Min : 0 ; Max : 2732	Moyenne : 1208 Min : 0 ; Max : 5464	Moyenne : 2417 Min : 0 ; Max : 10928
$u_c(C_{i,av}^{normal})$	Moyenne : 985 Min : 4 ; Max : 4131	Moyenne : 1971 Min : 8 ; Max : 8261	Moyenne : 3942 Min : 16 ; Max : 16523
$u_c(C_{i,ap}^{normal})$	Moyenne : 593 Min : 0,2 ; Max : 2736	Moyenne : 1186 Min : 0,4 ; Max : 5471	Moyenne : 2372 Min : 0,8 ; Max : 10943
$u_c(EE_i)$	Moyenne : 747 Min : 7 ; Max : 2785	Moyenne : 1494 Min : 14 ; Max : 5569	Moyenne : 2989 Min : 28 ; Max : 11139

⁷⁴ « Il [le théorème central limite] implique en outre que la loi convoluée [résultante de y] converge vers une loi normale avec l'augmentation du nombre des grandeurs d'entrée qui contribuent à $\sigma^2(y)$, que la convergence sera d'autant plus rapide que les valeurs $c^2\sigma^2(x_j)$ seront plus proches les unes des autres (ce qui équivaut en pratique à ce que chaque estimation d'entrée $\sigma^2(x_j)$ contribue par une incertitude comparable à l'incertitude de l'estimation y), et que les lois des x_j seront proches de la normalité, moins il sera nécessaire d'en avoir un grand nombre pour obtenir une loi normale pour y . Exemple : la loi rectangulaire est un exemple d'une loi non-normale, mais la convolution d'un nombre aussi faible que trois lois rectangulaires d'égale largeur est approximativement normale. » (JCGM/WG1, 2008 pp. 74, Annexe G, 2.2).

Tableau 3.7 Grandeurs intermédiaires pour les trois *scenarii* d'incertitudes pour l'échantillon MDE PACA

	Moyenne – Minimum – Maximum (en kWh)		
	<i>Optimiste</i>	<i>Réaliste</i>	<i>Pessimiste</i>
$u_c(C_{i,av}^{réel})$	Moyenne : 321 Min : 0 ; Max : 1742	Moyenne : 643 Min : 0 ; Max : 3484	Moyenne : 1286 Min : 0 ; Max : 6967
$u_c(C_{i,ap}^{réel})$	Moyenne : 107 Min : 0 ; Max : 594	Moyenne : 214 Min : 0 ; Max : 1187	Moyenne : 429 Min : 0 ; Max : 2374
$u_c(C_{i,av}^{normal})$	Moyenne : 330 Min : 1 ; Max : 1788	Moyenne : 661 Min : 2 ; Max : 3575	Moyenne : 1321 Min : 4 ; Max : 7151
$u_c(C_{i,ap}^{normal})$	Moyenne : 128 Min : 1 ; Max : 599	Moyenne : 257 Min : 2 ; Max : 1197	Moyenne : 513 Min : 4 ; Max : 2394
$u_c(EE_i)$	Moyenne : 336 Min : 1 ; Max : 1770	Moyenne : 671 Min : 2 ; Max : 3539	Moyenne : 1342 Min : 5 ; Max : 7078

Les Tableaux 3.8 et 3.9 présentent respectivement les parts des économies d'énergie (nombre de cas sur le nombre totale de cas de l'échantillon) non robustes et robustes des échantillons MDE 52-55 et MDE PACA.

Tableau 3.3 Ventilation (en %) des économies d'énergie en fonction de leur robustesse pour l'échantillon MDE 52-55

%	Optimiste	Réaliste	Pessimiste
Part non robuste	5,0	15,0	20,0
Part robuste avec signe -	12,0	10,0	7,0
Part robuste avec signe +	83,0	75,0	73,0

Tableau 3.4 Ventilation (en %) des économies d'énergie en fonction de leur robustesse pour l'échantillon MDE PACA

%	Optimiste	Réaliste	Pessimiste
Part non robuste	5,5	10,0	18,0
Part robuste avec signe -	13,0	10,0	4,0
Part robuste avec signe +	81,5	80,0	78,0

Tout d'abord, nous observons que quel que soit le scénario d'incertitudes, les économies d'énergie robustes et positives (réduction de la consommation suite aux travaux) constituent la plus grande part des deux échantillons. Par conséquent, **nous pouvons affirmer qu'il existe bien pour la très grande majorité des cas étudiés des économies d'énergie liées aux actions réalisées**⁷⁵.

Notons que les parts des économies d'énergie robustes et positives observées sur l'échantillon MDE PACA sont sur l'ensemble des trois *scenarii* plutôt supérieures à celles de l'échantillon MDE 52-55. Ceci est principalement dû à une plus grande proportion de cas avec des consommations d'énergie incertaines (*i.e.* fioul, GPL, bois) (voir Tableaux 3.4 et 3.5). Cela a pour effet d'engendrer des incertitudes plus importantes pour MDE 52-55 que pour MDE PACA (voir Tableaux 3.6 et 3.7).

Enfin remarquons, et ceci pour les deux échantillons, que pour le scénario « optimiste » d'incertitudes la part des économies d'énergie robustes et négatives est supérieure à celle des économies d'énergie non robustes. Avec l'augmentation des incertitudes au travers des *scenarii* « réaliste » et « pessimiste », l'inégalité change de sens. Ainsi une certaine proportion des économies d'énergie négatives observées semble être peu robuste. Ce qui voudrait dire que dans ces cas précis il

⁷⁵ Ce résultat nous confirme l'intérêt de la poursuite de l'analyse des économies d'énergie obtenues pour chacun des deux échantillons. Si les parts « non robuste » avaient représenté la majorité, la suite du travail aurait présenté peu d'intérêt.

n'y a pas de diminution de la consommation après travaux mais que la réalité d'une augmentation de la consommation est en grande partie incertaine.

Dans le cadre de l'étude de la véracité des gains énergétiques engendrés par les actions réalisées, nous nous sommes intéressés uniquement à la valeur des économies d'énergie obtenues, sans chercher à faire le lien entre économies d'énergie et nature des actions effectuées. Il convient maintenant de regarder ce point.

3.2.3. Etude des économies d'énergie par action

Avant l'analyse des économies d'énergie nous commencerons par déterminer quelles actions ont été réalisées au travers des opérations par les ménages constituant les différents échantillons et dans quelles proportions.

Il est important de rappeler que les échantillons enquêtés n'ont pas été constitués selon un objectif de représentativité des actions menées au travers de la totalité des deux opérations. C'est entre autres pour cette raison que notre travail a pour objectif l'évaluation des actions de rénovation énergétique et non l'évaluation des opérations de MDE.

Enfin, il faut noter une différence de terminologie dans la nomination des actions présentes dans chacune des deux opérations en raison de différences dans la nature des actions que nous expliciterons au cours des paragraphes suivants.

3.2.3.1. Nature des actions et nombre associé de cas pour l'échantillon MDE 52-55

Les différents types d'action mise en place via l'opération MDE 52-55 correspondent :

- Soit à un seul geste d'efficacité énergétique, appelé mono-lot. Dans la dénomination employée, le mot mono-lot est suivi du geste réalisé. Par exemple, l'appellation mono-lot chaudière condensation se traduit par installation seule d'une chaudière à condensation.
- Soit à un ensemble de gestes d'efficacité énergétique réalisés de façon concomitante, appelé multi-lot. Dans la dénomination employée, le mot multi-lots est suivi soit du système de chauffage installé lorsqu'un des gestes est un remplacement du système de chauffage existant, soit au terme isolation lorsque seules des gestes d'isolation sont réalisées. Par exemple, l'appellation multi-lots PAC se traduit par installation d'une PAC couplée à au moins un autre geste.

Un geste d'isolation correspond à l'isolation d'un seul type de paroi du logement sans distinction particulière ; un des éléments déperditifs constituant le bâti de la MI (la toiture, le sol, les murs extérieurs ou les ouvrants) est alors isolé.

La Figure 3.6 présente les actions d'efficacité énergétique réalisées, au travers de l'opération, par les ménages de l'échantillon MDE 52-55 et le nombre de cas associé à chacune de ces actions. Nous pouvons noter que les actions effectuées sont relativement diverses (9 catégories d'action).

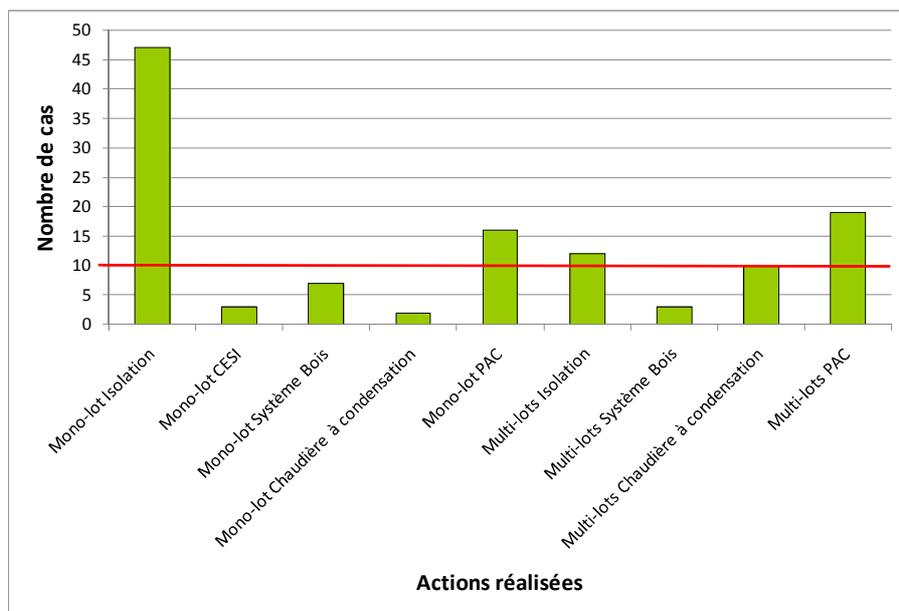


Figure 3.6 Actions réalisées et nombres de cas associés dans l'échantillon MDE 52-55

L'action mono-lot isolation est avec 47 cas (soit 40 % de l'échantillon) l'action la plus fréquemment représentée. Ces travaux correspondent pour la majorité (39 cas soit 83 % des 47 cas) à une isolation de la toiture, pour 5 cas (soit 11 %) à un remplacement d'ouvrants et pour 3 cas (soit 6 %) à une isolation des murs extérieurs. Les cas d'isolation de la toiture sont principalement (30 cas, soit 77 % des 39 cas) des situations de renouvellement de l'isolation.

Viennent ensuite en termes de volume, les actions du type multi-lots PAC avec 19 cas (soit 16 % de l'échantillon) et les mono-lots PAC avec 16 cas (soit 13 % de l'échantillon). Les travaux réalisés sont majoritairement l'installation d'une PAC air/eau dans le cadre des multi-lots (15 cas de PAC air/eau, 3 cas de PAC eau/eau et 1 cas de PAC air/air) et majoritairement l'installation d'une PAC air/air pour les mono-lots (12 cas de PAC air/air et 4 cas de PAC air/eau). Concernant les actions associées à l'installation d'une PAC dans les multi-lots, il s'agit uniquement d'actions d'isolation et très majoritairement d'une isolation de la toiture (11 cas d'isolation de la toiture⁷⁶ soit 58 % des 19 cas).

12 cas (soit 10 % de l'échantillon) correspondent à des multi-lots isolation dont 10 sont un couplage entre un renouvellement de l'isolation de la toiture et un remplacement d'ouvrants (soit 83 % des 12 cas). Ces remplacements d'ouvrants, tous par un vitrage correspond au moins à la performance d'isolation thermique assurée par un double vitrage performant (4/16/4 avec remplissage argon) (JORET, et al., 1999), sont pour 7 cas des remplacements de doubles vitrages anciens (type 4/8/4) et pour 3 cas des remplacements de simples vitrages. Nous ne connaissons pas la proportion pour chaque MI des ouvrants remplacés mais nous avons les surfaces traitées, à l'aide du fichier clients de l'opération ainsi que les surfaces habitables des logements. Les surfaces traitées représentent entre 8 % et 19,6 % des surfaces habitables. Dans le cadre d'une MI, il est couramment fait l'hypothèse dans les outils de calcul de consommation d'une surface de vitrage entre 11 % (conception non bioclimatique) et 20 % (conception bioclimatique) de la surface habitable (TRIBU ENERGIE, 2008). En comparaison de ces valeurs, cela nous laisse à penser que les remplacements d'ouvrants des cas de multi-lots isolation de l'échantillon MDE 52-55 ont été effectués dans des proportions conséquentes.

10 cas (soit 8 % de l'échantillon) correspondent à des multi-lots chaudière à condensation. Le second lot de ces travaux est pour 4 cas l'installation d'un chauffe-eau solaire individuel (CESI), pour 4 cas une isolation de la toiture et pour 2 cas une isolation de la toiture et un remplacement des ouvrants.

⁷⁶ 6 cas en situation de renouvellement de l'isolation et 5 cas en situation de première isolation.

Nous considérons qu'en dessous de 10 cas, le nombre est trop faible pour pouvoir être analysé. Ainsi, ne seront pas étudiés par la suite les 7 cas de mono-lot système bois, les 3 cas de multi-lots système bois, les 3 cas de mono-lot CESI et les 2 cas de mono-lot chaudière à condensation.

Enfin, tâchons de comparer les actions réalisées, au travers de l'opération entre 2006 et 2010, par les ménages de l'échantillon MDE 52-55 avec les types de travaux réalisés par les ménages français en 2010, selon l'enquête « Maîtrise de l'énergie » (TNS SOFRES, 2012) (voir Figure 3.7).

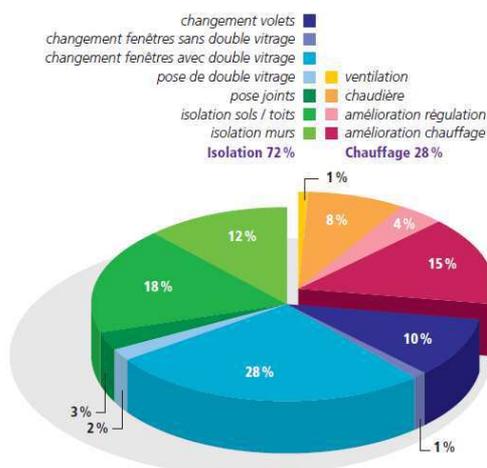


Figure 3.7 Types de travaux réalisés par les ménages français en 2010 (ADEME, 2011)

Parmi les actions d'isolation effectuées par les ménages de l'échantillon MDE 52-55, l'isolation de la toiture est largement dominante (83 % des mono-lots isolation et un des gestes dans la grande majorité des actions multi-lots) tandis qu'elle ne représente qu'au maximum 18 % des travaux réalisés par les ménages français en 2010.

Quant aux actions relatives au système de chauffage, dans le cadre de l'échantillon MDE 52-55, elles correspondent majoritairement à l'installation d'une PAC tandis qu'à l'échelle nationale, ce type de travaux ne représente qu'1 % des travaux effectués en 2010 (ADEME, 2011).

Ainsi, nous pouvons constater que la nature des actions réalisées, au travers de l'opération, par les ménages de l'échantillon MDE 52-55 n'est pas représentative de celle des travaux effectués par les ménages français.

3.2.3.2. Nature des actions et nombre associé de cas pour l'échantillon MDE PACA

Rappelons ici que par la définition même de l'opération MDE PACA (uniquement des travaux de rénovation du type multi-lots, voir Chapitre 2, sous-partie 2.2.1) et des critères employés de sélection des enquêtés sur la nature des travaux (uniquement multi-lots PAC et absence pour le second lot du remplacement des ouvrants, voir Chapitre 2, sous-partie 2.2.2), les actions présentes au sein de l'échantillon sont beaucoup plus homogènes que celles de l'échantillon MDE 52-55.

Pour cette raison, les actions de l'échantillon MDE PACA peuvent être décrites à un niveau plus détaillé, d'autant que si nous avons retenu le niveau de description utilisé pour l'échantillon MDE 52-55, nous n'aurions plus qu'une seule catégorie : multi-lots PAC.

La dénomination de ces actions d'efficacité énergétique est alors la suivante : la nature de la PAC installée suivi de la description du second lot réalisé (e.g. PAC air/eau + second lot) ou dans certains cas la réalisation de deux lots supplémentaires (e.g. PAC air/air + 2 autres lots).

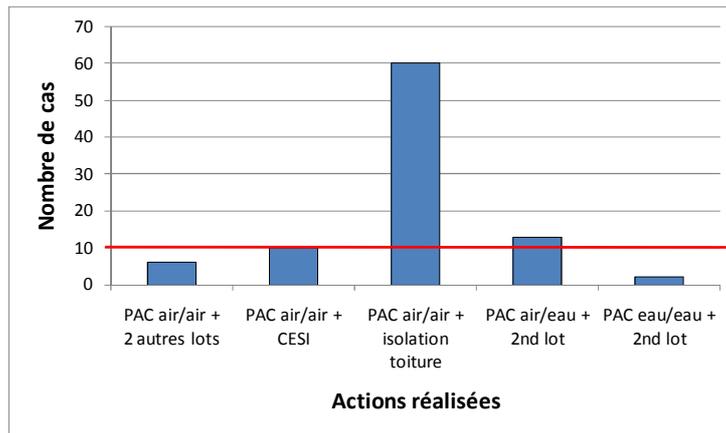


Figure 3.8 Actions réalisées et nombres de cas associés dans l'échantillon MDE PACA

Les travaux les plus fréquemment présents au sein de cet échantillon sont avec 60 cas (soit 66 % de l'échantillon) le couplage d'une PAC air/air avec une isolation de la toiture. Dans le cadre de ces travaux d'isolation, nous retrouvons une majorité de renouvellement de l'isolation (53 cas soit 88 % des 60 cas). Par ailleurs, grâce à une question ajoutée pour l'enquête MDE PACA, nous savons que dans 34 cas sur 53 (soit 64 %) ce renouvellement d'isolation se fait en conservant l'ancienne isolation.

Les seconds travaux les plus fréquents avec 13 cas (soit 14 % de l'échantillon) sont l'installation d'une PAC air/eau couplée à un second lot. Ce second lot est à 54 % (7 cas) une installation d'un CESI et à 46 % (6 cas) une isolation de la toiture⁷⁷. Ces derniers ont été regroupés dans une seule catégorie car séparément, les cas concernés sont trop peu nombreux.

Ensuite, 10 cas (soit 11 % de l'échantillon) correspondent au couplage d'une PAC air/air et d'un CESI. Les travaux liés à une PAC air/air et deux autres lots et à une PAC eau/eau et un second lot, avec respectivement 6 cas et 2 cas, ne seront pas retenus par la suite de l'analyse en raison de leur trop faible nombre.

S'agissant de la comparaison avec les types de travaux réalisés par les ménages français en 2010 (voir Figure 3.7), de par la présence pour tous les cas de l'échantillon MDE PACA de l'installation d'une PAC, la nature des actions réalisées est très différente de celle des travaux effectués à l'échelle nationale (1 % des travaux effectués (ADEME, 2011)). Parmi les seconds lots des actions de l'échantillon, la prépondérance d'une isolation de la toiture et l'absence du remplacement d'ouvrants accentuent la spécificité des travaux accomplis (voir Figure 3.7, isolation de la toiture : maximum 18 % des travaux effectués par les ménages français ; changement fenêtres avec double vitrage : 28 % des travaux effectués par les ménages français (ADEME, 2011)).

Maintenant que nous connaissons les actions réalisées et leur proportion au sein des échantillons, intéressons-nous aux économies d'énergie qu'elles engendrent.

3.2.3.3. Moyenne des économies d'énergie par action pour l'échantillon MDE 52-55

La moyenne des économies d'énergie unitaires annuelles surfaciques par nature d'action réalisée (résultat brut unitaire) est une valeur employée dans le cadre des calculs, selon une méthode ascendante (*bottom-up*), des économies d'énergie totales engendrées par une opération de MDE (AFNOR, 2012) (BROC, 2006).

⁷⁷ 5 cas en situation de renouvellement de l'isolation et 1 cas en situation de première isolation.

La Figure 3.9 présente les moyennes des économies d'énergie (unitaires annuelles surfaciques, exprimées en kWh/m²) par action réalisée au sein de l'échantillon MDE 52-55 et leur intervalle de confiance à 95 %⁷⁸.

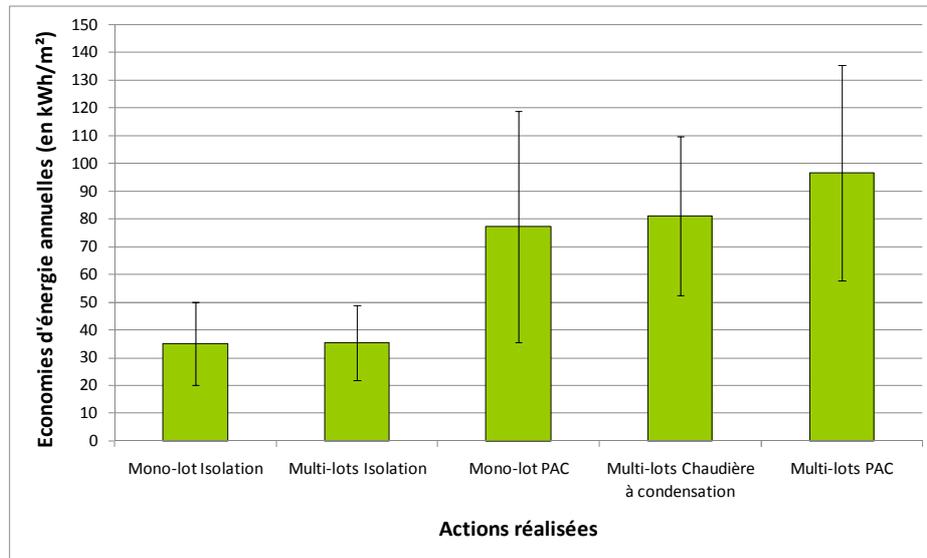


Figure 3.9 Moyennes des économies d'énergie par action réalisée et leur intervalle de confiance à 95 % dans l'échantillon MDE 52-55

Du seul point de vue des moyennes obtenues, nous en déduisons que les actions mono-lot isolation et multi-lots isolation sont celles engendrant, à un niveau identique, les plus faibles économies d'énergie (35 kWh/m²). Viennent ensuite, avec un niveau similaire d'économies, les actions mono-lots PAC et multi-lots chaudière à condensation (respectivement 77 kWh/m² et 81 kWh/m²). Les actions présentant en moyenne les plus importantes économies d'énergie sont les multi-lots PAC avec 97 kWh/m².

Cette seule comparaison des moyennes reste limitée, il est nécessaire d'analyser les intervalles de confiance à 95 % de ces dernières. Le but est de déterminer si les différences notées à partir des moyennes sont significatives statistiquement ou non (graphiquement, différence non significative si chevauchement conséquent des intervalles de confiance). Nous pouvons faire les observations suivantes :

- une égalité quasi-parfaite des intervalles de confiance autour des moyennes des mono-lots isolation et des multi-lots isolation traduit l'absence d'une différence significative entre les deux sous-échantillons,
- un chevauchement important des intervalles de confiance autour des moyennes des multi-lots chaudière à condensation et des multi-lots PAC s'interprète comme l'absence d'une différence significative entre les deux sous-échantillons,
- les non chevauchements des intervalles de confiance autour des moyennes des mono-lots et des multi-lots isolation avec ceux des multi-lots chaudière à condensation et PAC indiquent des différences significatives entre les éléments de ces deux groupes de sous-échantillons,
- le chevauchement de l'intervalle de confiance autour de la moyenne des mono-lots PAC avec ceux des mono-lots et des multi-lots isolation engendre l'absence d'une différence significative entre les trois sous-échantillons,
- de même, le chevauchement de l'intervalle de confiance autour de la moyenne des mono-lots PAC avec ceux des multi-lots chaudière à condensation et PAC montre l'absence d'une différence significative entre les trois sous-échantillons.

⁷⁸ Ceux-ci sont calculés sur la base d'une loi de probabilité normale (la plus fréquente) en raison de l'impossibilité de connaître précisément les lois de probabilité (nombre de cas trop faible) de la très grande majorité des sous-échantillons, représentant les différentes actions réalisées. Il est à noter que nous sommes obligés de faire un choix de loi de probabilité pour déterminer un intervalle de confiance.

L'ensemble de ces observations a été vérifié par des tests de Mann-Whitney⁷⁹ (SAPORTA, 2006 pp. 343-344, section 14.4.2.2 du Chapitre 14) avec un seuil de signification de 0,05⁸⁰ dont les résultats sont présentés dans le Tableau 3.10.

Tableau 3.10 Résultats des tests de Mann-Whitney pour l'échantillon MDE 52-55

Différence significative (oui ou non, p-value⁸¹)	Mono-lot Isolation	Multi-lots Isolation	Mono-lot PAC	Multi-lots Chaudière à condensation	Multi-lots PAC
Mono-lot Isolation	Non (p-value=1)	Non (p-value=0,717)	Non (p-value=0,087)	Oui (p-value=0,005)	Oui (p-value=0,002)
Multi-lots Isolation	-	Non (p-value=1)	Non (p-value=0,133)	Oui (p-value=0,021)	Oui (p-value=0,012)
Mono-lot PAC			Non (p-value=1)	Non (p-value=0,310)	Non (p-value=0,243)
Multi-lots Chaudière à condensation				Non (p-value=1)	Non (p-value=0,604)
Multi-lots PAC					Non (p-value=1)

A partir de ces résultats, nous pouvons tout d'abord remarquer **qu'il existe des différences significatives en termes d'économies d'énergie uniquement entre des actions d'isolation du bâti seules (mono-lot ou multi-lots) et des actions d'isolation du bâti couplées à un remplacement du système de chauffage par un système plus performant**. Ces dernières engendrant plus d'économies que les premières.

Le seul remplacement du système de chauffage, majoritairement par une PAC air/air (75 % des 16 cas de mono-lot PAC), fournit dans le cadre de cet échantillon⁸² un niveau d'économies d'énergie très incertain.

Deuxièmement, il est à noter que les travaux multi-lots d'isolation sont dans cet échantillon composés majoritairement (83 %) d'un couplage entre un renouvellement de l'isolation de la toiture et un remplacement d'ouvrants (majoritairement un remplacement dans des proportions importantes de doubles vitrages anciens) et les mono-lots isolation majoritairement (83 %) d'une isolation de la toiture (64 % de renouvellement et 19 % de première isolation). Ainsi, bien que le résultat au sens strict ne montre que l'absence de l'existence d'une différence significative entre les économies d'énergie engendrées par ces deux types d'action, il nous semble indiquer un très faible gain énergétique lié au remplacement d'ouvrants.

Enfin, il est difficile de comparer les résultats obtenus avec des valeurs d'économies d'énergie par action trouvées au sein de la littérature, il n'existe à notre connaissance qu'une unique référence française d'analyse *ex-post* de travaux de rénovation énergétique en MI. Cette étude du CEREN (CEREN, 2008) ne donne des résultats que pour des travaux d'isolation du bâti de logements

⁷⁹ Ce test non paramétrique (loi de probabilité des échantillons non normale) a été privilégié car il permet de ne pas faire de choix sur la loi de probabilité des échantillons. Test de l'hypothèse nulle « la différence de position des deux échantillons est égale à 0 ».

⁸⁰ L'hypothèse nulle est rejetée, uniquement dans la situation où le risque de la rejeter alors qu'elle vraie est inférieur à 5 %.

⁸¹ La p-value correspond au risque de rejeter l'hypothèse nulle alors qu'elle vraie.

⁸² Majoritairement des MI d'avant 1974 chauffées à partir de chaudières standards anciennes à des niveaux de température entre 19 °C et 21 °C pour les pièces de vie et sous un climat hivernal rigoureux.

construits avant 1975. Ainsi parmi l'ensemble des types d'action présents dans l'échantillon MDE 52-55, seuls les résultats liés à l'isolation de la toiture, correspondants au mono-lot isolation, peuvent être comparés.

Dans cette étude, le CEREN fournit les moyennes des économies d'énergie annuelles calculées par rapport à une situation de référence sans aucune isolation et pour un climat normal de 2250 °C.jour. Pour une action d'isolation de la toiture, les économies estimées sont les suivantes :

- MI chauffée au gaz : 23,1 kWh/m² (consommation de référence de chauffage gaz : 241,85 kWh/m²),
- MI chauffée au fioul : 19,2 kWh/m² (consommation de référence de chauffage fioul : 239,39 kWh/m²).

Pour permettre une comparaison à climat identique, nous devons ajuster, selon l'équation 3 (sous-partie 3.1.3.1), ces économies d'énergie au climat normal utilisé pour l'échantillon MDE 52-55 (à savoir 2663 °C.jour) :

- MI chauffée au gaz : 27,2 kWh/m²,
- MI chauffée au fioul : 22,7 kWh/m².

La comparaison de ces valeurs avec les résultats obtenus ci-dessus nous semble avoir du sens car d'une part, les principales caractéristiques de l'échantillon MDE 52-55 (MI d'avant 1974 chauffées avec un combustible) sont proches de celles des données du CEREN et d'autre part, les actions mono-lot isolation de l'échantillon sont majoritairement des isolations de la toiture. Le fait que l'échantillon MDE 52-55 présente majoritairement des renouvellements de l'isolation et celui du CEREN uniquement des premières isolations est supposé avoir un effet négligeable (isolation renouvelée supposée ancienne et donc présentant une résistance thermique faible⁸³).

Nous pouvons observer que les valeurs fournies par le CEREN se situent dans l'intervalle de confiance à 95 % autour de la moyenne des économies d'énergie obtenues pour les mono-lots isolation ([20 ; 50], en kWh/m²). Ceci traduit une certaine concordance entre les deux résultats. La supériorité de la moyenne obtenue pour l'échantillon MDE 52-55 à celles trouvées par le CEREN nous semble, pour au moins une partie, être due au fait que les données du CEREN correspondent à une période plus ancienne (*i.e.* 1995-2006). C'est-à-dire certainement en partie à des épaisseurs installées d'isolant moindres⁸⁴ que celles mises en place lors des travaux de l'opération MDE 52-55 (travaux entre 2006 et 2010).

3.2.3.4. Moyenne des économies d'énergie par action pour l'échantillon MDE PACA

Intéressons-nous maintenant aux économies d'énergie engendrées par les actions multi-lots PAC de l'échantillon MDE PACA. La Figure 3.10 présente les moyennes des économies d'énergie (unitaires annuelles surfaciques, en kWh/m²) par action réalisée au sein de l'échantillon MDE PACA et leur intervalle de confiance à 95 %⁸⁵.

⁸³ L'étude du CEREN (CEREN, 2008) estime l'augmentation de la consommation annuelle due à la dégradation du bâti de +0,6 %.

⁸⁴ La méthode 3CL-DPE pour le Diagnostic de Performance Energétique (DPE) (ARRETE 17 OCTOBRE, 2012) prend, par défaut, des coefficients de transmission thermique pour les planchers hauts de 0,23 W/(m².K) (combles perdus) et de 0,38 W/(m².K) (combles aménagés) pour des travaux d'isolation entre 1989 et 2000 et de 0,19 W/(m².K) (combles perdus) et de 0,27 W/(m².K) (combles aménagés) pour des travaux après 2000.

⁸⁵ Ceux-ci sont calculés sur la base d'une loi de probabilité normale en raison de l'impossibilité de connaître précisément les lois de probabilité (nombre de cas trop faible) de la très grande majorité des sous-échantillons, représentant les différentes actions réalisées.

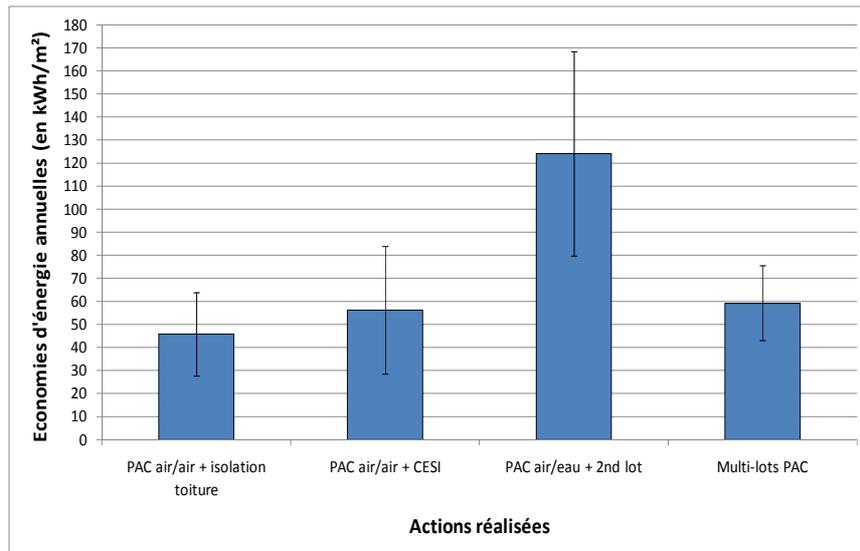


Figure 3.10 Moyennes des économies d'énergie par action réalisée et leur intervalle de confiance à 95 % dans l'échantillon MDE PACA

Avant de détailler les économies engendrées par les différentes actions, abordons-les comme une seule et même catégorie multi-lots PAC (voir Figure 3.10) afin de pouvoir faire la comparaison avec les économies d'énergie de l'échantillon MDE 52-55 pour cette même catégorie d'action (voir Figure 3.9).

Les économies d'énergie de chacun des échantillons sont très différentes du point de vue des moyennes (59 kWh/m² pour MDE PACA et 97 kWh/m² pour MDE 52-55). Cette différence est trouvée significative par un test de Mann-Whitney⁸⁶ avec un seuil de signification de 0,05 (p-value=0,029). Ce résultat semble logique au regard de la différence de rigueur climatique hivernal⁸⁷ (besoins de chauffage pour PACA plus faibles que pour les départements 52 et 55) et de caractéristiques techniques initiales des MI (pour MDE PACA, majoritairement MI d'après 1974 chauffées à l'électricité et pour MDE 52-55, majoritairement MI d'avant 1974 chauffées au fioul, au gaz ou au bois). Nous pouvons aussi nous demander jusqu'à quel point cette différence est due à la nature des travaux réalisés (pour MDE PACA, majoritairement installation de PAC air/air tandis que pour MDE 52-55, majoritairement installation de PAC air/eau)⁸⁸.

Comme l'échantillon MDE PACA, a un niveau de détail plus important dans la catégorisation des travaux réalisés, nous pouvons étudier s'il existe des différences en termes d'économies suivant le type de PAC installée. Nous pourrions faire de même en fonction du second lot effectué.

Regardons premièrement les moyennes des économies d'énergie produites par les différentes actions réalisées. Les plus faibles économies d'énergie sont liées aux actions d'installation d'une PAC air/air couplée à une isolation de la toiture, avec une moyenne de 46 kWh/m². La substitution de l'isolation de la toiture par l'installation d'un CESI entraîne en moyenne lorsqu'elle est associée à une PAC air/air des économies d'énergie supplémentaires (PAC air/air + CESI : 56 kWh/m²). Enfin, le fait d'installer une PAC air/eau à la place d'une PAC air/air engendre en moyenne une multiplication par un peu plus de deux des économies d'énergie (PAC air/eau + 2nd lot : 124 kWh/m²).

⁸⁶ Ce test non paramétrique (loi de probabilité des échantillons non normale) a été choisi en raison des faibles nombres de cas associés aux différentes actions qui ne permettent pas de déterminer de façon fiable leur loi de probabilité.

⁸⁷ Climats normaux (DJU) : 2663 C.jour pour MDE 52-55 et de 1309, 1372 et 1627 °C.jour pour MDE PACA.

⁸⁸ COefficients de Performance (COP) pris par défaut par la méthode 3CL-DPE (ARRETE 17 OCTOBRE, 2012) : COP d'une PAC air/air = 2,2 et COP d'une PAC air/eau = 2,6.

De façon similaire à l'analyse effectuée pour l'échantillon MDE 52-55, présentons l'étude des intervalles de confiance à 95 % autour des économies estimées :

- un chevauchement important des intervalles de confiance autour des moyennes des actions PAC air/air + isolation toiture et PAC air/air + CESI traduit l'absence d'une différence significative entre les deux sous-échantillons,
- d'une part, le non chevauchement de l'intervalle de confiance autour de la moyenne des actions PAC air/eau + 2nd lot avec celui des actions PAC air/air + isolation toiture et d'autre part, le très faible chevauchement⁸⁹ entre les intervalles de confiance autour des moyennes des actions PAC air/eau + 2nd lot et PAC air/air + CESI indiquent des différences significatives entre ces trois sous-échantillons.

L'ensemble de ces observations a été vérifié par des tests de Mann-Whitney avec un seuil de signification de 0,05 dont les résultats sont présentés dans le Tableau 3.11.

Tableau 3.11 Résultats des tests de Mann-Whitney pour l'échantillon MDE PACA

Différence significative (oui ou non, p-value)	PAC air/air + Isolation toiture	PAC air/air + CESI	PAC air/eau + 2 nd lot
PAC air/air + Isolation toiture	Non (p-value=1)	Non (p-value=0,215)	Oui (p-value<0,001)
PAC air/air + CESI	-	Non (p-value=1)	Oui (p-value=0,026)
PAC air/eau+ 2 nd lot	-	-	Non (p-value=1)

Par conséquent, **la seule différence significative trouvée en termes d'économies d'énergie concerne le type de PAC installée** (*i.e.* entre PAC air/air et PAC air/eau). Les PAC air/eau entraînant, comme techniquement attendu⁹⁰, plus d'économies que les PAC air/air. La nature du second lot effectué ne semble pas provoquer de différence significative, du moins entre des travaux d'isolation de la toiture et d'installation d'un CESI.

A notre connaissance, il n'existe pas de référence au sein de la littérature permettant une comparaison des valeurs d'économies d'énergie engendrées par la réalisation de différents travaux du type multi-lots PAC.

Au cours de l'analyse que nous venons d'effectuer, nous avons notamment observé que les intervalles de confiance à 95 % autour des moyennes des économies d'énergie obtenus pour les différentes actions réalisées étaient relativement conséquents. Ceci traduit la présence d'une certaine dispersion des valeurs obtenues au sein des différents sous-échantillons constitués par une même action réalisée. Nous nous proposons d'étudier de manière détaillée ces dispersions.

3.2.3.5. Dispersion des économies d'énergie par action pour l'échantillon MDE 52-55

Dans le cadre d'une opération d'efficacité énergétique sous-tendue par une logique de reproduction des actions, l'étude de la dispersion des économies d'énergie obtenues pour un même type d'action réalisée est importante. Nous chercherons donc à déterminer si des actions engendrent des gains énergétiques plus homogènes que d'autres, indiquant une meilleure reproductibilité et donc une certaine garantie des résultats.

⁸⁹ Il faut noter que les intervalles de confiance à 95 % présentés en Figure 3.10 sont calculés en supposant des lois de probabilité normales tandis qu'en réalité, les lois des sous-échantillons sont relativement indéterminées. Ainsi la présence en réalité du très faible chevauchement observé est relativement incertaine.

⁹⁰ Voir note de bas de page 88 (page 76).

La Figure 3.11 représente, sous la forme de diagrammes boîtes et moustaches⁹¹, les distributions des économies d'énergie, annuelles surfaciques, engendrées par les différentes actions réalisées au sein de l'échantillon MDE 52-55.

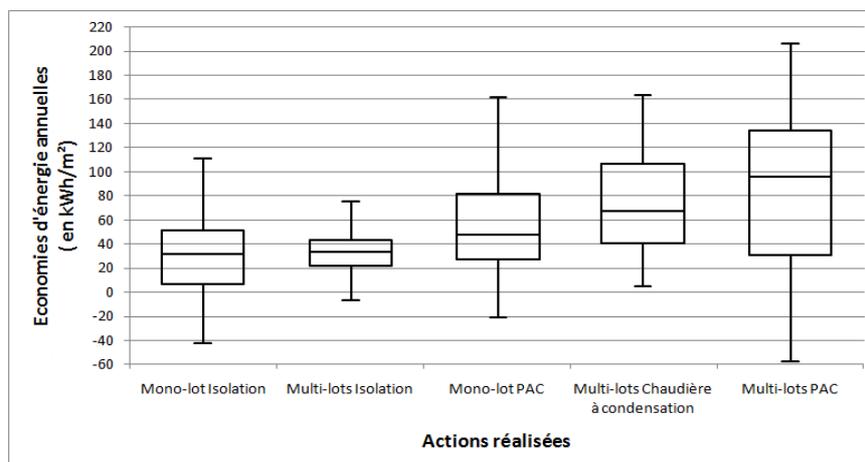


Figure 3.11 Distributions des économies d'énergie par action réalisée pour l'échantillon MDE 52-55

Comme attendu, l'ensemble des distributions possède une dispersion importante. Le domaine de définition présentant la plus faible largeur correspond à la distribution lié aux multi-lots isolation avec une largeur de 82 kWh/m² (domaine : [-7 ; 75]). A l'opposé, la plus importante largeur de domaine de définition, avec une valeur de 264 kWh/m² (domaine : [-58 ; 206]), correspond à la distribution pour les multi-lots PAC. Cependant, les moyennes des économies d'énergie étant différentes entre ces actions, il convient d'étudier leur dispersion relativement à leur moyenne en calculant leur coefficient de variation⁹² (Voir Tableau 3.12).

Tableau 3.12 Coefficients de variation des distributions des économies d'énergie par action réalisée pour l'échantillon MDE 52-55

	Mono-lot Isolation	Multi-lots Isolation	Mono-lot PAC	Multi-lots Chaudière à condensation	Multi-lots PAC
Cv (en %)	150	68	110	57	89

Ramenée à leur valeur moyenne, la plus faible dispersion, avec un Cv égal à 57 %, est obtenue pour les multi-lots chaudière à condensation, même si nous retrouvons bien une des plus faibles dispersions pour les multi-lots isolation avec un Cv de 68 %. Les Cv les plus élevés, respectivement de 150 % et 110 %, concernent les mono-lots isolation et PAC. Nous noterons que le Cv pour la distribution des multi-lots PAC est loin d'être parmi les plus élevés malgré son importante largeur de domaine de définition.

3.2.3.6. Dispersion des économies d'énergie par action pour l'échantillon MDE PACA

Etudions maintenant les dispersions au sein des résultats de l'échantillon MDE PAC, notamment en comparaison des résultats obtenus ci-dessus pour les multi-lots PAC. La Figure 3.12 représente, sous la forme de diagrammes boîtes et moustaches⁹³, les distributions des économies d'énergie, annuelles

⁹¹ Correspondent aux limites des moustaches telles que présentées dans la note de bas de page 59 (page 54), seulement les extrémités pour le sous-échantillon mono-lot isolation et les extrémités supérieures pour les sous-échantillons mono-lot et multi-lots PAC. Les autres extrémités sont les valeurs minimum et maximum des sous-échantillons, celles-ci étant respectivement supérieures et inférieures aux limites des moustaches.

⁹² Voir note de bas de page 29 (page 32).

⁹³ Correspondent aux limites des moustaches telles que présentées dans la note de bas de page 59 (page 54), seulement les extrémités supérieures des sous-échantillons PAC air/air + isolation toiture et PAC air/air + CESI. Les autres extrémités sont les valeurs minimum et maximum des sous-échantillons.

surfaciqes, engendrées par les différentes actions réalisées au sein de l'échantillon MDE PACA. Le Tableau 3.13 fournit les coefficients de variation de ces différents sous-échantillons.

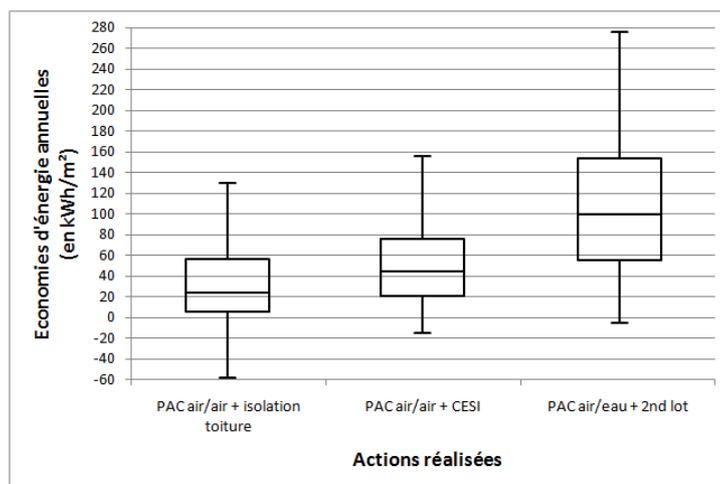


Figure 3.12 Distributions des économies d'énergie par action réalisée pour l'échantillon MDE PACA

Tableau 3.13 Coefficient de variation des distributions des économies d'énergie par action réalisée pour l'échantillon MDE 52-55

	PAC air/air + Isolation toiture	PAC air/air + CESI	PAC air/eau + 2 nd lot
Cv (en %)	154	83	66

Concernant les largeurs des domaines de définition, les sous-échantillons PAC air/air + isolation toiture et PAC air/air + CESI sont nettement inférieures (respectivement 188 kWh/m² avec un domaine [-58 ; 130] et 173 kWh/m² avec un domaine [-15 ; 157]) à celle du sous-échantillon PAC air/eau + 2nd lot (281 kWh/m² avec un domaine [-5 ; 276]). Par contre, s'agissant des coefficients de variation les 154 % du sous-échantillon PAC air/air + isolation toiture sont très supérieures aux 66 % du sous-échantillon PAC air/eau + 2nd lot.

Nous pouvons remarquer que cette dernière valeur est inférieure aux 89 % pour les multi-lots PAC de l'échantillon MDE 52-55 (79 % de ces cas correspondent à l'installation d'une PAC air/eau).

Au regard des résultats obtenus pour les deux échantillons, les dispersions en termes d'économies d'énergie peuvent être très différentes d'une action à l'autre. Toutefois, les valeurs minimums de Cv obtenues (> 50%) **pour chacun des deux échantillons indiquent des hétérogénéités importantes.** De plus, ces hétérogénéités restent en l'état inexplicées ce qui rendrait la prédiction des économies d'énergie engendrées par la réalisation de ces mêmes actions très incertaine.

Nous allons donc étudier, au travers d'une modélisation statistique des consommations après travaux, les différents facteurs pouvant expliquer ces hétérogénéités.

3.3. Modélisation statistique de la consommation après travaux

La modélisation statistique des consommations après travaux a pour objectif d'identifier les facteurs permettant d'expliquer les variations entre les économies d'énergie obtenues et par conséquence les différences observées entre cas ayant réalisé un même type d'action. Le problème est abordé au travers d'une modélisation statistique afin de pouvoir étudier les effets de ces facteurs toutes choses étant égales par ailleurs (étude de l'effet d'un facteur en neutralisant les effets des autres facteurs).

Nous commencerons par présenter les échantillons étudiés et la méthode statistique employée. Les facteurs pris en compte, *i.e.* les variables explicatives, seront explicités par la suite ainsi que les questions que leur effet sous-tend.

3.3.1. Echantillons étudiés

Nous allons étudier de façon séparée les échantillons MDE 52-55 et MDE PACA car ils représentent des opérations bien distinctes entraînant des actions en partie différentes, ce qui se traduira par une prise en compte des travaux réalisés de manière différente (variables différentes).

Comme il a déjà été souligné auparavant, dans la cadre de l'opération MDE PACA la question de l'usage de la climatisation se pose tant du point de vue du climat méditerranéen que de l'installation en grande majorité au sein de l'échantillon d'une PAC air/air potentiellement réversible. Cette question absente pour l'opération MDE 52-55 amène aussi à modéliser de façon séparée chacun des deux échantillons. Nous reviendrons plus en détail dans la partie description variables explicatives sur cet usage de la climatisation.

Comme nous l'avons montré en sous-parties 3.2.3.1 et 3.2.3.2, un certain nombre d'actions réalisées se retrouve représenté par un très faible nombre de cas au sein des échantillons (moins de 10 cas). Ces derniers ne peuvent être conservés dans les échantillons modélisés en raison d'une représentativité trop faible engendrant un risque de détection d'un effet lié seulement à un cas particulier. De ce fait, les échantillons étudiés se composent de la façon suivante :

- Echantillon MDE 52-55 : 119 cas « avant et après travaux » moins les 7 cas de mono-lot système bois, les 3 cas de multi-lots système bois, les 3 cas de mono-lot CESI et les 2 cas de mono-lot chaudière à condensation soit au final un échantillon de 104 cas.
- Echantillon MDE PACA : 91 cas « avant et après travaux » moins les 6 cas de PAC air/air + deux autres lots et les 2 cas de PAC eau/eau + 2nd lot et moins aussi un cas unique d'installation d'un système de climatisation en dehors de l'opération soit au final un échantillon de 82 cas.

3.3.2. Méthode statistique

La modélisation statistique choisie est une analyse de covariance⁹⁴ (ANCOVA) avec une méthode des moindres carrés ordinaires⁹⁵ (SAPORTA, 2006 pp. 407-411, section 17.1 du Chapitre 17).

La variable expliquée est la consommation énergétique⁹⁶ annuelle tous usages après travaux (*ap*) ajustée à un climat normal (*normal*) et ramenée à 1 m² (*m²*) de surface habitable (en kWh/m²). Cette dernière sera notée pour le cas *i* : $C_{i,ap}^{normal,m^2}$.

D'autres variables expliquées ont, préalablement, été testés (économies d'énergies unitaires annuelles surfaciques, rapport entre consommation après travaux et consommation avant travaux, le logarithme népérien de ce rapport) mais ceci sans succès, suite à des problèmes de non vérification d'une partie des hypothèses liées à une ANCOVA.

⁹⁴ Généralisation à des variables quantitatives et qualitatives d'une régression linéaire multiple.

⁹⁵ Cette méthode permet de minimiser les distances entre les valeurs observées de la variable expliquée (fournies par l'échantillon) et les valeurs prédites par le modèle. Par construction, la moyenne sur la totalité de l'échantillon de ces distances est nulle. Les estimateurs ordinaires des moindres carrés des différents paramètres du modèle (effet des différentes variables explicatives) sont, moyennant la vérification de certaines conditions, des estimateurs non biaisés (moyenne de l'estimateur égale moyenne de l'effet « réel »).

⁹⁶ Pour rappel, il s'agit d'énergie finale en kWh PCI.

Afin de ne garder dans les modèles que les variables significatives, une sélection par méthode descendante⁹⁷ est appliquée avec un seuil de signification sur le test t de Student⁹⁸ de 0,05 (SAPORTA, 2006 pp. 339-342, section 14.4.1 du Chapitre 14).

Enfin, nous choisissons d'exprimer les effets des différentes modalités constituant une variable qualitative par rapport à l'effet de la première modalité de la variable (« coefficient de la 1^{ère} modalité = 0 »). Le codage de la première modalité sera alors choisi avec une attention toute particulière afin d'assurer une interprétation aisée des effets estimés par le modèle. Dans la description des variables explicatives qui va suivre nous justifierons les choix des premières modalités.

Ainsi l'équation du modèle statistique sera de la forme suivante :

$$C_{i,ap}^{normal,m^2} = Cst + \sum_{j=1}^{N_j} a_j * variable_j + \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{l=1}^{m_k} b_{kl} * variable_{k_modalité_l} + \varepsilon_i \quad (eq.14)$$

avec *Cst* : constante correspondant à la consommation après travaux pour une situation où toutes les variables quantitatives sont égales à 0 et où toutes les variables qualitatives sont égales à leur première modalité,

a_j et *variable_j* : coefficient estimateur de l'effet de la variable quantitative *j*, *j* allant de 1 à *N_j* (nombre total de variables quantitatives dans le modèle),

b_{kl} et *variable_{k_modalité_l}* : coefficient estimateur de l'effet de la modalité *l* de la variable qualitative *k*, *k* allant de 1 à *N_k* (nombre total de variables qualitatives dans le modèle) et *l* allant de 1 à *m_k* (nombre total de modalités de la variable qualitative *k*),

ε_i : erreur du modèle pour le cas *i*, exprime l'information manquante dans l'explication linéaire de la consommation après travaux à partir des variables explicatives (problème de spécification, variables non prises en compte, etc.).

Tous les effets estimés par le modèle (coefficient) le sont toutes choses (toutes les autres variables) étant égales par ailleurs ainsi afin de faciliter leur lecture, nous ne le repréciserons plus dans les paragraphes qui vont suivre.

La méthode statistique choisie, notamment la sélection des variables significatives, permettra tout d'abord de savoir s'il y a une influence significative des différentes variables sur la consommation après travaux et donc sur les économies d'énergie réalisées. Deuxièmement, en cas de significativité, une quantification de l'effet de ces variables sera donnée.

Toutefois, avant d'analyser les résultats nous nous devons d'une part, de vérifier la signification globale des modèles et d'autre part, d'effectuer une analyse des résidus⁹⁹ des modèles afin de s'assurer du respect des principales hypothèses de la régression linéaire multiple (l'homoscédasticité¹⁰⁰ et une distribution des résidus suivant une loi normale).

Enfin, nous analyserons la qualité des modèles au travers deux grandeurs : le R² ajusté qui qualifie la capacité d'explication du modèle et le RMCE (la Racine carrée de la Moyenne des Carrés des Erreurs) qui qualifie la capacité de prédiction du modèle.

⁹⁷ La méthode de sélection descendante consiste à partir du modèle avec toutes les variables et modalités (constituants des variables qualitatives) à éliminer une par une les variables ou les modalités les moins significatives jusqu'à ne conserver que des variables et/ou des modalités ayant une p-value inférieure au seuil fixé.

⁹⁸ Test paramétrique (échantillon supposé distribué selon une loi normale) de l'hypothèse nulle « le coefficient, estimateur de l'effet de la variable, vaut 0 ».

⁹⁹ Résidu = valeur observée - valeur prédite par le modèle. Estimation de l'erreur du modèle (voir équation 14).

¹⁰⁰ La variance des résidus doit être constante pour chaque observation et pour chaque valeur des variables explicatives (répartition aléatoire et homogène de l'erreur du modèle).

Le R^2 ajusté est une correction du coefficient de détermination (R^2 , il correspond à la part de la dispersion des observations expliquée par le modèle ainsi il prend sa valeur entre 0 et 1) défini par l'équation suivante pour le cas général :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{eq.15})$$

avec n : nombre d'observations de l'échantillon,

y_i : valeur de la variable expliquée observée pour le cas i de l'échantillon,

\hat{y}_i : valeur de la variable expliquée prédite par le modèle pour le cas i de l'échantillon,

\bar{y} : moyenne des valeurs de la variable expliquée de l'échantillon (identique pour les valeurs observées et pour les valeurs prédites).

Le R^2 ajusté permet de tenir compte du nombre de variables utilisées dans le modèle et corriger ainsi l'augmentation mécanique du R^2 en fonction de celui-ci. Le R^2 ajusté est déterminé par la relation suivante :

$$R^2_{\text{ajusté}} = 1 - (1 - R^2) * \frac{n-1}{n-1-DL_{\text{modèle}}} \quad (\text{eq.16})$$

avec $DL_{\text{modèle}}$: Degrès de Liberté de la partie expliquée du modèle, correspond au nombre de coefficients non nuls dans le modèle.

Le RMCE correspond à l'estimateur de l'écart-type de l'erreur du modèle. Il est défini par l'équation suivante :

$$RMCE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1-DL_{\text{modèle}}}} \quad (\text{eq.17})$$

Il peut être intéressant dans le cadre d'une comparaison de modèles d'exprimer ce RMCE en fonction de la valeur absolue de la moyenne des valeurs de la variable expliquée de l'échantillon au travers la définition d'un coefficient de variation (CV_{RMCE}) :

$$CV_{RMCE} = \frac{RMCE}{|\bar{y}|} \quad (\text{eq.18})$$

3.3.3. Variables explicatives

Dans le cadre de ces modélisations statistiques, nous allons tâcher d'expliquer la consommation après travaux à partir de :

- la situation avant travaux,
- des actions réalisées,
- et de l'ensemble des changements, connus au travers des enquêtes, ayant pu intervenir entre les périodes avant et après travaux.

Les variables explicatives sont présentées en trois groupes, les variables utilisées pour les deux échantillons, la variable adoptée uniquement pour l'échantillon MDE 52-55 et les variables employées seulement pour l'échantillon MDE PACA.

Disposant de deux échantillons aux caractéristiques très différentes, il sera intéressant de comparer les résultats obtenus pour les variables communes aux deux modèles.

3.3.3.1. Variables explicatives utilisées pour les deux échantillons : consommation avant travaux

La situation avant travaux est prise en compte via la consommation avant travaux. Plus précisément, il s'agit de la consommation énergétique annuelle tous usages avant travaux (av) ajustée à un climat normal et ramenée à 1 m² de surface habitable (en kWh/m²). Cette dernière sera notée pour

le cas i : $C_{i,av}^{normal,m^2}$. Nous pouvons noter que les consommations avant et après travaux sont ajustées à un même climat normal neutralisant les écarts de consommation dus aux variations climatiques.

Rappelons-nous qu'aucun cas, pour les deux échantillons, ne présente une situation de modification de la surface habitable entre les situations avant et après travaux (*e.g.* aménagement des combles perdus). Ceci nous permet par conséquent d'utiliser les consommations surfaciques et non à avoir à intégrer une variable prenant en compte l'évolution de la surface habitable.

Afin d'avoir une constante du modèle qui ne corresponde pas à une consommation avant travaux nulle, ce qui n'aurait pas de sens physique, nous recentrons la variable sur la moyenne des consommations avant travaux de chacun des deux échantillons (pour MDE 52-55, 267,9 kWh/m² et pour MDE PACA, 174,5 kWh/m²). Voir Tableau 3.14 pour les domaines de définition de la variable sur chacun des échantillons.

Tableau 3.14 Domaines de définition de la variable $C_{i,av}^{normal,m^2}$ pour les deux échantillons

Domaine de définition	MDE 52-55	MDE PACA
$C_{i,av}^{normal,m^2}$ (en kWh/m ²)	[-164,2 ; 499,9]	[-118,2 ; 360,1]

Le coefficient calculé par le modèle correspondra ainsi à une estimation de l'évolution de la consommation après travaux pour une augmentation de 1 kWh/m² de la consommation avant travaux par rapport à la moyenne des consommations avant travaux sur l'échantillon concerné.

3.3.3.2. Variables explicatives utilisées pour les deux échantillons : changement déclaré de température de chauffage

Le changement des comportements (plus précisément de l'utilisation du service énergétique concerné) suite à des actions d'efficacité énergétique, appelé effet rebond (SORRELL, et al., 2008) (GREENING, et al., 2000), est un des facteurs avancés comme frein à la pleine réalisation des gains énergétiques escomptés (HAAS, et al., 2000).

Dans le cadre des deux échantillons étudiés, les actions effectuées (isolation du bâti et/ou remplacement du système de chauffage) visent principalement à diminuer la consommation de chauffage¹⁰¹. Par conséquent, nous nous intéressons particulièrement au changement de comportement des ménages en termes d'usage du chauffage. Ce dernier sera caractérisé par la différence des températures intérieures, dans les pièces de vie (*pvie*) sur les périodes de présence (*p*), déclarées par les ménages pour les situations avant et après travaux en saison de chauffage (*ch*). Ces températures (*T*) seront respectivement notées pour le cas i : $T_{i,av}^{ch,pvie,p}$ et $T_{i,ap}^{ch,pvie,p}$.

Partant de l'hypothèse que ce sont dans ces pièces de vie et sur ces périodes de présence que les attentes de confort des ménages sont les plus importantes, il nous semble que cette différence est un bon indicateur des changements de comportement de chauffage des ménages.

La constante du modèle (terme *Cst* de l'équation 14, sous-partie 3.3.2) sera donnée pour un non changement déclaré de température de chauffage (différence des températures déclarées nulles). Voir Tableau 3.15 pour les domaines de définition de la variable sur chacun des échantillons.

¹⁰¹ Possibilité via le remplacement d'un système de chauffage servant aussi à la production d'ECS et/ou l'installation d'un nouveau système de chauffage assurant aussi la production d'ECS, d'un impact des travaux sur la consommation liée à cette dernière.

Tableau 3.15 Domaines de définition de la variable changement « déclaré de température de chauffage » pour les deux échantillons

Domaine de définition	MDE 52-55	MDE PACA
Changement déclaré de température de chauffage (en °C)	[-5,0 ; 5,0] 17 % ¹⁰² avec une valeur différente de 0 dont 12 % avec une valeur positive et 5 % avec une valeur négative	[-3,5 ; 5,5] 22 % avec une valeur différente de 0 dont 17 % avec une valeur positive et 5 % avec une valeur négative

Le coefficient calculé par le modèle sera l'estimation de l'évolution de la consommation après travaux pour une augmentation de 1 °C de la température de chauffage entre les périodes avant et après travaux. L'estimation toutes choses étant égales par ailleurs incluant entre autres la consommation avant travaux, l'évolution de la consommation après travaux correspondra à l'opposé de l'évolution des économies d'énergie :

$$\text{d'après l'équation 1}^{103}, EE_{i'} - EE_i = (C_{i',av}^{normal,m^2} - C_{i',ap}^{normal,m^2}) - (C_{i,av}^{normal,m^2} - C_{i,ap}^{normal,m^2}) \quad (\text{eq.19})$$

$$\text{si } C_{i',av}^{normal,m^2} = C_{i,av}^{normal,m^2} \text{ (neutralisation de l'effet de la consommation avant travaux)}$$

$$\text{alors } C_{i',ap}^{normal,m^2} - C_{i,ap}^{normal,m^2} = -(EE_{i'} - EE_i) \quad (\text{eq.20})$$

Il en sera de même pour l'ensemble des autres coefficients du modèle, hors le coefficient pour la variable liée à la consommation avant travaux.

Il est à noter que les consommations utilisées sont des consommations tous usages, et non seulement de chauffage, par conséquent l'effet du changement déclaré de température de chauffage pourra incorporer les effets de changement des comportements des ménages concernant les autres usages (production d'ECS, cuisson et électricité spécifique). Toutefois, au travers des enquêtes nous n'avons pas d'éléments d'information concernant ces derniers. Nous ne pourrions donc pas séparer l'effet rebond direct de l'effet rebond indirect¹⁰⁴ (SORRELL, 2007).

Bien que nous ne puissions faire cette séparation, et bien que les échantillons étudiés soient modestes en nombre de cas, que le changement de température de chauffage soit issu de déclarations auxquelles sont liées des incertitudes, que les périodes de suivi soient courtes (en moyenne, un an avant travaux et un an après travaux), l'étude de l'effet de ce changement reste intéressante. Les évaluations de ce dernier étant rares, tout particulièrement en France, et d'autant plus à partir d'échantillons dont les situations avant et après travaux sont connues.

Des ordres de grandeur d'effet rebond direct à long terme pour le chauffage domestique (moyenne de 10 % à 30 % des économies d'énergie attendues non réalisées, pouvant atteindre 60 % pour les ménages en précarité énergétique) sont donnés au sein de la littérature pour les pays de l'OCDE (SORRELL, 2007) (HAAS, et al., 2000) (GREENING, et al., 2000).

¹⁰² L'ensemble des pourcentages présentés dans cette sous-partie 3.3.3 étant relatif, à moins d'une indication particulière, soit aux 104 cas de l'échantillon MDE 52-55, soit aux 82 cas de l'échantillon MDE PACA, nous indiquerons les pourcentages sans préciser le nombre de cas correspondant.

¹⁰³ Sous-partie 3.1.1.

¹⁰⁴ Effet rebond direct : changement des comportements concernant l'usage ayant fait l'objet de l'amélioration énergétique. Effet rebond indirect : changement des comportements concernant d'autres usages que celui ayant fait l'objet de l'amélioration énergétique.

3.3.3.3. Variables explicatives utilisées pour les deux échantillons : déclaration de changement dans l'occupation

Dans la période entre avant et après travaux, le nombre d'occupants (*e.g.* naissance ou décès) et/ou l'occupation en semaine du logement (*e.g.* personne prenant sa retraite et donc passant plus de temps dans son logement) peuvent amener des modifications en termes de besoins énergétiques, ayant des répercussions sur les économies d'énergies obtenues suite à l'action effectuée. L'ensemble des besoins énergétiques (de chauffage, d'ECS, de cuisson et d'électricité spécifique) peut être impacté¹⁰⁵ d'où l'importance de travailler avec des consommations tous usages.

Au regard d'une part, des faibles nombres de cas déclarant un changement du nombre d'occupants (7 % de l'échantillon pour MDE 52-55 et pour MDE PACA) et d'autre part, des faibles nombres de cas déclarent une modification dans l'occupation en semaine du logement (pour MDE 52-55, 2 % de l'échantillon et pour MDE PACA, 16 % de l'échantillon), il est choisi de regrouper l'étude de leur effet dans une seule et même variable qualitative afin d'obtenir un nombre critique de cas (voir Tableau 2.18 pour la représentativité des modalités). Ce regroupement se justifie d'autant plus que les effets des augmentations ou des diminutions du nombre d'occupants et de l'occupation en semaine sont censés *a priori* se traduire par une modification dans le même sens de la consommation d'énergie (élévation quand augmentation et réduction quand diminution des deux facteurs).

Ayant ces deux possibilités, augmentation et diminution, de changement dans l'occupation du logement, la variable est définie par trois modalités : « pas de déclaration de changement dans l'occupation », « déclaration d'une augmentation dans l'occupation » et « déclaration d'une diminution dans l'occupation ». L'absence de changement dans l'occupation du logement est choisie comme référence (*i.e.* première modalité). En effet, cette situation est la plus courante comme le confirme les représentativités des différentes modalités pour chacun des échantillons (voir Tableau 3.16).

Les coefficients du modèle pour chacune des modalités correspondront à l'estimation, au signe opposé près, de la différence des économies d'énergie engendrées entre une situation sans déclaration de changement de l'occupation et la situation représentée par la modalité.

Tableau 3.16 Représentativité des modalités de la variable « déclaration de changement dans l'occupation » pour les deux échantillons

Représentativité de la modalité (en %)	MDE 52-55	MDE PACA
Pas de déclaration de changement	91	77
Déclaration d'une augmentation dans l'occupation	9	8
Déclaration d'une diminution dans l'occupation	0	15

Nous noterons que les cas présentant des changements dans l'occupation du logement sont généralement sortis des échantillons étudiés dans le cadre de l'évaluation d'une opération d'efficacité énergétique (SUERKEMPER, et al., 2012) car il modifie les conditions de fonctionnement du logement sans que nous sachions bien prendre en compte l'effet sur les économies d'énergie de cette modification. Ces modèles seront donc une tentative pour prendre en compte cet effet.

Celle-ci nous semble d'autant plus importante que l'anticipation de l'arrivée d'un nouvel occupant (*e.g.* un enfant ou un parent âgé) ou la prise de la retraite par une personne du ménage peuvent être des motivations à la réalisation d'action de rénovation énergétique (TNS SOFRES, 2009)¹⁰⁶. Or il s'agit d'estimer des économies d'énergie réelles et donc résultantes également de ces modifications.

¹⁰⁵ Voir note de bas de page 53 (page 50).

¹⁰⁶ 8 % des enquêtés, ayant réalisé des travaux dans les 5 dernières années, répondent avoir effectué ces derniers suite à de nouveaux besoins (naissance, etc.). Ce qui en fait la troisième occasion de réalisation de travaux derrière à 53 % l'absence de nécessité particulière et à 18 % suite à de l'usure, de la vétusté, des dégâts provoqués, à une rénovation (ravalement) et une mise aux normes.

3.3.3.4. Variables explicatives utilisées pour les deux échantillons : déclaration de malfaçons

La présence de malfaçons associées aux actions réalisées peut être à l'origine d'une réduction des économies d'énergie obtenues par rapport à ceux escomptés. Pour étudier cet effet, nous prenons en compte dans le modèle la présence ou non de malfaçons sur la base des déclarations des enquêtés. Les cas de déclarations de malfaçons étant relativement peu nombreux (voir Tableau 3.17 pour la représentativité des modalités) et celles-ci étant de nature diverse, les modalités retenues pour la variable sont : « non déclaration de malfaçons » et « oui déclaration de malfaçons ».

L'absence de malfaçons déclarées est choisie comme première modalité, et de la sorte comme référence, car la présence de malfaçons est censée être l'exception. Les représentativités des deux modalités dans les deux échantillons vont dans ce sens (voir Tableau 3.17). Le coefficient du modèle sera l'estimation, au signe opposé près, de la différence des économies d'énergie engendrées entre les situations sans et avec malfaçons déclarées.

Tableau 3.17 Représentativité des modalités de la variable « déclaration de malfaçons » pour les deux échantillons

Représentativité de la modalité (en %)	MDE 52-55	MDE PACA
Non déclaration de malfaçons	91	90
Oui déclaration de malfaçons	9	10

Enfin, nous pouvons remarquer que les déclarations de malfaçons sont présentes dans les mêmes faibles proportions au sein des deux échantillons. Ces valeurs sont probablement sous-estimées par rapport aux malfaçons réelles mais il aurait fallu effectuer des visites techniques après travaux de chacun des logements, démarche difficile de par son coût au regard des tailles des échantillons enquêtés. Toutefois, nous pouvons raisonnablement penser que les malfaçons observées et déclarées par les enquêtés sont parmi les plus importantes.

Par ailleurs, il n'existe pas à notre connaissance au sein de la littérature française de référence fournissant des ordres de grandeurs de malfaçons observées sur des actions similaires à celles des deux échantillons étudiés. Une étude anglaise (HONG, et al. 2006) détermine à l'aide d'une caméra infrarouge, sur un nombre limité (non précisé) de logements rénovés, des moyennes de 20 % et de 13 % des surfaces théoriquement isolées respectivement de murs extérieurs et de combles perdus en manque d'isolation.

3.3.3.5. Variables explicatives utilisées pour les deux échantillons : déclaration de travaux de rénovation énergétique hors opération

Les actions réalisées au travers des opérations d'efficacité énergétique MDE 52-55 ou MDE PACA peuvent s'accompagner d'autres rénovations énergétiques soit en tant que partie d'un projet de rénovation plus large (*e.g.* installation ou rénovation d'une Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC) lors de l'isolation de la toiture), soit en tant que remplacement d'un système rencontrant des problèmes techniques lors de cette période¹⁰⁷ (*e.g.* remplacement d'un chauffe-eau électrique). La non prise en charge par l'opération de ces travaux peut être due à l'éligibilité de ces actions dans le périmètre de l'opération (*e.g.* installation ou remplacement d'une VMC ou d'un chauffe-eau électrique) mais aussi à un niveau de performance inférieur aux exigences de l'opération (*e.g.* installation d'une chaudière standard tandis que l'opération exige une chaudière à condensation).

Les travaux de rénovation énergétique réalisés hors opération ayant été identifiés via les enquêtes, nous pouvons faire l'étude de l'effet de leur réalisation sur les économies d'énergie attribuées aux

¹⁰⁷ Les périodes avant et après travaux correspondant au moins à une année complète de consommation d'énergie sans perturbation et les dates de début et de fin de ces années étant conservées identiques, en moyenne la période non exploitée dans laquelle sont réalisés les travaux liés à l'opération est d'une année.

actions de l'opération. Ces travaux hors opération étant de nature diverse et les nombres de cas par nature de travaux étant trop faibles, la variable est définie au travers de deux modalités : « non déclaration de travaux de rénovation énergétique hors opération » et « oui déclaration de travaux de rénovation énergétique hors opération ».

L'absence de déclaration de travaux hors opération est choisie comme première modalité, et donc comme référence, car elle est la plus répandue (voir Tableau 3.18). Le coefficient du modèle sera l'estimation, au signe opposé près, de la différence des économies d'énergie engendrées entre les situations sans et avec déclaration de travaux de rénovation énergétique hors opération.

Tableau 3.18 Représentativité des modalités de la variable « déclaration de travaux de rénovation énergétique hors opération » pour les deux échantillons

Représentativité de la modalité (en %)	MDE 52-55	MDE PACA
Non déclaration de travaux hors opération	73	78
Oui déclaration de travaux hors opération	27	22

Nous pouvons observer que les non déclarations et les déclarations de travaux hors opération sont présentes sensiblement dans les mêmes proportions dans les deux échantillons.

L'étude de cet effet est importante car s'il est significatif, il devrait attribuer des économies d'énergie à ces travaux qui auraient été considérées à tort comme engendrées par les seules actions de l'opération (surestimation des économies).

Cette variable est la dernière des variables communes aux deux échantillons. Décrivons maintenant les variables utilisées seulement pour l'un ou l'autre des deux échantillons.

3.3.3.6. Variable explicative utilisée uniquement pour l'échantillon MDE 52-55 : action de l'opération

Comme souligné auparavant (voir sous-partie 3.2.3.2), les actions réalisées via l'opération au sein de l'échantillon MDE PACA sont beaucoup plus homogènes que celles de l'échantillon MDE 52-55. Pour cette raison, les actions de l'échantillon MDE PACA sont décrites à un niveau plus détaillé. Ne souhaitant pas nous priver de ce niveau de détail dans l'étude des économies d'énergie engendrées par les différentes actions réalisées, nous choisissons de traiter ces dernières de façon spécifique pour chaque échantillon.

Dans le cadre de l'échantillon MDE 52-55, nous conservons donc pour les modalités de la variable liée à l'action réalisée au travers de l'opération les regroupements utilisés précédemment (voir sous-partie 3.2.3.1) soit :

- Mono-lot isolation,
- Multi-lots isolation,
- Mono-lot PAC,
- Multi-lots chaudière à condensation,
- Multi-lots PAC.

L'action mono-lot isolation est la première modalité et donc la référence car elle est l'action la plus répandue au sein de l'échantillon (voir Tableau 3.19). Les coefficients du modèle pour chacune des modalités correspondront à l'estimation, au signe opposé près, de la différence des économies d'énergie engendrées entre la réalisation au travers de l'opération d'une action mono-lot isolation et la réalisation de l'action représentée par la modalité.

Tableau 3.19 Représentativité des modalités de la variable « action de l’opération énergétique » pour l’échantillon MDE 52-55

Modalité	Représentativité de la modalité (en %)
Mono-lot isolation	45
Multi-lots isolation	12
Mono-lot PAC	15
Multi-lots Chaudière à condensation	10
Multi-lots PAC	18

Il sera tout particulièrement intéressant de comparer les résultats du modèle statistique avec les résultats obtenus lors de l’analyse statistique descriptive menée auparavant (voir sous-partie 3.2.3.3) tant en ce qui concerne les différences entre les économies d’énergie par action trouvées significatives que les valeurs absolues de ces dernières.

3.3.3.7. Variables explicatives utilisées uniquement pour l’échantillon MDE PACA : type de PAC installée via l’opération et nature du second lot réalisé via l’opération

Les actions réalisées via l’opération MDE PACA sont toutes des multi-lots PAC correspondant à l’association d’une PAC (PAC air/air ou PAC air/eau) et d’un second lot (isolation de la toiture ou installation d’un CESI). Afin d’étudier séparément les effets sur les économies d’énergie obtenues du type de PAC installée et de la nature du second lot réalisé, les actions effectuées via l’opération sont prises en compte dans le modèle au travers de deux variables distinctes.

La variable sur le type de PAC installée présente deux modalités : « PAC air/air » et « PAC air/eau ». La variable sur la nature du second lot effectué est elle aussi composée de deux modalités : « Isolation de la toiture » et « Installation d’un CESI ». La PAC air/air et l’isolation de la toiture sont les premières modalités et donc les références de leur variable respective car elles sont les plus fréquentes parmi l’échantillon (voir Tableau 3.20 et Tableau 3.21).

Tableau 3.20 Représentativité des modalités de la variable « type de PAC installée via l’opération » pour l’échantillon MDE PACA

Modalité	Représentativité de la modalité (en %)
PAC air/air	85
PAC air/eau	15

Tableau 3.21 Représentativité des modalités de la variable « nature du second lot réalisé via l’opération » pour l’échantillon MDE PACA

Modalité	Représentativité de la modalité (en %)
Isolation de la toiture	79
Installation d’une CESI	21

Le coefficient du modèle pour la variable sur le type de PAC installée via l’opération sera l’estimation, au signe opposé près, de la différence des économies d’énergie engendrées entre l’installation d’une PAC air/air et l’installation d’une PAC air/eau. De façon similaire, le coefficient du modèle pour la variable portant sur la nature du second lot réalisé au travers l’opération correspondra à l’estimation, au signe opposé près, de la différence des économies d’énergie engendrées entre une isolation de la toiture et une installation d’un CESI.

De nouveau, il sera intéressant de comparer les résultats du modèle avec l’analyse statistique descriptive réalisée (voir sous-partie 3.2.3.4) et notamment afin de savoir s’ils confirment qu’il existe une différence significative en termes d’économies d’énergie en fonction du type de PAC installée.

3.3.3.8. Variables explicatives utilisées uniquement pour l'échantillon MDE PACA : utilisation déclarée de la climatisation après travaux

La question de l'usage de la climatisation au sein de l'échantillon MDE PACA a déjà été évoquée à plusieurs reprises. L'installation via l'opération d'une PAC réversible peut entraîner soit une première installation de la climatisation, soit le remplacement d'un système de climatisation existant avant travaux.

Dans le cadre de cet échantillon, 73 % des ménages déclarent avoir via l'opération, installé la climatisation, 15 % déclarent avoir rénové via l'opération leur système de climatisation et 12 % déclarent n'avoir fait aucune action concernant la climatisation, au travers mais aussi hors de l'opération. Notons que les installations et les remplacements sont très majoritairement associés à une PAC air/air (respectivement 98 % des installations et 92 % des remplacements) tandis que les situations de non action sont toutes en lien avec l'installation d'une PAC air/eau.

Les utilisations de la climatisation après travaux (voir Tableau 3.22), issues des déclarations des ménages lors des enquêtes, correspondent à différentes situations en fonction des actions réalisées concernant la climatisation.

Tableau 3.22 Représentativité des différentes utilisations de la climatisation après travaux parmi les différentes situations d'action concernant la climatisation

Utilisation déclarée de la climatisation après travaux (en %)	Action concernant la climatisation via l'opération		
	Installation	Remplacement	Pas d'action
Pas d'utilisation	40	33	90
Utilisation faible (1 semaine et moins en cumulé sur la période estivale)	25	33	10
Utilisation fréquente (de 2 à 3 semaines en cumulé sur la période estivale)	18	25	0
Utilisation en continue (1 mois et plus en cumulé sur la période estivale)	17	9	0

Nous pouvons noter que les cas ayant installé la climatisation au travers de l'opération déclarent le plus fréquemment ne pas l'utiliser (40 %) ou en avoir une utilisation faible (25 %). Une majorité des ménages ayant remplacé leur système de climatisation déclarent également ne pas l'utiliser (33 %) ou peu l'utiliser (33 %). Ainsi sur la totalité de l'échantillon, 45 % des ménages déclarent ne pas utiliser la climatisation après les travaux. Nous pouvons remarquer que ceci est légèrement supérieur, mais du même ordre de grandeur, aux 37 % n'utilisant pas la climatisation parmi l'échantillon du CEREN de maisons existantes (construites avant 2000) équipées de PAC en zone climatique H3 (CEREN, 2013).

Enfin, observons les températures intérieures déclarées par les ménages lors des périodes d'utilisation de la climatisation après travaux, soit pour les 55 % des cas de l'échantillon déclarant une utilisation (voir Figure 3.13). Observons que les valeurs déclarées sont relativement étendues allant de 17 °C à 26 °C et que la température moyenne déclarée est de 22,6 °C. La moitié des ménages déclarent une température de moins de 23 °C. Hélas, au travers de l'enquête, nous n'avons pas récupéré d'information supplémentaire concernant l'utilisation de la climatisation (*e.g.* durée journalière d'utilisation).

Au regard du faible nombre de cas étudiés, il ne nous est pas possible de prendre en compte à la fois la situation, vis-à-vis de l'état avant travaux, de l'action réalisée via l'opération en lien avec la climatisation et l'utilisation déclarée de la climatisation après travaux. De plus, l'étude seule de l'effet de la situation de l'action (installation, remplacement et pas d'action) ne semble pas pertinente tant les utilisations après travaux sont diverses pour une même situation (voir Tableau 3.22). Comme les différentes situations sont dominées par l'inutilisation de la climatisation, nous allons nous concentrer sur l'étude des effets des différentes utilisations déclarées de la climatisation après travaux. Nous couplerons cette dernière avec l'étude de l'effet du niveau de température déclaré pour les périodes de climatisation après travaux.

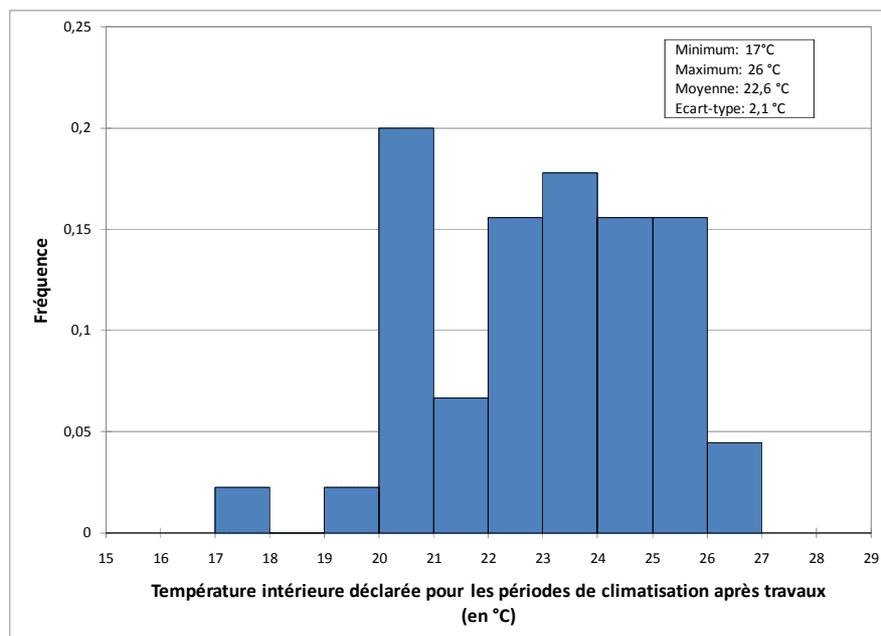


Figure 3.13 Histogrammes des températures intérieures déclarées pour les périodes de climatisation après travaux de l'échantillon MDE PACA

Ainsi, la variable relative à l'utilisation déclarée de la climatisation après travaux se compose de 5 modalités :

- « Pas d'utilisation déclarée»,
- « Déclaration d'une utilisation faible couplée à une température de moins de 23 °C »,
- « Déclaration d'une utilisation faible couplée à une température de 23 °C et plus»,
- « Déclaration d'une utilisation importante (fréquente ou continue) couplée à une température de moins de 23 °C »,
- « Déclaration d'une utilisation importante (fréquente ou continue) couplée à une température de 23 °C et plus».

Les utilisations « fréquente » et « continue » sont regroupées sous une même utilisation dite « importante » en raison de représentativités trop faibles prises séparément. La représentativité de chacune des modalités de la variable est présentée dans le Tableau 3.23.

Tableau 3.23 Représentativité des modalités de la variable « utilisation déclarée de la climatisation après travaux » pour l'échantillon MDE PACA

Modalité	Représentativité de la modalité (en %)
Pas d'utilisation déclarée	45
Déclaration d'une utilisation faible couplée à une température de moins de 23 °C	13
Déclaration d'une utilisation faible couplée à une température de 23 °C et plus	11
Déclaration d'une utilisation importante couplée à une température de moins de 23 °C	16
Déclaration d'une utilisation importante couplée à une température de 23 °C et plus	15

L'absence d'utilisation de la climatisation est la première modalité et donc la référence car elle est la situation la plus fréquente parmi les niveaux d'intensité d'utilisation (pas d'utilisation, faible utilisation, importante utilisation). De plus, les coefficients du modèle pour les différentes modalités correspondront ainsi à des estimations, au signe opposé près, de la différence des économies d'énergie engendrées entre une inutilisation déclarée de la climatisation et l'utilisation déclarée de la climatisation représentée par la modalité.

L'étude de ces coefficients nous permettra de savoir si l'utilisation de la climatisation suite à l'installation d'une PAC air/air (très majoritairement) a un effet significatif sur les économies d'énergie obtenues et si c'est le cas, s'il existe des différences d'effet suivant l'utilisation déclarée de la climatisation.

Comme pour la variable sur le changement déclaré de température de chauffage, l'échantillon étudié est non optimal (faible nombre de cas engendrant un faible niveau de détail, données issues de déclarations, périodes de suivi courtes) mais il reste intéressant car à notre connaissance, il n'existe pas parmi la littérature française d'analyse *ex-post* avant/après travaux de l'usage de la climatisation lié à l'installation de PAC air/air en logement individuel. Les études parmi la littérature internationale sont également rares (GRAM-HANSEN, et al., 2012).

3.3.3.9. Etude de la multicollinéarité au sein des variables explicatives

Il est à noter qu'il est vérifié que chacun des deux jeux de variables explicatives ne présente pas de multicollinéarité¹⁰⁸. Toutes les variables et les modalités des deux modèles statistiques ont un facteur d'inflation de la variance (VIF) inférieure à 1,6¹⁰⁹.

3.3.4. Résultats

Avant la présentation des résultats à proprement dite nous nous devons de vérifier la validité du modèle.

3.3.4.1. Validation des modèles

Les significations globales des modèles sont testées via des tests du F de Fischer¹¹⁰ (SAPORTA, 2006 pp. 339-342, section 14.4.1 du Chapitre 14). Les probabilités associées au F (p-value) sont pour les deux modèles inférieures à 0,0001 (F de 96,6 pour le modèle MDE 52-55 et de 17,1 pour le modèle MDE PACA). Cela signifie que le risque de se tromper est de moins de 0,01 % en concluant que les variables explicatives retenues par le modèle apportent une quantité d'information significative.

La Figure 3.14 qui représente les résidus normalisés (centrés réduits) en fonction des valeurs prédites par les modèles de $C_{i,ap}^{normal,m^2}$ permet une approche graphique de vérification de l'hypothèse d'homoscédasticité des résidus (répartition aléatoire et homogène autour du zéro de l'axe des ordonnées).

¹⁰⁸ Existence de relation(s) linéaire(s) entre des variables et/ou des modalités du jeu de variables explicatives. Ces liens au-delà d'un certain seuil ne permettent plus de satisfaire l'hypothèse, associée à une régression linéaire multiple, d'indépendance linéaire des variables explicatives entre elles.

¹⁰⁹ Pour détecter les multicollinéarités et identifier les variables impliquées dans ces dernières, il est effectué des régressions linéaires multiples de chacune des variables explicatives en fonction des autres. Ainsi, le R^2 de chacun des modèles obtenus est transformé en facteur d'inflation de la variance par la relation suivante : $1/(1-R^2)$. Un facteur d'inflation de la variance inférieur à 1,6 correspond à un R^2 inférieur à 0,375.

¹¹⁰ Test paramétrique de l'hypothèse nulle « la variance du modèle obtenu n'est pas significativement différente de celle d'un modèle avec tous les coefficients nuls ».

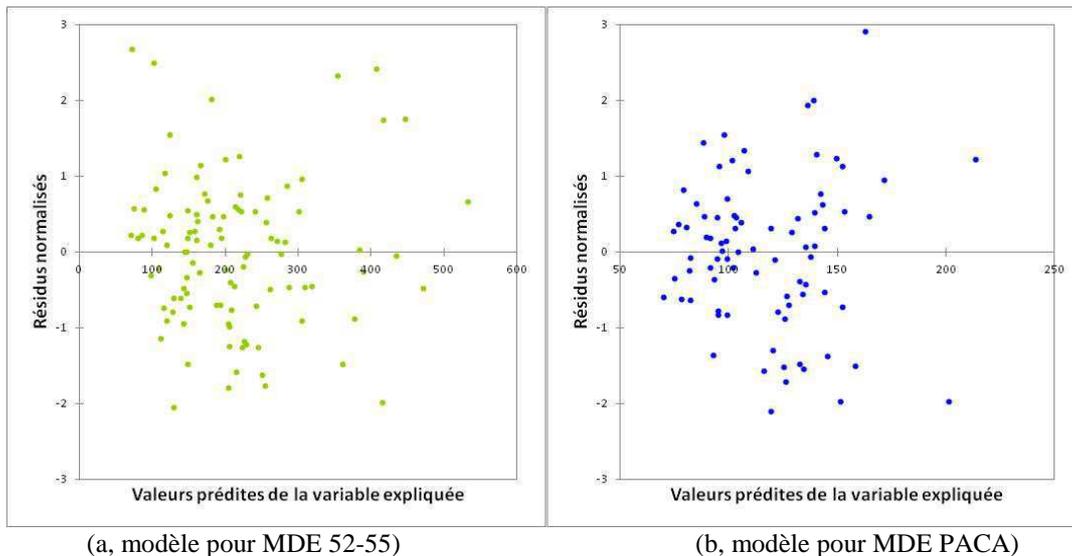


Figure 3.14 Résidus normalisés en fonction des valeurs prédites par chacun des modèles

Pour confirmer celle-ci, nous utilisons des tests de Levene et de Bartlett¹¹¹ (LEVENE, 1960) (BROWN, et al., 1974), avec un seuil de signification de 0,05, pour chacune des variables qualitatives et pour des discrétisations des variables quantitatives¹¹². Concernant le modèle pour l'échantillon MDE 52-55, tous les tests acceptent l'égalité des variances des résidus à l'exception de ceux pour la variable sur la consommation avant travaux (p-value=0,022). En effet, la variance des résidus pour les consommations avant travaux les plus importantes est significativement supérieure à celles des consommations plus faibles (4579 (kWh/m²)² contre environ 1400 (kWh/m²)²). Ceci traduit une difficulté du modèle statistique à expliquer les consommations après travaux des cas avec les grandes consommations initiales. S'agissant du modèle pour l'échantillon MDE PACA, tous les tests acceptent l'égalité des variances. Par conséquent (un seul test rejetant l'égalité des variances), l'hypothèse d'homoscédasticité est considérée comme validée pour les deux modèles.

La Figure 3.15 présente la droite de Henry de chacun des deux modèles, permettant de comparer la fonction de répartition des résidus du modèle (en abscisse) à celle qu'aurait une loi normale de même moyenne (zéro) et de même variance (en ordonnées).

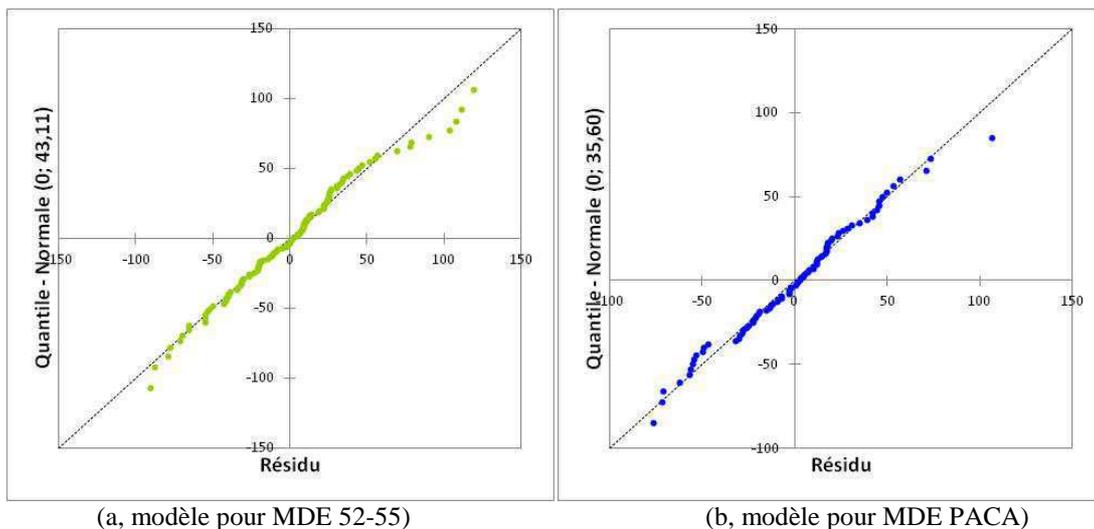


Figure 3.15 Droite de Henry des résidus de chacun des modèles

¹¹¹ Ils testent (tests paramétriques) ici l'égalité des variances des résidus entre les différentes modalités d'une variable qualitative ou les différents groupes issus de la discrétisation d'une variable quantitative. Hypothèse nulle : « les variances sont identiques ».

¹¹² Discrétisation en 4 groupes à partir d'une méthode automatique de Fisher (FISHER, 1958).

Compte-tenu des faibles tailles des deux échantillons, le relativement bon alignement de la très grande majorité des points sur la première bissectrice tend à indiquer la distribution des résidus des modèles suivant une loi normale. Des tests de Jarque-Tera¹¹³ (SAPORTA, 2006 pp. 369-370, section 14.6.4 Chapitre 14) nous garantissent un risque (p-value) de nous tromper de 25 % pour le modèle pour MDE 52-55 et de 95 % pour MDE PACA en rejetant l'hypothèse d'une distribution normale. Ces valeurs étant supérieures à un seuil de signification de 5 %, cette hypothèse ne peut être rejetée. En parallèle de cette vérification, nous avons calculé que 93 % des résidus normalisés du modèle pour MDE 52-55 et 94 % pour l'échantillon MDE PACA se trouvent dans un intervalle [-1,96 ; 1,96] mettant en évidence l'absence de données suspectes en grand nombre.

En conclusion, les principales hypothèses liées à une régression linéaire multiple sont vérifiées pour les deux modèles ainsi leurs résultats peuvent être considérés comme fiables.

3.3.4.2. Résultats des modèles

Les Tableaux 3.24 et 3.25 fournissent les résultats (termes significatifs seulement) des modèles respectivement pour MDE 52-55 et pour MDE PACA.

¹¹³ Test de l'hypothèse nulle : « l'échantillon suit une loi normale ».

Tableau 3.24 Modèle statistique de $C_{i,ap}^{normal,m^2}$ pour MDE 52-55

Variable (unité de référence) ou modalité	Coefficient	Intervalle de confiance à 95 %	t	Signification (p-value au test t de Student)
Constante	228,9	[217,7 ; 240,1]	40,4	< 0,0001
Consommation avant travaux (1 kWh/m ²)	0,73	[0,65 ; 0,81]	20,1	< 0,0001
Changement déclaré de température de chauffage (1 °C)	24,3	[17,3 ; 31,3]	6,8	< 0,0001
Déclaration de travaux de rénovation énergétique hors opération - <i>Non</i>	Référence (coefficient = 0)			
Déclaration de travaux de rénovation énergétique hors opération - <i>Oui</i>	-30,3	[-50,1 ; -10,5]	-3,0	0,003
Action de l'opération – <i>Mono-lot isolation</i>	Référence (coefficient = 0)			
Action de l'opération – <i>Multi-lots chaudière à condensation</i>	-36,0	[-65,7 ; -6,3]	-2,4	0,018
Action de l'opération – <i>Multi-lots PAC</i>	-59,2	[-82,0 ; -36,4]	-5,1	< 0,0001
Nombre d'observations = 104 ; DL _{modèle} = 5 R ² ajusté = 0,82 RMCE = 44,4 kWh/m ² ; CV _{RMCE} = 21 %				

Tableau 3.25 Modèle statistique de $C_{i,ap}^{normal,m^2}$ pour MDE PACA

Variable (unité de référence) ou modalité	Coefficient	Intervalle de confiance à 95 %	t	Signification (p-value au test t de Student)
Constante	105,3	[95,6; 115,0]	21,7	< 0,0001
Consommation avant travaux (1 kWh/m ²)	0,30	[0,20 ; 0,40]	6,3	< 0,0001
Utilisation déclarée de la climatisation après travaux – <i>Pas d'utilisation</i>	Référence (coefficient = 0)			
Utilisation déclarée de la climatisation après travaux – <i>Utilisation importante couplée à une température de moins de 23 °C</i>	40,2	[17,7 ; 62,7]	3,6	0,001
Utilisation déclarée de la climatisation après travaux – <i>Utilisation importante couplée à une température de 23 °C et plus</i>	38,7	[15,4 ; 62,0]	3,3	0,001
Nombre d'observations = 82 ; DL _{modèle} = 3 R ² ajusté = 0,37 RMCE = 36,5 kWh/m ² ; CV _{RMCE} = 31 %				

3.3.5. Discussions

Nous analyserons les résultats obtenus variable par variable et en comparant les deux modèles chaque fois que cela est possible. Auparavant, nous pouvons observer que toutes les variables ou modalités présentes dans les deux modèles ont des niveaux de signification très élevés ($p\text{-value} \ll 0,05$). Avant de faire l'analyse des variables, étudions la qualité des deux modèles.

3.3.5.1. Qualité des modèles

Avec des R^2 ajustés de 0,82 et de 0,37 respectivement pour les modèles pour MDE 52-55 et pour MDE PACA, la capacité d'explication du premier est plutôt bonne tandis que celle du second reste faible. Ceci revient à dire que le modèle pour MDE 52-55 arrive à mieux expliquer les variations de consommations après travaux entre les différents cas de l'échantillon que le modèle pour MDE PACA.

Concernant la capacité de prédiction de chacun des modèles, en valeur absolue le RMCE de 36,5 kWh/m² du modèle MDE PACA est plus faible que celui du modèle pour MDE 52-55 (44,4 kWh/m²). Toutefois, ramené à la moyenne des consommations après travaux observées pour chacun des échantillons, le CV_{RMCE} du modèle pour MDE 52-55 (21 %) est plutôt correct (valeur préconisée par le protocole IPMVP ≤ 15 % (EVO, 2009)) tandis celui du modèle pour MDE PACA est relativement conséquent (31 %).

En résumé, le modèle pour l'échantillon MDE 52-55 présente des qualités d'explication et de prédiction plutôt bonnes tandis que celles du modèle pour MDE PACA sont faibles. Une majeure partie des variations dans les consommations après travaux de l'échantillon MDE PACA n'est ainsi pas captée par les variables étudiées soit car celle-ci est due à d'autres facteurs que ceux pris en compte, soit à cause de fortes incertitudes liées aux différentes données, soit parce que la loi linéaire utilisée n'est qu'une approximation partiellement satisfaisante des relations entre la consommation après travaux et les facteurs étudiés. A la vue des résultats obtenus pour le modèle pour l'échantillon MDE 52-55 avec une forme de modèle identique et des variables explicatives quasi-similaires, nous aurions tendance à apporter plus de crédit aux deux premières explications. Toutefois en l'état, nous ne sommes pas capables d'arbitrer entre ces hypothèses. Ceci ne nous empêche pas d'analyser les résultats trouvés par le modèle pour MDE PACA dans l'explication des variations des consommations après travaux.

3.3.5.2. Constante

La constante du modèle pour MDE 52-55 de 228,9 kWh/m² (intervalle de confiance à 95 % : [217,7 ; 240,1]) correspond à la consommation après travaux prédite par le modèle pour un cas hypothétique avec une consommation avant travaux de 267,9 kWh/m² (moyenne sur l'échantillon) ayant réalisé via l'opération un mono-lot isolation, ne déclarant pas de changement de température de chauffage suite aux travaux et ne déclarant pas de travaux de rénovation énergétique supplémentaires hors opération (et pour toutes les valeurs des variables non significatives). Ainsi nous pouvons en déduire pour ce cas des économies d'énergie de 39,0 kWh/m² (intervalle de confiance à 95 % : [27,8 ; 50,2]). Nous pouvons remarquer que cette valeur est relativement proche de la moyenne, des économies d'énergie engendrées par un mono-lot isolation, trouvée lors de l'analyse statistique descriptive (35 kWh/m² voir sous-partie 3.2.3.3). Ainsi nous pouvons en déduire que les ménages de l'échantillon ayant réalisé cette action présentent des caractéristiques similaires (pas de changement de température de chauffage, pas de travaux supplémentaires de rénovation) à celles pour lesquelles la constante est définie.

Pour MDE PACA, les 105,3 kWh/m² (intervalle de confiance à 95 % : [95,6 ; 115,0]) de consommation après travaux prédite pour la constante du modèle sont données pour un cas hypothétique de consommation avant travaux de 174,5 kWh/m² (moyenne sur l'échantillon) et un ménage déclarant ne pas utiliser la climatisation après travaux (et pour toutes les valeurs des variables non significatives). Les économies d'énergie prédites sont dans ce cas de 69,2 kWh/m² (intervalle de

confiance à 95 % : [59,5 ; 78,9]). Cette valeur est supérieure à la moyenne des économies d'énergie obtenue sur la totalité de l'échantillon étudiée (totalité des trois actions) lors de l'analyse descriptive (59 kWh/m² voir sous-partie 3.2.3.4). Par conséquent, cela nous laisse à penser que l'usage de la climatisation, déclaré par un certain nombre de cas, a pour effet de réduire les économies d'énergie obtenues.

Les coefficients des différentes variables et modalités sont à ajouter à la constante de l'équation pour obtenir les consommations après travaux, et donc les économies d'énergie, prédites par les modèles.

3.3.5.3. Consommation avant travaux

La variable en lien avec la consommation avant travaux est significative dans les deux modèles. Cela indique un effet de la consommation initiale sur la consommation après travaux et donc sur les économies d'énergie obtenues dans les deux échantillons.

Pour MDE 52-55, sur 1 kWh/m² de surconsommation initiale par rapport à la moyenne (267,9 kWh/m²), nous retrouvons après travaux selon le modèle 0,73 kWh/m² (intervalle de confiance à 95 % : [0,65 ; 0,80]). Ce qui exprimé en économies d'énergie indique un supplément d'économies de 0,27 kWh/m² (intervalle de confiance à 95 % : [0,20 ; 0,35]) par kWh/m² de surconsommation initiale par rapport à la moyenne.

Dans le modèle pour MDE PACA, nous obtenons 0,3 kWh/m² après travaux (intervalle de confiance à 95 % : [0,2 ; 0,4]) sur 1 kWh/m² de surconsommation initiale par rapport à la moyenne (174,5 kWh/m²). Ce qui se traduit par un supplément d'économies de 0,7 kWh/m² (intervalle de confiance à 95 % : [0,6 ; 0,8]) par kWh/m² de surconsommation initiale par rapport à la moyenne.

Par conséquent **dans les deux échantillons, plus la consommation initiale est élevée, plus les économies d'énergie sont importantes en valeur absolue**. Ceci semble logique car comme les actions d'efficacité énergétique menées touchent principalement l'usage chauffage, les économies engendrées dépendent directement des besoins initiaux de chauffage et du rendement du système initial de chauffage. Le chauffage étant le principal poste de consommation d'un logement individuel, une consommation tous usages élevée signifie, à moins d'une situation exceptionnelle, une consommation de chauffage importante et donc des besoins de chauffage conséquents et/ou un rendement du système de chauffage faible.

Cependant, nous pouvons remarquer un effet sur les économies d'énergie beaucoup plus important de la consommation avant travaux pour MDE PACA que pour MDE 52-55, ce qui *a priori* peut paraître contradictoire avec le fait que les consommations de chauffage en PACA sont moindres que celles en 52 et 55, *ceteris paribus*. Nous tâcherons de voir si parmi les autres variables se trouverait l'explication à cette différence d'effet.

3.3.5.4. Changement déclaré de température de chauffage

La variable lié au changement déclaré de température de chauffage suite aux travaux est trouvée significative pour MDE 52-55 et non significative pour MDE PACA.

Pour MDE 52-55, le modèle prédit une élévation de la consommation après travaux de 24,3 kWh/m² (intervalle de confiance à 95 % : [17,3 ; 31,3]) par °C déclaré d'augmentation de la température de chauffage. Ceci revient donc à **une diminution des économies d'énergie de 24,3 kWh/m² par °C déclaré d'augmentation de la température de chauffage**.

Essayons à partir de cette valeur d'estimer le pourcentage des économies d'énergie escomptées non réalisées suite au changement de comportement de chauffage, expression usuelle de l'effet rebond. Pour cela, définissons les économies d'énergie (*EE*) escomptées selon le modèle sans changement de comportement de chauffage :

$$EE_i(T_{i,ap}^{ch,pvie,p} - \widehat{T_{i,av}^{ch,pvie,p}} = 0) = C_{i,av}^{normal,m^2} - C_{i,ap}^{normal,m^2} (T_{i,ap}^{ch,pvie,p} - T_{i,av}^{ch,pvie,p} = 0) \quad (eq.21)$$

avec $EE_i(T_{i,ap}^{ch,pvie,p} - \widehat{T_{i,av}^{ch,pvie,p}} = 0)$: économies d'énergie prédites par le modèle pour le cas i en supposant une situation de non changement déclaré de température de chauffage,

$C_{i,ap}^{normal,m^2} (T_{i,ap}^{ch,pvie,p} - T_{i,av}^{ch,pvie,p} = 0)$: consommation d'énergie après travaux prédite par le modèle pour le cas i en supposant une situation de non changement déclaré de température de chauffage.

Les économies d'énergie prédites par le modèle avec prise en compte de la déclaration concernant le changement de température de chauffage sont directement déduites de la relation suivante :

$$EE_i(T_{i,ap}^{ch,pvie,p} - \widehat{T_{i,av}^{ch,pvie,p}}) = C_{i,av}^{normal,m^2} - C_{i,ap}^{normal,m^2} (T_{i,ap}^{ch,pvie,p} - T_{i,av}^{ch,pvie,p}) \quad (eq.22)$$

avec $EE_i(T_{i,ap}^{ch,pvie,p} - \widehat{T_{i,av}^{ch,pvie,p}})$: économies d'énergie prédites par le modèle pour le cas i en prenant le changement déclaré de température de chauffage,

$C_{i,ap}^{normal,m^2} (T_{i,ap}^{ch,pvie,p} - T_{i,av}^{ch,pvie,p})$: consommation d'énergie après travaux prédite par le modèle pour le cas i en prenant le changement déclaré de température de chauffage.

Nous pourrions utiliser, en lieu et place de ces dernières, les économies d'énergie obtenues directement à partir de l'analyse des enquêtes. C'est cette démarche qui est généralement adoptée au sein de la littérature lors de l'estimation de l'effet rebond par une méthode de comparaison avant et après travaux (effet rebond déduit directement à partir des économies d'énergie théoriquement calculées et mesurées) (HAAS, et al., 2000). Cependant, il nous semble que ceci aurait pour inconvénient d'incorporer dans l'estimation de l'effet rebond l'erreur du modèle statistique et donc entraîner un biais. L'erreur du modèle pouvant être associé à un effet rebond des ménages ne déclarant pas de changement de température mais aussi à un ensemble d'autres facteurs. Dans l'étude citée (HAAS, et al., 2000), il nous semble que la démarche retenue tend à attribuer au changement de comportement la totalité de l'écart entre économies d'énergie mesurées et calculées tandis que comme l'ont montré Sanders et Phillipson (SANDERS, et al., 2006), ce changement n'explique qu'environ un tiers de l'écart.

L'effet rebond est donc estimé à partir de l'équation suivante :

$$Effet_rebond_i = 100 * \left(\frac{EE_i(T_{i,ap}^{ch,pvie,p} - \widehat{T_{i,av}^{ch,pvie,p}} = 0) - EE_i(T_{i,ap}^{ch,pvie,p} - \widehat{T_{i,av}^{ch,pvie,p}})}{EE_i(T_{i,ap}^{ch,pvie,p} - \widehat{T_{i,av}^{ch,pvie,p}} = 0)} \right) \quad (eq.23)$$

avec $Effet - rebond_i$: effet rebond estimé pour le cas i , exprimé en %.

D'après la définition utilisée, nous estimons **la moyenne de l'effet rebond sur l'échantillon MDE 52-55 (ménages ne déclarant pas de changement et ceux en déclarant) de 11,6 %** (intervalle de confiance à 95 % : [8,2 ; 15,0]¹¹⁴). Cette valeur est dans la fourchette basse des ordres de grandeur d'effet rebond direct à long terme pour le chauffage domestique donnés au sein de la littérature pour les pays de l'OCDE (moyenne de 10 % à 30 %) (SORRELL, 2007) (GREENING, et al., 2000). Par contre, elle correspond bien¹¹⁵ à la valeur de 12 % trouvée pour des propriétaires occupants dans le cadre d'une étude auprès de 11 000 ménages allemands (40 % pour des locataires) (MADLENER, et al., 2011).

¹¹⁴ A partir des consommations après travaux prédites par le modèle pour les bornes basse et haute de l'intervalle de confiance du coefficient pour la variable changement déclaré de température de chauffage.

¹¹⁵ Pour rappel, l'échantillon MDE 52-55 est composé uniquement de ménages propriétaires occupants (voir Chapitre 2, sous-partie 2.1.2).

Par ailleurs, elle est inférieure aux 30 % d'effet rebond estimés par une méthode de comparaison avant et après travaux par Haas et al. sur un échantillon de 11 logements collectifs (HAAS, et al., 2000). La différence observée nous semble due au biais méthodologique souligné ci-dessus. Toutefois, **l'estimation faite ici présente des limites puisque basée sur des changements de température déclarés** ainsi nous n'estimons l'effet que pour les ménages déclarant un changement.

Nous observons, pour les 17 % des cas de l'échantillon MDE 52-55 qui déclarent un changement de température de chauffage, un effet rebond moyen de 67,1 % (intervalle de confiance à 95 % : [47,6 ; 86,5]). Celui-ci **se scinde en un effet rebond moyen de 126,4 %¹¹⁶** (intervalle de confiance à 95 % : [89,8 ; 163,1]) **pour les 12 % des cas de l'échantillon qui déclarent avoir augmenté la température de chauffage et un effet rebond moyen de -87,3 %¹¹⁷** (intervalle de confiance à 95 % : [-62,0 ; -112,6]) **pour les 5 % des cas de l'échantillon qui déclarent avoir diminué la température de chauffage.** Par conséquent, lorsque les ménages de l'échantillon déclarent augmenter la température de chauffage après travaux, il est évalué qu'ils ne présentent pas en moyenne d'économies d'énergie et ont même augmenté leurs consommations d'énergie. A l'opposé, les ménages de l'échantillon déclarant une diminution de la température de chauffage suite aux travaux présentent en moyenne des économies d'énergie très supérieures à celles escomptées.

Ces effets importants lorsqu'un changement de température de chauffage est déclaré nous laissent à penser qu'il y a déclaration d'un changement de la part des ménages lorsque celui-ci est conséquent. Ceci semble logique du fait que pour que les ménages ressentent, et non mesurent, le changement, il y a besoin que celui-ci soit marqué.

Par ailleurs, revenons sur la présence de 5 % des cas de l'échantillon déclarant une diminution de la température de chauffage suite aux travaux. Ces cas déclarent des températures intérieures, dans les pièces de vie sur les périodes de présence, pour la période avant travaux entre 21 °C et 25 °C. Ces surchauffes initiales semblent pour la très grande majorité (80 % sur les 5 % précédents) être liées à la présence avant travaux de systèmes principaux de chauffage au bois (poêle ou insert bois ou chaudière bois à bûches). Ces systèmes pour les plus anciens n'ont pas de système fin de régulation, ce qui provoque des fonctionnements de type tout ou rien pouvant se traduire par des surchauffes lors de leur fonctionnement.

L'existence de tels cas est à remarquer car à notre connaissance, elle est que rarement évoquée dans la littérature. L'effet rebond est toujours invoqué au travers d'une augmentation de la demande de confort suite aux travaux. Mais de tels cas montrent la limite de cette seule interprétation. Ces observations sont bien sûr à vérifier sur des tailles d'échantillon plus importantes. Cependant le fait que 5 % des cas de l'échantillon MDE PACA déclarent aussi une diminution de la température de chauffage suite aux travaux dans un contexte tout à fait différent tend à confirmer qu'il ne s'agit pas de cas particuliers isolés.

Toutefois, l'effet du changement déclaré de température de chauffage suite aux travaux n'est pas trouvé significatif par le modèle pour MDE PACA. Mais celui-ci présente plusieurs raisons pour pouvoir être relativement réduit en termes de kWh/m² par °C de variation et donc être « masqué » par les incertitudes liées aux données.

Premièrement, parmi les cas déclarant un changement de température de chauffage, l'isolation thermique du bâti après travaux des MI de l'échantillon MDE PACA est plus fréquente que celle des MI de l'échantillon MDE 52-55. Au sein de ce sous-échantillon MDE PACA, 5,5 % déclarent n'avoir aucune isolation dans les murs extérieurs et aucun cas déclare ne pas avoir d'isolation en toiture tandis que dans le sous-échantillon MDE 52-55, 33 % et 11 % déclarent n'avoir aucune isolation respectivement dans les murs extérieurs et dans la toiture. Les pourcentages de non isolation des autres éléments déperditifs du bâti sont les mêmes dans les deux sous-échantillons (5,5 % déclarent posséder

¹¹⁶ Ces cas en moyenne ne réalisent pas les économies d'énergie prévues mais présentent en plus une élévation de la consommation après travaux représentant 26,4 % des économies d'énergie prévues.

¹¹⁷ Ces cas en moyenne présentent des économies d'énergie supérieures de 87,3 % à celles prévues.

au moins une partie du vitrage en simple vitrage, 50 % déclarent n'avoir isolation dans le plancher bas). Cette isolation thermique plus fréquente, globalement sur le sous-échantillon MDE PACA, entraîne des déperditions thermiques plus faibles ce qui engendre une sensibilité réduite de la consommation du chauffage à la différence entre les températures intérieure et extérieure (*i.e.* aux DJ), d'après la relation approchante suivante :

$$C_{ch}^{m^2} = Cst_0 * \frac{q_0 * DJ_x}{\varepsilon_{ch}} \quad (\text{eq.24})$$

avec $C_{ch}^{m^2}$: consommation énergétique annuelle de chauffage (*ch*) ramenée à 1 m² (m²) de surface habitable (en kWh/m²),

Cst_0 : facteur de conversion (24 h/1000),

q_0 : totalité des déperditions thermiques ramenée à 1 m² de surface habitable (en W/(m².K)),

DJ_x : degrés-jours base *x* (calculés sur la base d'une température de non chauffage de *x* C) annuels, en °C.jour,

ε_{ch} : efficacité globale du système de chauffage.

Deuxièmement, à cette **moindre sensibilité de la consommation de chauffage à la différence entre les températures intérieure et extérieure vient s'ajouter un climat hivernal très clément en PACA** (DJU normaux sur les trois départements étudiés de 1309, 1372 et 1627 °C.jour, voir Tableau 3.1, sous-partie 3.1.3.1). Les deux éléments combinés peuvent **entraîner un faible effet du changement déclaré de température de chauffage sur la consommation d'énergie après travaux pour l'échantillon MDE PACA**.

3.3.5.5. Déclaration de changement dans l'occupation et déclaration de malfaçons

Les deux modèles ne détectent pas de façon significative de différence en termes de consommations après travaux entre des cas sans et avec déclaration de changement dans l'occupation. Il en va de même entre des cas sans et avec déclaration de malfaçons.

Nous rappelons que cela n'indique pas qu'il n'y a pas du tout d'effet de ces variables dans « la réalité » mais que la quantification de celui par le modèle présente trop d'incertitude pour pouvoir être considérée comme significative (une p-value au test t de Student au-dessus de 0,05 engendre la présence de 0 dans l'intervalle de confiance à 95 % autour du coefficient et donc ne garantit pas le signe du coefficient)¹¹⁸.

3.3.5.6. Déclaration de travaux de rénovation énergétique hors opération

Dans le modèle **pour l'échantillon MDE 52-55, la déclaration de travaux de rénovation énergétique en dehors de l'opération (en supplément des actions réalisées via l'opération) présente un effet significatif sur la consommation après travaux tandis que dans le modèle pour MDE PACA son effet est déterminé comme non significatif**.

Plus précisément, dans le modèle pour MDE 52-55, un ménage déclarant avoir effectué des travaux supplémentaires de rénovation énergétique hors opération présente une consommation après travaux moindre de 30,3 kWh/m² (intervalle de confiance à 95 % : [-50,1 ; -10,5]) par rapport à un cas ne déclarant pas de rénovation supplémentaire. Ceci revient à dire que le cas déclarant des travaux supplémentaires réalise des économies d'énergie supérieures de 30,3 kWh/m² à celui ne déclarant pas

¹¹⁸ Une p-value supérieure à 0,05 au test t de Student (hypothèse nulle : « le coefficient vaut 0 ») se traduit par une probabilité de se tromper supérieure à 5 % en supposant que le coefficient ne vaut pas 0. Ceci est exactement identique à une probabilité d'avoir raison inférieure à 95 % en supposant que le coefficient ne vaut pas 0. Par ailleurs, un intervalle de confiance à 95 % peut se définir comme un intervalle permettant d'avoir une probabilité d'avoir raison de 95 % en supposant que la valeur du coefficient est comprise dans celui-ci. Ainsi une p-value supérieure à 0,05 au test t de Student revient donc à avoir 0 dans l'intervalle de confiance à 95 % autour du coefficient.

de travaux supplémentaires. Le fait que la réalisation de rénovations énergétiques supplémentaires engendre des économies d'énergie additionnelles est logique. La question de l'absence de significativité pour cette variable dans le modèle MDE PACA doit être posée.

La différence de significativité entre les deux modèles est certainement due à la nature des travaux supplémentaires. En effet, dans le cadre de l'échantillon MDE 52-55, les travaux des 27 % déclarant des rénovations supplémentaires correspondent pour 36 % à un remplacement du système de production d'ECS, pour 32 % à un remplacement du système de chauffage, pour 25 % à la réalisation d'un mono-lot isolation et pour 7 % à un remplacement du système de chauffage couplé à un mono-lot isolation. En revanche, les travaux des 22 % de l'échantillon MDE PACA déclarant des rénovations supplémentaires se répartissent pour 61 % à un remplacement du système de production d'ECS et pour 39 % à la réalisation d'un mono-lot isolation. Nous pouvons noter dans le cadre d'une comparaison entre les deux sous-échantillons, l'absence pour MDE PACA de travaux hors l'opération sur le système de chauffage et de travaux multi-lots. Ceci pouvant expliquer que l'impact des travaux supplémentaires en termes de kWh/m² économisés soit réduit pour MDE PACA¹¹⁹ et donc puisse être « masqué » par les incertitudes. La douceur du climat hivernal en PACA jouant aussi dans la réduction de l'impact des travaux d'isolation.

Nous pouvons également remarquer que la nature même des actions réalisées via chacune des deux opérations permet d'expliquer la différence de nature des travaux supplémentaires. Dans l'échantillon MDE PACA, la totalité des actions via l'opération correspond à l'installation d'une PAC couplée à la réalisation d'un second lot tandis que l'échantillon MDE 52-55 présente pour 50 % des cas des actions mono-lot ou multi-lots isolation, laissant la place au remplacement du système de chauffage hors l'opération.

Cette variable est la dernière des variables communes aux deux modèles, nous allons maintenant nous intéresser à celles spécifiques à chaque échantillon. Nous commencerons par la plus spécifique des variables restantes à analyser, l'utilisation déclarée de la climatisation après travaux propre à l'échantillon MDE PACA.

3.3.5.7. Utilisation déclarée de la climatisation après travaux

L'utilisation déclarée de la climatisation après travaux dans le modèle pour MDE PACA est considérée comme significative pour deux modalités sur les quatre de la variable (la première étant la référence est prise égale à 0).

Concernant les modalités significatives, des ménages déclarant utiliser la climatisation après travaux de façon importante à une température de moins de 23 °C et de 23 °C et plus présentent des consommations après travaux supérieures, à un cas déclarant ne pas utiliser la climatisation après travaux, respectivement de 40,2 kWh/m² (intervalle de confiance à 95 % : [17,7 ; 62,7]) et de 38,7 kWh/m² (intervalle de confiance à 95 % : [15,4 ; 62,0]). Ceci se traduit par des pertes sur les économies d'énergie par rapport à ce dernier cas, respectivement de 40,2 kWh/m² pour le cas déclarant une utilisation importante de la climatisation après travaux à une température de moins de 23 °C et de 38,7 kWh/m² pour le cas déclarant une utilisation importante de la climatisation après travaux à une température de 23 °C et plus.

A partir de ces résultats, nous pouvons tout de suite noter que **la température déclarée de climatisation après travaux ne semble pas avoir d'effet particulier sur les consommations engendrées par l'utilisation de la climatisation** (la différence entre les deux coefficients est pour sûr non significative)¹²⁰. Il est difficile de connaître l'exactitude de la valeur déclarée et même ce à quoi

¹¹⁹ Selon le CEREN (CEREN, 2009_b), sur l'ensemble du parc de MI en PACA et pour l'année 2006, les consommations liées à la production d'ECS représentent en moyenne par logement 9,8 % des consommations tous usages.

¹²⁰ Un modèle pour l'échantillon MDE PACA pour lequel la variable, utilisation déclarée de la climatisation après travaux, est définie par trois modalités (pas d'utilisation, utilisation faible, utilisation importante) ne tenant

elle correspond exactement (température de consigne ou température intérieure) ainsi l'absence de différence trouvée semble justifiée.

Entre les 45 % et les 24 % de l'échantillon déclarant respectivement ne pas utiliser ou faiblement la climatisation après les travaux, il n'est détecté aucune différence significative sur les économies d'énergie réalisées. Nous pouvons légitimement penser qu'une utilisation faible de la climatisation (1 semaine et moins en cumulé sur la période estivale) engendre des consommations de climatisation peu élevées et donc un effet qui est masqué par les incertitudes.

Par contre, pour les 31 % déclarant une utilisation importante de la climatisation après travaux des pertes significatives sur les économies d'énergie engendrées sont trouvées. Toutefois, en observant les intervalles de confiance à 95 % autour de ces coefficients, nous pouvons remarquer **combien la quantification de l'effet est incertaine** (les intervalles de confiance à 95 % représentent respectivement $\pm 56\%$ et $\pm 60\%$ de la valeur des coefficients). Enfin, nous pouvons remarquer d'une part, que **ces 31 % correspondent tous à une PAC air/air** et d'autre part, **que 84 % de ces derniers sont en situation de développement d'un nouvel usage concernant la climatisation (effet rebond indirect).**

En comparaison, la seule référence de la littérature internationale disposant de données avant et après travaux, pour analyser l'usage de la climatisation lié à l'installation de PAC air/air en MI, ne trouve pas comme significatif l'effet du nombre déclaré de jours de climatisation sur la consommation annuelle électrique après travaux (échantillon de 67 MI danoises, résidences principales équipées avant travaux d'un chauffage principal à effet joule) (GRAM-HANSSSEN, et al., 2012). L'usage modéré déclaré de la climatisation (21 % déclarent utiliser la climatisation et parmi ceux-ci seulement 17 % déclarent l'utiliser 15 jours et plus sur la période estivale), doublé d'un climat estival relativement doux au Danemark¹²¹, entraîne certainement des consommations de climatisation trop faibles pour pouvoir être significatives.

3.3.5.8. Action de l'opération

Nous terminons l'analyse des modèles obtenus avec les variables liées aux actions réalisées via l'opération.

Pour MDE 52-55, la variable en lien avec l'action réalisée via l'opération est significative tandis que pour MDE PACA, les variables concernant la PAC installée et le second lot réalisé via l'opération sont non significatives.

Le modèle MDE 52-55 détermine que des ménages ayant réalisé via l'opération des actions multi-lots chaudière à condensation ou des actions multi-lots PAC présentent des consommations après travaux inférieures respectivement de 36,0 kWh/m² (intervalle de confiance à 95 % : [-65,7 ; -6,3]) et de 59,2 kWh/m² (intervalle de confiance à 95 % : [-82,0 ; -36,4]) à un cas ayant effectué au travers l'opération une action mono-lot isolation. Ceci revient par rapport à ce dernier cas à des économies d'énergie supplémentaires de 36,0 kWh/m² pour des actions multi-lots chaudière à condensation et de 59,2 kWh/m² pour des actions multi-lots PAC. Les différences en termes de consommation après travaux, et donc d'économies d'énergie, entre une action mono-lot isolation et des actions multi-lots isolation et mono-lot PAC sont trouvées non significatives.

plus compte des températures déclarées de climatisation donne des résultats quasi-identiques à celui présenté : R² ajusté = 0,38, RMCE = 36,3 kWh/m², la modalité « utilisation déclarée faible » non significative et la modalité « utilisation déclarée importante » significative (coefficient = 39,5 kWh/m², intervalle de confiance à 95 % = [21,9 ; 57,1], p-value < 0,0001).

¹²¹ Sur la période allant de 1981 à 2010 (METEO CLIMAT), la température moyenne sur le mois juillet (le plus chaud au Danemark) est de 18,2 °C pour Copenhague (Danemark) tandis que pour Aix en Provence (France, région PACA), elle est de 22,9 °C. Sur le même mois, les moyennes des températures minimales et maximales sont respectivement de 14,2 °C et 22,0 °C pour Copenhague et de 15,1 °C et 30,6 °C pour Aix en Provence.

Il est intéressant de noter que dans le cadre de l'analyse statistique descriptive réalisée précédemment (voir sous-partie 3.2.3.3) concernant les moyennes des économies d'énergie obtenues par nature d'action effectuée via l'opération MDE 52-55, nous avons déjà trouvé les mêmes différences significatives (entre mono-lot isolation et d'une part, multi-lots chaudière à condensation et d'autre part, multi-lots PAC) et non significatives (entre mono-lot isolation et d'une part, multi-lots isolation et d'autre part, mono-lot PAC) (voir Tableau 3.10). Par ailleurs, de la même façon que dans l'analyse descriptive, au regard des intervalles de confiance à 95 % autour des coefficients significatives du modèle, nous ne pouvons pas conclure à une différence significative en termes d'économies d'énergie entre des actions multi-lots chaudière à condensation et PAC.

Ainsi le modèle statistique confirme les conclusions tirées de l'analyse descriptive de l'échantillon MDE 52-55 :

- il existe des différences significatives en termes d'économies d'énergie uniquement entre des actions d'isolation du bâti seules (mono-lot ou multi-lots) et des actions d'isolation du bâti couplées à un remplacement du système de chauffage par un système plus performant,
- la différence non significative en termes d'économies d'énergie entre les actions mono-lot (majoritairement renouvellement de l'isolation de la toiture) et multi-lots d'isolation (composées majoritairement d'un couplage renouvellement de l'isolation de la toiture et remplacement dans des proportions importantes de double vitrage ancien) semble aller dans le sens d'un très faible gain énergétique lié au remplacement d'ouvrants.

Enfin, comparons les coefficients déterminés par le modèle avec les différences des moyennes des économies d'énergie obtenues lors de l'analyse statistique descriptive. Nous pouvons observer que les 62 kWh/m² de différence entre les moyennes des économies d'énergie des actions mono-lot isolation (35 kWh/m²) et multi-lots PAC (97 kWh/m²) sont très proches des 59,2 kWh/m² du coefficient lié à la modalité « multi-lots PAC ». Les 46 kWh/m² de différence entre les moyennes des économies d'énergie des actions mono-lot isolation (35 kWh/m²) et multi-lots chaudière à condensation (81 kWh/m²) sont supérieures aux 36,0 kWh/m² du coefficient pour la modalité « multi-lots chaudière à condensation ». Cependant au regard des intervalles de confiance à 95 % autour tant des moyennes (mono-lot isolation : [20 ; 50], multi-lots chaudière à condensation : [53 ; 110]) que du coefficient ([-65,7 ; -6,3]), la différence paraît être faible.

Dans le modèle sur MDE PACA, aucune des deux variables liées aux actions réalisées via l'opération n'est trouvée significative. La non significativité de ces variables indiquent que le modèle ne trouve pas de différence significative en termes d'économies d'énergie, *ceteris paribus*, entre d'une part, les installations d'une PAC air/air et d'une PAC air/eau et d'autre part, entre une isolation de la toiture et l'installation d'un CESI. L'analyse statistique descriptive faite auparavant (voir sous-partie 3.2.3.4) avait également mise en avant l'absence de différence significative entre les deux seconds lots mais par contre, elle avait déterminée comme significative la différence entre les types de PAC installée (plus d'économies d'énergie engendrées par une PAC air/eau que par une PAC air/air). Essayons de voir si cette différence observée est prise en charge par le modèle au travers des deux variables significatives du modèle.

Premièrement, comme nous l'avons montré ci-dessus, la totalité des cas déclarant une utilisation importante de la climatisation après travaux correspond à la mise en place d'une PAC air/air. Par ailleurs, comme le montre le Tableau 3.26, les consommations avant travaux des cas ayant installé une PAC air/eau sont significativement supérieures à celles des cas ayant installé une PAC air/air. Ceci pouvant se justifier par des proportions de MI construite avant 1974 et de système principal de chauffage non électrique (chaudière combustible hors bois et poêle ou insert bois) plus importantes parmi les cas avec PAC air/eau (50 % de MI d'avant 1974 et 83 % de système non électrique) que parmi les cas avec PAC air/air (14 % de MI d'avant 1974 et 16 % de système non électrique). Du point de vue technique, il apparaît logique qu'une PAC air/eau remplace plutôt des systèmes de chauffage avec réseau hydraulique.

Tableau 3.26 Moyennes des consommations avant travaux suivant le type de PAC installée et leur intervalle de confiance à 95 % pour l'échantillon MDE PACA

$C_{i,av}^{normal,m^2}$ (en kWh/m ²)	Type de PAC installée	
	PAC air/eau	PAC air/air
Moyenne	244,4	162,5
Intervalle de confiance à 95% ¹²²	[182,4 ; 306,4]	[145,2 ; 179,8]
P-value au test de Mann-Whitney entre les deux sous-échantillons : 0,007		

Ainsi, le modèle statistique sur MDE PACA trouve que la différence d'économies d'énergie obtenues entre les installations d'une PAC air/eau et d'une PAC air/air n'est pas propre au type de machine mais plutôt d'une part à des consommations avant travaux des ménages s'équipant d'une PAC air/eau supérieures à ceux s'équipant d'une PAC air/air, traduisant des caractéristiques techniques différentes des MI, et d'autre part, à des déclarations d'une moindre utilisation de la climatisation après travaux dans le cas de PAC air/eau que de PAC air/air.

Le fait que la variable liée à la consommation avant travaux prenne en charge une partie de la différence des économies d'énergie entre les installations d'une PAC air/eau et d'une PAC air/air explique certainement pour une grande partie l'importance de l'effet de la consommation avant travaux trouvé par le modèle (voir ci-dessus pour l'analyse de cette variable).

3.4. Conclusions

Après avoir présenté dans le chapitre précédent les deux échantillons étudiés, MDE 52-55 et MDE PACA, nous nous sommes intéressés à l'évaluation *ex-post* des actions de rénovation énergétique réalisées, au travers des opérations MDE, par ces ménages. Nous avons pu déterminer les économies d'énergie obtenues par chacun d'entre eux. Un calcul des incertitudes liées aux économies estimées a été réalisé sous la forme d'une étude de sensibilité sur la base de trois *scenarii* d'incertitudes (un scénario « réaliste » encadré par un scénario « pessimiste » et un scénario « optimiste »).

Ainsi, nous avons observé que quel que soit le scénario d'incertitudes, les économies d'énergie robustes et positives (réduction de la consommation suite aux travaux) constituent la grande majorité des deux échantillons (*a minima*, pour le scénario « pessimiste » : 73 % de l'échantillon MDE 52-55 et 78 % de l'échantillon MDE PACA). La part des économies d'énergie robustes et négatives (augmentation de la consommation suite aux travaux) est elle trouvée variable pour l'échantillon MDE 52-55, allant de 12 % (scénario « optimiste ») à 7 % (scénario « pessimiste ») et pour l'échantillon MDE PACA de 13 % (scénario « optimiste ») à 4 % (scénario « pessimiste »). Bien qu'il y ait un certain nombre de cas parmi les deux échantillons présentant des augmentations après travaux de la consommation énergétique annuelle sûres, une certaine proportion des économies d'énergie négatives observées semble être non robuste (économies d'énergie non différentes de zéro de façon significative).

Ensuite, nous avons détaillé la nature des actions effectuées via les opérations dans chacun des échantillons, tout en rappelant que les échantillons ne sont pas représentatifs de l'ensemble des actions réalisées au sein des opérations, car construits à dessein, ni des travaux d'efficacité énergétique accomplis par les ménages français. L'action la plus fréquente au sein de l'échantillon MDE 52-55 est le mono-lot isolation (40 % de l'échantillon). Cette dernière se compose majoritairement de situation de renouvellement de l'isolation de la toiture (64 % des cas avec une action mono-lot isolation). Viennent ensuite dans des proportions de l'échantillon plus modestes (entre 8 % et 16 %), les actions multi-lots PAC (majoritairement installation d'une PAC air/eau couplée à une isolation de la toiture) et mono-lot PAC (majoritairement installation d'une PAC air/air) ainsi que les actions multi-lots

¹²² Ceux-ci sont calculés sur la base d'une loi de probabilité normale en raison de l'impossibilité de connaître précisément la loi de probabilité (nombre de cas trop faible) notamment du sous-échantillon, PAC air/eau installée (12 cas).

isolation (majoritairement renouvellement de l'isolation de la toiture couplée à un remplacement dans des proportions importantes de double vitrage ancien) et multi-lots chaudière à condensation (couplée de façon à peu près identique entre une installation d'un CESI et une isolation de la toiture).

L'échantillon MDE PACA présente uniquement des actions de type multi-lots PAC qui correspondent majoritairement (66 % de l'échantillon) à l'installation d'une PAC air/air couplée à une isolation de la toiture (88 % de renouvellement de l'isolation). Avec respectivement 14 % et 11 % de l'échantillon l'installation d'une PAC air/eau couplée à un second lot (répartition identique entre une installation d'un CESI et une isolation de la toiture) et l'installation d'une PAC air/air couplée à l'installation d'une CESI apparaissent en retrait.

Dans le cadre d'une analyse statistique descriptive, nous avons étudié les moyennes des économies d'énergie engendrées par ces différentes natures d'actions et leur intervalle de confiance à 95 %. Pour MDE 52-55, cela nous a permis de vérifier que les valeurs d'économies d'énergie trouvées pour une action d'isolation de la toiture étaient cohérentes avec celles obtenues par le CEREN dans l'une des rares études françaises, avec des données issues d'une analyse *ex-post* avant et après travaux, concernant l'effet de l'isolation du bâti sur les consommations de chauffage des logements construits avant 1975 (CEREN, 2008).

Par ailleurs, l'analyse sur MDE 52-55 a également mis en avant qu'il n'existe des différences significatives en termes d'économies d'énergie uniquement qu'entre des actions d'isolation du bâti seules (mono-lot ou multi-lots) et des actions d'isolation du bâti couplées à un remplacement du système de chauffage par un système plus performant (PAC ou chaudière à condensation). Ces dernières engendrant plus d'économies que les premières. Le seul remplacement du système de chauffage (majoritairement remplacé par une PAC air/air) fournit, dans le cadre de cet échantillon, un niveau d'économies d'énergie très incertain.

L'absence d'une différence significative entre les économies d'énergie engendrées par une isolation de la toiture (mono-lot isolation) et une isolation de la toiture couplée à un remplacement d'ouvrants (multi-lots isolation) nous semble aller dans le sens d'un gain énergétique lié au remplacement d'ouvrants difficile à mettre en évidence.

Pour l'analyse statistique descriptive de l'échantillon MDE PACA, la seule différence significative trouvée en termes d'économies d'énergie concerne le type de PAC installée : les PAC air/eau entraînent plus d'économies que les PAC air/air. La nature du second lot effectué ne semble pas provoquer de différence significative, du moins entre des travaux d'isolation de la toiture et l'installation d'un CESI.

L'analyse descriptive des résultats a été conclue par une étude de la dispersion des économies d'énergie obtenues pour une même action réalisée. Cette étude apparaissant importante notamment dans la situation d'une opération d'efficacité énergétique sous-tendue par une logique de reproduction des actions. Pour les deux échantillons, les dispersions en termes d'économies d'énergie peuvent être très différentes d'une action à l'autre. Toutefois, les valeurs minimums de coefficient de variation obtenues pour chacun des deux échantillons (pour MDE 52-55 et multi-lots chaudière à condensation, $Cv = 57\%$ et pour MDE PACA et PAC air/eau + 2nd lot, $Cv = 66\%$) indiquent **des hétérogénéités importantes et donc une estimation des économies d'énergie difficile en l'absence de l'explication de ces hétérogénéités.**

Pour cela, au travers d'un modèle statistique pour chacun des échantillons, nous avons cherché à expliquer la consommation après travaux à partir de la consommation avant travaux, des actions réalisées et de l'ensemble des changements ayant pu intervenir entre les périodes avant et après travaux. La modélisation statistique ayant pour but de détecter, *ceteris paribus*, les facteurs explicatifs des différences d'économies d'énergie obtenues et par conséquent, les différences observées entre cas pour une même action réalisée via l'opération.

Le modèle obtenu pour l'échantillon MDE 52-55 présente des qualités d'explication et de prédiction plutôt bonnes (R^2 ajusté = 0,82 et $Cv_{RMCE} = 21\%$) tandis que celles du modèle pour

MDE PACA sont plutôt faibles (R^2 ajusté = 0,37 et $Cv_{RMCE} = 31\%$). Toutefois les deux modèles vérifient les principales hypothèses liées à une régression linéaire multiple et ont une signification globale élevée, indiquant que les variables explicatives retenues par les modèles apportent une quantité d'information significative.

Dans les deux modèles, il a tout d'abord été trouvé que pour une même action réalisée via l'opération, la consommation d'énergie avant travaux a un effet significatif sur les économies d'énergie obtenues : **plus la consommation avant travaux est élevée, plus les économies d'énergie sont importantes.**

S'agissant plus particulièrement du **modèle pour MDE 52-55, il a permis de confirmer les conclusions tirées à partir de l'analyse statistique descriptive** quant aux effets des différentes actions réalisées au travers l'opération. Il a également **mis en avant un apport significatif d'économies d'énergie lié à la réalisation, en dehors de l'opération, de travaux supplémentaires de rénovation énergétique.** L'échantillon MDE 52-55 présente pour 50 % des cas des actions mono-lot ou multi-lots isolation effectuées via l'opération ce qui laisse la place, pour une partie des cas, à la réalisation hors opération du remplacement du système de chauffage seul ou associé à un autre lot d'isolation (39 % des cas ayant réalisé des travaux supplémentaires).

Le modèle a permis de démontrer un effet significatif sur les économies d'énergie d'un changement déclaré de température de chauffage suite aux travaux (une diminution des économies d'énergie par °C déclaré d'augmentation). A partir de celui-ci, il a été estimé sur la totalité de l'échantillon **un effet rebond moyen de 11,6 %** (part des économies non réalisées parmi les économies escomptées). Cette valeur fait partie de la fourchette basse des ordres de grandeur d'effet rebond direct pour le chauffage domestique donnés au sein de la littérature internationale (moyenne de 10 % à 30 %) (SORRELL, 2007). En effet, les estimations de l'effet rebond par une méthode de comparaison avant et après travaux présentes dans la littérature semblent maximiser celui-ci (attribution au changement de comportement la totalité de l'écart entre économies d'énergie mesurées et calculées). Toutefois, **l'estimation faite présente des limites puisque basée sur des changements de température déclarés** ainsi nous n'avons estimé l'effet que pour les ménages déclarant un changement.

Nous avons pu estimer que les 12 % de l'échantillon MDE 52-55 déclarant augmenter la température de chauffage après travaux ne présentent pas en moyenne d'économies d'énergie et ont même augmenté leurs consommations d'énergie. A l'opposé, les ménages de l'échantillon (5 %) déclarant une diminution de la température de chauffage suite aux travaux présentent en moyenne des économies d'énergie très supérieures à celles escomptées.

De plus, nous avons pu remarquer que la grande majorité de ces derniers cas (80 % de ces 5 % de l'échantillon) correspond à des surchauffes avant travaux (entre 21 °C et 25 °C dans les pièces de vie en période de présence) liées à un système principal de chauffage au bois (poêle ou insert bois ou chaudière bois à bûches). L'existence de tels cas est à remarquer car à notre connaissance, elle n'est que rarement évoquée dans la littérature où l'effet rebond est toujours invoqué au travers une augmentation de la demande de confort suite aux travaux.

Concernant MDE PACA, si respectivement 73 % et 15 % de l'échantillon ont installé ou rénové la climatisation via l'opération, le modèle statistique a trouvé que seuls les 31 % de l'échantillon déclarant utiliser de façon importante la climatisation après travaux (de 2 semaines à 1 mois et plus en cumulé sur la période estivale) présentent un effet significatif de réduction des économies d'énergie. Toutefois la quantification de cet effet, correspondant tous à l'installation d'une PAC air/air, est très incertaine. Le modèle n'a pas déterminé de différence significative en termes d'économies d'énergie entre la déclaration d'une non utilisation de la climatisation après travaux (45 % de l'échantillon) et la déclaration d'une utilisation faible (24 % de l'échantillon, 1 semaine et moins en cumulé sur la période estivale).

Enfin, la différence d'économies d'énergie obtenues entre les installations d'une PAC air/eau et d'une PAC air/air, soulignée lors de l'analyse statistique descriptive, a été déterminée par le modèle comme non propre au type de machine. Celui-ci impute pour partie cette différence à des consommations avant travaux des MI s'équipant d'une PAC air/eau supérieures à celles des MI s'équipant d'une PAC air/air. Ceci traduit des caractéristiques techniques différentes pour ces MI (des proportions de MI construite avant 1974 et de système principal de chauffage non électrique plus importantes parmi les cas avec PAC air/eau que parmi les cas avec PAC air/air). L'autre partie de la différence est prise en charge dans le modèle par des déclarations d'une moindre utilisation de la climatisation après travaux dans le cas de PAC air/eau que de PAC air/air.

Par contre, l'absence de différence significative en termes d'économies d'énergie entre des seconds lots, travaux d'isolation de la toiture et installation d'un CESI, a été confirmée.

Bibliographie

ADEME Les chiffres clés du bâtiment Energies-Environnement [Rapport] / Centre de Sophia Antipolis. - Valbonne (06) : [s.n.], 2011. - p. 97.

AFNOR Calcul des économies d'énergie et de l'efficacité énergétique - Méthode descendante (top-down) et ascendante (bottom-up). - [s.l.] : Agence Française de Normalisation (AFNOR), 2012. - NF EN 16212.

ARRETE 17 OCTOBRE Arrêté du 17 octobre 2012 modifiant la méthode de calcul 3CL-DPE introduite par l'arrêté du 9 novembre 2006 portant approbation de diverses méthodes de calcul pour le diagnostic de performance énergétique en France métropolitaine [Revue] // Journal officiel de la République française. - 10 novembre 2012. - 0262. - p. 17780. - texte n°9.

ARRETE 8 FEVRIER Arrêté du 8 février 2012 modifiant l'arrêté du 15 septembre 2006 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants proposés à la vente en France métropolitaine [Revue] // Journal officiel de la République française. - 15 mars 2012. - 0064. - p. 4710. - texte n° 6.

BROC J-S L'évaluation ex-post des opérations locales de maîtrise de la demande en énergie - Etat de l'art, méthodes *bottom-up*, exemples appliqués et approche du développement d'une culture pratique de l'évaluation [Rapport] : Thèse de doctorat / MINES ParisTech. - 2006.

BROWN M B et FORSYTHE A B Robust tests for the equality of variances [Revue] // Journal of the American Statistical Association. - 1974. - 69. - pp. 364-367.

CEREN Consommation moyenne d'énergie régionale par usage. Exploitation particulière de l'Enquête Logement 2006 [Rapport]. - 2009_b. - Etude 8107.

CEREN Consommations d'énergie en 2011 des maisons existantes équipées de pompe à chaleur [Rapport]. - 2013. - Étude 2106.

CEREN Effets de l'isolation du bâti et de la rénovation de l'installation de chauffage sur les consommations d'énergie dans les logements construits avant 1975 [Rapport]. - 2008. - Etude 7152.

CEREN Les consommations liées à la production de froid dans les secteurs résidentiel, tertiaire, industriel et agricole [Rapport]. - 2004. - Etude 4550.

CEREN Secteur résidentiel - Suivi du parc et des consommations d'énergie - Consommations en 2008 [Rapport]. - 2009_a. - Etude 9102.

DAY A R, MAIDMENT G R et RATCLIFFE M S Cooling degree-days and their applicability to building energy estimation [Conférence] // The Chartered Institution of Building Services Engineers Conference. - Dublin (Ireland) : [s.n.], 2000.

DAY A R. An investigation into the estimation and weather normalisation of energy consumption in buildings using degree-days [Rapport] : PhD Thesis / South Bank University. - London : [s.n.], 1999.

DAY A R. Cooling energy consumption and temperature [Conférence] // Market Transformation Programme Seminar. - 2004.

EVO Protocole International de Mesure et de Vérification de la Performance énergétique - Concepts et options pour l'évaluation des économies d'énergie et d'eau - Volume 1 [Rapport] = EVO 10000 - 1:2009 (Fr). - 2009.

FISHER W D On grouping for maximum homogeneity [Revue] // Journal of the American Statistical Association. - 1958. - 53. - pp. 789-798.

GRAM-HANSSSEN K, CHRISTENSEN T H et PETERSEN P E Air-to-air heat pumps in real-life use: Are potential savings achieved or are they transformed into increased comfort? [Revue] // Energy and Buildings. - 2012. - 53. - pp. 64-73.

GREENING L A, GREENE D L et DIFIGLIO C Energy efficiency and consumption - the rebound effect - a survey [Revue] // Energy Policy. - 2000. - 28. - pp. 389-401.

HAAS R et BIERMAYR P The rebound effect for space heating. Empirical evidence from Austria [Revue] // Energy Policy. - 2000. - 28. - pp. 403-410.

HERRING H Energy efficiency - a critical view [Revue] // Energy. - 2006. - 31. - pp. 10-20.

HONG S H, ORESZCZYN T, RIDLAY I, THE WARM FRONT STUDY GROUP The impact of energy efficient refurbishment on the space heating fuel consumption in English dwellings [Revue] // Energy and Buildings. - 2006. - 38. - pp. 1171-1181.

JCGM/WG1 Evaluation des données de mesure - Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure [Rapport] = JCGM 100:2008 (F). - 2008.

JORET L et PROST A Vitrage à isolation thermique renforcée. - [s.l.]: Techniques de l'Ingénieur, 1999. - Référence C3635.

LEVENE H In contributions to probability and statistics: essays in honor of Harold Hotelling, I. Olkin et al. [Livre] / éd. Press Stanford University. - 1960.

MADLENER R et HAUERTMANN M Rebound effects in German residential heating: do ownership and income matter? [Rapport]: Working paper / Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior. - 2011.

METEO CLIMAT [En ligne]. - <http://meteo-climat-bzh.dyndns.org/listenormale-1981-2010-1-p67.php>.

SANDERS C et PHILLIPSON M Review of differences between measured and theoretical energy savings for insulation measures [Rapport] / Centre for Research on Indoor Climate and Health; Glasgow Caledonian University. - 2006.

SAPORTA G Probabilités, analyse des données et statistique [Livre]. - [s.l.]: Technip, 2006. - Seconde édition.

SORRELL S et DIMITROPOULOS J The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions [Revue] // Ecological Economics. - 2008. - 65. - pp. 636-649.

SORRELL S The Rebound Effect: an assessment of evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency [Rapport] / Technology and Policy Assessment function; UK Energy Research Centre. - 2007. - ISBN 1-903144-0-35.

SUERKEMPER F, THOMAS S, OSSO D et BAUDRY P Cost-effectiveness of energy efficiency programmes-evaluating the impacts of a regional programme in France [Revue] // Energy Efficiency. - 2012. - 5. - pp. 121-135.

TECMARKET WORKS, et al. The California Evaluation Framework [Rapport]. - 2004. - Last Revision: January 2006.

TNS SOFRES Enquête sur la motivation des propriétaires à entreprendre des travaux d'économies d'énergie [Rapport]: Etude pour le compte de l'association Cap Consommateurs Habitants. - 2009.

TNS SOFRES Maîtrise de l'énergie - Bilan 2011 - Phase 2 [Rapport]: Note de synthèse. - 2012.

TRIBU ENERGIE Etude RT2005 d'impact du couple (Ujn/Sw) des fenêtres [Rapport]: Etude pour l'Union des Fabricants de Menuiseries Extérieures. - 2008. - Aff: ET-7/122.

**Chapitre 4. Analyses statistiques
des écarts
entre évaluations *ex-ante* et *ex-post***

Table des matières

Introduction.....	111
4.1. Echantillons étudiés, modèle de calcul ex-ante utilisé et résultats ex-post exploités....	111
4.1.1. Echantillons étudiés	111
4.1.1.1. Echantillon avant travaux	111
4.1.1.2. Echantillon après travaux	112
4.1.2. Modèle de calcul <i>ex-ante</i> utilisé.....	112
4.1.2.1. Présentation générale.....	112
4.1.2.2. Calcul du coefficient G de déperdition volumique du bâtiment.....	113
4.1.2.3. Prise en compte des systèmes de chauffage, de production d'ECS et de climatisation	117
4.1.2.4. Prise en compte des comportements des ménages	119
4.1.2.5. Prise en compte des équipements liés aux autres usages.....	120
4.1.2.6. Données de localisation.....	122
4.1.2.7. Période de simulation	122
4.1.2.8. Choix importants pour la simulation des situations après travaux	122
4.1.2.9. Résultats de simulation et corrections climatiques.....	123
4.1.3. Résultats <i>ex-post</i> exploités.....	124
4.2. Quantification des écarts.....	124
4.2.1. Écarts sur les consommations en situation avant travaux	125
4.2.2. Écarts sur les consommations en situation après travaux	128
4.2.3. Écarts sur les économies d'énergie	131
4.3. Modélisation statistique des écarts.....	134
4.3.1. Détection par modélisation statistique des sources d'écart entre consommations calculées et observées : revue de la littérature.....	135
4.3.2. Modélisation des écarts de consommations avant travaux	136
4.3.2.1. Echantillon étudié.....	137
4.3.2.2. Méthode statistique.....	137
4.3.2.3. Variables explicatives.....	139
4.3.2.4. Résultats	146
4.3.2.5. Discussions.....	148
4.3.3. Modélisation des écarts de consommations après travaux.....	156
4.3.3.1. Echantillon étudié.....	156
4.3.3.2. Méthode statistique.....	157
4.3.3.3. Variables explicatives.....	157
4.3.3.4. Résultats	161
4.3.3.5. Discussions.....	163
4.4. Conclusions.....	166
Bibliographie.....	170

Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'identifier, à partir d'analyses statistiques, l'origine des écarts entre des évaluations *ex-ante* et *ex-post*. Ce travail se concentrera sur l'évaluation de l'efficacité d'actions de rénovation énergétique en MI.

Dans un premier temps, nous précisons les échantillons étudiés et présenterons le modèle de calcul *ex-ante* utilisé et les données *ex-post* exploitées. Puis nous réaliserons une quantification des écarts entre consommations d'énergie simulées (*ex-ante*) et observées (*ex-post*) aussi bien en situation avant travaux qu'après travaux. Ainsi, nous étudierons l'évolution des écarts entre les situations avant et après travaux. Nous nous intéresserons également aux écarts en termes d'économies d'énergie.

Ensuite, par le biais d'une modélisation statistique, nous tâcherons de détecter les facteurs techniques et les facteurs comportementaux permettant d'expliquer les écarts entre consommations simulées et observées en situation avant travaux (erreur initiale). Une modélisation statistique des écarts entre consommations simulées et observées en situation après travaux sera également réalisée. Elle se proposera d'étudier d'une part, l'influence de l'écart initial (avant travaux) et d'autre part, les effets des changements intervenus entre les périodes avant et après travaux (*e.g.* action d'efficacité énergétique mise en place ou changement de comportement du ménage).

4.1. Echantillons étudiés, modèle de calcul *ex-ante* utilisé et résultats *ex-post* exploités

4.1.1. Echantillons étudiés

Comme expliqué dans le Chapitre 2, ce travail s'appuie sur des données provenant d'enquêtes réalisées auprès de ménages ayant participé à deux différentes opérations de MDE (MDE 52-55 ou MDE PACA).

L'échantillon MDE PACA contient un certain nombre de cas d'utilisation de la climatisation (12 % de l'échantillon avant travaux et 55 % de l'échantillon après travaux). De plus, pour les 31 % des ménages de l'échantillon déclarant un usage important de la climatisation après travaux, il a été trouvé un impact significatif à la hausse de cet usage sur les consommations après travaux (voir Chapitre 3, sous-partie 4.3.5.7). En raison de ces caractéristiques, il ne nous semble pas opportun d'étudier les écarts entre consommations simulées et observées pour l'échantillon MDE PACA tant l'évaluation *ex-ante* des consommations liées à la climatisation risque d'être erronée. D'une part, la prise en compte des systèmes de climatisation par le modèle de calcul *ex-ante* utilisé est rudimentaire, comme nous le verrons dans les paragraphes à venir, et d'autre part, une partie des éléments issus des enquêtes de définition de ces systèmes et de leur utilisation (surface traitée et température de climatisation) est entachée d'incertitudes certainement non négligeables. Une méthode aussi répandue en France que la méthode 3CL-DPE (ARRETE 17 OCTOBRE, 2012) estime la consommation liée à climatisation de façon encore plus simpliste (définition à partir de la surface climatisée et de la zone climatique RT d'été) que le modèle ici utilisé ainsi il ne s'agit pas d'un problème inhérent à ce seul modèle.

Pour ces raisons, seulement des échantillons MDE 52-55 seront traités dans ce chapitre.

4.1.1.1. Echantillon avant travaux

L'échantillon MDE 52-55 utilisé pour l'étude des écarts en situation avant travaux est composé des 119 cas présentant des données exploitables à la fois pour leurs situations avant et après travaux et des

135 cas disposant de données exploitables seulement pour leur situation avant travaux¹²³ (voir Chapitre 2, sous-partie 2.1.3). Nous ne consacrerons pas dans ce chapitre un paragraphe dédié à la description des caractéristiques de ces 135 cas sachant que celles-ci sont très proches de celles pour la situation avant travaux des 119 cas « avant et après travaux » (voir Chapitre 2, sous-partie 2.1.4).

4.1.1.2. Echantillon après travaux

Seuls les 119 cas utilisables pour leurs situations avant et après travaux sont pris en compte pour l'étude des écarts en situation après travaux. Comme nous souhaitons analyser l'évolution des écarts des situations avant à après travaux, il est essentiel de disposer de l'avant travaux.

4.1.2. Modèle de calcul *ex-ante* utilisé

4.1.2.1. Présentation générale

L'évaluation *ex-ante* des différents cas étudiés a été réalisée à l'aide du modèle de calcul SimFast (DEQUE, et al., 1999) entrant dans la catégorie dit « d'ingénieur » (SWAN, et al., 2009). Ce dernier est un modèle thermique dynamique (pas de temps horaire) monozone développé par EDF-R&D. Il est une réduction¹²⁴ d'un modèle physique plus complexe, CLIM 2000 (BONNEAU, et al., 1993). La modélisation résultante, appelée « par boîte grise » (DEQUE, et al., 2000), permet de minimiser à la fois le nombre de paramètres à entrer et le nombre d'équations requises pour représenter les phénomènes thermiques. Par contre, elle nécessite de définir un modèle « boîte grise » par typologie de bâtiment (*e.g.* MI indépendante).

Dans le cadre d'un suivi expérimental d'une MI indépendante localisée en région parisienne, la modélisation par boîtes grises a été validée entraînant des écarts de moins de 4 % en termes de consommation d'énergie annuelle par rapport au modèle physique CLIM 2000 tandis que ce dernier présente lui-même des écarts de 5 % par rapport aux consommations mesurées (DEQUE, et al., 2000).

SimFast compose le cœur de calcul d'un certain nombre d'outils d'appui à des offres commerciales de rénovation d'EDF envers ses clients particuliers. Par conséquent, c'est un outil qui présente une forte utilisation, ce qui renforce l'intérêt de son usage dans le cadre de ce travail.

SimFast permet le calcul de la consommation d'énergie (énergie finale PCI) tous usages (chauffage, production d'ECS, cuisson et électricité spécifique) pour un logement individuel ou collectif. Ce calcul est effectué à partir des données météo réelles (données disponibles, dans la version utilisée, entre le 01/01/2003 et le 08/02/2011) tri-horaires¹²⁵ de la station météo la plus proche.

Ayant un grand nombre de cas à simuler, nous utilisons un outil (Diag Serie), basé sur le cœur de calcul de SimFast, qui permet de lancer automatiquement en série plusieurs simulations. Les résultats sont regroupés dans un fichier Excel contenant les consommations d'électricité et des autres énergies par usage et tous usages. Le fichier d'entrée est un fichier Excel où chaque ligne correspond à un cas à simuler et chaque colonne à un paramètre d'entrée. 115 paramètres peuvent être décrits par le fichier (voir Annexe 3 pour la liste complète), tous ne sont pas à renseigner afin de pouvoir réaliser une simulation. En effet, un certain nombre de paramètres correspond à des niveaux de saisie plus ou moins détaillés d'une même information d'entrée (*e.g.* la surface vitrée du logement peut être renseignée soit par un paramètre à trois niveaux, peu de vitrage, normal et grande baie vitrée, soit par quatre paramètres correspondant à la déclaration des surfaces des ouvrants sur les quatre points cardinaux).

¹²³ Cas pour lesquels est disponible durant la période avant travaux au moins une année complète de consommation d'énergie sans perturbation (réalisation de travaux hors de l'opération).

¹²⁴ Réduction selon la méthode de Moore (MOORE, 1981).

¹²⁵ Une température moyenne fournie toutes les trois heures.

Le niveau de complexité des paramètres d'entrée du logiciel est en rapport avec le niveau des informations qu'il a été possible de récupérer grâce aux enquêtes téléphoniques. Ce point justifie l'usage de SimFast plutôt que celui d'un modèle de simulation plus sophistiqué (e.g. : TRNSYS, EnergyPlus...) pour lesquels les paramètres d'entrée sont beaucoup trop complexes et nombreux pour être obtenus à partir d'une enquête téléphonique. De plus, de tels modèles de simulation sont généralement utilisés pour réaliser les évaluations de rénovations plus importantes et plus complexes que les actions d'efficacité énergétique effectuées par les ménages des échantillons MDE 52-55 (en très grande majorité, un mono-lot isolation et de manière moindre, des multi-lots couplant une action d'isolation et l'installation d'un système de chauffage performant mais restant « courant » par rapport au marché¹²⁶, une chaudière à condensation, une PAC air/air ou une PAC air/eau, voir Chapitre 3, sous-partie 4.2.3.1).

Nous n'utiliserons pas la méthode de calcul pour la RT Existant globale (ARRETE 13 JUIN, 2008) (méthode de calcul Th-C-E ex) (ARRETE 08 AOUT, 2008) car elle ne doit être utilisée que pour des bâtiments ayant une surface de plus de 1000 m², ce qui n'est pas le cas des logements de l'échantillon étudié (voir Figure 2.4, Chapitre 2, sous-partie 2.1.4.5). De plus, celle-ci se base sur des données conventionnelles d'occupation et de comportement, ce qui engendre obligatoirement un biais dans la comparaison des consommations calculées avec des consommations observées issues d'occupations et d'usages réels. C'est pour cette même raison, entre autres, que nous n'utiliserons pas non plus la méthode de calcul 3CL-DPE (ARRETE 17 OCTOBRE, 2012).

Nous ne décrivons pas avec précision la modélisation faite par SimFast car cela serait fastidieux (le dossier de modélisation fait 133 pages) et trop riche en détail par rapport au sujet qui nous concerne. Nous allons plutôt essayer de porter à la connaissance du lecteur les grands principes du calcul tout en les mettant en relation avec les choix quant à la saisie des paramètres d'entrée. Les échantillons utilisés ne comportant que des MI, nous ne présenterons que les entrées pour ce type de logement.

4.1.2.2. Calcul du coefficient G de déperdition volumique du bâtiment

SimFast est basé sur l'utilisation d'un coefficient G (en $W/(m^3 \cdot ^\circ C)$) de déperdition volumique du bâtiment (voir eq.25) pour déterminer les caractéristiques thermiques de l'enveloppe du logement. Cette grandeur peut soit directement être spécifiée dans le fichier d'entrée, soit elle fait l'objet de calculs au sein du logiciel.

$$G = \frac{\text{Déperdition} + \text{Renouvellement d'air} + \text{Ponts thermiques}}{\text{Volume chauffé}} \quad (\text{eq.25})$$

avec : *Déperdition* en $W/^\circ C$ (calculer comme la somme des déperditions par les ouvrants, les murs, le plancher bas et la toiture),
Renouvellement d'air en $W/^\circ C$ ($0,34 * \text{Volume chauffé} * \text{Taux de renouvellement d'air}$),
Ponts thermiques en $W/^\circ C$ (sont prises en compte les liaisons mur/plancher bas et mur/plancher intermédiaire),
Volume chauffé en m^3 ($\text{Surface habitable} * \text{Hauteur sous-plafond moyenne}$).

Le calcul des déperditions nécessite la connaissance des surfaces déperditives et des déperditions surfaciques des différents éléments du bâti. Les surfaces déperditives sont estimées par le logiciel via des relations à partir des paramètres suivants :

- surface habitable (en m²),
- hauteur sous-plafond moyenne (en m),

¹²⁶ Selon l'Observatoire Permanent de l'amélioration ENergétique du logement (OPEN), il est estimé qu'en 2011, 34 % des travaux de rénovation de l'installation de chauffage réalisés par les ménages français dans leurs logements correspondaient à l'installation d'une PAC, d'une chaudière à condensation ou d'une chaudière bois associée à du solaire thermique (ADEME, 2012). Toutefois, les travaux de rénovation de l'installation de chauffage n'ont représenté en 2011 que 9 % du marché des travaux d'entretien et d'amélioration effectués par les ménages dans leurs logements (ADEME, 2012).

- forme de la maison (rectangle, en U ou en L),
- mitoyenneté (oui ou non),
- indicateur d'un garage accolé (oui ou non),
- indicateur d'une véranda (oui ou non),
- indicateur d'au moins un étage (oui ou non),
- indicateur de combles aménagés (oui ou non),
- surface vitrée de la maison (peu de vitrage, normal ou grande baie vitrée),
- orientation globale des ouvrants (+ des $\frac{3}{4}$ au sud, + des $\frac{3}{4}$ au nord, environ les $\frac{3}{4}$ au sud, environ les $\frac{3}{4}$ au nord, la moitié au sud, la moitié au nord ou autant au nord qu'au sud).

L'ensemble de ces paramètres est renseigné à partir des réponses aux questionnaires des enquêtes. En raison de la difficulté à répondre à certaines questions par enquête téléphonique, la surface vitrée est renseignée à partir d'un indicateur qualitatif plutôt qu'à partir des surfaces des ouvrants sur les quatre points cardinaux.

De façon ordinaire dans Diag Série, les déperditions surfaciques des différents éléments du bâti sont déterminées par lecture de tableaux de coefficients de transmission thermique (U en $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$) codés au sein du logiciel. Dans ces tableaux, des coefficients (τ) de réduction des déperditions due à la présence d'un espace tampon sont associés aux éléments donnant sur un espace non chauffé (*e.g.* mur sur garage ou mur sur véranda). Les U et les τ utilisés sont ainsi fournies en fonction de la zone climatique d'implantation, de l'énergie de référence (électrique ou non) et de la date de référence (date de construction ou de rénovation) de l'élément. Ces paramètres se traduisent par les entrées suivantes :

- département de la commune d'implantation¹²⁷,
- énergie de référence du bâti (électricité, gaz, fioul, GPL ou bois)¹²⁸,
- date de construction (avant 1974, 1974-1976, 1977-1981, 1982-1988, 1989-1996, 1997-2001, 2002-2005, après 2005),
- rénovation (chaîne de 4 chiffres, 0 ou 1 suivant la rénovation des fenêtres, des murs avec isolation par l'intérieur, des murs avec isolation par l'extérieur et des combles).

En cas de rénovation d'un élément, le niveau de performance installée est directement déduit de la date de construction du logement via l'association, par le logiciel, à celle-ci d'une date de rénovation (*e.g.* une maison construite avant 1974 se voit attribuer une date de rénovation de 1982-1988 et ceci quel que soit l'élément du bâti). Cette date de rénovation vient se substituer à la date de construction comme définition de la date de référence servant à la lecture des tableaux de U et de τ . Par ailleurs, il est à noter que Diag Série ne permet pas de définir le type de plancher bas (par défaut, plancher sur vide sanitaire), ni une rénovation de celui-ci.

Les coefficients de transmission thermique des ponts thermiques (ψ en $W/(m \cdot ^\circ C)$) ainsi que le taux de renouvellement d'air (\dot{v} en volume/heure) sont délivrés par des tableaux structurés de façon identique à ceux pour les U des éléments. Par conséquent, les mêmes entrées que celles indiquées ci-dessus sont utilisées pour leur définition en sachant que seule la date de construction est employée comme date de référence (il n'est pas possible de définir une rénovation de la ventilation).

Si cette façon de déterminer les caractéristiques thermiques des différents éléments déperditifs peut se justifier dans la logique de réalisation de diagnostics (simulation état avant travaux) pour laquelle a

¹²⁷ Sert à déterminer à laquelle des trois zones climatiques RT (H1, H2 ou H3) appartient le lieu d'implantation du logement.

¹²⁸ L'énergie de référence du bâti correspond à l'énergie principale de chauffage pour laquelle la conception du logement a été réalisée (énergie au moment de la construction). Au final, seule une distinction entre l'électricité et les autres énergies est faite. Ainsi, nous avons choisi de faire correspondre cette énergie à l'énergie principale de chauffage (hypothèse SimFast en cas de non spécification de l'énergie du bâti) déclarée pour la situation avant travaux via l'enquête, les passages d'une énergie principale de chauffage électrique à combustible, ou inversement, étant relativement rares (notamment avant le lancement durant la fin des années 1990 du marché des PAC (ADEME, 2012 pp. 54, sous-partie le Résentiel, Evolution des ventes de pompes à chaleur), 4 ménages de l'échantillon avant travaux déclarent une PAC comme système avant les travaux).

été conçu Diag Série, elle présente un certain nombre de limites par rapport à l'usage que nous souhaitons en faire. La plus importante de toutes étant que Diag Série ne permet pas de tenir compte d'une rénovation récente de l'enveloppe. Ceci nous a semblé d'autant plus restrictif que SimFast offre la possibilité d'une prise en compte plus fine (déclaration de la date de rénovation).

Sur cette base, nous pourrions employer les dates de rénovation déclarées lors des enquêtes pour les travaux hors opération MDE et pour les travaux dans l'opération MDE, utiliser les performances minimales exigées par le référentiel technique de celle-ci. Toutefois, nous ne retenons pas ce procédé car nous souhaitons être plus spécifique. Nous choisissons d'utiliser les épaisseurs d'isolant, les caractéristiques des ouvrants et les types de ventilation déclarés au travers de l'enquête. Ceci aussi bien pour les éléments du bâti rénovés que pour ceux non rénovés. En effet, dans le cadre des méthodes de calcul existantes (3CL-DPE ou Th-C-E ex, sans parler des modèles plus complexes), il est le plus souvent privilégié la saisie des caractéristiques physiques de l'enveloppe (épaisseur d'isolant, nature des vitrages...) à la date de construction ou de rénovation.

Ainsi, pour chaque élément (ouvrants, murs, toiture, plancher bas), nous associons des U à chacune des caractéristiques (épaisseur de isolation pour les parois et type de vitrage et matériau du cadre pour les ouvrants) pouvant être déclarées (voir Tableau 4.1 à Tableau 4.7). Ces U sont choisis en cohérence avec ceux présents dans les tableaux utilisés par SimFast¹²⁹ ou estimés en cas de niveau de performance non pris en compte par les tableaux (triple vitrage, 12 cm d'isolant dans les murs...). Nous procédons exactement de la même manière pour les τ associés aux éléments donnant sur un espace tampon, pour les coefficients ψ de transmission thermique des ponts thermiques ou pour les taux de renouvellement d'air \dot{v} des différents types de ventilation. De plus, il est à noter que cette façon de procéder nous permet de pouvoir faire varier, à l'opposé de Diag Série, le type de plancher bas ou le type de ventilation pris en compte.

Tableau 4.1 Tableau de détermination des U pour les ouvrants

Cadre\Vitrage	U (en W/(m ² .°C))				
	Simple vitrage	Survitrage	Double vitrage « ordinaire »	4/16/4 avec Argon	Triple vitrage
Bois ou PVC	4,20	2,83	entre 2,9 et 1,8 (en fonction de la période de construction ou des travaux et de l'énergie principale de chauffage)	1,65	0,80
Métal	4,95	4,00	entre 3,85 et 2,29 (en fonction de la période de construction ou des travaux et de l'énergie principale de chauffage)	2,14	1,20
Provenant de SimFast	Oui	Non	Oui	Non	Non

Une correction des U des ouvrants due à la présence de volets (ΔU_{volets}) est apportée au travers les deux entrées suivantes :

- indicateur de fermeture des volets la nuit (oui ou non),
- si fermeture des volets la nuit, type des volets (persiennes, roulants ou pleins en bois, voir Tableau 4.2 pour les valeurs de ΔU_{volets} correspondantes).

La première entrée est directement renseignée à partir des réponses aux questionnaires des trois vagues d'enquêtes. La deuxième ne l'est que pour la vague 2011. Pour les vagues 2009 et 2010 des

¹²⁹ Par conséquent, un utilisateur de SimFast ayant une table de correspondance entre caractéristiques physiques déclarées et date de rénovation (date de référence) à utiliser dans les tableaux SimFast pourrait arriver aux mêmes résultats.

enquêtes, nous supposons la présence de volets de type persienne en cas de fermeture des volets la nuit.

Tableau 4.2 Tableau de détermination des ΔU_{volets} par type de volets

Type de volets	ΔU_{volets} (en W/(m ² .°C))
Persiennes	-0,13
Roulants	-0,49
Pleins en bois	-0,3

Tableau 4.3 Tableau de détermination des U et τ pour les murs

Epaisseur d'isolant (en cm)	Mur sur extérieur		Mur sur local non chauffé (type garage)		Provenant de SimFast
	U (en W/(m ² .°C))	τ (sans unité)	U (en W/(m ² .°C))	τ (sans unité)	
Pas d'isolant	2,50	1,00	3,13	0,80	Oui
≤ 4	1,05	1,00	1,15	0,91	Oui
6	0,75	1,00	0,79	0,95	Oui
8	0,40	1,00	0,42	0,95	Oui
10	0,36	1,00	0,37	0,95	Oui
≥ 12	0,32	1,00	0,34	0,95	Non

Tableau 4.4 Tableau de détermination des U et τ pour les toitures

Epaisseur d'isolant (en cm)	Combles aménagés		Combles perdus		Provenant de SimFast
	U (en W/(m ² .°C))	τ (sans unité)	U (en W/(m ² .°C))	τ (sans unité)	
Pas d'isolant	1,35	1,00	1,50	0,90	Oui
≤ 5	0,50	1,00	0,55	0,91	Oui
10	0,30	1,00	0,30	1,00	Oui
16	0,20	1,00	0,20	1,00	Oui
20	0,17	1,00	0,17	1,00	Oui
≥ 24	0,14	1,00	0,14	1,00	Non

Tableau 4.5 Tableau de détermination des U et τ pour les planchers bas

Epaisseur d'isolant (en cm)	Plancher sur sous-sol total ou vide sanitaire		Plancher sur terre-plein		Provenant de SimFast
	U (en W/(m ² .°C))	τ (sans unité)	U (en W/(m ² .°C))	τ (sans unité)	
Pas d'isolant	1,75	0,55	0,00	1,00	Oui
≤ 4	0,65	0,75			Oui
6	0,53	0,85			Oui
8	0,35	0,85			Oui
10	0,32	0,85			Oui
≥ 12	0,29	0,85			Non

En cas de plancher sur sous-sol partiel, nous supposons qu'une moitié de la surface du plancher correspond à un plancher sur sous-sol et que l'autre moitié correspond à un plancher sur terre-plein.

Tableau 4.6 Tableau de détermination des \dot{v} pour la ventilation

Type de ventilation	\dot{v} (en volume/heure)	Provenant de SimFast
Naturelle	1,00	Oui
VMC simple flux	0,56	Oui
VMC hygroréglable	0,40	Oui
VMC double flux	0,30	Oui

Tableau 4.7 Tableau de détermination des ψ pour les ponts thermiques

Type de liaison	ψ (en W/(m.°C))	Provenant de SimFast
Mur/plancher bas	0,5	Oui
Mur/plancher intermédiaire	0,5	Oui

L'ensemble des grandeurs déterminées à partir des informations déclarées est ensuite utilisé pour calculer le coefficient G du logement. Il est supposé, à défaut d'autres informations que les rénovations effectuées sur un élément du bâti le sont sur la totalité de la surface des parois de l'élément. Ce calcul est réalisé en conservant les données de surfaces déperditives déterminées par SimFast¹³⁰. Le coefficient G estimé est quant à lui directement employé comme valeur d'entrée pour la simulation.

4.1.2.3. Prise en compte des systèmes de chauffage, de production d'ECS et de climatisation

La prise en compte des systèmes de chauffage se fait par le renseignement des entrées suivantes :

- énergie des systèmes de chauffage (électricité, gaz, fioul, GPL et bois, possibilité d'en saisir plusieurs),
- type des systèmes de chauffage (35 types sont proposés dont convecteurs, PAC split, chaudière ancienne, chaudière à condensation avec radiateurs, PAC air/eau HT avec ventilo-convecteurs ou radiateurs, chaudière bois automatique, voir Annexe 3-entrée 7 pour la liste complète, possibilité d'en saisir plusieurs),
- surface chauffée par les systèmes de chauffage (possibilité d'en saisir plusieurs séparées par ; toutefois la somme doit être égale à la surface habitable renseignée),
- indice du système double usage chauffage et production d'ECS (0 en cas d'absence de double usage sinon 1 pour le premier système déclaré, 2 pour le deuxième... possibilité de déclarer un seul système double usage),
- performance des systèmes de chauffage (standard, effet Joule NF Cat. C ou flamme verte, possibilité d'en saisir plusieurs),
- présence d'un appoint bois (oui ou non),
- type de l'appoint bois (cheminée à foyer ouvert, cheminée à foyer fermé/insert, poêle ancien, poêle performant ou poêle de masse, un seul choix possible),
- certification flamme verte de l'appoint (oui ou non),
- nombre de stères de l'appoint bois (nombre de stères consommés par an par l'appoint bois).

Ces entrées sont directement renseignées à partir des réponses aux enquêtes, à l'exception de la surface chauffée par les systèmes de chauffage. En cas de présence de plusieurs systèmes de chauffage (hors appoint bois), la surface chauffée par chacun est estimée soit à partir des commentaires des

¹³⁰ Diag Serie peut fournir, dans un fichier Excel à part au moment de la simulation, l'ensemble des données de géométrie et de déperditions utilisées pour le calcul du G . Ainsi, une première simulation a été réalisée afin d'obtenir les données géométriques estimées par SimFast.

enquêtés, soit en supposant une répartition de 90 % - 10 % quand il s'agit d'un appoint pour les jours les plus froids¹³¹.

La prise en compte du système de production d'ECS (possibilité de saisir un seul système) est réalisée de façon similaire à celle des systèmes de chauffage à partir des entrées suivantes :

- mode de production d'ECS (classique, solaire ou thermodynamique),
- énergie de production d'ECS (électricité, gaz, fioul, GPL ou bois),
- type de la production d'ECS (électrique à accumulation, autre énergie à accumulation, autre énergie instantané, autre énergie à micro-accumulation, accumulation assurée par la PAC HT, accumulation assurée par la PAC hybride),
- dans le cas d'une chaudière ou d'une PAC hybride double usage, utilisation d'une production électrique pour l'été (oui ou non),
- surface des capteurs solaire thermique (en m²),
- volume du ballon si accumulation ou micro-accumulation (en l),
- emplacement du ballon si accumulation (volume chauffé, local accolé, local enterré, local semi-enterré),
- présence d'une jaquette isolante sur le ballon si accumulation (pris toujours à 0 dans notre cas).

Le mode, l'énergie et le type de production d'ECS ainsi que l'utilisation d'une production électrique pour l'été sont directement issus des résultats des enquêtes. La surface des capteurs solaires thermiques est fournie par les fichiers clients de l'opération pour les cas enquêtés en 2009 et 2010. La question avait été rajoutée dans le questionnaire pour la vague d'enquêtés de 2011 (voir Chapitre 2, sous-partie 2.1.2.2). Le volume du ballon est une donnée fournie par les résultats des vagues d'enquêtes 2010 et 2011. Pour les cas de la vague d'enquêtes de 2009, celui-ci est déterminé par le logiciel en fonction du nombre d'habitants, de la surface habitable et du type de production. L'emplacement du ballon est en partie spécifié par les résultats des enquêtes qui permettent de savoir s'il est situé dans un local chauffé ou non chauffé. En cas d'emplacement dans un local non chauffé :

- si un garage accolé est déclaré, nous supposons qu'il est dans un local accolé,
- si un plancher sur sous-sol est déclaré, nous supposons qu'il est dans un local enterré,
- si ni l'un, ni l'autre sont déclarés, nous supposons qu'il est dans un local accolé.

La prise en compte du système de climatisation (possibilité de saisir un seul système) est effectuée à partir des entrées suivantes :

- présence d'un système de climatisation (oui ou non),
- surface climatisée (en m²),
- type de consigne pour la climatisation (dans notre cas uniquement température de consigne),
- valeur de la consigne (en °C).

Tous ces éléments sont directement délivrés par les données des enquêtes. Toutefois, les questionnaires des enquêtes pour l'opération MDE 52-55 ont été conçus pour ne prendre en compte qu'un système de climatisation par PAC réversible.

1 cas sur les 254 de l'échantillon avant travaux et 7 cas sur les 119 de l'échantillon après travaux déclarent avoir un système de climatisation. En raison d'une part, d'un climat estival beaucoup plus froid dans les départements 52 (Haute-Marne) et 55 (Meuse) qu'en région PACA¹³² et d'autre part, des

¹³¹ Cette approche est forcément approximative s'agissant d'un appoint mis en marche par rapport à un niveau de température extérieure (e.g. fonctionnement d'une chaudière en appoint d'une PAC air/eau quand la température extérieure est inférieure à -5 °C).

¹³² Sur la période allant de 1981 à 2010 (METEO CLIMAT), la température moyenne sur le mois juillet (le plus chaud) est de 19,9 °C pour Saint-Dizier (Haute-Marne) tandis que pour Aix en Provence (région PACA), elle est de 22,9 °C. Sur le même mois, les moyennes des températures minimales et maximales sont respectivement de 14,2 °C et 25,6 °C pour Saint-Dizier et de 15,1 °C et 30,6 °C pour Aix en Provence.

résultats trouvés concernant l'usage de la climatisation pour l'échantillon MDE PACA (effet significatif sur la consommation seulement en cas d'utilisation importante, voir Chapitre 3, sous-partie 4.3.5.7), nous supposons les consommations liées à l'usage de la climatisation tant calculées¹³³ qu'observées trop faibles pour pouvoir engendrer des écarts significatifs. Ainsi, ces quelques cas déclarant un usage de la climatisation sont conservés dans les échantillons MDE 52-55 étudiés.

4.1.2.4. Prise en compte des comportements des ménages

Tout d'abord, le nombre total d'occupants du logement et le nombre d'occupants du logement en journée (de 8 h à 18 h) sont pris en compte via deux entrées dans SimFast. Le nombre total d'occupants est directement fourni par les enquêtes tandis que le nombre d'occupants en journée n'est directement délivré que par les vagues 2009 et 2011 des enquêtes. La vague 2010 des enquêtes comprend qu'une question globale sur la présence en journée (absent, partiellement présent ou présent) ainsi les règles suivantes sont appliquées pour spécifier l'entrée du logiciel :

- si absence déclarée alors 0 occupant en journée quelle que soit la structure du ménage (seul, couple ou famille),
- si partiellement présent déclaré alors 0 occupant en journée si ménage composé d'une seule personne et 1 occupant en journée si ménage composé d'au moins deux personnes,
- si présent déclaré alors 1 occupant en journée si ménage composé d'une seule personne, si ménage composé de deux personnes application d'une probabilité de 21 % qu'il ait 1 occupant en journée et d'une probabilité de 79 % qu'il ait 2 occupants en journée, si ménage composé de plus de deux personnes application d'une probabilité de 59 % qu'il ait 1 occupant en journée et d'une probabilité de 42 % qu'il ait 2 occupants en journée¹³⁴.

3 entrées servent à prendre en compte les absences en week-end, les congés d'hiver et d'été :

- absence le week-end (tous les week-ends, 1 week-end sur 2, 1 week-end sur 3, 1 week-end par mois ou moins d'1 week-end par mois),
- durée des congés en hiver (aucun, 1 semaine, 2 semaines, 3 semaines),
- durée des congés en été (aucun, 1 semaine, 2 semaines, 3 semaines).

Ces entrées sont directement renseignées à partir des réponses aux enquêtes. Les dates des week-ends et des semaines d'absence sont définies par défaut par le logiciel.

Concernant la prise en compte de la gestion des températures de consigne de chauffage, Diag Serie offre deux possibilités soit une définition assistée à partir de 5 entrées, soit la définition à l'aide de jours-types heure par heure de la température de consigne. Nous choisissons la deuxième option car la première présente l'inconvénient de gérer par une seule et même entrée la réalisation des réductions de température de consigne sur la journée et la nuit (si réduction le jour, réduction la nuit et vice et versa).

Bien que nous ayons opté pour la définition d'un scénario de gestion de la température, nous conservons un certain nombre d'hypothèse faite par le logiciel, en raison d'un manque d'informations par rapport à ces points (questions non intégrées dans les questionnaires des enquêtes) :

- période à l'extérieur du logement en journée de 8 h à 18 h,
- période de sommeil de 22 h à 7 h,
- la température de consigne indiquée pour la zone représentant le logement (modèle monozone) est la moyenne, non pondérée par les surfaces, des températures de consigne pour les pièces de vie et pour les autres pièces,

¹³³ Les 8 cas déclarant climatiser leur logement présentent des consommations annuelles liées à la climatisation calculées entre 73 et 528 kWh, soit de 0,2 % à 2,4 % de la consommation annuelle tous usages calculées.

¹³⁴ Les probabilités utilisées sont directement obtenus à partir de la vague 2009 des enquêtes. Le fait que pour un couple la probabilité d'être deux occupants en journée soit plus élevée que celle pour une famille s'explique par la présence d'un très grand nombre de couples retraités parmi les répondants à l'enquête.

- quand réduction de la température de consigne, réduction de -2 °C (il a été demandé les températures intérieures moyennes en période d'absence sur la journée et durant la nuit seulement sur la vague 2011 des enquêtes),
- pas de modification au niveau de la gestion des réduits suite à la réalisation des travaux,
- durant les week-ends d'absence, réduction de la température sur tout le week-end,
- durant les semaines de congés en hiver, température hors gel (8 °C) sur toute la semaine.

Les températures de consigne du scénario sont définies directement à partir des températures intérieures moyennes déclarées pour les pièces de vie et pour les autres pièces (pour la vague 2011 des enquêtes, température en période de présence en journée). Quant à la réalisation de réduits, ils dépendent des réponses aux questions sur les périodes d'abaissement de la température de consigne pour les vagues 2009 et 2010 des enquêtes (réponse : pas de réduction, pendant la nuit, pendant le jour ou pendant le jour et la nuit) et sur les températures intérieures moyennes des pièces de vie et des autres pièces lors des périodes d'absence sur la journée et durant la nuit pour la vague 2011 des enquêtes.

Le logiciel permet également de prendre en compte le comportement des ménages concernant l'ouverture quotidienne des fenêtres (réponse possible oui ou non). Les enquêtes fournissent cette information.

Enfin, le logiciel tient compte des habitudes du ménage en terme de consommation d'ECS pour se laver (plutôt des douches, des douches et quelques bains, plutôt des bains). Cette entrée est renseignée à partir des résultats des enquêtes.

Par conséquent, il est important de rappeler que le modèle de calcul utilisé, SimFast, est relativement éloigné dans sa prise en compte de l'occupation et du comportement, des méthodes de calcul réglementaires ou assimilées (*e.g.* 3CL-DPE) basées sur des données et *scenarii* conventionnels.

4.1.2.5. Prise en compte des équipements liés aux autres usages

Les équipements liés aux autres usages sont les appareils de cuisson, l'éclairage et les équipements électroménagers.

Prise en compte des appareils de cuisson

La prise en compte des appareils de cuisson se fait à l'aide d'une seule entrée, qui est une chaîne de chiffres 0 ou 1, suivant la présence des appareils suivants :

- plaque en fonte,
- plaque en vitrocéramique,
- plaque à induction,
- four électrique,
- mini-four,
- four micro-onde,
- table de cuisson au gaz/GPL,
- four au gaz/GPL.

Pour la vague d'enquêtes de 2011, l'énergie des plaques de cuisson, celle du four et les présences d'un mini-four ou d'un four micro-onde sont récupérées via les réponses au questionnaire. Ainsi, en dehors des commentaires explicitant la nature des plaques de cuisson, la seule hypothèse que nous faisons est qu'en cas de plaques électriques de cuisson, celles-ci soient des plaques en fonte.

Par contre pour les vagues 2009 et 2010 des enquêtes, ne connaissant au travers des réponses aux questionnaires seulement les énergies principale et d'appoint pour la cuisson, nous sommes amenés à faire les hypothèses suivantes :

- l'énergie principale de cuisson correspond à l'énergie utilisée pour les plaques de cuisson,
- l'énergie d'appoint de cuisson correspond à l'énergie utilisée pour le four,

- en cas d'énergie principale de cuisson électrique, les plaques de cuisson sont supposées être des plaques en fonte,
- un four à micro-onde est supposé présent si au moins l'une des deux énergies de cuisson déclarées est de l'électricité.

Prise en compte de l'éclairage

La prise en compte de l'éclairage se fait au travers de deux entrées :

- type d'éclairage (incandescent, fluocompact ou mixte),
- nombre d'halogènes (*i.e.* à haute tension entre 300 et 500 W).

Ces entrées sont directement renseignées par les réponses au questionnaire utilisé pour la vague d'enquêtes de 2011. Pour les vagues 2009 et 2010 des enquêtes, le type d'éclairage est défini grâce à deux questions dans le questionnaire (éclairage mixte : oui ou non, éclairage économe : oui ou non). Les questionnaires employés permettent également de savoir si le ménage possède ou pas au moins un halogène mais ils ne permettent pas de connaître le nombre d'halogènes possédés. Ainsi, nous faisons des hypothèses par rapport à la surface habitable :

- 75 m² et moins, 1 halogène,
- entre 76 m² et 100 m², 2 halogènes,
- plus de 100 m², 3 halogènes.

Prise en compte des équipements électriques

Le logiciel prend en compte la présence et le nombre des équipements électriques suivants :

- réfrigérateur,
- congélateur,
- réfrigérateur-congélateur,
- lave-linge,
- sèche-linge,
- lave-vaisselle,
- télévision,
- ordinateur,
- magnétoscope,
- petit électroménager,
- console de jeu,
- chaine hifi,
- lecteur DVD.

Une entrée supplémentaire permet de définir la présence d'une cave à vin, d'un réfrigérateur américain ou d'un aquarium de plus de 100 litres. Tandis qu'une dernière entrée permet d'ajuster de façon subjective la quantité de petit électroménager (peu, moyen, beaucoup).

La présence de ces équipements est directement tirée des résultats des enquêtes. Par contre, leur nombre est défini pour les trois vagues d'enquêtes seulement pour les réfrigérateurs, les congélateurs et les réfrigérateurs-congélateurs. Ainsi, il est supposé pour le lave-linge, le sèche-linge et le lave-vaisselle qu'en cas de présence, seul un équipement est présent dans le logement.

Pour la vague 2011 des enquêtes, les nombres de télévisions et d'ordinateurs sont récupérés via les réponses au questionnaire. Ce dernier contient aussi une question sur la présence d'un équipement audio-vidéo ainsi nous faisons les hypothèses suivantes pour obtenir les nombres de magnétoscope, de console de jeu, de hifi et de lecteur DVD :

- par défaut, 1 lecteur DVD et 0 magnétoscope,
- en cas de présence d'un équipement audio-vidéo, 1 chaine hifi et si le ménage est une famille, 1 console de jeu.

Pour les vagues 2009 et 2010 des enquêtes, le nombre d'équipements audiovisuels et informatiques est défini de façon qualitative (peu, moyen, beaucoup). Par conséquent, nous faisons les hypothèses suivantes pour traduire ce jugement qualitatif en nombre :

- si peu alors 1 télévision et 1 lecteur DVD,
- si moyen alors 1 télévision, 1 ordinateur, 1 console de jeu (si une famille) et 1 lecteur DVD,
- si beaucoup alors 2 télévisions, 2 ordinateurs, 1 console de jeu (si famille), 1 chaîne hifi et 1 lecteur DVD.

Les questionnaires incorporent aussi une question qualitative (peu, moyen, beaucoup) concernant le petit électroménager, les réponses à cette question permettent directement de spécifier l'entrée correspondance. Par contre, nous avons dû choisir de façon arbitraire à quatre (un aspirateur, un fer à repasser, une cafetière ou une bouilloire et un robot de cuisine) le nombre moyen de petits électroménagers.

4.1.2.6. Données de localisation

Au sein du logiciel, la localisation du lieu d'implantation du logement est déclarée par le numéro du département d'implantation. A partir de celui-ci sont déterminées la station météo la plus proche (dans le cas des départements 52 et 55, Saint-Dizier) et donc les données météo (tri-horaires réelles) à utiliser.

L'implantation sur une zone côtière et l'altitude de la commune (en m) sont prises par défaut par le logiciel.

4.1.2.7. Période de simulation

Les périodes de simulation sont définies par la date de début et la date de fin de simulation.

Pour les cas correspondant aux vagues 2009 et 2010 des enquêtes, n'ayant pas d'autre information à notre disposition, les dates de début et de fin sont prises respectivement le 01 janvier et le 31 décembre de l'année simulée.

Pour les cas correspondant à la vague d'enquêtes de 2011, le mois de facturation annuelle, ou les mois de facturation semi-annuelle, de l'énergie principale du logement sont récupérés via des précisions dans le questionnaire. Pour ces cas, les dates de début et de fin de simulation sont prises le premier jour du mois de facturation et le dernier jour du mois précédent celui de facturation.

4.1.2.8. Choix importants pour la simulation des situations après travaux

Quatre choix importants effectués pour la simulation des situations après travaux sont à noter :

- Sont pris en compte les travaux de rénovation réalisés hors opération MDE durant la période intermédiaire entre les situations avant et après travaux. En effet, ne pas les prendre en compte ne mènerait qu'à surévaluer les économies d'énergie attribuées aux actions effectuées via l'opération et donc à ajouter une source d'écart entre les consommations simulées et observées.
- Sont pris en compte les changements dans le nombre total d'occupants et dans l'occupation en semaine du logement intervenus durant la période intermédiaire entre avant et après travaux. L'anticipation de l'arrivée d'un nouvel occupant (*e.g.* un enfant ou un parent âgé) ou le départ à la retraite par une personne du ménage peuvent être des motivations à la réalisation d'action de rénovation énergétique (TNS SOFRES, 2009) ainsi il est possible de détenir l'information d'un tel changement au moment de l'évaluation *ex-ante* de la situation après travaux.

- Sont pris en compte les changements de consommation annuelle de bois d'appoint intervenus suite à la réalisation des travaux d'efficacité énergétique. En effet, ces changements correspondent majoritairement à des diminutions ou des augmentations conséquentes pouvant être très certainement anticipées. Les diminutions intervenant principalement dans le cadre de travaux, sur entres autres le système de chauffage, motivés par une volonté de réduire l'usage du bois, due à la pénibilité engendrée par sa manutention. Les augmentations étant quant à elles principalement associées à un remplacement ou à l'installation d'un système de chauffage d'appoint au bois. Si l'existence de ces changements semble la plus part du temps anticipable, nous nous plaçons dans le cas idéal où lors de l'évaluation *ex-ante* du projet de rénovation, la quantification du changement sur la consommation de bois d'appoint est effectuée sans erreur. Cette forte hypothèse a pour objectif premier de pouvoir se concentrer uniquement sur l'étude de l'influence sur les écarts entre résultats simulés et observés du changement de consommation de bois d'appoint.
- Ne sont pas pris en compte les changements déclarés de température de chauffage suite à la réalisation des travaux. En effet, aujourd'hui dans le cadre d'une évaluation *ex-ante* par un modèle de calcul d'un projet de rénovation, les simulations des situations après travaux sont toujours réalisées à partir des mêmes comportements que ceux de la situation avant travaux¹³⁵.

4.1.2.9. Résultats de simulation et corrections climatiques

Les simulations réalisées par l'outil Diag Serie permettent entre autres d'obtenir, pour les périodes saisies (période d'une année), les consommations, en énergie finale (exprimées en kWh PCI), d'électricité et des autres énergies (gaz, fioul, GPL et bois) par usage mais également tous usages. Ainsi, les consommations tous usages de chacune des énergies sont sommées pour obtenir la consommation énergétique annuelle tous usages simulée à climat réel. Toutes les consommations d'énergie simulées sont ajustées à un climat normal que ce soit en situation avant travaux ou après travaux.

Pour les situations après travaux, l'ajustement va de soi en raison du fait que nous faisons l'exercice de se placer dans la cadre d'une évaluation effectuée avant la réalisation des travaux ainsi le climat réel de la situation après travaux n'est pas censé être connu.

Pour les situations avant travaux, les consommations simulées pourraient être conservées à climat réel toutefois ayant pour objectif l'étude de l'évolution des écarts entre les situations avant et après travaux, il nous semble plus cohérent de travailler directement avec des consommations ajustées à un climat normal.

De la même façon que dans la Chapitre 3 (voir Chapitre 3, sous-partie 4.1.3), seuls les usages liées au chauffage et à la climatisation sont supposés dépendants des variations climatiques.

La correction climatique des consommations de chauffage simulées est réalisée exactement de la même façon que ce qui a été présenté dans le Chapitre 3 (voir sous-partie 4.1.3.1, équation 3) et avec également 2663 °C.jour de DJU pour le climat normal sur les départements 52 et 55 (moyenne annuelle sur 20 années entre 1991 et 2010 pour la station de Saint-Dizier). Par ailleurs, nous appliquons cette correction directement sur les consommations de chauffage simulées par le logiciel (somme des consommations de chauffage fournies par la simulation pour chacune des énergies).

¹³⁵ Dans les cas déclarants un changement de l'occupation en semaine du logement du type avant les travaux, personne en journée et après travaux, une personne présente, les températures de consigne de chauffage prises en compte dans la simulation de la situation après travaux ne sont pas changées par rapport à la simulation de la situation avant travaux. Par contre, si avant les travaux, un réduit de température de chauffage était déclaré durant les périodes d'absence en journée en semaine, après travaux ce réduit n'est plus pris en compte dans la simulation en raison de la présence en journée en semaine d'au moins une personne.

Aucune correction des consommations de climatisation n'est appliquée, la méthode d'ajustement par « degrés-jours froid » ne semblant pas être fiable et les consommations simulées (8 cas parmi les échantillons) étant très faibles¹³⁶, un ajustement risquerait d'introduire des incertitudes non négligeables par rapport à ces dernières.

Les consommations énergétiques annuelles tous usages avant (*av*) et après (*ap*) travaux simulées (*sim*) et ajustées à un climat normal (*normal*) seront notées pour le cas *i* de l'échantillon :

$$C_{i,\vartheta}^{sim,normal} \text{ avec } \vartheta = \text{avant (av) ou après (ap) travaux.}$$

Les économies d'énergie (*EE*) unitaires annuelles simulées (*sim*) sont donc données pour le cas *i* par l'équation suivante :

$$EE_i^{sim} = C_{i,av}^{sim,normal} - C_{i,ap}^{sim,normal} \quad (\text{eq.26})$$

4.1.3. Résultats *ex-post* exploités

L'ensemble des résultats *ex-post* (consommations d'énergie et économies d'énergie observées) exploités dans ce chapitre a été obtenu selon la méthode présentée dans le Chapitre 3 (voir sous-partie 3.1).

Les consommations énergétiques annuelles tous usages avant (*av*) et après (*ap*) travaux observées (*obs*) et ajustées à un climat normal (*normal*) seront notées pour le cas *i* de l'échantillon :

$$C_{i,\vartheta}^{obs,normal} \text{ avec } \vartheta = \text{avant (av) ou après (ap) travaux.}$$

Les économies d'énergie (*EE*) unitaires annuelles observées (*obs*) pour le cas *i* seront notées EE_i^{obs} .

4.2. Quantification des écarts

Dans ce paragraphe, nous présenterons les résultats de la quantification des écarts entre consommations d'énergie simulées (*ex-ante*) et observées (*ex-post*) aussi bien en situation avant travaux qu'après travaux. Nous nous intéresserons également aux écarts en termes d'économies d'énergie.

Pour quantifier les écarts entre consommations d'énergie simulées et observées nous utiliserons l'indicateur suivant :

$$F_écart_{i,conso,\vartheta} = \frac{C_{i,\vartheta}^{obs,normal}}{C_{i,\vartheta}^{sim,normal}} \quad (\text{eq.27})$$

avec $F_écart_{i,conso,\vartheta}$: facteur d'écart ($F_écart$) entre les consommations (*conso*) simulées et observées de la situation ϑ (avant ou après travaux) du cas *i*.

Cet indicateur a été employé en premier par Wirl (WIRL, 1988) puis a été repris depuis sous plusieurs dénominations : « facteur de service » (HAAS, et al., 1998) (HAAS, et al., 2000), « facteur de chauffage » (TIGCHELAAR, et al., 2011), « intensité d'utilisation » (SCHULER, et al., 2000), « taux d'utilisation » (GIRAUDET, 2011) ou « intensité d'utilisation » (ALLIBE, 2012). Les dénominations suggèrent une interprétation des écarts sous le seul angle des différences des comportements simulés et réels tandis que comme l'indique Allibe (ALLIBE, 2012), les écarts peuvent également être dus à un biais du modèle ou encore à des malfaçons dans la réalisation des travaux pour les situations après travaux. Par conséquent, nous préférons retenir l'appellation plus neutre de facteur d'écart.

¹³⁶ Voir note de bas de page 133 (page 119).

De la même façon, un facteur d'écart peut être défini pour étudier les écarts entre économies d'énergie (EE) simulées et observées d'un cas i :

$$F_écart_{i,EE} = \frac{EE_i^{obs}}{EE_i^{sim}} \quad (\text{eq.28})$$

Sur la base des calculs d'incertitude effectués dans le Chapitre 3 (voir sous-partie 3.2.2.2), nous associerons aux facteurs d'écart des intervalles présentant un niveau de confiance d'environ 95 %. Ces derniers seront calculés à partir des intervalles, ayant un niveau de confiance d'environ 95 % (incertitude élargie avec un $k = 2$) pour le scénario « réaliste » des incertitudes, autour des consommations d'énergie et des économies d'énergie observées et ajustées à un climat normal.

4.2.1. Ecarts sur les consommations en situation avant travaux

La Figure 4.1 représente pour les 254 cas de l'échantillon MDE 52-55 avant travaux, les facteurs d'écart des consommations en situation avant travaux et leur intervalle de confiance d'environ 95 % en fonction des consommations surfaciques simulées. Le Tableau 4.8 fournit quelques statistiques descriptives liées à ces valeurs.

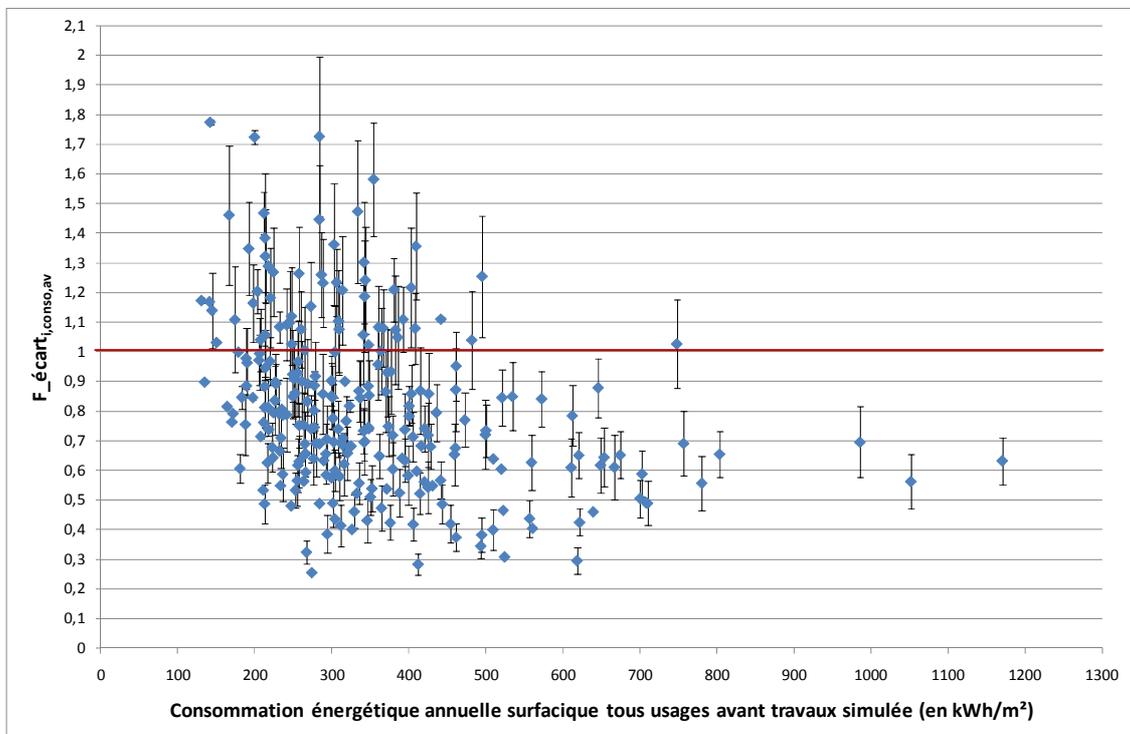


Figure 4.1 $F_écart_{i,conso,av}$ et leur intervalle d'un niveau de confiance d'environ 95 % en fonction des consommations simulées

Tableau 4.8 Statistiques descriptives des $F_{\text{écart},i,\text{conso},\text{av}}$ et de leur intervalle d'un niveau de confiance d'environ 95 %

Min	0,26	Moyenne des bornes inférieures des intervalles	0,72	Proportion de cas ayant un intervalle inférieur à 1	68 %
Max	1,77	Moyenne des bornes supérieures des intervalles	0,89	Proportion de cas ayant un intervalle supérieur à 1	17 %
Ecart-type	0,28	Moyenne	0,81	Proportion de cas comprenant 1 dans leur intervalle	15 %

Comme nous pouvons l'observer graphiquement, les facteurs d'écart, et donc les erreurs commises par la méthode de calcul, recouvrent un domaine très étendu (min : 0,26 et max : 1,77). Une grande majorité des facteurs d'écart possède une valeur inférieure à 1 (l'unité correspondant à l'égalité des consommations simulées et observées), ce qui traduit une tendance des simulations à surestimer les consommations par rapport aux observations. Plus précisément, les consommations observées en situation avant travaux correspondent en moyenne à 81 % des consommations simulées, ce qui équivaut à des écarts entre consommations observées et simulées valant en moyenne -19 % des consommations simulées¹³⁷.

Notons qu'en tenant compte des intervalles d'un niveau de confiance d'environ 95 %, ce sont 68 % de l'échantillon qui ont de manière quasi-certaine des consommations surestimées par la simulation (intervalle inférieure à 1) et 17 % qui ont de façon quasi-certaine des consommations sous-estimées (intervalle supérieure à 1). Les 15 % restant ne présentent pas de manière quasi-certaine (intervalle comprenant 1) d'écart entre consommations simulées et observées.

Nous pouvons également remarquer que **les consommations simulées tendent à surestimer, non linéairement, les consommations observées (facteur d'écart inférieur à 1) avec l'augmentation de leur valeur**. Une même tendance à la surestimation lorsque la performance énergétique théorique du logement diminue est notée dans les travaux de Haas et al. (HAAS, et al., 2000), d'Allibe (ALLIBE, 2012), de Guerra-Santin et Itard (GUERRA-SANTIN, et al., 2012) et de Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_a) ou encore dans l'étude comparative entre 4 pays européens (Royaume-Uni, Pays-Bas, Allemagne et France) de Laurent et al. (LAURENT, et al., 2013). Schuler et al. (SCHULER, et al., 2000) font la même observation mais avec une surestimation qui croit avec l'ancienneté de la période de construction. A l'opposé, **pour les cas ayant les plus petites consommations simulées, nous pouvons noter une tendance à la sous-estimation des consommations observées (facteur d'écart supérieur à 1)**, ce qui là aussi est en accord avec les articles cités ci-dessus mais également avec les études concernant des logements énergétiquement efficaces effectuées par exemple par Zraggen (ZGRAGGEN, 2010), Branco et al. (BRANCO, et al., 2004) ou Marchio et Rabl (MARCHIO, et al., 1991).

Au regard des caractéristiques de l'échantillon MDE 52-55 avant travaux (majoritairement des MI d'avant 1974¹³⁸ chauffées à partir de chaudières anciennes à des niveaux de température entre 19 °C et 21 °C pour les pièces de vie, voir Chapitre 2, sous-partie 2.1.4), il apparaît cohérent avec la littérature qu'en moyenne, les consommations simulées soient surestimées par rapport aux consommations observées.

Aucun des modèles de calcul utilisés dans les travaux cités ne permet d'estimer à la fois les consommations liées à l'électricité spécifique (éclairage et équipements électriques) et à la cuisson. Ainsi la comparaison des résultats de simulation et des observations n'est jamais réalisée sur les consommations tous usages comme c'est le cas pour l'étude ici présentée. Comme nous venons de le

¹³⁷ Ce qui revient encore à des écarts représentant en moyenne +24 % des consommations observées.

¹³⁸ Pour rappel, date de la première RT en France.

voir, l'élargissement des consommations prises en compte ne semble pas changer les tendances dans les écarts, d'autant que la consommation de chauffage représente la part prépondérante de la consommation tous usages. Toutefois, tâchons de le vérifier graphiquement en représentant les écarts des consommations tous usages en fonction des écarts entre consommations simulées et observées liées à l'électricité spécifique et à l'électricité pour la cuisson (voir Figure 4.2). En effet, 119 ménages de l'échantillon (47 % des 254 cas de l'échantillon) n'utilisent l'électricité que pour l'électricité spécifique seule ou pour l'électricité spécifique et une partie ou la totalité de l'usage cuisson, ce qui permet de comparer directement les consommations d'électricité déclarées par ces ménages avec les consommations d'électricité simulées. Pour se faire, nous définissons un facteur d'écart spécifique :

$$F_écart_{i,conso,élec\ spé,élec\ cuis,av} = \frac{C_{i,av,élec}^{obs}}{C_{i,av,élec}^{sim}} \quad (eq.29)$$

avec $F_écart_{i,conso,élec\ spé,élec\ cuis,av}$: facteur d'écart entre les consommations d'électricités spécifique et de cuisson (*élec*) simulées et observées de la situation avant travaux du cas i ,

$C_{i,av,élec}^{obs}$: consommation annuelle avant travaux d'électricité déclarée par le cas i , en kWh,

$C_{i,av,élec}^{sim}$: consommation annuelle avant travaux d'électricité simulée pour le cas i , en kWh.

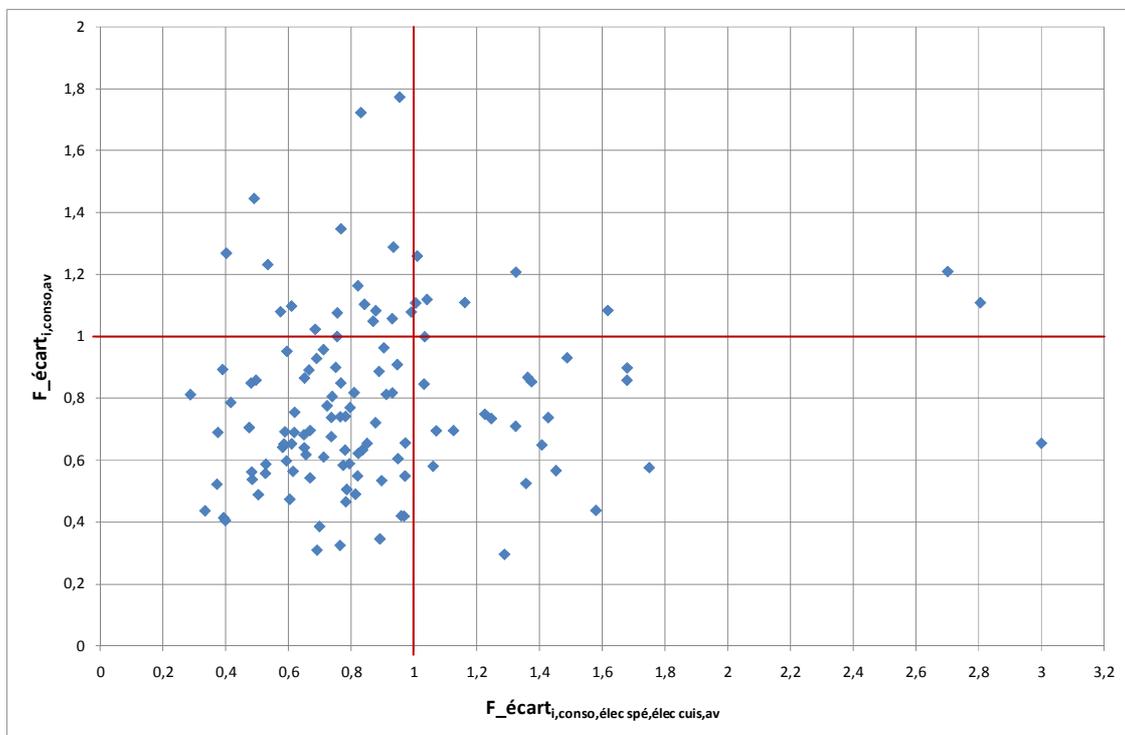


Figure 4.2 $F_écart_{i,conso,av}$ en fonction de $F_écart_{i,conso,élec\ spé,élec\ cuis,av}$ pour les 119 cas de l'échantillon ne présentant pas d'usage de l'électricité pour le chauffage, la production d'ECS ou la climatisation

Si nous observons également un domaine des facteurs d'écart pour les consommations d'électricités spécifique et de cuisson très étendu (min : 0,29 et max : 3,00), il semble bien ne pas exister de lien particulier entre les écarts des consommations tous usages et les écarts des consommations d'électricités spécifique et de cuisson¹³⁹. Ceci est confirmé par ailleurs par un test de corrélation de Pearson¹⁴⁰ pour lequel est trouvé un r de 0,130 non significatif (p-value=0,160¹⁴¹).

¹³⁹ Moyenne et écart-type de $F_écart_{i,conso,élec\ spé,élec\ cuis,av}$ sur les 119 cas respectivement de 0,89 et 0,44.

¹⁴⁰ Teste s'il existe une corrélation linéaire de type $y = a + b * x$ (voir note de bas de page 71, p 66).

¹⁴¹ Ceci correspond à un risque d'affirmer que le coefficient de corrélation est différent de zéro alors qu'il est égal à zéro de 16,0 %. Pour rappel, traditionnellement il est jugé significatif un coefficient présentant un risque de moins de 5 %.

4.2.2. Ecart sur les consommations en situation après travaux

Regardons maintenant la Figure 4.3 qui représente pour les 119 cas de l'échantillon MDE 52-55 après travaux, les facteurs d'écart des consommations en situation après travaux et leur intervalle d'un niveau de confiance d'environ 95 % en fonction des consommations surfaciques simulées. Le Tableau 4.9 fournit quelques statistiques descriptives liées à ces valeurs.

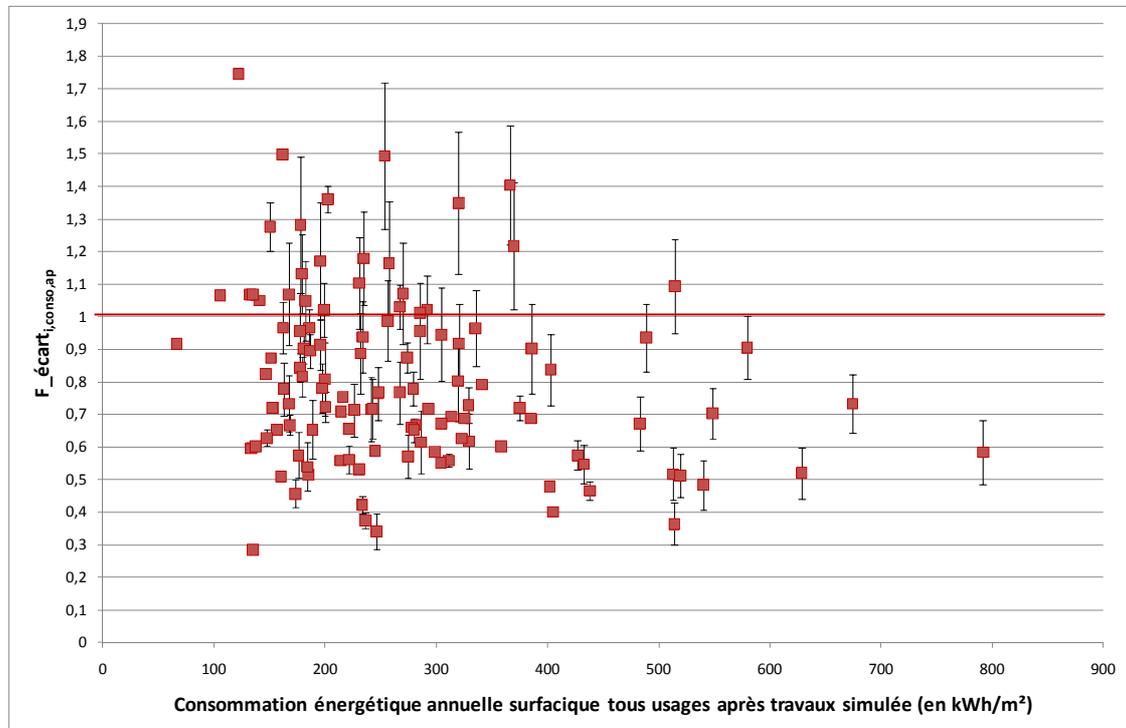


Figure 4.3 $F_{\text{écart}}_{i,\text{conso},\text{ap}}$ et leur intervalle d'un niveau de confiance d'environ 95 % en fonction des consommations simulées

Tableau 4.9 Statistiques descriptives des $F_{\text{écart}}_{i,\text{conso},\text{ap}}$ et de leur intervalle d'un niveau de confiance d'environ 95 %

Min	0,28	Moyenne des bornes inférieures des intervalles	0,74	Proportion de cas ayant un intervalle inférieur à 1	67 %
Max	1,75	Moyenne des bornes supérieures des intervalles	0,86	Proportion de cas ayant un intervalle supérieur à 1	19 %
Ecart-type	0,27	Moyenne	0,80	Proportion de cas comprenant 1 dans leur intervalle	14 %

Bien qu'en moyenne les consommations énergétiques annuelles surfaciques simulées aient diminuée entre les situations avant et après travaux (avant : 346,0 kWh/m² et après : 274,2 kWh/m²)¹⁴², la moyenne des facteurs d'écart entre consommations simulées et observées n'a elle pas évolué significativement (moyenne $F_{\text{écart}}_{i,\text{conso},\text{av}}=0,83$ avec un intervalle d'un niveau de confiance d'environ 95 % [0,75 ; 0,91] et moyenne $F_{\text{écart}}_{i,\text{conso},\text{ap}}=0,80$ avec un intervalle d'un niveau de confiance d'environ 95 % [0,74 ; 0,86]). En supposant que la tendance observée pour les situations avant travaux définissait une relation entre les facteurs d'écart et les consommations surfaciques simulées valable également pour les situations après travaux, les

¹⁴² Valeurs calculées pour les mêmes 119 cas de l'échantillon MDE 52-55.

consommations simulées ayant diminué en moyenne, nous aurions pu nous attendre en moyenne à une diminution de la surestimation dans les situations après travaux (soit à une augmentation du facteur d'écart).

Si la moyenne des facteurs d'écart n'a pas significativement évolué, cela signifie qu'à l'échelle individuelle, certains cas ont vu leur facteur d'écart augmenter, d'autres diminuer et enfin probablement, pour certains il est resté inchangé. Tâchons de voir si le niveau avant travaux du facteur d'écart joue un rôle dans ces évolutions. Ceci en notant bien que les différentes valeurs de facteur d'écart avant travaux traduisent certainement des logements avec des caractéristiques différentes (voir sous-partie 4.2.1 ci-dessus).

Afin d'avoir une meilleure visibilité dans l'analyse de ces évolutions, nous avons décidé de segmenter l'échantillon des 119 cas en quartiles (de 29 à 30 cas) de facteur d'écart avant travaux ($F_écart_{i,conso,av}$)¹⁴³. Pour chaque quartile, les facteurs d'écart moyens des consommations en situations avant et après travaux sont calculés de la manière suivante :

$$F_écart_{Qk,conso,\vartheta} = \frac{\sum_{i=1,Qk}^{N,Qk} C_{i,\vartheta}^{obs,normal}}{\sum_{i=1,Qk}^{N,Qk} C_{i,\vartheta}^{sim,normal}} \quad (eq.30)$$

avec $F_écart_{Qk,conso,\vartheta}$: facteur d'écart ($F_écart$) entre les consommations ($conso$) simulées et observées de la situation ϑ (avant ou après travaux) du quartile Qk (k entre 1 et 4 ; $1,Qk$ et N,Qk définissant le premier et dernier indice i du quartile).

Sur la base de cette relation, l'incertitude-type composée associée à $F_écart_{Qk,conso,\vartheta}$ est définie par l'équation suivante, les $C_{i,\vartheta}^{obs,normal}$ ¹⁴⁴ étant supposées indépendantes les unes des autres (voir Chapitre 3, sous-partie 3.2.2.2, équation 7) :

$$u_c(F_écart_{Qk,conso,\vartheta}) = \frac{1}{\sum_{i=1,Qk}^{N,Qk} C_{i,\vartheta}^{sim,normal}} * \sqrt{\sum_{i=1,Qk}^{N,Qk} u^2(C_{i,\vartheta}^{obs,normal})} \quad (eq.31)$$

En raison du théorème central limite (voir Chapitre 3, sous-partie 3.2.2.2), nous supposons que l'incertitude élargie $U = 2 * u_c(F_écart_{Qk,conso,\vartheta})$ définit un intervalle ayant un niveau de confiance d'environ 95 % autour de $F_écart_{Qk,conso,\vartheta}$.

La Figure 4.4 représente pour chaque quartile de l'échantillon les facteurs d'écart moyens des consommations en situations avant et après travaux et leur intervalle d'un niveau de confiance d'environ 95 % en fonction des consommations surfaciques simulées.

¹⁴³ Min=0,28 ; premier quartile=0,63 ; médiane=0,80 ; troisième quartile=1,03 ; max=1,77.

¹⁴⁴ Notés $C_{i,\vartheta}^{normal}$ dans le Chapitre 3.

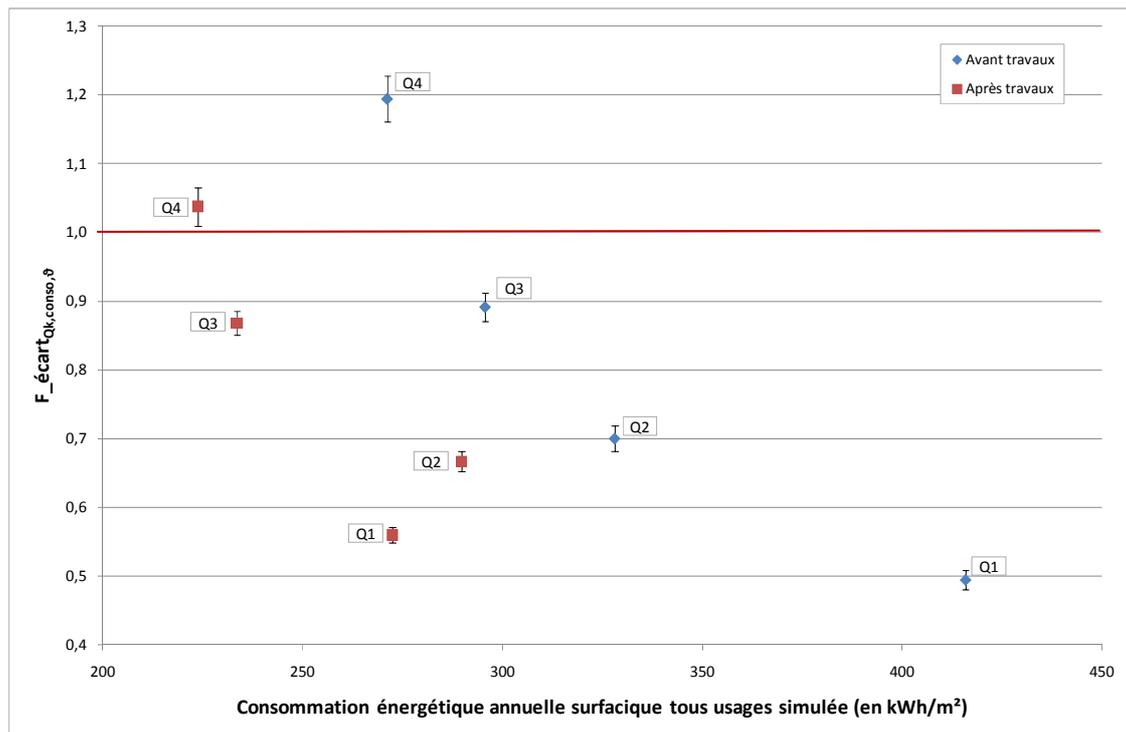


Figure 4.4 $F_{\text{écart}}_{Qk,conso,av}$, $F_{\text{écart}}_{Qk,conso,ap}$ et leur intervalle d'un niveau de confiance d'environ 95 % en fonction des consommations simulées pour chaque quartile de $F_{\text{écart}}_{i,conso,av}$

Tout d'abord, nous pouvons confirmer qu'il n'existe pas une seule et même fonction entre les facteurs d'écart et les consommations surfaciques simulées, sur laquelle les différents points avant et après travaux seraient répartis. Par ailleurs, si nous retrouvons bien pour la situation avant travaux une tendance à la surestimation des consommations (facteur d'écart inférieur à 1) régulière en fonction de l'augmentation de la consommation surfacique simulée, la régularité de cette tendance n'est plus respectée pour la situation après travaux. Le facteur d'écart après travaux du deuxième quartile est en effet supérieur à celui du premier quartile malgré une consommation simulée supérieure.

Deuxièmement, nous relevons sur l'échantillon étudié des évolutions des facteurs d'écart entre les situations avant et après travaux différentes d'un quartile à l'autre :

- le quartile des facteurs d'écart avant travaux les plus bas (facteur moyen de 0,49) présente une augmentation du facteur d'écart moyen (+0,07),
- les quartiles des facteurs d'écart avant travaux centraux (facteurs moyens des deuxième et troisième quartiles respectivement de 0,70 et 0,89) présentent des faibles baisses des facteurs d'écart moyens (respectivement de -0,03 et -0,02),
- le quartile des facteurs d'écart avant travaux les plus élevés (facteur moyen de 1,19) présente une diminution du facteur d'écart moyen (-0,15).

Par conséquent, **les évolutions du facteur d'écart entre avant et après travaux ne sont pas les mêmes suivant la valeur du facteur d'écart avant travaux¹⁴⁵. Ceci avec un rapprochement de 1 de leur facteur d'écart notamment dans les cas de forte surestimation initiale (facteur d'écart inférieur à 0,6) mais également de sous-estimation initiale (facteur d'écart supérieur à 1)**. En effet, dans ces deux catégories de cas, les écarts relatif (sans unité) et absolu (en kWh) provoqués par le modèle de calcul sur les consommations décroissent (en valeur absolue, *i.e.* |écart|).

¹⁴⁵ Dit autrement la différence ($F_{\text{écart}}_{Qk,conso,ap} - F_{\text{écart}}_{Qk,conso,av}$) dépend de $F_{\text{écart}}_{Qk,conso,av}$. Plus précisément, il est trouvé une corrélation linéaire entre les deux grandeurs (r de -0,95 avec une p -value <0,0001 à un test de corrélation de Pearson [voir note de bas de page 71, page 66], basé sur la relation linéaire suivante : $(F_{\text{écart}}_{Qk,conso,ap} - F_{\text{écart}}_{Qk,conso,av}) = 0,20 - 0,29 * F_{\text{écart}}_{Qk,conso,av}$).

Ces grandeurs étant définies par les relations suivantes :

$$Ecart_relatif_{Qk,conso,\vartheta} = \frac{\sum_{i=1,Qk}^{N,Qk} C_{i,\vartheta}^{obs,normal} - \sum_{i=1,Qk}^{N,Qk} C_{i,\vartheta}^{sim,normal}}{\sum_{i=1,Qk}^{N,Qk} C_{i,\vartheta}^{sim,normal}} = F_écart_{Qk,conso,\vartheta} - 1 \quad (eq.32)$$

$$\begin{aligned} Ecart_absolu_{Qk,conso,\vartheta} &= \sum_{i=1,Qk}^{N,Qk} C_{i,\vartheta}^{obs,normal} - \sum_{i=1,Qk}^{N,Qk} C_{i,\vartheta}^{sim,normal} \\ &= \left(F_écart_{Qk,conso,\vartheta} - 1 \right) * \sum_{i=1,Qk}^{N,Qk} C_{i,\vartheta}^{sim,normal} \\ &= Ecart_relatif_{Qk,conso,\vartheta} * \sum_{i=1,Qk}^{N,Qk} C_{i,\vartheta}^{sim,normal} \end{aligned} \quad (eq.33)$$

Pour les quartiles centraux, si l'écart relatif augmente (en valeur absolue, i.e. |écart|) très légèrement (diminution du facteur d'écart), il faut bien noter que l'écart absolu, lui décroît (en valeur absolue i.e. |écart|) très faiblement (pour le deuxième quartile de 1,9 kWh/m²¹⁴⁶ et pour le troisième quartile de 1,2 kWh/m²).

Ainsi, dans tous les cas, l'écart absolu (en valeur absolue) semble *a minima* ne pas augmenter entre les situations avant et après travaux. De plus, **son évolution entre les deux situations semble d'autant plus faible que l'écart avant travaux est proche de zéro (facteur d'écart proche de 1)**. Il faut bien voir que le quartile des facteurs d'écart avant travaux les plus élevés (quatrième quartile) présente un très large domaine de facteurs d'écart avant travaux ([1,03 ; 1,77]¹⁴⁷).

4.2.3. Ecarts sur les économies d'énergie

Intéressons-nous maintenant à l'impact des écarts entre consommations simulées et observées sur les écarts entre économies d'énergie simulées et observées. Nous poursuivrons l'analyse sur la base de la segmentation de l'échantillon des 119 cas en quartiles de facteur d'écart avant travaux ($F_écart_{i,conso,av}$) afin de relier les résultats aux observations faites ci-dessus.

Pour chaque quartile, les facteurs d'écart moyens des économies d'énergie sont définis par la relation suivante :

$$F_écart_{Qk,EE} = \frac{\sum_{i=1,Qk}^{N,Qk} EE_i^{obs}}{\sum_{i=1,Qk}^{N,Qk} EE_i^{sim}} \quad (eq.34)$$

avec $F_écart_{Qk,EE}$: facteur d'écart ($F_écart$) entre les économies d'énergie (EE) simulées et observées du quartile Qk .

En découle l'incertitude-type composée associée à $F_écart_{Qk,EE}$ suivante, les EE_i^{obs} ¹⁴⁸ étant supposés indépendants les uns des autres :

$$u_c(F_écart_{Qk,EE}) = \frac{1}{\sum_{i=1,Qk}^{N,Qk} EE_i^{sim}} * \sqrt{\sum_{i=1,Qk}^{N,Qk} u^2(EE_i^{obs})} \quad (eq.35)$$

L'incertitude élargie $U = 2 * u_c(F_écart_{Qk,EE})$ définit un intervalle ayant un niveau de confiance d'environ 95 % autour de $F_écart_{Qk,EE}$.

¹⁴⁶ Ramenée à 1 m² de surface habitable afin d'être plus facilement appréhendable.

¹⁴⁷ Avec une largeur de 0,74, son domaine est quasiment aussi étendu que le domaine défini par les trois autres quartiles accolés (largeur de 0,75).

¹⁴⁸ Notés EE_i dans le Chapitre 3.

La Figure 4.5 représente pour chaque quartile les facteurs d'écart moyens des économies d'énergie et leur intervalle d'un niveau de confiance d'environ 95 % en fonction des économies d'énergie surfaciques simulées.

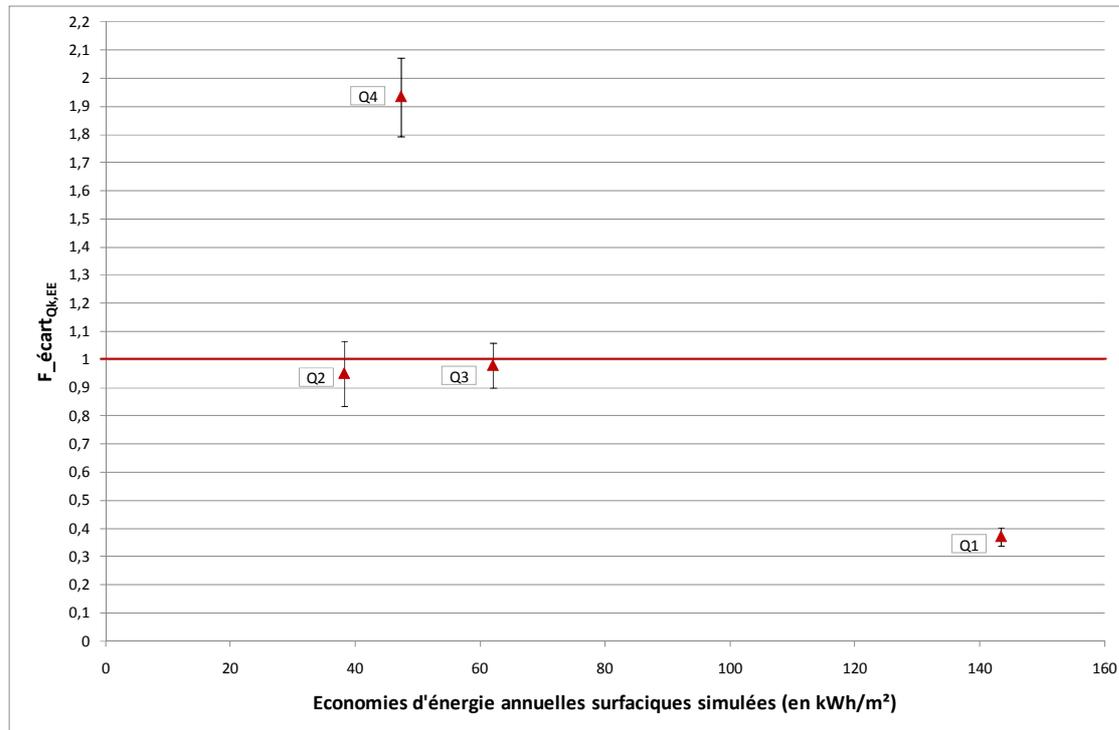


Figure 4.5 $F_{\text{écart}_{Qk,EE}}$ et leur intervalle d'un niveau de confiance d'environ 95 % pour chaque quartile de $F_{\text{écart}_{i,conso,av}}$ en fonction des économies d'énergie simulées

Premièrement, nous pouvons observer que les facteurs d'écart moyens des économies d'énergie présentent des différences d'un quartile à l'autre beaucoup plus importantes que les facteurs d'écart moyens des consommations. L'intervalle min-max est de [0,37 ; 1,93] contre respectivement [0,49 ; 1,19] pour la situation avant travaux et [0,56 ; 1,04] pour la situation après travaux.

Nous pouvons également remarquer que la valeur des facteurs d'écart moyens ne semble pas dépendre linéairement de celle des économies d'énergie simulées. Par exemple, le quatrième quartile malgré des économies d'énergie simulées encadrées par celles des deuxième et troisième quartiles possède un facteur d'écart moyen très éloigné de ceux de ces derniers, relativement proches entre eux.

Tâchons d'analyser les valeurs des facteurs d'écart moyens des économies d'énergie (Figure 4.5) au regard des évolutions des facteurs d'écart moyens des consommations entre les situations avant et après travaux des différents quartiles (Figure 4.4) :

- le quartile Q1 des facteurs d'écart avant travaux les plus bas ($F_{\text{écart}_{Q1,conso,av}}$, facteur moyen de 0,49) présentant une augmentation du facteur d'écart moyen après travaux ($F_{\text{écart}_{Q1,conso,ap}}$, facteur moyen de 0,56, les écarts relatif et absolu diminuent en valeur absolue) connaît une importante surestimation des économies d'énergie ($F_{\text{écart}_{Q1,EE}}$, facteur moyen de 0,37),
- les quartiles Q2 et Q3 des facteurs d'écart avant travaux centraux (facteurs moyens des deuxième et troisième quartiles respectivement de 0,70 et 0,89) présentant de faibles baisses des facteurs d'écart moyens après travaux (facteurs moyens respectivement de 0,67 et 0,87, les écarts relatifs et absolus respectivement augmentent et diminuent très faiblement en valeur absolue) connaissent une quasi-égalité des économies d'énergie simulées et observées,
- le quartile Q4 des facteurs d'écart avant travaux les plus élevés (facteur moyen de 1,19) présentant une diminution du facteur d'écart moyen après travaux (facteur d'écart moyen

de 1,04, les écarts relatif et absolu diminuent) connaît une forte sous-estimation des économies d'énergie (facteur moyen de 1,93).

Ainsi, il semble que **plus l'écart sur les consommations diminue entre les situations avant et après travaux et plus l'écart sur les économies d'énergie est important**, ce qui *a priori* peut paraître contre-intuitif. Réécrivons l'expression définissant $F_écart_{Qk,EE}$ pour mieux comprendre :

$$F_écart_{Qk,EE} = \frac{EE_{Qk}^{obs}}{EE_{Qk}^{sim}} \quad (eq.36)$$

nous retiendrons la simplification d'écriture EE_{Qk}^{obs} et EE_{Qk}^{sim} pour respectivement $\sum_{i=1, Qk}^{N, Qk} EE_i^{obs}$ et $\sum_{i=1, Qk}^{N, Qk} EE_i^{sim}$ pour l'ensemble des termes relatifs au quartile Qk ¹⁴⁹.

L'équation 36 peut s'écrire d'après l'équation 30, sous-partie 4.2.2 (ou 27, sous-partie 4.2) :

$$F_écart_{Qk,EE} = \frac{(F_écart_{Qk,conso,av} * C_{Qk,av}^{sim,normal}) - (F_écart_{Qk,conso,ap} * C_{Qk,ap}^{sim,normal})}{EE_{Qk}^{sim}} \quad (eq.37)$$

ou encore en ajoutant et enlevant au numérateur $F_écart_{Qk,conso,av} * C_{Qk,av}^{sim,normal}$,

$$F_écart_{Qk,EE} = F_écart_{Qk,conso,av} + \left[\frac{(F_écart_{Qk,conso,av} - F_écart_{Qk,conso,ap}) * C_{Qk,ap}^{sim,normal}}{EE_{Qk}^{sim}} \right] \quad (eq.38)$$

D'après les équations 32 (sous-partie 4.2.2) et 37, elle est équivalente à l'équation suivante :

$$F_écart_{Qk,EE} = 1 + \left[\frac{(Ecart_relatif_{Qk,conso,av} * C_{Qk,av}^{sim,normal}) - (Ecart_relatif_{Qk,conso,ap} * C_{Qk,ap}^{sim,normal})}{EE_{Qk}^{sim}} \right] \quad (eq.39)$$

Ceci revient à l'expression suivante en termes d'écart relatif sur les économies d'énergie :

$$Ecart_relatif_{Qk,EE} = \left[\frac{(Ecart_relatif_{Qk,conso,av} * C_{Qk,av}^{sim,normal}) - (Ecart_relatif_{Qk,conso,ap} * C_{Qk,ap}^{sim,normal})}{EE_{Qk}^{sim}} \right] \quad (eq.40)$$

Les équations 38 et 39 permettent ainsi de relier la valeur du facteur d'écart des économies d'énergie aux évolutions entre les situations avant et après travaux des facteurs d'écart des consommations et des écarts relatifs. Pour être complet, tâchons également de rapprocher le facteur d'écart des économies d'énergie de l'évolution des écarts absolus sur les consommations :

$$F_écart_{Qk,EE} = \frac{C_{Qk,av}^{obs,normal} - C_{Qk,ap}^{obs,normal}}{EE_{Qk}^{sim}} \quad (eq.41)$$

ce qui peut s'écrire en ajoutant et enlevant au numérateur $C_{Qk,av}^{sim,normal}$ et $C_{Qk,ap}^{sim,normal}$,

$$F_écart_{Qk,EE} = 1 + \left[\frac{(C_{Qk,av}^{obs,normal} - C_{Qk,av}^{sim,normal}) - (C_{Qk,ap}^{obs,normal} - C_{Qk,ap}^{sim,normal})}{EE_{Qk}^{sim}} \right] \quad (eq.42)$$

ou encore d'après l'équation 33 (sous-partie 4.2.2),

$$F_écart_{Qk,EE} = 1 + \left(\frac{Ecart_absolu_{Qk,conso,av} - Ecart_absolu_{Qk,conso,ap}}{EE_{Qk}^{sim}} \right) \quad (eq.43)$$

¹⁴⁹ En plus d'alléger l'écriture, cette simplification permet de faire plus facilement l'analogie avec un cas individuel i .

Ceci est également équivalent à :

$$Ecart_absolu_{Qk,EE} = Ecart_absolu_{Qk,conso,av} - Ecart_absolu_{Qk,conso,ap} \quad (eq.44)$$

Par conséquent selon les équations 43 et 44, pour que les économies d'énergie simulées soient égales aux économies d'énergie observées, il faut que l'écart absolu sur la consommation après travaux soit égale à l'écart absolu sur la consommation avant travaux. Les consommations après travaux étant censées être significativement inférieures aux consommations avant travaux, ceci se traduit par une augmentation de l'écart relatif entre les situations avant et après travaux (voir équations 39 et 40), ce qui revient à une diminution du facteur d'écart si sa valeur avant travaux est inférieure à 1 et à une augmentation du facteur d'écart s'il est supérieur à 1 avant travaux (voir équation 38).

Dans le cas **des premier et quatrième quartiles**, les facteurs d'écart moyens des consommations avant travaux respectivement de 0,49 et de 1,19 augmentant et diminuant en situation après travaux ($F_écart_{Qk,conso,av} - F_écart_{Qk,conso,ap}$ respectivement négatif et positif, voir équation 38), les facteurs d'écart des économies d'énergie diminuent et augmentent par rapport à ceux des consommations avant travaux. Ce qui peut encore s'exprimer de la façon suivante : pour ces deux quartiles, **les diminutions des écarts relatifs et absolus sur les consommations entre avant et après travaux entraînent des augmentations de l'écart relatif sur les économies d'énergie par rapport à celui sur les consommations avant travaux.**

Concernant **les quartiles centraux**, les facteurs d'écart moyens des consommations avant travaux respectivement de 0,70 et 0,89 diminuant légèrement en situation après travaux, les facteurs d'écart des économies d'énergie augmentent et tendent vers l'unité. En effet, **l'augmentation de leurs écarts relatifs sur les consommations entre avant et après travaux traduit une très faible baisse de leurs écarts absolus ce qui a pour conséquence une quasi-égalité entre les économies d'énergie simulées et observées.**

Notons que dans tous les cas, à moins du passage d'une surestimation des consommations à une sous-estimation et vice et versa (des signes opposés entre les écarts absolus des consommations avant et après travaux), l'écart absolu sur les économies d'énergie (voir équation 44) est toujours inférieur, en valeur absolue, à celui sur les consommations avant travaux.

En conclusion, **il est important de noter que toute modification entre les situations avant et après travaux des écarts absolus entre les consommations simulées et observées crée un écart entre économies d'énergie simulées et observées. Ce dernier évoluant de surcroît de manière opposée à celui des consommations.** Plus la réduction d'une surestimation des consommations entre avant et après travaux est importante, plus les économies d'énergie sont surestimées. **Ainsi, à partir d'un écart de consommations avant travaux donné non nul, il est impossible d'avoir un gain de précision à la fois sur les consommations après travaux et sur les économies d'énergie.**

La variation des écarts sur les consommations entre avant et après travaux semblant d'autant plus réduite que l'écart avant travaux est faible (facteur d'écart proche de 1), il faut, semble-t-il, minimiser ce dernier pour obtenir les écarts les plus petits possibles à la fois sur les consommations après travaux et sur les économies d'énergie.

4.3. Modélisation statistique des écarts

Au regard des fortes dispersions des facteurs d'écart à l'échelle du logement pour une valeur de consommation simulée (voir Figures 4.1 et 4.3), il ne semble pas possible d'établir avec précision une relation directe entre le facteur d'écart et la consommation simulée que ce soit en situation avant ou après travaux. Une amélioration de la précision des estimations du modèle de calcul à l'échelle d'un logement ne semble donc pouvoir passer que par une identification des différentes sources d'écart entre simulation et observation.

Au sein de la littérature, les principales sources d'écart identifiées sont le comportement des ménages et la performance des bâtiments (bâti et/ou système) que cela soit dans le cadre de bâtiments faisant l'objet de campagnes de mesures (BRANCO, et al., 2004) (ZGRAGGEN, 2010) (ENERTECH, 2010) ou d'enquêtes (CAYRE, et al., 2011) (GUERRA-SANTIN, et al., 2012) (LAURENT, et al., 2013). Toutefois, s'agissant de ces derniers cités qui sont de par la nature des données exploitées proches de notre travail, les effets des différentes sources d'écart ne sont pas forcément tous quantifiés individuellement et quand ils le sont, la quantification n'est pas forcément effectuée *ceteris paribus*.

Pour cela, nous utiliserons une modélisation statistique permettant d'étudier les effets de différents facteurs toutes choses étant égales par ailleurs (étude de l'effet d'un facteur en neutralisant les effets des autres facteurs).

Tout d'abord, nous tâcherons de distinguer, parmi les facteurs explicatifs des écarts entre consommations simulées et observées en situation avant travaux, les facteurs techniques liés au bâti et aux systèmes énergétiques et les facteurs comportementaux. Ensuite, nous étudierons l'influence sur les écarts des consommations après travaux des écarts avant travaux et des changements intervenus entre les périodes avant et après travaux (*e.g.* action d'efficacité énergétique mise en place ou changement de comportement du ménage). Nous n'essayerons pas d'expliquer par un modèle statistique les écarts sur les économies d'énergie, ceux-ci étant directement le résultat des écarts sur les consommations avant et après travaux.

4.3.1. Détection par modélisation statistique des sources d'écart entre consommations calculées et observées : revue de la littérature

Parmi la littérature, à notre connaissance, seulement deux articles (SCHULER, et al., 2000) (MAJCEN, et al., 2013_b) utilisent une approche par modélisation statistique pour détecter les origines des écarts entre des consommations calculées et observées.

Schuler et al. (SCHULER, et al., 2000) exploitent un large panel d'environ 15 000 logements (maisons individuelles et appartements) allemands provenant d'une enquête réalisée en 1988 auprès de ménages de l'ex-Allemagne de l'Est. Ils étudient, sur l'usage chauffage, les écarts entre les consommations annuelles déduites de consommations récupérées auprès des fournisseurs d'énergie et les résultats d'une estimation simplifiée à partir de valeurs moyennes, par période de construction et par type de bâtiment, de demande d'énergie de chauffage (énergie utile) par m² de surface de logement¹⁵⁰. Ils définissent sous le vocable d'« intensité d'utilisation » du logement le rapport entre la consommation « réelle » et la consommation calculée, ce qui est équivalent à ce que nous avons appelé facteur d'écart (équation 27, sous-partie 4.2) mais uniquement pour des consommations de chauffage. Deux modèles statistiques ayant pour variable expliquée cette intensité d'utilisation sont réalisés (*a priori* sur la base d'ANCOVA) en appliquant une méthode de sélection descendante sur les variables explicatives avec un seuil de signification sur le test t de Student¹⁵¹ de 0,1 (ne garantissant pas l'absence de zéro dans l'intervalle de confiance à 95 % des coefficients). Ces derniers tâchent respectivement d'expliquer l'intensité d'utilisation à partir de caractéristiques socio-économiques du ménage et de caractéristiques techniques du logement. Avec un R² de 0,008, les variables socio-économiques n'apportent aucune explication. Les variables techniques permettent d'expliquer une part plus importante des variations d'intensité d'utilisation, toutefois celle-ci reste très modeste avec un R² de 0,144. En raison des très faibles précisions fournies sur les modèles (seulement les coefficients, les coefficients normalisés et les R²) et de certaines anomalies dans les résultats donnés (*e.g.* un seul coefficient donné pour les variables qualitatives malgré la présence pour certaines de plusieurs modalités), nous ne pourrions avoir qu'une analyse sommaire des résultats obtenus dans la partie consacrée à la discussion des modèles présentés dans le cadre de ce manuscrit.

¹⁵⁰ Valeur multipliée par la surface du logement et une correction climatique et divisée par un rendement moyen de la totalité de l'installation de chauffage (supposé suivant l'énergie de chauffage) pour estimer la consommation annuelle d'énergie pour le chauffage.

¹⁵¹ Pour rappel, il teste l'hypothèse nulle « le coefficient, estimateur de l'effet de la variable, vaut 0 ».

Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b) utilisent aussi un panel conséquent, avec environ 40 000 logements (maisons individuelles et appartements) extrait de la base des logements néerlandais ayant fait l'objet d'une certification énergétique durant l'année 2010 (attribution d'une étiquette énergie entre A et G). Ils s'intéressent à l'écart entre les consommations annuelles de gaz estimées par la méthode de calcul liée à la certification énergétique (méthode simplifiée équivalente à la méthode 3CL-DPE (ARRETE 17 OCTOBRE, 2012) employée en France) et les consommations annuelles de gaz récupérées auprès des fournisseurs d'énergie. La méthode retenue pour étudier les origines des écarts diffère de celle de Schuler et al. (SCHULER, et al., 2000). En effet, il est choisi de comparer les valeurs des coefficients d'un modèle tâchant d'expliquer la consommation théorique de gaz et de son équivalent tâchant d'expliquer la consommation réelle de gaz, la différence entre les coefficients d'une même variable ou modalité indiquant la source d'un écart entre consommations théoriques et réelles. Afin de se rapprocher le plus possible d'une comparaison des coefficients *ceteris paribus*, ces deux modèles (*a priori* des ANCOVA) présentent le même jeu de variables explicatives sélectionnées manuellement selon un seuil de signification sur le test t de Student de 0,01¹⁵². A la façon de Schuler et al. (SCHULER, et al., 2000) sont pris en compte parmi les variables explicatives des caractéristiques techniques du logement et des caractéristiques socio-économiques du ménage. Le modèle obtenu pour la consommation théorique présente avec un R² de 0,879 une bien meilleure capacité d'explication que celui pour la consommation réelle (R² de 0,505), toutefois certaines sources d'écart sont détectées. Le détail des résultats obtenus par Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b) sera présenté lors de la discussion concernant les modèles réalisés dans la présente étude.

Néanmoins, nous pouvons souligner dès à présent certaines différences entre ces deux études et le travail présenté. Tout d'abord, la taille des échantillons que nous exploitons (quelques centaines de logements) est très petite par rapport aux dizaines de milliers de cas constituant les bases de données de ces articles. Cependant cette plus petite dimension, nous a permis de réaliser, en termes de temps et de coût, des enquêtes incluant des questions plus détaillées sur les caractéristiques techniques des logements et surtout des questions sur les comportements des ménages, données absentes des deux références.

Deuxièmement, nous travaillons sur des consommations simulées et observées tous usages et non sur un usage spécifique (chauffage pour Schuler et al. (SCHULER, et al., 2000)) ou une énergie donnée (gaz pour Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b)), ce qui nous permet de minimiser l'introduction de certains biais¹⁵³ ou d'incertitudes¹⁵⁴. Mais les données de consommations déclarées par les ménages que nous exploitons correspondent pour certaines à des énergies non de réseau (fioul, GPL et bois) et ainsi ne font pas forcément l'objet d'un comptage précis. Elles présentent donc pour une partie un niveau d'incertitude plus élevé *a priori* que les consommations de gaz provenant des fournisseurs d'énergie utilisées par Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b).

Enfin, Schuler et al. (SCHULER, et al., 2000) et Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b) tâchent d'expliquer des écarts entre consommations calculées et « réelles » pour une seule année donnée, sans pouvoir resituer celle-ci par rapport à l'historique des logements et des ménages. Tandis que grâce à la spécificité des échantillons que nous avons à disposition, nous pouvons étudier des écarts de consommations en situation avant travaux, ce qui est équivalent aux deux études citées, mais également des écarts en situation après travaux. L'étude de ces derniers se faisant en connaissant d'une part, les écarts avant travaux et d'autre part, les évolutions des logements, des ménages et de leur comportement entre l'avant et l'après travaux.

4.3.2. Modélisation des écarts de consommations avant travaux

¹⁵² Ne sont conservées que les variables quantitatives présentant un coefficient significatif dans l'un des deux modèles et les variables qualitatives présentant au moins une modalité significative dans l'un des deux modèles.

¹⁵³ Dans le cas de Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b), la méthode de calcul n'estime pas la consommation de gaz liée à l'usage cuisson.

¹⁵⁴ Dans le cas de Schuler et al. (SCHULER, et al., 2000), ils déduisent des consommations par énergie les consommations de chauffage à partir d'un certain nombre d'hypothèses.

Nous commencerons par présenter l'échantillon étudié et la méthode statistique employée. Les facteurs pris en compte, *i.e.* les variables explicatives, seront explicités ensuite ainsi que les questions que leur effet sous-tend avant d'aborder les résultats et leur discussion.

4.3.2.1. Echantillon étudié

L'échantillon utilisé pour la modélisation des écarts des consommations avant travaux correspond aux 254 cas de l'échantillon MDE 52-55 avant travaux auquel nous retirons :

- 4 cas ayant pour système principal de chauffage une PAC (nombre de cas trop faible pour être étudié),
- 2 cas ayant pour système principal une chaudière combustible récente (installée après 2001) et ayant des consommations de bois d'appoint conséquente et très élevée (nombre de cas trop faible pour être étudié),

soit au final un échantillon de 248 cas.

Il est important de noter que cet échantillon n'a pas été construit dans un objectif de représentativité du parc français de MI (voir Chapitre 2, sous-partie 2.1.4) ainsi nous ne pourrions étudier l'ensemble des sources d'écart entre consommations simulées et observées pour une MI française¹⁵⁵. Toutefois, en raison des caractéristiques des logements étudiés (majoritairement des MI d'avant 1974 chauffées à partir de chaudières anciennes), nous étudierons des MI supposées être parmi les moins performantes du parc soit, d'après les observations faites ci-dessus (voir sous-partie 4.2.1), des MI censées présenter les plus grands écarts entre consommations simulées et observées.

4.3.2.2. Méthode statistique

La méthode statistique choisie est proche de celle employée dans le Chapitre 3 pour expliquer la consommation énergétique annuelle après travaux (voir Chapitre 3, sous-partie 3.3.2) ainsi nous nous attacherons, au cours de ce sous-paragraphe, à ne réaliser qu'une description des différences par rapport à cette première méthode.

La modélisation statistique choisie est une analyse de covariance (ANCOVA) avec une méthode des moindres carrés ordinaires.

La variable expliquée est le logarithme népérien (\ln) du facteur d'écart ($F_{\text{écart}}$) entre les consommations énergétiques¹⁵⁶ ($conso$) simulées (sim) et observées (obs) de la situation avant travaux (av). Ce dernier sera noté pour le cas i : $\ln(F_{\text{écart},i,conso,av})$. D'après la définition du facteur d'écart (voir équation 27, sous-partie 4.2), ceci est encore équivalent à $\ln(C_{i,\vartheta}^{obs,normal}) - \ln(C_{i,\vartheta}^{sim,normal})$.

L'utilisation du logarithme du facteur d'écart à la place par exemple du seul facteur d'écart se justifie du point de vue analytique. En effet, le facteur d'écart des consommations est le rapport de deux termes (consommations simulées et observées) dont la plus grande part est décrite mathématiquement par des effets multiplicatifs (déperditions thermiques du bâti multiplié par l'inverse du rendement du système principal de chauffage et par des degrés-jours). Ainsi en utilisant le logarithme, il devient possible de transformer mathématiquement ces effets multiplicatifs en relations additives requises par un modèle de régression linéaire.

Afin de ne garder dans les modèles que les variables significatives, une sélection par méthode descendante est appliquée avec un seuil de signification sur le test t de Student de 0,05.

¹⁵⁵ N'ayant pas dans l'échantillon de logements collectifs, nous pouvons encore moins prétendre étudier l'ensemble des sources d'écart pour un logement français quel que soit.

¹⁵⁶ Pour rappel, il s'agit de consommations énergétiques (énergie finale en kWh PCI) annuelles tous usages ajustées à un climat normal.

Nous choisissons d'exprimer les effets des différentes modalités constituant une variable qualitative en se fixant la contrainte « somme des coefficients =0 ». Ce choix présente l'avantage d'être moins arbitraire qu'une référence sur la première modalité de la variable (« coefficient de la 1^{ère} modalité =0 »), notamment lorsque comme ici la sélection de celle-ci n'est pas toujours une évidence. Par ailleurs, une telle contrainte tend automatiquement à faire ressortir des symétries dans les effets des modalités, ce qui nous intéresse particulièrement afin de faire apparaître les modalités entraînant une augmentation des écarts de consommation et à l'opposé, celles engendrant une diminution des écarts.

Ainsi l'équation du modèle statistique sera de la forme suivante :

$$\ln(F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{av}}}) = Cst + \sum_{j=1}^{N_j} a_j * \text{variable}_j + \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{l=1}^{m_k} b_{kl} * \text{variable}_{k_modalité_l} + \varepsilon_i$$

(eq.45)

avec Cst : constante correspondant au ln du facteur d'écart des consommations avant travaux pour une situation où toutes les variables quantitatives sont égales à 0 et où toutes les variables qualitatives sont égales à un équivalent de modalité moyenne,

a_j et variable_j : coefficient estimateur de l'effet de la variable quantitative j , j allant de 1 à N_j (nombre total de variables quantitatives dans le modèle),

b_{kl} et $\text{variable}_{k_modalité_l}$: coefficient estimateur de l'effet de la modalité l de la variable qualitative k , k allant de 1 à N_k (nombre total de variables qualitatives dans le modèle) et l allant de 1 à m_k (nombre total de modalités de la variable qualitative k),

ε_i : erreur du modèle pour le cas i , exprime l'information manquante dans l'explication linéaire du ln du facteur d'écart à partir des variables explicatives (problème de spécification, variables non prises en compte, etc.).

Pour rappel, tous les effets estimés par le modèle (coefficient) le sont toutes choses (toutes les autres variables) étant égales par ailleurs. Afin de faciliter la lecture, nous ne le repréciserons plus dans les paragraphes qui vont suivre.

Un dernier point à souligner est celui de l'interprétation des coefficients d'un modèle avec une variable expliquée en logarithme. Dans le cas de ce modèle, la totalité des variables quantitatives étudiées ne sera pas transformée en ln de ces variables. Par conséquent, leur coefficient sera approximativement égal au pourcentage de variation du facteur d'écart des consommations pour une augmentation d'une unité de la variable quantitative. Pour une variable quantitative, l'interprétation sera très similaire : la différence des coefficients de deux modalités d'une même variable sera approximativement égale au pourcentage de variation du facteur d'écart des consommations entre les deux modalités. Par conséquent, malgré l'utilisation du ln du facteur d'écart comme variable expliquée, les coefficients du modèle obtenu seront directement interprétables en termes d'évolution du facteur d'écart des consommations lui-même.

Toutefois, avant d'analyser les résultats nous nous devons d'une part, de vérifier la signification globale des modèles et d'autre part, d'effectuer une analyse des résidus¹⁵⁷ des modèles afin de s'assurer du respect des principales hypothèses de la régression linéaire multiple (l'homoscédasticité¹⁵⁸ et une distribution des résidus suivant une loi normale).

Enfin, nous analyserons de nouveau la qualité du modèle au travers principalement de deux grandeurs : le R^2 ajusté qui qualifie la capacité d'explication du modèle et le RMCE qui qualifie la capacité de prédiction du modèle (voir Chapitre 3, sous-partie 3.3.2, équations 16 et 17 pour leur définition précise).

¹⁵⁷ Pour rappel, résidu = valeur observée - valeur prédite par le modèle. Estimation de l'erreur du modèle (voir équation 45).

¹⁵⁸ Pour rappel, la variance des résidus doit être constante pour chaque observation et pour chaque valeur des variables explicatives (répartition aléatoire et homogène de l'erreur du modèle).

4.3.2.3. Variables explicatives

Nous allons expliquer le ln du facteur d'écart entre les consommations simulées et observées en situation avant travaux à partir :

- de caractéristiques techniques du bâti (3 variables),
- de caractéristiques techniques des systèmes de chauffage et de production d'ECS (3 variables),
- de caractéristiques techniques des systèmes énergétiques des autres usages (3 variables),
- d'une caractéristique climatique (1 variable),
- de caractéristiques socio-économiques des ménages (2 variables),
- et de comportements déclarés par les ménages (3 variables).

Les variables explicatives seront présentées selon ces six regroupements.

Caractéristiques techniques du bâti

Les caractéristiques du bâti sont tout d'abord prises en compte au travers de deux variables quantitatives permettant de définir le volume du logement, la surface habitable et la hauteur moyenne sous-plafond. Ces deux variables sont la possibilité de tester la validité du modèle monozone utilisé pour les simulations pour :

- d'une part, de grandes surfaces habitables (risque d'ambiance thermique intérieure de moins en moins homogène),
- et d'autre part, de grandes hauteurs sous-plafond (risque de gradient de température sur la hauteur sous-plafond d'autant plus élevé).

Afin d'avoir une constante du modèle (terme Cst de l'équation 45, sous-partie 4.3.2.2) qui ne corresponde pas à une surface habitable et une hauteur sous-plafond nulles, ce qui n'aurait pas de sens physique, nous recentrons ces variables sur les moyennes de chacune de ces grandeurs sur l'échantillon employé (moyenne des surfaces habitables : 137,4 m² et moyenne des hauteurs sous-plafond : 2,52 m). Par ailleurs, les coefficients calculés par le modèle devant correspondre à une estimation de l'évolution en pourcentage du facteur d'écart avant travaux pour des augmentations d'une unité de ces grandeurs, nous choisissons d'exprimer la surface habitable en dizaine de m² et la hauteur sous-plafond en dizaine de cm. Voir Tableau 4.10 pour les domaines de définition de ces deux variables.

Tableau 4.10 Domaines de définition des variables « surface habitable » et « hauteur sous-plafond »

	Surface habitable (en 10 m ²)	Hauteur sous-plafond (en 0,1 m)
Domaine de définition	[-8,74; 21,26]	[-5,2 ; 21,8]

La troisième et dernière variable concernant le bâti est le coefficient G du logement utilisé pour réaliser les simulations (voir équation 25, sous-partie 4.1.2.2). Celui-ci permet de caractériser la performance thermique de l'enveloppe du logement à travers les déperditions volumiques théoriques de celui. A la façon des deux variables quantitatives présentées ci-dessus, la variable est premièrement recentrée sur la moyenne sur l'échantillon (moyenne : 1,15 W/(m³.°C)) puis exprimée dans une nouvelle unité (en 0,1 W/(m³.°C)) afin d'avoir un coefficient statistique plus aisément compréhensible. Voir Tableau 4.11 pour son domaine de définition.

Tableau 4.11 Domaine de définition de la variable G

	G (en 0,1 W/(m ³ .°C))
Domaine de définition	[-6,2 ; 12,0]

Dans la partie consacrée à la quantification des écarts en situation avant travaux (voir Figure 4.1, sous-partie 4.2.1), nous avons pu remarquer qu'un accroissement des consommations simulées tend à une augmentation de la surestimation des consommations observées (le facteur d'écart s'éloigne négativement de 1). Une même tendance à la surestimation lorsque la performance énergétique théorique du logement diminue est notée dans les travaux de Haas et al. (HAAS, et al., 2000), d'Allibe (ALLIBE, 2012), de Guerra-Santin et Itard (GUERRA-SANTIN, et al., 2012), de Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_a) et de Laurent et al. (LAURENT, et al., 2013). Toutefois, seuls les travaux de Haas et al. (HAAS, et al., 2000) observent l'évolution de l'écart par rapport à une grandeur quantifiant la qualité thermique théorique du bâti (besoins surfaciques de chauffage du logement, en W/(m².°C)).

Une partie du reste de la littérature (ALLIBE, 2012) (GUERRA-SANTIN, et al., 2012) (LAURENT, et al., 2013) qualifie la performance théorique du logement via uniquement une grandeur globale (enveloppe+ systèmes) (EPC¹⁵⁹ pour Guerra-Santin et Itard (GUERRA-SANTIN, et al., 2012) et coût du service normé du chauffage pour Allibe (ALLIBE, 2012) et Laurent et al. (LAURENT, et al., 2013)). Schuler et al. (SCHULER, et al., 2000) utilisent eux des proxys de la performance thermique de l'enveloppe (période de construction et nombre de logements dans le bâtiment). Quant à Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_a), ils utilisent un indicateur global (l'étiquette énergie du logement) et des proxys (*e.g.* âge du logement).

En intégrant dans les variables explicatives à la fois la performance thermique théorique du logement et la performance théorique des systèmes énergétiques, nous souhaitons étudier séparément leur effet sur les écarts entre consommations simulées et observées. Il s'agira tout d'abord de déterminer si les effets sont significatifs puis pour ceux l'étant de les quantifier.

Caractéristiques techniques des systèmes de chauffage et de production d'ECS

La prise en compte des systèmes énergétiques du logement est faite au travers de plusieurs variables, chacune caractérisant un système ou un ensemble de systèmes en rapport avec un usage en particulier (*i.e.* chauffage, production d'ECS, cuisson, éclairage, équipements électriques). Nous présentons séparément les variables liées aux systèmes de chauffage et de production d'ECS, ces derniers étant censés représenter les usages les plus consommateurs d'une MI¹⁶⁰.

Au travers des déclarations des ménages lors des enquêtes menées, nous connaissons la nature du système principal de chauffage mais également celle(s) du ou des systèmes d'appoint. Le modèle de calcul utilisé permet de tenir compte de ces différents systèmes avec cependant une particularité pour les appoints de chauffage au bois (voir sous-partie 4.1.2.3). En effet, le nombre de stères consommés par an par l'appoint est une entrée requise par le logiciel. L'existence même de cette entrée nous laisse à penser qu'elle risque d'avoir une influence sur les écarts entre consommations simulées et observées, celle-ci engendrant une part intrinsèquement sans écart par rapport à l'observé dans la consommation totale de chauffage simulée. Par ailleurs, au sein de l'échantillon certaines natures de système principale de chauffage présentent de forts liens avec la présence ou non d'un appoint de chauffage au bois (*e.g.* 73 % des cas ayant des convecteurs ou des radiateurs électriques comme système principal ont un appoint bois). Par conséquent, afin d'éviter toute multicollinéarité excessive au sein des variables explicatives, nous choisissons de prendre en compte dans une même variable la nature du système principal de chauffage et la consommation de bois d'appoint. Celle-ci sera nommée système

¹⁵⁹ Energy Performance Certificate, équivalent au DPE en France.

¹⁶⁰ Non de type Bâtiment Basse Consommation (BBC) ou passif, comme c'est le cas pour les logements de l'échantillon.

de chauffage, l'association de la nature du système principal de chauffage et de la consommation annuelle de bois d'appoint pouvant être considéré un qualificatif du système global de chauffage.

Pour cela, nous discrétisons à l'aide d'une méthode automatique de Fisher les consommations annuelles de bois d'appoint en trois groupes. Voir le Tableau 4.12 pour le résultat de cette discrétisation.

Tableau 4.12 Résultats de la discrétisation des consommations annuelles de bois d'appoint de l'échantillon

Groupe	Consommation annuelle de bois d'appoint (en stère)	Représentativité du groupe (en %)
Bois d'appoint nul ou faible	0 à 5	72
Bois d'appoint conséquent	6 à 16	21
Bois d'appoint très élevé	17 à 30	7

Nous pouvons notamment remarquer l'existence d'un groupe, peu fréquent dans l'échantillon (7 % des cas), ayant des consommations annuelles de bois d'appoint très élevées (17 stères et plus, soit plus de 29000 kWh PCI). Le logiciel de simulation utilisé ne permet pas de définir comme système principal de chauffage une cheminée, un insert ou un poêle bois, ce qui rend obligatoire la prise en compte de ces systèmes en appoint d'un chauffage principal, d'où la présence dans l'échantillon de certains cas avec des consommations de bois dites « d'appoint » très élevées.

Ensuite, nous regroupons les types de système de chauffage possibles de choisir pour réaliser la simulation (voir Annexe 3-entrée 7 pour la liste complète) dans les catégories suivantes :

- convecteurs ou radiateurs électriques (rendement théorique électrique proche de 1 dans SimFast) ;
- chaudière combustible (gaz, fioul ou GPL) ancienne (installée en 2001 et avant) : la méthode de calcul fait la distinction entre des chaudières installées avant 1989 et entre 1989 et 2001 inclus, toutefois la proximité de leur rendement théorique nominal de combustion (respectivement 79 % et 83 % dans SimFast) nous permet de les regrouper ;
- chaudière combustible (gaz, fioul ou GPL) récente (installée après 2001) : la méthode de calcul fait la distinction entre des chaudières standards installées après 2001, des chaudières basse température et des chaudières à condensation, cependant de nouveau la proximité de leur rendement théorique nominal de combustion (respectivement 87 %, 90 % et 92 % sur PCS dans SimFast) nous permet de les regrouper afin d'obtenir une catégorie représentant un nombre de cas possible d'analyser ;
- chaudière bois bûches ancienne (rendement théorique nominal de combustion de 50 % dans SimFast).

Le regroupement de ces catégories avec les groupes de consommation de bois d'appoint fournit à la variable système de chauffage, les modalités détaillées dans le Tableau 4.13.

Tableau 4.13 Représentativité des modalités de la variable « système de chauffage »

Modalité	Représentativité de la modalité (en %)
Convecteurs ou radiateurs électriques + bois d'appoint nul ou faible	9
Chaudière combustible récente + bois d'appoint nul ou faible	14
Chaudière combustible ancienne + bois d'appoint nul ou faible	45
Chaudière bois bûches ancienne + bois d'appoint nul ou faible	5
Convecteurs ou radiateurs électriques + bois d'appoint conséquent	9
Chaudière combustible ancienne + bois d'appoint conséquent	11
Convecteurs ou radiateurs électriques + bois d'appoint très élevé	7

Une partie de l'échantillon présente également un appoint de chauffage n'utilisant pas le bois. Leur présence ou non n'étant pas reliée à la variable système de chauffage (coefficients de corrélation linéaire de la présence d'un appoint de chauffage non bois avec les modalités de la variable système de chauffage entre -0,136 et 0,081), celle-ci est prise en compte de manière séparée. Nous chercherons seulement à savoir si leur présence ou non a un effet sur le facteur d'écart des consommations. En effet, la prise en compte d'un appoint hors bois pour la simulation suppose notamment de faire des hypothèses quant à la part de la surface habitable chauffée par ce système. Ce choix même de définition d'un appoint n'est pas forcément représentatif de l'utilisation qui peut être faite de celui-ci, *e.g.* utilisation sur toute la surface habitable seulement lors des jours les plus froids. Voir Tableau 4.14 pour la représentativité des modalités de la variable.

Tableau 4.14 Représentativité des modalités de la variable « présence d'un appoint de chauffage hors bois »

Modalité	Représentativité de la modalité (en %)
Oui	8
Non	92

Enfin, la nature du système de production d'ECS est prise en compte au travers d'une variable qualitative aux modalités reprenant les choix possibles pour la réalisation de la simulation :

- chauffe-eau électrique,
- chaudière double usage avec ballon d'accumulation,
- chaudière double usage en instantanée.

Tableau 4.15 Représentativité des modalités de la variable « système de production d'ECS »

Modalité	Représentativité de la modalité (en %)
Chauffe-eau électrique	51
Chaudière double usage avec ballon d'accumulation	40
Chaudière double usage en instantanée	8

Caractéristiques techniques des systèmes énergétiques des autres usages

Les systèmes énergétiques des autres usages, *i.e.* cuisson, éclairage et équipements électriques, sont pris en compte via trois variables.

La variable relative à l'usage cuisson correspond à la nature de l'énergie utilisée pour les plaques de cuisson, celle-ci étant supposée l'énergie principale de cet usage. Trois modalités sont possibles : électricité, gaz et GPL. Voir le Tableau 4.16 pour leur représentativité au sein de l'échantillon.

Tableau 4.16 Représentativité des modalités de la variable « énergie principale de cuisson »

Modalité	Représentativité de la modalité (en %)
Electricité	39
Gaz	14
GPL	47

La variable relative à l'usage éclairage correspond au type d'éclairage utilisé. Trois modalités sont définies en rapport à ce qu'il est possible de prendre en compte pour la simulation : incandescent, fluocompact ou mixte. Voir le Tableau 4.17 pour leur représentativité au sein de l'échantillon.

Tableau 4.17 Représentativité des modalités de la variable « type d'éclairage »

Modalité	Représentativité de la modalité (en %)
Incandescent	25
Fluocompact	38
Mixte	37

La variable relative à l'usage lié aux équipements électriques (électroménager, informatique, audio...) est une variable quantitative correspondant au nombre total d'équipements présent dans le logement pris en compte pour la simulation (voir sous-partie 4.1.2.4). Pour que la constante du modèle statistique ne soit pas déterminée pour un nombre nul d'équipements, la variable est recentrée sur la moyenne sur l'échantillon (14 équipements par logement). Voir Tableau 4.18 pour son domaine de définition.

Tableau 4.18 Domaine de définition de la variable « nombre d'équipements électriques »

	Nombre d'équipements électriques (unité : un équipement)
Domaine de définition	[-6 ; 11]

Caractéristique climatique

Les consommations simulées et observées utilisées pour le calcul du facteur d'écart sont ajustées à un même climat normal (2663 °C.jour) mais de manière légèrement différente. La correction climatique des consommations simulées est directement appliquée sur les consommations de chauffage simulées à climat réel tandis que la correction climatique des consommations observées est elle appliquée sur une part de 70 % de la consommation tous usages à climat réel supposée représenter la consommation de chauffage. Puisque la correction climatique implique les DJU réels de l'année concernée (voir Chapitre 3, sous-partie 3.1.3.1, équation 3), s'il existe une source d'écart entre consommations simulées et observées due à cette correction climatique, celle-ci est supposée dépendre directement de ces DJU réels.

Par conséquent, nous choisissons comme variable caractérisant le climat les DJU réels de l'année observée. De nouveau, afin d'éviter de déterminer la constante du modèle statistique pour une valeur nulle n'ayant pas vraiment de sens, nous recentrons la variable sur les DJU du climat normal. L'unité de la variable n'est pas laissée en °C.jour mais passée en 100 °C.jour, pour rendre l'interprétation du coefficient du modèle plus facile. Voir Tableau 4.19 pour son domaine de définition.

Tableau 4.19 Domaine de définition de la variable « DJU réels »

	DJU réels (en 100 °C.jour)
Domaine de définition	[-6,19 ; 1,79]

Caractéristiques socio-économiques des ménages

Seulement deux variables explicatives concernant les caractéristiques socio-économiques des ménages sont à notre disposition.

La première variable socio-économique est le nombre d'occupants. En effet, il est intéressant de savoir si le logiciel de simulation prend correctement en compte des variations de celui-ci. La variable est recentrée sur le nombre d'occupants par ménage le plus fréquent de l'échantillon (2 occupants pour 55 % des cas). Voir le Tableau 4.20 pour son domaine de définition.

Tableau 4.20 Domaine de définition de la variable « nombre d'occupants »

	Nombre d'occupants (unité : un occupant)
Domaine de définition	[-1; 6]

La deuxième variable socio-économique utilisée est l'occupation en journée en semaine du logement. Celle-ci dépend directement entre autres de l'activité professionnelle du ménage (retraité, au chômage, en activité à temps plein et à l'extérieur...). Cette variable qualitative présente trois modalités :

- tous les occupants absents durant la journée,
- au moins un occupant partiellement présent durant la journée,
- au moins un occupant présent¹⁶¹ durant la totalité de la journée.

Voir le Tableau 4.21 pour leur représentativité au sein de l'échantillon.

Tableau 4.21 Représentativité des modalités de la variable « occupation en journée en semaine du logement »

Modalité	Représentativité de la modalité (en %)
Absent toute la journée	23
Partiellement présent sur la journée	18
Présent toute la journée	59

Cette variable sera l'occasion de tester la validité des hypothèses de simulation concernant les horaires d'absence en journée (8 h à 18 h) mais aussi la prise en compte des présences partielles sur la journée.

Comportements déclarés par les ménages

Les enquêtes réalisées nous permettent d'avoir des variables de comportement. Par ailleurs, il est important de noter que les simulations réalisées le sont avec les comportements déclarés des ménages et non des comportements conventionnels (comme c'est le cas par exemple pour la méthode de calcul utilisée par Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b)). Par conséquent, il s'agira de tester la bonne prise en compte par la méthode de calcul des comportements déclarés par les ménages et non pas de tester les conséquences des écarts entre comportements conventionnels et déclarés sur les écarts des consommations.

La première variable de comportement prise en compte est la température intérieure moyenne¹⁶² sur les périodes de présence (p) déclarée par le ménage pour la situation avant travaux en saison de chauffage (ch). Cette température est la température de consigne de chauffage employée pour les simulations. Elle sera notée pour le cas i : $T_{i,av}^{ch,moy,p}$. Cette valeur est recentrée sur la moyenne des

¹⁶¹ Peut-être le même occupant ou plusieurs occupants présents sur des moments différents de la journée.

¹⁶² Moyenne, non pondérée par les surfaces, entre la température déclarée pour les pièces de vie et pour les autres pièces.

températures sur l'échantillon ($19,7\text{ °C}^{163}$) afin de donner un sens physique à la constante du modèle statistique. Voir le Tableau 4.22 pour le domaine de définition de la variable.

Tableau 4.22 Domaine de définition de la variable $T_{i,av}^{ch,moy,p}$

	$T_{i,av}^{ch,moy,p}$ (en °C)
Domaine de définition	[-5,2 ; 5,3]

La deuxième variable concerne les comportements de gestion du chauffage et plus particulièrement de la gestion des réduits de température sur les jours de la semaine (lundi au vendredi). Trois modalités sont possibles :

- aucune réduction de température de consigne,
- réduction de température de consigne en journée ou la nuit,
- réduction de température de consigne en journée et la nuit.

Voir le Tableau 4.23 pour leur représentativité au sein de l'échantillon.

Tableau 4.23 Représentativité des modalités de la variable « gestion des réduits de température »

Modalité	Représentativité de la modalité (en %)
Aucune réduction	29
Réduction en journée ou la nuit	62
Réduction en journée et la nuit	9

La dernière variable concerne le comportement d'ouverture des fenêtres des ménages. Plus précisément, il s'agit d'un variable qualitative caractérisant le temps moyen sur une journée d'ouverture des fenêtres :

- moins de 10 min,
- de 10 min à 30 min,
- de 30 min à 1 heure,
- et plus d'1 heure.

Voir le Tableau 4.24 pour leur représentativité au sein de l'échantillon.

Tableau 4.24 Représentativité des modalités de la variable « temps moyen journalier d'ouverture des fenêtres »

Modalité	Représentativité de la modalité (en %)
Moins de 10 min	41
De 10 min à 30 min	37
De 30 min à 1 heure	12
Plus d'1 heure	10

Cette variable sera l'occasion de tester la validité de la prise en compte par la simulation de l'ouverture journalière des fenêtres selon une modalité dichotomique (oui ou non).

Etude de la multicollinéarité au sein des variables explicatives

La multicollinéarité au sein du jeu de variables explicatives est étudiée. Toutes les variables et les modalités du modèle statistique ont un facteur d'inflation de la variance (VIF) inférieure à $1,8^{164}$.

¹⁶³ Nous pouvons remarquer au passage que cette valeur est légèrement supérieure à la température de consigne de chauffage de 19 °C utilisée par les méthodes de calcul réglementaires et assimilées.

4.3.2.4. Résultats

Il est nécessaire de vérifier la validité du modèle, avant toute présentation de celui-ci.

Validation du modèle

La signification globale du modèle, testée via un test du F de Fischer¹⁶⁵, est très bonne avec une probabilité associée au F (p-value) inférieure à 0,0001 (F de 32,6). Cela signifie que le risque de se tromper est de moins de 0,01 % en concluant que les variables explicatives retenues par le modèle apportent une quantité d'information significative.

La Figure 4.6 qui représente les résidus normalisés (centrés réduits) en fonction des valeurs prédites par le modèle du $\ln(F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{av}}})$ permet une approche graphique de vérification de l'hypothèse d'homoscédasticité des résidus (répartition aléatoire et homogène autour du zéro de l'axe des ordonnées).

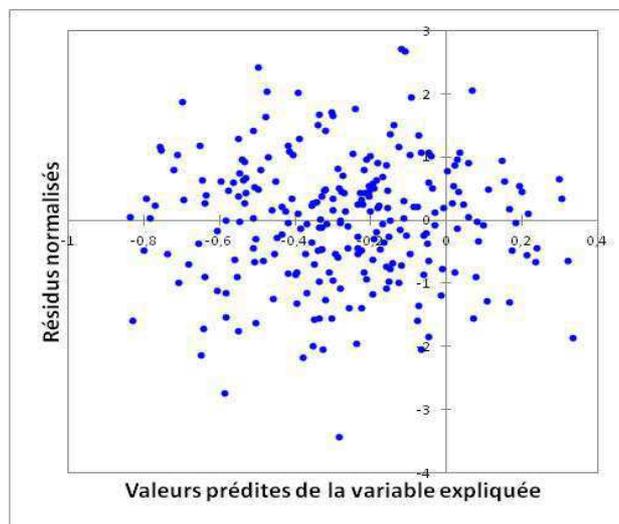


Figure 4.6 Résidus normalisés en fonction des valeurs de $\ln(F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{av}}})$ prédites par le modèle

Pour confirmer celle-ci, nous utilisons des tests de Levene et de Bartlett¹⁶⁶, avec un seuil de signification de 0,05, pour chacune des variables qualitatives et pour des discrétisations des variables quantitatives¹⁶⁷. Tous les tests acceptent l'égalité des variances des résidus ainsi l'hypothèse d'homoscédasticité est considérée comme validée.

La Figure 4.7 présente la droite de Henry du modèle, permettant de comparer la fonction de répartition des résidus du modèle (en abscisse) à celle qu'aurait une loi normale de même moyenne (zéro) et de même variance (en ordonnées).

¹⁶⁴ Pour rappel, pour détecter les multicollinéarités et identifier les variables impliquées dans ces dernières, il est effectué des régressions linéaires multiples de chacune des variables explicatives en fonction des autres. Ainsi, le R^2 de chacun des modèles obtenus est transformé en facteur d'inflation de la variance par la relation suivante : $1/(1-R^2)$. Un facteur d'inflation de la variance inférieur à 1,8 correspond à un R^2 inférieur à 0,444.

¹⁶⁵ Pour rappel, il teste l'hypothèse nulle « la variance du modèle obtenu n'est pas significativement différente de celle d'un modèle avec tous les coefficients nuls ».

¹⁶⁶ Pour rappel, ils testent l'égalité des variances des résidus entre les différentes modalités d'une variable qualitative ou les différents groupes issus de la discrétisation d'une variable quantitative. Hypothèse nulle : « les variances sont identiques ».

¹⁶⁷ Discrétisation en 5 groupes à partir d'une méthode automatique de Fisher.

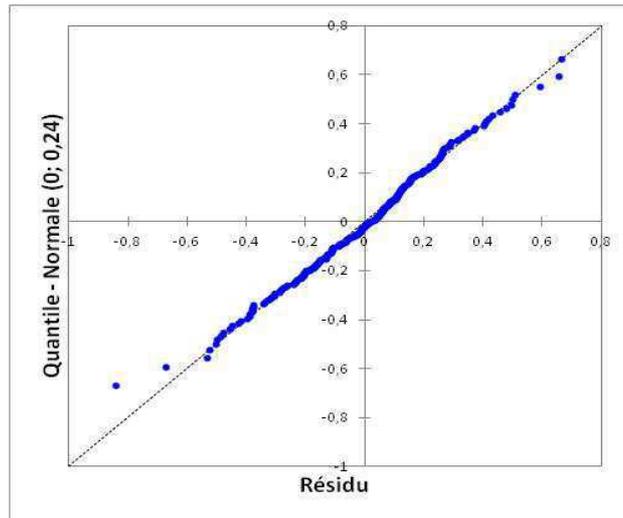


Figure 4.7 Droite de Henry des résidus du modèle $\ln(F_{\text{écart}_i, \text{conso}, \text{av}})$

Le relativement bon alignement de la très grande majorité des points sur la première bissectrice tend à indiquer la distribution des résidus des modèles suivant une loi normale. Un test de Jarque-Tera¹⁶⁸ nous indique l'impossibilité de rejeter l'hypothèse d'une distribution normale avec une p-value de 0,292, supérieur à 0,05. En parallèle de cette vérification, nous avons calculé que 95 % des résidus normalisés du modèle se trouvent dans un intervalle [-1,96 ; 1,96] mettant en évidence l'absence de données suspectes en grand nombre.

En conclusion, les principales hypothèses liées à une régression linéaire multiple sont vérifiées ainsi les résultats du modèle peuvent être considérés comme fiables. Rétrospectivement, cette validation justifie également le choix pour la variable expliquée du logarithme du facteur d'écart des consommations, à la place par exemple du seul facteur d'écart.

¹⁶⁸ Pour rappel, il teste l'hypothèse nulle : « l'échantillon suit une loi normale ».

Résultats du modèle

Le tableau ci-après fournit les résultats (termes significatifs seulement) du modèle obtenu.

Tableau 4.25 Modèle statistique de $\ln(F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{av}}})$

Variable (unité de référence) ou modalité	Coefficient	Intervalle de confiance à 95 %	t	Signification (p-value au test t de Student)
Constante	-0,196	[-0,234 ; -0,159]	-10,3	< 0,0001
<i>Caractéristiques techniques du bâti</i>				
Surface habitable (10 m ²)	-0,018	[-0,024 ; -0,012]	-6,1	< 0,0001
G (0,1 W/(m ³ .°C))	-0,044	[-0,051 ; -0,036]	11,5	< 0,0001
<i>Caractéristiques techniques des systèmes de chauffage et de production d'ECS</i>				
Système de chauffage – Convecteurs ou radiateurs électriques + bois d'appoint nul ou faible	-0,208	[-0,300 ; -0,115]	4,4	< 0,0001
Système de chauffage – Chaudière combustible ancienne + bois d'appoint nul ou faible	-0,105	[-0,182 ; -0,027]	-2,7	0,008
Système de chauffage – Chaudière combustible récente + bois d'appoint nul ou faible	-0,152	[-0,205 ; -0,099]	-5,6	< 0,0001
Système de chauffage – Chaudière combustible ancienne + bois d'appoint conséquent	0,172	[0,090 ; 0,255]	4,1	< 0,0001
Système de chauffage – Convecteurs ou radiateurs électriques + bois d'appoint très élevé	0,292	[0,196 ; 0,389]	6,0	< 0,0001
<i>Comportements déclarés par les ménages</i>				
$T_{i,\text{av}}^{\text{ch,moy,p}}$ (1 °C)	-0,033	[-0,053 ; -0,014]	-3,4	0,001
Gestion des réduits de température – Aucune réduction	-0,085	[-0,139 ; -0,031]	-3,1	0,002
Gestion des réduits de température – Réduction en journée et la nuit	0,085	[0,031 ; 0,139]	3,1	0,002
Nombre d'observations = 248 ; DL _{modèle} = 8 R ² ajusté = 0,51 RMCE = 0,245 ; C _{VRMCE} = 90 %				

4.3.2.5. Discussions

Nous allons analyser les résultats obtenus variable par variable et en les comparant chaque fois que cela sera possible avec la littérature. Auparavant, nous pouvons observer que toutes les variables ou modalités présentent dans le modèle ont des niveaux de signification très élevés (p-value << 0,05). Avant de faire l'analyse des variables, étudions la qualité de celui-ci.

Qualité des modèles

Avec un R² ajusté de 0,51, la capacité d'explication du modèle est moyenne.

Le RMCE correspondant à l'écart-type de l'erreur du modèle sur le $\ln(F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{av}}})$ est difficilement interprétable en l'état à cause du logarithme. Afin d'avoir un RMCE correspondant à l'erreur du modèle directement sur le $F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{av}}}$, nous transformons à l'aide d'exponentielles les valeurs observées et prédites de $\ln(F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{av}}})$ en $F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{av}}}$ puis appliquons l'équation 17

(Chapitre 3, sous-partie 3.3.2), définissant son calcul. Ainsi, nous obtenons un RMCE de 0,200 qui représente un CV_{RMCE} de 25 %, soit un ordre de grandeur correct.

Toutefois, une partie importante des variations des logarithmes des facteurs d'écart des consommations avant travaux de l'échantillon n'est pas captée par les variables étudiées car soit celle-ci est due à d'autres facteurs que ceux pris en compte, soit à cause de fortes incertitudes liées aux différentes données, soit parce que la loi linéaire utilisée n'est qu'une approximation partiellement satisfaisante des relations entre le $\ln(F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{av}}})$ et les facteurs étudiés. Toutefois en l'état, nous ne sommes pas capables d'arbitrer entre ces hypothèses. Ceci ne nous empêche pas d'analyser les résultats trouvés par le modèle en raison de la très bonne signification globale du modèle ainsi que des niveaux de signification élevés des variables et modalités retenues.

Auparavant, nous pouvons remarquer que le R^2 ajusté obtenu est très largement supérieur aux R^2 des modèles de Schuler et al. (SCHULER, et al., 2000) (R^2 de 0,008 pour l'explication de l'intensité d'utilisation par des variables socio-économiques et R^2 de 0,144 pour l'explication de l'intensité d'utilisation par des variables techniques). Quant à la comparaison du R^2 ajusté du modèle obtenu avec les R^2 des modèles de Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b), elle aurait peu de sens sachant que leurs modèles tâchent d'expliquer des consommations annuelles de gaz en m^3 calculées et réelles, variables expliquées très différentes du \ln du facteur d'écarts des consommations.

Constante

La constante du modèle de -0,196 (intervalle de confiance à 95 % : [-0,234 ; -0,159]) correspond à un facteur d'écart des consommations en situation avant travaux prédit de 0,82 (*i.e.* $\exp(-0,196)$) avec un intervalle de confiance de [0,79 ; 0,85]) pour un cas hypothétique avec une surface habitable de 137,4 m^2 (moyenne sur l'échantillon), un G de 1,15 $W/(m^3 \cdot ^\circ C)$ (moyenne sur l'échantillon), un système de chauffage « moyen », une température moyenne de consigne de chauffage de 19,7 $^\circ C$ (moyenne sur l'échantillon) et une gestion des réduits de température « moyenne » (et pour toutes les valeurs des variables non significatives). Nous pouvons noter que cette valeur est relativement proche des 0,81 de moyenne trouvée sur l'échantillon lors de la quantification des écarts en situation avant travaux (voir Tableau 4.8).

Les coefficients des différentes variables et modalités sont à ajouter à la constante de l'équation pour obtenir les $\ln(F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{av}}})$, et donc les $F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{av}}}$, prédits par le modèle.

Caractéristiques techniques du bâti

Deux variables sur les trois caractérisant le bâti sont trouvées significatives : la surface habitable (p-value < 0,0001) et le coefficient de déperditions G (p-value < 0,0001). La hauteur moyenne sous-plafond est elle déterminée comme non significative, cela pouvant peut-être être due aux potentiellement fortes incertitudes liées aux estimations de cette valeur par les ménages et/ou à l'importante homogénéité de cette grandeur parmi l'échantillon étudié.

Le coefficient de la variable « surface habitable » de -0,018 (intervalle de confiance à 95 % : [-0,024 ; -0,012]) signifie que le facteur d'écart des consommations avant travaux diminue approximativement de 1,8 % pour chaque augmentation de 10 m^2 de la surface habitable. En nous plaçant dans le cas d'un facteur d'écart inférieur à 1 (cas majoritaire dans l'échantillon, voir Figure 4.1 et Tableau 4.8), ceci nous indique que les facteurs d'écart des consommations sont plus élevés pour les logements à petite surface habitable que les logements à grande surface habitable. **Cela signifie que les consommations simulées surestiment d'autant plus les consommations observées que la surface habitable est grande.**

Les travaux de Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b) présentent un résultat similaire du point de vue qualitatif de l'effet. Dans leur modèle de la consommation théorique, l'accroissement de la consommation de gaz engendré par une augmentation de 10 m^2 de la surface est à peu près deux fois

supérieur¹⁶⁹ à celui trouvé par le modèle de la consommation réelle. Notons que Schuler et al. (SCHULER, et al., 2000) observent également une diminution de l'intensité d'utilisation avec l'augmentation de la surface.

Ce résultat tend à montrer pour les logements avec une grande surface habitable, la limite d'un modèle monozone pour lequel la totalité de la surface est supposée chauffée à une même température de consigne moyenne (moyenne non pondérée des températures dans les pièces de vie et dans les autres pièces). En effet, comme il est souligné par Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b), plus la surface habitable d'une MI est grande, plus la probabilité d'avoir des pièces non chauffées est élevée. Par ailleurs, rappelons-nous que dans le cadre de l'échantillon MDE PACA étudié lors du Chapitre 2, 32 % des 91 ménages déclarent ne pas chauffer la totalité de la surface de leur logement, avec une part non chauffée représentant en moyenne la valeur significative de 29 % de la surface totale (voir Chapitre 2, sous-partie 2.1.2.4).

L'autre variable relative au bâti trouvée significative par le modèle est celle liée au coefficient G , caractérisant la performance thermique théorique de l'enveloppe du logement. La valeur de $-0,044$ (intervalle de confiance à 95 % : $[-0,051 ; -0,036]$) signifie que le facteur d'écart des consommations avant travaux diminue approximativement de 4,4 % pour chaque augmentation de $0,1 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ du coefficient G . En se plaçant à nouveau dans le cas d'un facteur d'écart inférieur 1, ceci nous indique que **les consommations simulées surestiment d'autant plus les consommations observées que la performance thermique théorique de l'enveloppe du logement est mauvaise (coefficient G croissant).**

Par ailleurs, il est intéressant de noter que pour les plus petites valeurs de G de l'échantillon (minimum de la variable $-6,2 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ soit un coefficient G de $0,53 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$), en dehors de l'effet des autres variables ou modalités significatives du modèle, les valeurs prédites du $\ln(F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{av}}})$ sont positives ($-0,196 - 0,044 * (-6,2) = 0,077$), ce qui correspond à des facteurs d'écart supérieurs à 1 ($\exp(0,077) = 1,08$). **Par le seul biais du coefficient G , nous retrouvons (voir sous-partie 4.2.1) que les logements les plus performants présentent des consommations simulées sous-estimant les consommations observées.** Cette sous-estimation des consommations semble donc **due en grande partie à une surestimation de la performance thermique de ces logements.** Celle-ci peut être due à la surestimation des surfaces isolées et/ou une sous-estimation des U des parois isolées mais encore à un biais de modélisation lié par exemple à la non prise en compte de certains ponts thermiques. A partir des résultats obtenus, il n'est pas possible de préciser les origines exactes de ces écarts et de quantifier leur effet

L'effet du coefficient G trouvé par le modèle semble permettre à lui seul d'expliquer les tendances observées, lors de la partie consacrée à la quantification des écarts en situation avant travaux, des évolutions des facteurs d'écart en fonction des consommations simulées (voir sous-partie 4.2.1). Rappelons-nous que cette tendance est également partagée dans la littérature (ALLIBE, 2012) (GUERRA-SANTIN, et al., 2012) (LAURENT, et al., 2013) où l'évolution d'équivalents de facteur d'écart ou directement des écarts est analysée au regard de la performance globale (enveloppe+ systèmes) théorique du logement.

Nous pouvons remarquer que le résultat trouvé est également en accord avec les travaux de Haas et al. (HAAS, et al., 2000) qui déterminent que le facteur de service d'un logement (équivalent au facteur d'écart sur le seul usage chauffage) est d'autant plus faible par rapport à 1 (surestimation d'autant plus importante) que ses besoins surfaciques de chauffage sont élevés (en $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$).

Dans les travaux de Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b), il n'est pas utilisé une variable quantifiant la seule performance thermique du bâti mais une étiquette énergie (attribué au logement,

¹⁶⁹ Attention, ce résultat n'est pas comparable au coefficient trouvé dans le modèle présentement étudié. Le résultat de Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b), correspondant à une augmentation de 0,5 du facteur d'écart des consommations pour chaque accroissement de 10 m^2 de la surface habitable, ne peut être exprimé en pourcentage d'évolution.

entre A et G) qui qualifie la performance globale du logement. Toutefois, au travers de cette variable, un résultat similaire à ce que nous obtenons est présenté. Plus la performance globale du logement est basse (plus l'étiquette s'éloigne de A), plus la consommation théorique de gaz est surestimée par rapport à la consommation réelle. Ils étudient également une variable liée au type de logement (MI indépendante, MI mitoyenne à une autre sur un côté...) qui pourrait apporter des informations quant à l'évolution des écarts lorsque la surface déperditive de l'enveloppe diminue. Cependant, le fait que les deux modèles trouvent qu'une MI mitoyenne à une autre sur un côté consomme plus de gaz qu'une MI indépendante tend, comme Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b) le font eux-mêmes, à ne pas analyser les résultats pour cette modalité. Il en va de même pour la modalité « MI au centre d'une bande » que le modèle sur les consommations réelles détermine comme non significative. Enfin, ils trouvent que l'âge du logement, proxy imparfait¹⁷⁰ de la performance thermique théorique du bâti, n'est pas une source d'écart entre consommations théoriques et réelles.

Schuler et al. (SCHULER, et al., 2000) trouvent que plus le bâtiment a été construit dans une période récente plus son intensité d'utilisation (équivalent de facteur d'écart uniquement pour l'usage chauffage) est élevé (moins les consommations sont surestimées). Toutefois, il faut bien noter que Schuler et al. n'emploient pas d'indicateur qualifiant la performance enveloppe+ systèmes du logement dans leurs variables explicatives comme le font Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b), ceci entraînant probablement la prise en charge en partie de l'effet de la performance globale du logement par le proxy de la performance de l'enveloppe qu'est la période de construction. De plus, le fait que Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b) utilisent une variable quantitative, « âge du logement » certainement en année, et Schuler et al. (SCHULER, et al., 2000) une variable qualitative, « période de construction du logement », peut peut-être aussi jouer un rôle dans la différence des résultats trouvés.

Au-delà de ces différences entre les résultats de Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b) et de Schuler et al. (SCHULER, et al., 2000), l'effet trouvé pour le coefficient *G* est en accord avec ces deux articles en termes de tendance.

Caractéristiques techniques des systèmes de chauffage et de production d'ECS

Une variable sur les trois caractérisant les systèmes de chauffage et de production d'ECS sont **trouvées significatives : le système de chauffage (p-value des modalités entre < 0,0001 et 0,008)** avec cinq modalités significatives. Nous n'avons pas d'explication quant à la non signification des variables « présence d'un appoint de chauffage non bois » et « système de production d'ECS », mise à part le moindre poids énergétique des consommations engendrées par ces systèmes par rapport aux consommations liées au système principal de chauffage.

Commençons par analyser les coefficients des trois modalités couplées avec une consommation de bois d'appoint nulle ou faible (entre 0 et 5 stères). Dans ces trois cas, nous considérons l'apport de l'appoint bois au système global de chauffage quasiment négligeable, ce qui revient à analyser le seul effet de la nature du système principal de chauffage. Les coefficients signifient que le modèle estime qu'un logement chauffé principalement par des convecteurs ou des radiateurs électriques possède un facteur d'écart des consommations avant travaux inférieur de 10,3 % (intervalle de confiance à 95 % : [2,6 % ; 18,1 %]) à celui du même logement chauffé à partir d'une chaudière combustible ancienne (installée en 2001 ou avant) et de 5,6 % (intervalle de confiance à 95 % : [0,3 % ; 10,9 %]) à celui du même logement chauffé avec une chaudière combustible récente (installée après 2001).

La différence entre les coefficients des modalités « chaudière combustible ancienne » et « chaudière combustible récente » est à considérer comme non significative (-0,047 avec un intervalle de confiance à 95 % comprenant zéro : [-0,100 ; 0,006]).

En se plaçant dans le cas d'un logement avec un facteur d'écart inférieur à 1, **les résultats obtenus indiquent que des convecteurs ou des radiateurs électriques** (rendements proches de 100 %)

¹⁷⁰ En effet, il ne rend pas compte des travaux de rénovation énergétique réalisés depuis la construction du logement ou du moins partiellement (seulement les travaux effectués par la quasi-totalité des logements d'un même âge).

engendrent des consommations simulées surestimant plus les consommations observées que des chaudières combustibles ayant des rendements nominaux supposés plus faibles (environ 80 % pour celles installées en 2001 ou avant et environ 90 % pour celles installées après 2001). Ce résultat va plutôt à l'encontre des observations faites précédemment quant à l'augmentation de la surestimation des consommations avec l'augmentation des consommations simulées (voir sous-partie 4.2.1) ou avec la diminution de la performance théorique enveloppe+ systèmes du logement dans la littérature (ALLIBE, 2012) (GUERRA-SANTIN, et al., 2012) (LAURENT, et al., 2013). Au passage, nous pouvons remarquer que cette tendance semble ainsi plus due à la performance thermique théorique de l'enveloppe qu'à la performance théorique des systèmes.

Par contre les résultats trouvés sont plutôt en accord avec des travaux de Haas et al. (HAAS, et al., 1998) qui montrent que le facteur de service (équivalent du facteur d'écart sur le seul usage chauffage) d'une MI avec un système de chauffage non central est en moyenne plus faible de 20 % que celui d'une MI avec un système de chauffage central (respectivement 0,39 et 0,49). En effet, les convecteurs et les radiateurs électriques composent un système de chauffage non centralisé permettant une régulation généralement¹⁷¹ réalisée au niveau de chaque appareil tandis que les chaudières sont un système de chauffage central (la chaudière via une boucle d'eau fournit de la chaleur à des émetteurs disposés dans les différentes pièces), bien qu'il soit possible par de simples robinets thermostatiques de moduler individuellement l'émission de chaleur de chaque radiateur dans une certaine mesure.

Par conséquent, **les résultats trouvés semblent plus à mettre en lien avec la nature centrale ou non du système de chauffage qu'avec la différence de rendement théorique des systèmes**. Plus particulièrement, ils semblent démontrer la meilleure adaptation du modèle monozone, pour lequel la totalité de la surface est supposée chauffée à une même température de consigne, à un système de chauffage central qu'à un système de chauffage décentralisé. Un système non centralisé entraînant une plus grande probabilité d'avoir des pièces chauffées à des températures différentes les unes des autres, et donc une ambiance thermique intérieure plus hétérogène, qu'un système centralisé.

De plus, les différences de gestion du chauffage entre un système central utilisant du gaz, du fioul ou du GPL et un système électrique non centralisé peuvent également être associées aux différences de prix entre ces énergies.

Ce résultat est difficilement comparable aux résultats trouvés par Schuler et al. (SCHULER, et al., 2000) qui trouvent bien une variable qualitative liée au type de système de chauffage significative mais l'analyse du coefficient obtenu est très hasardeuse. D'une part, un seul coefficient est fourni pour la variable sans préciser de référence et d'autre part, certaines modalités sont de notre point de vue difficilement distinguables (« central heating » et « independent boilers »).

Il en est de même pour les résultats de Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b) pour la variable liée au type d'installation car leurs modèles expliquent les seules consommations annuelles de gaz en ayant parmi l'échantillon utilisé des cas avec un système de chauffage n'utilisant pas de gaz. Ceci ayant pour conséquence un travail statistique sur des usages différents entre modalité de la variable. Tandis que dans le cadre des travaux présentés ici, les consommations simulées et observées sont des consommations tous usages.

Parmi la variable type d'installation ayant pour référence une chaudière gaz à rendement amélioré (au-dessus 83 %), trois modalités peuvent être analysées suivant les critères de leur étude (coefficients dans les deux modèles présentant une p-value au test t de Student inférieure à 0,01). La modalité chauffage électrique indique que la consommation théorique annuelle de gaz sous-estime la consommation réelle de gaz. Comme il est souligné dans l'article, ceci est à mettre sur le compte de la non connaissance des systèmes de production d'ECS des logements. Par ailleurs, la modalité poêle gaz ou fioul indique elle une légère surestimation. Enfin, la modalité chaudière gaz à condensation

¹⁷¹ A la vue des caractéristiques de l'échantillon, très majoritairement des logements d'avant 1975 et des logements les plus récents datant de la période 1982-1988, il nous semble raisonnable de penser que très peu des installations de convecteurs ou de radiateurs électriques possèdent un régulateur ou un programmeur centralisé.

(rendement sur PCI de 107 %) présente une consommation théorique de gaz surestimant de façon conséquente la consommation réelle mais avec une consommation théorique anormalement supérieure à celle d'une chaudière gaz à rendement amélioré (au-dessus 83 %). Par conséquent, il ne semble pas se dégager une explication particulière aux résultats trouvés et dans tous les cas, les modèles statistiques ne retrouvent par l'observation qu'ils font à partir d'une analyse descriptive des consommations théoriques et réelles : les systèmes les moins performants entraînent les plus importantes surestimations.

Revenons maintenant sur le modèle présenté dans la présente étude, en nous intéressant aux deux autres modalités significatives de la variable liée au système de chauffage : « chaudière combustible ancienne avec une consommation de bois d'appoint conséquente (entre 6 et 16 stères) » et « convecteurs ou radiateurs électriques avec une consommation de bois d'appoint élevée (entre 17 et 30 stères) ». Les coefficients trouvés sont positifs (respectivement 0,172 avec un intervalle de confiance à 95 % [0,090 ; 0,255] et 0,292 avec un intervalle de confiance à 95 % [0,196 ; 0,389]), ce qui indiquent des facteurs d'écart plus élevés (dans le cas d'un facteur d'écart inférieur à 1, des écarts plus faibles) pour un logement avec ces modalités présentant des consommations de bois d'appoint conséquente à très élevée que pour le même logement présentant les modalités précédemment analysés avec des consommations de bois d'appoint nulles ou faibles. Cette observation est d'autant plus valable quand la comparaison est faite sur des modalités avec un même système principal de chauffage. En raison de l'intégration directe dans les entrées de la méthode de calcul de la consommation annuelle de bois d'appoint déclarée et donc d'une part de la consommation intrinsèquement sans écart par rapport à l'observé, ce résultat semble logique.

Toutefois, il est à noter que **la modalité avec des convecteurs ou des radiateurs électrique associés à une consommation de bois d'appoint très élevée**, en dehors de l'effet des autres variables ou modalités significatives du modèle, présente une valeur prédite du $\ln(F_{\text{écart}_{i,\text{conso},av}})$ positive $(-0,196 + 0,292) = 0,096$, ce qui **correspond à un facteur d'écart supérieur à 1** ($\exp(0,096) = 1,10$) **et donc à une sous-estimation des consommations**. Dans la logique de ce que nous venons de décrire juste auparavant, ce résultat peut paraître surprenant.

Il est dû au fait que **les consommations de bois d'appoint très élevées ne sont pas prises en compte dans leur totalité dans la simulation**. En effet, la méthode de calcul a besoin pour déterminer la consommation du système « principal » de chauffage de calculer la part des besoins horaires de chauffage satisfait par l'appoint bois. La consommation annuelle de bois d'appoint, donnée d'entrée de la simulation, est convertie en masse puis répartie à l'aide de *scenarii* de chargement mensuelle et horaire suivant le jour en semaine ou en week-end. A cela s'ajoute les définitions d'une charge maximale de bois de l'appoint et d'un chargement ou non de l'appoint selon la température horaire intérieure. Trois *scenarii* de chargement horaire sur la journée sont définies sur la base d'un pour des consommations annuelles de moins de 2 stères, un pour des consommations entre 2 et 9 stères et un dernier au-dessus de 9 stères. Au regard de ces éléments, il semble que la méthode de calcul n'ait pas été conçue afin de tenir compte de consommation de bois d'appoint très élevée, présentant ainsi un seuil de consommation de bois, en rapport avec les besoins thermiques calculés du logement, au-delà duquel les quantités de bois déclarées ne sont plus prises en compte. Cependant, le fait que la méthode de calcul ne permette pas de définir une cheminée, un insert ou un poêle bois comme système principal de chauffage engendre automatiquement cette erreur de modélisation pour ces cas, néanmoins peu nombreux (7 % de l'échantillon).

Enfin, nous pouvons noter **que les cas présentant une sous-estimation des consommations (facteur d'écart supérieur à 1) ne semblent pas s'expliquer par le seul effet d'une performance thermique théorique élevée (coefficient G les plus bas) mais aussi par celui de consommations de bois d'appoint importantes**.

Caractéristiques techniques des systèmes énergétiques des autres usages, caractéristique climatique et caractéristiques socio-économiques des ménages

Aucune des trois variables caractérisant les systèmes énergétiques des autres usages (*i.e.* cuisson, éclairage et équipements électriques) n'est significative dans le modèle. En raison du moindre poids énergétique de ces usages dans la consommation totale d'une MI¹⁷², cela peut paraître logique. Les consommations de ces usages étant trop faibles pour influencer de façon significative les écarts entre consommations simulées et observées.

La variable liée aux DJU réels est également trouvée non significative. Le fait de travailler sur un échantillon de MI implantées dans deux départements limitrophes (52 la Haute-Marne et 55 la Meuse) a pour conséquence de limiter les variations climatiques au sein de l'échantillon, ce qui pourrait expliquer du moins en partie la non significativité de la variable climatique. Seuls 3 cas sur les 248 MI de l'échantillon présentent des DJU réels sur l'année analysée¹⁷³ au-delà des 10 % d'écart avec les DJU normaux utilisés. Il est à remarquer qu'aucune variable climatique n'est étudiée que ce soit dans les travaux de Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b) ou de Schuler et al. (SCHULER, et al., 2000) tandis qu'ils travaillent avec des échantillons répartis sur des zones géographiques beaucoup plus grandes (échelle des Pays-Bas pour Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b) et de l'ex-Allemagne de l'Est pour Schuler et al. (SCHULER, et al., 2000)) bien que présentant une moins grande disparité climatique que le territoire français.

Enfin, aucune des deux variables socio-économiques prises en compte (« nombre d'occupants » et « occupation du logement en journée en semaine ») n'est déterminée comme significative par le modèle, sans que nous ayons d'explications à avancer à cela. Il est important de noter l'absence de colinéarité importante entre la variable liée à l'occupation du logement en journée en semaine et la variable de comportement, « gestion des réduits de température » (coefficient de corrélation linéaire le plus élevé entre les deux variable de -0,373 entre les modalités « présent toute la journée » et « réduction en journée et la nuit »).

Ce résultat de non signification des variables socio-économique est partagé avec Majcen et al. (MAJCEN, et al., 2013_b). Suivant les critères de l'étude (coefficients dans les deux modèles présentant une p-value au test t de Student inférieure à 0,01), le nombre de personnes composant le ménage n'est pas analysable (non signification dans le modèle sur les consommations théoriques, p-value de 0,685) tandis que la variable jours travaillées par personne dans le ménage est non significative dans les deux modèles. Seule la variable liée à la valeur patrimoniale est trouvée analysable et ceci sans engendrer de grand écart entre les consommations (écart de 59 m³ de gaz sur la consommation annuelle pour un logement valant 100 000 € et plus).

Quant au modèle de Schuler et al. (SCHULER, et al., 2000) expliquant l'intensité d'utilisation d'un logement à partir de variables socio-économiques, il présente comme significatif le nombre de personnes dans le ménage (diminution de l'intensité d'utilisation avec l'accroissement du nombre d'occupants) et comme non significatifs, le nombre de personnes ayant un emploi à temps plein dans le ménage et la catégorie socioprofessionnelle de la personne référente. Toutefois, le R² de 0,008 du modèle et le fait qu'ils utilisent un seuil de signification de 0,1 au test t de Student sans préciser les p-value à ce test des variables retenues amènent à considérer que les variables socio-économiques n'apportent quasiment aucune explication, suivant une relation linéaire, aux valeurs d'intensité d'utilisation (équivalent de facteur d'écart).

¹⁷² Dans le cadre de l'échantillon étudié, les MI ne sont pas de type BBC ou passif pour lesquels les consommations d'électricité spécifique sont théoriquement censées être proches en termes d'ordre de grandeur de celles liées au chauffage.

¹⁷³ Les années d'analyse peuvent être plus ou moins différentes d'un cas à l'autre, surtout qu'elles ne correspondent pas toujours à des années civiles.

Comportements déclarés par les ménages

Deux des trois variables de comportements sont trouvées significatives par le modèle : $T_{i,av}^{ch,moy,p}$ (p-value de 0,001) et gestion des réduits de température (p-values de 0,002). La non signification de la variable temps moyen journalier d'ouverture des fenêtres pourrait être due à de fortes incertitudes liées aux déclarations des ménages.

Le coefficient de la variable $T_{i,av}^{ch,moy,p}$ de -0,033 (intervalle de confiance à 95 % : [-0,053 ; -0,014]) signifie que le facteur d'écart des consommations diminue d'approximativement 3,3 % pour chaque augmentation de 1 °C de la température intérieure moyenne déclarée par le ménage pour les périodes de présence en période de chauffage. En se plaçant dans le cas d'un facteur d'écart inférieur à 1 (cas majoritaire dans l'échantillon, voir Figure 4.1 et Tableau 4.8), **cela signifie une surestimation des consommations d'autant plus importante que la température de consigne de chauffage en période de présence utilisée par la simulation est élevée**. Nous pouvons remarquer que cet effet suit la tendance observée, lors de la quantification des écarts, d'une augmentation de la surestimation avec l'accroissement des consommations simulées (voir sous-partie 4.2.1).

L'origine de cette source d'écart semble résider dans le calcul employé pour passer des températures intérieures déclarées par les ménages pour les pièces de vie et pour les autres pièces à la température intérieure moyenne, non pondérée par les surfaces des différentes pièces, servant de température de consigne de chauffage à la totalité de l'espace chauffé pour la simulation. Il nous semble raisonnable de penser que les ménages associent respectivement les pièces de vie au séjour et/ou au salon et les autres pièces aux chambres. Ainsi ils n'intègrent certainement pas dans les valeurs déclarées entre autres les températures dans la cuisine, la ou les salles de bain et les espaces de circulation. Une salle de bain et un espace de circulation sont censés être des espaces moins chauffés qu'un séjour ou qu'une chambre, en dehors de moments précis et limités dans le temps dans la journée pour une salle de bain. Tandis que les températures intérieures dans une cuisine semblent plus à rapprocher de celles d'une chambre que de celles d'un séjour d'après le Commissariat Général au Développement Durable (CGDD)¹⁷⁴.

De ce fait, la température intérieure des pièces de vie, température censée être la plus élevée du logement, semble surreprésentée par le calcul d'une température intérieure moyenne non pondérée par les surfaces des différentes pièces. De plus, l'utilisation de températures déclarées par les ménages pour les pièces de vie et les autres pièces entraînent très certainement l'absence de prise en compte de températures dans des espaces moins chauffés.

Pour les cas présentant les températures intérieures moyennes les plus basses (min de 14,5 °C¹⁷⁵), en raison des très faibles valeurs déclarées, elles indiquent très probablement une restriction en termes d'utilisation du chauffage valable sur la totalité de logement d'où une température relativement homogène au sein des différentes pièces de ces logements entraînant un faible éloignement de la température de consigne utilisée pour la simulation. A l'opposé, les cas avec les températures intérieures moyennes les plus hautes (max de 25,0 °C¹⁷⁶) semblent présenter des températures élevées dans les pièces de vie dues à la présence dans ces pièces d'un appoint de chauffage local type insert ou cheminée bois. Ainsi, il existe très probablement dans ces logements d'importantes différences de température entre les pièces, différences mal intégrées dans la température de consigne surestimée utilisée pour la simulation.

¹⁷⁴ Dans le cadre de l'exploitation d'une campagne nationale de mesures menée par l'Observation de la Qualité de l'Air Intérieur (OQAI) auprès de ménages habitant une MI ou un appartement (CGDD, 2013 pp. 8, Graphique 1).

¹⁷⁵ Les valeurs minimums trouvées par l'étude du CGDD (CGDD, 2013) pour le séjour (263 logements) et la chambre (308 logements) sont respectivement de 14,9 °C et 5,4 °C. Au regard de ces dernières, les valeurs minimums déclarées par les ménages de l'échantillon MDE 52-55 ne semblent pas aberrantes.

¹⁷⁶ L'étude du CGDD (CGDD, 2013) trouve pour le séjour et pour la chambre des températures maximums de 25,5 °C. En comparaison de ces dernières, les valeurs maximums déclarées au sein de l'échantillon ne semblent pas aberrantes.

Les coefficients de la variable liée à la gestion des réduits de température nous indiquent que le modèle estime qu'un logement avec un ménage déclarant aucune réduction de température possède un facteur d'écart des consommations avant travaux inférieur approximativement de 17,0 % (intervalle de confiance à 95 % : [11,6 % ; 22,4 %]) à celui du même logement avec un ménage déclarant des réductions en journée en semaine et la nuit. En se plaçant de nouveau dans le cas d'un facteur d'écart inférieur à 1, **cela signifie une plus grande surestimation des consommations pour le ménage déclarant aucune réduction de température que pour le ménage déclarant des réductions en journée et la nuit.** Là aussi, cet effet suit la tendance générale observée, lors de la quantification des écarts, d'une augmentation de la surestimation avec l'accroissement des consommations simulées (voir sous-partie 4.2.1).

L'application stricte dans le cadre des simulations de ces gestions de réduits de température pour toutes les journées ouvrées sur la totalité de la saison de chauffage semble être l'explication à cette source d'écart. En effet, **il est fort probable que l'application de ces régimes extrêmes de gestion des réduits de température ne soit pas exactement avérée sur la totalité de la saison de chauffage dans la réalité.** La réponse des ménages à une telle question peut être supposée correspondre à leur comportement le plus fréquent au cours de la saison de chauffage. Ainsi, elle amène forcément une part d'approximation quant à leur comportement au jour le jour (possibilité de journées « atypiques ») mais également entre le début et la fin de la saison de chauffage et le cœur de celle-ci .

L'effet sur la consommation énergétique des réduits de température et par la même occasion de l'hétérogénéité des températures entre les pièces d'un même logement dépend *a priori* de la qualité thermique de l'enveloppe. Celle-ci entraînant suivant l'importance de l'isolation entre le volume intérieur et l'extérieur une décroissance plus ou moins rapide de la température intérieure en cas de réduct de température ainsi qu'une température intérieure plus ou moins homogène. Comme montré par Hens et al. (HENS, et al., 2010), une gestion du chauffage donnée entraîne des effets différents sur la consommation en fonction de la performance thermique du logement. Plus précisément, ils trouvent quasiment pas de différence entre les consommations d'un logement totalement chauffé et partiellement chauffé lorsque celui-ci est bien isolé et à l'opposé, des différences conséquentes entre les deux gestions lorsque le logement n'est pas isolé. Ainsi, il est important de se rappeler que moins le logement est performant thermiquement, plus sa consommation énergétique sera sensible aux variations de gestion du chauffage.

4.3.3. Modélisation des écarts de consommations après travaux

Après avoir tâché de détecter les facteurs permettant d'expliquer les écarts de consommations avant travaux, faisons de même pour les écarts de consommations après travaux grâce à la spécificité des échantillons à notre disposition.

Pour rappel, le but du travail de modélisation présenté dans ce paragraphe est d'étudier l'influence sur les écarts des consommations après travaux des écarts avant travaux et des changements intervenus entre les périodes avant et après travaux (*e.g.* action d'efficacité énergétique mise en place ou changement de comportement du ménage). A notre connaissance, il n'existe pas dans la littérature un travail d'une telle nature.

De manière classique maintenant, nous présenterons tout d'abord l'échantillon étudié et la méthode statistique employée. Les facteurs pris en compte, *i.e.* les variables explicatives, seront explicités ensuite ainsi que les questions que leur effet suggère avant d'aborder les résultats et leur discussion.

4.3.3.1. Echantillon étudié

L'échantillon utilisé pour la modélisation des écarts des consommations après travaux correspond aux 119 cas de l'échantillon MDE 52-55 utilisables pour leurs situations avant et après travaux moins :

- 4 cas déclarant une moindre occupation de leur logement après les travaux (nombre de cas trop faible pour être étudié),
- 3 cas ayant réalisé pour seul travaux sur les systèmes l'installation d'un CESI (nombre de cas trop faible pour être étudié),
- 1 cas présentant une évolution atypique de ses facteur d'écart de consommations entre avant et après travaux (résidu normalisé trop élevé, 5,7¹⁷⁷).

Ainsi au final, l'échantillon exploité est de 111 cas.

Il est important de se rappeler que les échantillons enquêtés n'ont pas été constitués dans un objectif de représentativité que ce soit des actions menées au travers l'opération MDE 52-55 (voir Chapitre 2, sous-partie 2.1.2) ou des actions de rénovation énergétique réalisées parmi le parc français de MI.

4.3.3.2. Méthode statistique

La méthode statistique utilisée est identique, à l'exception de la variable expliquée, à celle employée dans le Chapitre 3 pour expliquer la consommation énergétique annuelle après travaux (voir Chapitre 3, sous-partie 3.3.2) : ANCOVA avec une méthode des moindres carrés ordinaires associée à une sélection par méthode descendante appliquée avec un seuil de signification sur le test t de Student de 0,05 et une référence pour les variables qualitatives sur la première modalité.

La variable expliquée est le facteur d'écart ($F_{\text{écart}}$) entre les consommations énergétiques¹⁷⁸ (*conso*) simulées (*sim*) et observées (*obs*) de la situation après travaux (*ap*). Ce dernier sera noté pour le cas i : $F_{\text{écart}i,\text{conso},\text{ap}}$.

Ayant pour variable explicative, comme nous allons le voir dans le paragraphe suivant, le facteur d'écart pour la situation avant travaux, nous pouvons directement utiliser le facteur d'écart après travaux. Ceci de façon similaire à ce que nous avons réalisé précédemment pour expliquer la consommation après travaux en fonction entre autres de la consommation avant travaux. Du point de vue mathématique, il apparaît logique d'expliquer la valeur d'une grandeur après un événement à partir de la valeur de cette grandeur avant l'événement plus ou moins une certaine quantité lié à l'événement intervenu.

4.3.3.3. Variables explicatives

Dans le cadre de cette modélisation statistique, nous allons tâcher d'expliquer le facteur d'écart entre les consommations simulées et observées en situation après travaux à partir du facteur d'écart des consommations avant travaux et de l'ensemble des changements, connus au travers des enquêtes, ayant pu intervenir entre les périodes avant et après travaux.

Facteur d'écart des consommations avant travaux

La situation avant travaux est prise en compte via le facteur d'écart entre les consommations simulées et observées en situation avant travaux : $F_{\text{écart}i,\text{conso},\text{av}}$.

De façon identique à ce que nous avons fait pour les autres modèles statistiques (voir Chapitre 3, sous-partie 3.3.3 et sous-partie 4.3.2.3), nous cherchons d'une part, à avoir une constante du modèle statistique qui ne corresponde pas à des valeurs n'ayant pas de sens physique et d'autre part, à avoir des variables quantitatives présentant des unités facilitant l'interprétation de leur coefficient.

¹⁷⁷ Cas passant d'un facteur d'écart avant travaux de 0,65 à un facteur d'écart après travaux de 1,74 à cause de l'installation d'une PAC air/eau présentant un « problème important de réglage et/ou de fonctionnement ».

¹⁷⁸ Pour rappel, il s'agit de consommations énergétiques (énergie finale en kWh PCI) annuelles tous usages ajustées à un climat normal.

Afin d'avoir une constante du modèle statistique qui ne corresponde pas à un facteur d'écart avant travaux nul, nous recentrons la variable sur la moyenne de cette grandeur sur l'échantillon employé (moyenne : 0,83). Par ailleurs, le coefficient calculé par le modèle devant correspondre à une estimation de l'évolution du facteur d'écart après travaux pour une augmentation d'une unité du facteur d'écart avant travaux, nous choisissons d'exprimer ce dernier en dixième. Voir Tableau 4.26 pour le domaine de définition de la variable.

Tableau 4.26 Domaine de définition de la variable $F_{\text{écart}_{i,\text{conso,av}}}$

	$F_{\text{écart}_{i,\text{conso,av}}}$ (en 0,1)
Domaine de définition	[-5,5 ; 9,4]

La présence du facteur d'écart avant travaux parmi les variables explicatives sera l'occasion de tester si le rôle que celui-ci semble jouer dans la valeur du facteur d'écart après travaux, d'après l'analyse effectuée lors de la quantification des écarts après travaux (voir sous-partie 4.2.2), est significatif ou non du point de vue statistique. En cas de signification, une quantification de son effet sera réalisée.

Travaux de rénovation énergétique

Tout d'abord comme nous l'avons déjà souligné (voir sous-partie 4.1.2.8), les travaux de rénovation énergétique pris en compte dans la simulation de la situation après travaux sont à la fois les actions menées via et hors l'opération MDE 52-55. Ainsi dans le cadre des variables explicatives, il en sera de même.

De manière identique à l'étude séparée des effets sur le facteur d'écart avant travaux de la performance thermique théorique du bâti et des systèmes, nous prenons en compte au travers deux variables distinctes les travaux concernant le bâti et le système de chauffage (et de production d'ECS lorsque le même système assure les deux usages¹⁷⁹). Ceci afin de tester si les effets sur les écarts de consommations de la prise en compte par le logiciel de simulation des uns et des autres sont différents.

La variable utilisée concernant les travaux relatifs au bâti est le changement du coefficient G du logement entre les simulations des situations avant et après travaux (voir équation 25, sous-partie 4.1.2.2). Celui-ci permet de caractériser l'évolution de la performance thermique de l'enveloppe du logement entre les situations avant et après travaux. La variable est premièrement recentrée sur la moyenne de l'échantillon (moyenne : $-0,14 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$) puis exprimée dans une nouvelle unité (en $0,1 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$) afin d'avoir un coefficient plus compréhensible. Voir Tableau 4.27 pour son domaine de définition.

Tableau 4.27 Domaine de définition de la variable « changement de G »

	Changement de G (en $0,1 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$)
Domaine de définition	[-12,7 ; 1,4] 22 % ne présentent pas de changement (valeur de la variable : 1,4)

Concernant les travaux sur le système de chauffage, nous avons choisi une variable définissant l'existence ou non de tels travaux :

- pas de travaux concernant le système de chauffage (donc seulement des travaux d'isolation),
- travaux sur le système de chauffage couplés ou non à des travaux d'isolation.

¹⁷⁹ Ne sont pas étudiés les cas avec des travaux sur le seul système de production d'ECS en raison d'un trop faible nombre de ces derniers parmi l'échantillon (3 cas d'installation d'un CESI). Les systèmes énergétiques relatifs aux autres usages (*i.e.* éclairage, cuisson, équipements électriques) eux n'ont pas fait l'objet d'action d'efficacité énergétique dans le cadre de l'échantillon étudié.

Voir Tableau 4.28 pour la représentativité des modalités.

Tableau 4.28 Représentativité des modalités de la variable « travaux sur le système de chauffage »

Modalité	Représentativité de la modalité (en %)
Pas de travaux	44
Travaux sur le système	56

La modalité « pas de travaux sur le système » est choisie comme première modalité et ainsi comme référence afin d'évaluer l'effet de travaux sur le système de chauffage.

En raison de la grande diversité de nature des systèmes de chauffage installés¹⁸⁰, il ne nous est pas possible de réaliser un découpage des modalités plus fin par nature des systèmes (trop faible nombre de cas pour pouvoir être étudié).

Changement déclaré de consommation de bois d'appoint

D'une part, comme nous l'avons précisé précédemment (voir sous-partie 4.1.2.8), la simulation de la situation après travaux est effectuée en tenant compte des changements de consommation annuelle de bois d'appoint déclarés par les ménages. D'autre part, le modèle sur le facteur d'écart avant travaux a mis en évidence l'existence de cas de sous-estimation des consommations (facteur d'écart supérieur à 1) en raison de consommations de bois d'appoint très élevées, cas susceptibles de voir ces consommations changer de façon plus ou moins importante suite aux travaux d'efficacité énergétique et par répercussion, engendrer des variations atypiques de facteur d'écart entre avant et après travaux. L'adjectif atypique fait référence au fait que les valeurs des facteurs d'écart de ces cas sont propres à la prise en compte, spécifique au logiciel de simulation utilisé (SimFast) des consommations de bois d'appoint.

Par conséquent, par la définition d'une variable correspondant au changement déclaré de consommation de bois d'appoint entre avant et après travaux, nous essayons de l'isoler des autres sources d'écart possibles. Voir Tableau 4.29 pour son domaine de définition.

Tableau 4.29 Domaine de définition de la variable « changement déclaré de consommation de bois d'appoint »

	Changement déclaré de consommation de bois d'appoint (en stère)
Domaine de définition	[-30 ; 10] 23 % présentent un changement

Déclaration de malfaçons

La présence de malfaçons associées aux actions réalisées (HONG, et al. 2006) peut être à l'origine d'une plus importante consommation après travaux qu'estimée par la simulation. Pour étudier cet effet, nous prenons en compte, de façon identique au modèle sur les consommations après travaux étudié dans le Chapitre 3 (voir sous-partie 3.3.3.4), la présence ou non de malfaçons sur la base des déclarations des enquêtés. Pour rappel, les cas de déclarations de malfaçons étant relativement peu nombreux (voir Tableau 4.30 pour la représentativité des modalités) et celles-ci étant de nature diverse, les modalités retenues pour la variable sont : « non déclaration de malfaçons » et « oui déclaration de malfaçons ».

L'absence de déclaration de malfaçons est choisie comme première modalité, et de la sorte comme référence, dans le but d'étudier l'effet ou non de la présence de malfaçons sur le facteur d'écart après travaux.

¹⁸⁰ PAC air/air, PAC air/eau, PAC eau/eau, chaudière à condensation, chaudière récente (hors opération), chaudière bois, poêle bois et convecteurs récents (hors opération) (voir Chapitre 3, sous-partie 3.2.3.1).

Tableau 4.30 Représentativité des modalités de la variable « déclaration de malfaçons »

Représentativité de la modalité (en %)	MDE 52-55
Non déclaration de malfaçons	93
Oui déclaration de malfaçons	7

Changement déclaré de température de chauffage

Pour rappel (voir sous-partie 4.1.2.8), les changements déclarés de température de chauffage suite à la réalisation des travaux ne sont pas pris en compte dans les simulations des situations après travaux. Les simulations des situations après travaux sont réalisées à partir des comportements de la situation avant travaux d'où une possible source d'écart pour les consommations après travaux. Cette source d'écart exprimée en termes d'économies d'énergie est appelée effet rebond (SORRELL, et al., 2008) (GREENING, et al., 2000).

La prise en compte du changement déclaré de température de chauffage est effectuée de manière identique au modèle sur les consommations après travaux étudié dans le Chapitre 3 (voir sous-partie 3.3.3.2), *i.e.* par la différence des températures intérieures, dans les pièces de vie sur les périodes de présence, déclarées par les ménages pour les situations avant et après travaux en saison de chauffage.

La constante du modèle statistique sera donnée pour une absence de changement de déclaration de température de chauffage (différence des températures déclarées nulles) et le coefficient de la variable sera calculé pour une augmentation de 1 °C de la température de chauffage. Voir Tableau 4.31 pour le domaine de définition de la variable.

Tableau 4.31 Domaines de définition de la variable « changement déclaré de température de chauffage »

	Changement déclaré de température de chauffage (en °C)
Domaine de définition	[-5,0 ; 5,0] 20 % avec une valeur différente de 0 dont 14,5 % avec une valeur positive et 5,5 % avec une valeur négative

Déclaration de changement dans l'occupation

Pour rappel (voir sous-partie 4.1.2.8), les simulations après travaux sont réalisées en prenant en compte les changements dans le nombre total d'occupants et dans l'occupation en semaine du logement intervenus durant la période intermédiaire entre avant et après travaux. Ainsi il est opportun de tester si l'effet de ces changements sur les consommations est bien similaire entre la simulation et la réalité.

De nouveau, nous utilisons la même variable que celle utilisée par le modèle sur les consommations après travaux étudié dans le Chapitre 3 (voir sous-partie 3.3.3.3), *i.e.* une variable qualitative permettant de prendre en compte une augmentation, une diminution et un non changement dans l'occupation du logement sur la base des déclarations des ménages. Ayant seulement 5 cas présentant une diminution dans l'occupation du logement, nombre trop faible pour pouvoir étudier l'effet de la modalité, nous avons dû les retirer de l'échantillon étudié (voir sous-partie 4.3.3.1). Voir Tableau 4.32 pour la représentativité des deux autres modalités.

Tableau 4.32 Représentativité des modalités de la variable « déclaration de changement dans l'occupation »

Représentativité de la modalité (en %)	MDE 52-55
Pas de déclaration de changement	91
Déclaration d'une augmentation dans l'occupation	9

L'absence de changement dans l'occupation du logement est choisie comme référence (*i.e.* première modalité) afin d'étudier si une augmentation dans l'occupation du logement est une source d'écart ou non entre consommations simulées et observées.

Etude de la multicolinéarité au sein des variables explicatives

La multicolinéarité au sein de ce jeu de variables explicatives est également étudiée. Toutes les variables et les modalités du modèle statistique ont un facteur d'inflation de la variance (VIF) inférieure à 1,4¹⁸¹.

4.3.3.4. Résultats

De nouveau, avant toute présentation de modèle obtenu, il est nécessaire de vérifier sa validité.

Validation du modèle

La signification globale du modèle, testée via un test du F de Fischer¹⁸², est très bonne avec une probabilité associée au F (p-value) inférieure à 0,0001 (F de 43,2). Cela signifie que le risque de se tromper est de moins de 0,01 % en concluant que les variables explicatives retenues par le modèle apportent une quantité d'information significative.

La Figure 4.8 qui représente les résidus normalisés (centrés réduits) en fonction des valeurs prédites par le modèle de $F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{ap}}}$ permet une approche graphique de vérification de l'hypothèse d'homoscédasticité des résidus (répartition aléatoire et homogène autour du zéro de l'axe des ordonnées).

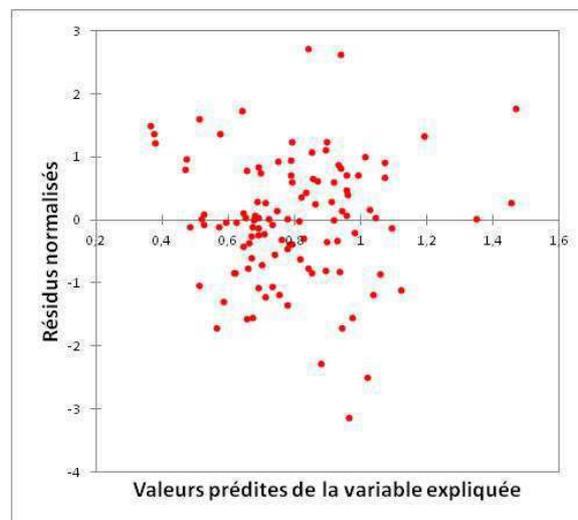


Figure 4.8 Résidus normalisés en fonction des valeurs de $F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{ap}}}$ prédites par le modèle

Pour confirmer celle-ci, nous utilisons des tests de Levene et de Bartlett¹⁸³, avec un seuil de signification de 0,05, pour chacune des variables qualitatives et pour des discrétisations des variables

¹⁸¹ Un facteur d'inflation de la variance inférieur à 1,2 correspond à un R^2 inférieur à 0,286.

¹⁸² Pour rappel, il teste l'hypothèse nulle « la variance du modèle obtenu n'est pas significativement différente de celle d'un modèle avec tous les coefficients nuls ».

¹⁸³ Pour rappel, ils testent l'égalité des variances des résidus entre les différentes modalités d'une variable qualitative ou les différents groupes issus de la discrétisation d'une variable quantitative. Hypothèse nulle : « les variances sont identiques ».

quantitatives¹⁸⁴. Tous les tests acceptent l'égalité des variances des résidus ainsi l'hypothèse d'homoscédasticité est considérée comme validée.

La Figure 4.9 présente la droite de Henry du modèle, permettant de comparer la fonction de répartition des résidus du modèle (en abscisse) à celle qu'aurait une loi normale de même moyenne (zéro) et de même variance (en ordonnées).

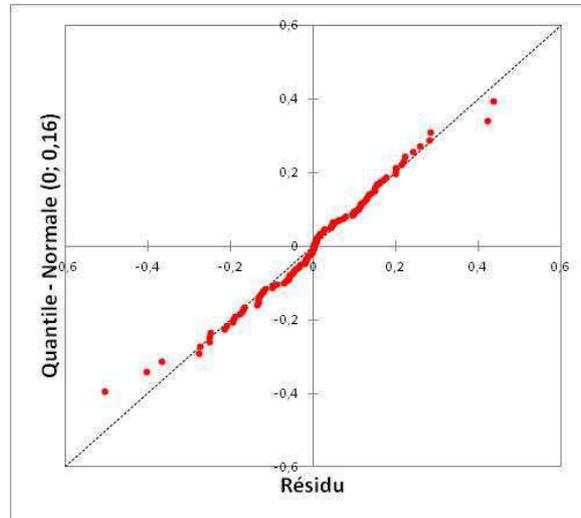


Figure 4.9 Droite de Henry des résidus du modèle $F_{\text{écart}_i, \text{conso}, \text{ap}}$

Le relativement bon alignement de la très grande majorité des points sur la première bissectrice tend à indiquer la distribution des résidus des modèles suivant une loi normale. Un test de Jarque-Tera¹⁸⁵ nous indique l'impossibilité de rejeter l'hypothèse d'une distribution normale avec une p-value de 0,187, supérieur à 0,05. En parallèle de cette vérification, nous avons calculé que 95 % des résidus normalisés du modèle se trouvent dans un intervalle $[-1,96 ; 1,96]$ mettant en évidence l'absence de données suspectes en grand nombre.

En conclusion, les principales hypothèses liées à une régression linéaire multiple sont vérifiées ainsi les résultats du modèle peuvent être considérés comme fiables.

¹⁸⁴ Discrétisation en 3 groupes à partir d'une méthode automatique de Fisher.

¹⁸⁵ Pour rappel, il teste l'hypothèse nulle : « l'échantillon suit une loi normale ».

Résultats du modèle

Le tableau ci-après fournit les résultats (termes significatifs seulement) du modèle obtenu.

Tableau 4.33 Modèle statistique de $F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{ap}}}$

Variable (unité de référence) ou modalité	Coefficient	Intervalle de confiance à 95 %	t	Signification (p-value au test t de Student)
Constante	0,799	[0,767 ; 0,831]	49,4	< 0,0001
$F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{av}}}$ (0,1)	0,073	[0,062 ; 0,084]	12,7	< 0,0001
Changement de G (0,1 W/(m ³ .°C))	-0,016	[-0,030 ; -0,003]	-2,4	0,019
Changement déclaré de consommation de bois d'appoint (1 stère)	0,011	[0,004 ; 0,018]	3,0	0,003
Changement déclaré de température de chauffage (1 °C)	0,034	[0,008 ; 0,060]	2,6	0,012
Nombre d'observations = 111 ; DL _{modèle} = 4 R ² ajusté = 0,61 RMCE = 0,161 ; CV _{RMCE} = 20 %				

4.3.3.5. Discussions

Avant de faire l'analyse des variables, étudions la qualité de modèle.

Qualité des modèles

Avec un R² ajusté de 0,61 et un RMCE de 0,161 qui représente un CV_{RMCE} de 20 %, les capacités d'explication et de prédiction du modèle sont légèrement meilleures que celles du modèle sur le facteur d'écart avant travaux.

Toutefois, de nouveau, une bonne partie des variations dans la variable expliquée, ici le facteur d'écart des consommations après travaux, n'est pas captée par les variables étudiées sans que nous soyons capable d'avancer une explication précise. Néanmoins, ceci ne nous empêche pas d'analyser les résultats trouvés en raison de la très bonne signification globale du modèle ainsi que des niveaux de signification élevés de la plus part des variables retenues.

Constante

La constante du modèle de 0,799 (intervalle de confiance à 95 % : [0,767 ; 0,831]) correspond à la valeur du facteur d'écart des consommations en situation après travaux prédit par le modèle pour un cas hypothétique avec un facteur d'écart des consommations avant travaux de 0,83 (moyenne sur l'échantillon), un changement de G de -0,14 W/(m³.°C) (moyenne sur l'échantillon, indiquant une amélioration de la qualité thermique théorique de l'enveloppe), pas de changement de consommation de bois d'appoint et une absence de déclaration de changement de température de chauffage (et pour toutes les valeurs des variables non significatives). Nous pouvons remarquer que cette très faible baisse des facteurs d'écart entre avant et après travaux (0,031) correspond à celles observées pour les quartiles centraux des facteurs d'écart avant travaux lors de la quantification des écarts en situation après travaux (voir Figure 4.4, Q2 et Q3).

Les coefficients des différentes variables sont à ajouter à la constante de l'équation pour obtenir les $F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{ap}}}$ prédits par le modèle.

Facteur d'écart des consommations avant travaux

Le coefficient trouvé de 0,073 (intervalle de confiance à 95 % : [0,062 ; 0,084]) signifie que le modèle estime que deux logements présentant une différence de facteurs d'écart avant travaux de 0,1

suite à la réalisation d'une même action d'efficacité, engendrant les mêmes changements de consommation de bois d'appoint et de température de chauffage, ne possèdent plus qu'une différence de facteur d'écart après travaux de 0,073. Ainsi, plus le facteur d'écart avant travaux est élevé par rapport à la valeur moyenne sur l'échantillon de 0,83 (notamment les cas supérieurs à 1) et plus la diminution du facteur d'écart après travaux est importante. A l'opposé, plus le facteur d'écart avant travaux est bas par rapport au 0,83 (notamment les cas inférieurs à 0,6) et plus l'augmentation du facteur d'écart après travaux est conséquente.

Ainsi, **le modèle statistique semble en partie attribuer à la valeur du facteur d'écart avant travaux les évolutions observées entre avant et après travaux des écarts** (voir sous-partie 4.2.2, Figure 4.4). Pour rappel, ces évolutions traduisent pour les cas en sous-estimation (facteur d'écart supérieur à 1) ou en forte surestimation (facteur d'écart inférieur à 0,6), une tendance globale à la diminution de l'écart absolu entre avant et après travaux engendrant une réduction de l'écart relatif et donc un rapprochement de 1 des facteurs d'écart après travaux (voir sous-partie 4.2.2). Pour les cas en surestimation modérée (facteur d'écart au-dessus de 0,6 et en-dessous de 1), la tendance globale est à une très faible diminution de l'écart absolu produisant une légère augmentation de l'écart relatif et donc une faible réduction des facteurs d'écart après travaux (voir sous-partie 4.2.2).

Travaux de rénovation énergétique

Sur les deux variables relatives aux travaux de rénovation énergétique effectués, seule la variable « changement de G » est significative. Le modèle estime ainsi comme non significatif l'effet de travaux sur le système de chauffage sur l'évolution du facteur d'écart entre avant et après travaux. L'effet étant certainement répartie sur les variables significatives notamment la variable facteur d'écart avant travaux.

Le coefficient trouvé de -0,016 (intervalle de confiance à 95 % : [-0,030 ; -0,003]) signifie que le facteur d'écart après travaux augmente de 0,016 pour chaque réduction supplémentaire de 0,1 W/(m³.°C) du coefficient G par rapport à la moyenne des réductions sur l'échantillon (valeur de -1 pour la variable « changement de G »). Lors de l'analyse de l'effet de ce coefficient, nous devons bien avoir en tête que la variable utilisée correspond au changement du coefficient G recentré sur la moyenne des changements sur l'échantillon (moyenne : -0,14 W/(m³.°C), changement de G pour la valeur zéro de la variable) et que les travaux d'isolation n'entraînent pas les mêmes réductions de G suivant les états avant travaux de l'enveloppe des logements, dont dépend en partie le facteur d'écart avant travaux (voir sous-partie 4.3.2.5).

Pour structurer notre analyse, à la façon de ce que nous avons fait lors de la quantification des écarts après travaux (voir sous-partie 4.2.2), nous divisons l'échantillon étudié en quartile de facteur d'écart avant travaux. Le Tableau 4.34 fournit pour chacun de ces quartiles, les moyennes des changements de G mais également des valeurs de la variable « changement de G » (*i.e.* changement du coefficient G recentré sur la moyenne des changements sur l'échantillon).

Tableau 4.34 Moyennes des changements de G et de la variable « changement de G » par quartile de facteur d'écart avant travaux

Quartile	Domaine de $F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{av}}}$	Moyenne changement de G (en W/(m ³ .°C))	Moyenne variable « changement de G » (en 0,1 W/(m ³ .°C))
1 ^{er}	[0,28 ; 0,64]	-0,270	-1,29
2 ^{ème}]0,64 ; 0,81]	-0,125	0,16
3 ^{ème}]0,81 ; 1,02]	-0,107	0,34
4 ^{ème}]1,02 ; 1,77]	-0,060	0,81

Nous pouvons observer que plus les facteurs d'écart avant travaux ($F_{\text{écart}_{i,\text{conso},\text{av}}}$) sont élevés, plus les moyennes de changement de G sont basses (faible amélioration de la performance thermique du bâti). Cela se justifie à partir du lien trouvé précédemment entre facteur d'écart avant travaux et performance thermique théorique de l'enveloppe (voir sous-partie 4.3.2.5) : plus les facteurs d'écart avant travaux des logements sont élevés, meilleures sont les performances thermiques théoriques des

enveloppes et donc moins les travaux d'isolation réalisés engendrent d'amélioration de celles-ci, sachant que les résistances thermiques installées sont sensiblement les mêmes pour tous les logements.

Le minimum en termes de changement de G étant zéro (pas de travaux d'isolation), les moyennes de changement de G sont toutes négatives (réduction des coefficients G). A l'opposé, la variable statistique liée au changement de G étant recentrée sur la valeur de $-0,14 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, seul le premier quartile présente une moyenne négative (diminution en moyenne des coefficients G supérieure à la moyenne des diminutions des coefficients G sur la totalité de l'échantillon). Ainsi, d'après l'effet de la variable, seuls les cas avec les facteurs d'écart avant travaux les plus bas (forte surestimation) présentent en moyenne une augmentation de leur facteur d'écart en situation après travaux due à la diminution de leur coefficient G . Les autres cas possédant des facteurs d'écart avant travaux plus élevés (surestimation modérée à sous-estimation) voient en moyenne, selon le modèle statistique, leur facteur d'écart décroître suite à la diminution de leur coefficient G (moyenne de la variable « changement de G » positive, réduction en moyenne moindre que la moyenne des diminutions des coefficients G sur la totalité de l'échantillon). Ceci de façon d'autant plus importante que la valeur du facteur d'écart avant travaux est importante en raison d'une moyenne de la variable « changement de G » d'autant plus haute.

L'effet trouvé par le changement de G induit par des travaux d'isolation va dans le même sens que les évolutions des facteurs d'écart entre avant et après travaux observées (voir sous-partie 4.2.2, Figure 4.4) et donc également de l'effet déterminé pour la valeur du facteur d'écart avant travaux. Ce dernier semble ainsi bien se voir attribuer en partie les effets liés aux travaux de rénovation.

Changement déclaré de consommation de bois d'appoint

Le changement déclaré de consommation de bois d'appoint est trouvé significatif avec un coefficient de 0,011 (intervalle de confiance à 95 % : [0,004 ; 0,018]). Ce dernier signifie que le facteur d'écart après travaux diminue de 0,011 pour chaque réduction de 1 stère de la consommation déclarée de bois d'appoint (valeur de -1 pour la variable).

Comme nous l'avons envisagé lors de la description de la variable (voir sous-partie 4.3.3.3), **certains des ménages présentant avant travaux des consommations de bois d'appoint très élevées** (de 17 à 30 stères, voir Tableau 4.12, sous-partie 4.3.2.3) **déclarent avoir fortement diminué, voire ramené à zéro**, cette consommation suite aux travaux d'efficacité énergétique (changement de consommation de bois d'appoint minimum : -30 stères). Le modèle estime que ces changements engendrent des diminutions conséquentes de leur facteur d'écart avant travaux supérieur à 1 (sous-estimation). En effet, ces cas qui avaient une partie de leur consommation annuelle de bois d'appoint très élevée non prise en compte lors de la simulation de la situation avant travaux (voir sous-partie 4.3.2.5) voient après travaux, **la part de leur consommation de bois d'appoint initialement non prise en compte décroître voire s'annuler d'où la diminution de la sous-estimation avant travaux allant jusqu'à une surestimation après travaux.**

A l'opposé, quelques ménages déclarent augmenter leur consommation de bois d'appoint suite aux travaux (changement de consommation de bois d'appoint maximum : +10 stères). Ce modèle sur le facteur d'écart après travaux estime, de manière similaire au modèle sur le facteur d'écart avant travaux, que plus la consommation de bois d'appoint est importante, plus le facteur d'écart est élevé.

En somme, l'effet de cette variable démontre de nouveau l'influence sur les écarts entre consommations simulées et observées de la prise en compte, spécifique au logiciel de simulation utilisé, des appoints de chauffage au bois et de leur consommation.

Changement déclaré de température de chauffage

Le fait de ne pas intégrer dans les paramètres de la simulation de la situation après travaux un changement de la température de chauffage lié aux travaux de rénovation énergétique est estimé par le modèle avoir un effet significatif sur les écarts de consommations après travaux. Plus particulièrement,

le modèle trouve que le fait de ne pas tenir compte dans la simulation d'une augmentation déclarée de température de 1 °C élève de 0,034 (coefficient de 0,034, intervalle de confiance à 95 % : [0,008 ; 0,060]) le facteur d'écart après travaux. **Ceci indique pour les cas de surestimation (facteur d'écart inférieur à 1) majoritaires dans l'échantillon (80 %), un moindre écart entre consommations simulées et observées lorsque n'est pas pris en compte l'augmentation de température déclarée par le ménage.** Ce résultat peut paraître surprenant *a priori*.

Comme le modèle sur le facteur d'écart avant travaux nous l'a montré, plus la température de consigne de chauffage intégrée dans la simulation est importante, plus le facteur d'écart est petit traduisant une surestimation plus conséquente des consommations. **En ne prenant pas en compte dans la simulation une augmentation de température suite aux travaux (14,5 % des cas de l'échantillon), la simulation après travaux est effectuée sur la base d'une température de consigne plus basse que celle déclarée par les ménages (température avant travaux plus basse que celle après travaux). Ainsi la consommation simulée est plus basse que ce qu'elle aurait été en tenant compte de l'augmentation de température.** Lors d'une surestimation, ceci a pour conséquence une diminution de l'écart entre consommations simulées et observées et donc une augmentation du facteur d'écart après travaux. A l'opposé, lors d'une sous-estimation, la simulation avec une température plus basse que celle déclarée engendre une accentuation de la sous-estimation.

Dans le cas de la non intégration dans la simulation d'une diminution de la température de chauffage suite à des travaux (4,5 % des cas de l'échantillon), les effets sont strictement opposés à ceux décrits ci-dessus : lors d'une surestimation, accentuation de la surestimation et lors d'une sous-estimation, diminution de la sous-estimation.

Il est important de noter que l'effet analysé sur les consommations après travaux ici est similaire à celui que nous connaissons sous le terme « effet rebond » (SORRELL, et al., 2008) (GREENING, et al., 2000) du moins pour les cas en surestimation (facteur d'écart inférieur à 1). Dans ces cas, une augmentation de la température engendre une augmentation du facteur d'écart des consommations après travaux entraînant d'après l'équation 38 (sous-partie 4.2.3), un facteur d'écart des économies d'énergie plus faible que celui du facteur d'écart des consommations avant travaux et donc une plus grande surestimation des économies d'énergie.

Déclaration de malfaçons et déclaration de changement dans l'occupation

Le modèle ne détecte pas de façon significative de différence en termes de facteur d'écart après travaux entre des cas sans et avec déclaration de malfaçons. Nous rappelons que cela n'indique pas qu'il n'y a pas du tout d'effet des malfaçons mais que la quantification de celui par le modèle présente trop d'incertitude pour pouvoir être considérée comme significative. Le faible nombre de cas (7 % de l'échantillon) et la non distinction de la nature de la malfaçon n'aident pas à étudier cet effet.

La variable liée à la déclaration de changement dans l'occupation est également non significative. Nous pouvons remarquer que cela était déjà le cas pour les variables « nombre d'occupants » et « occupation en journée en semaine » dans le modèle sur le facteur d'écart avant travaux. Par conséquent dans l'ensemble, les modèles statistiques ne trouvent pas significatifs les effets de ces variables d'occupation sur les écarts de consommations.

4.4. Conclusions

En conclusion, la première partie de ce chapitre, consacré à un travail d'analyses statistiques des écarts entre évaluations *ex-ante* et *ex-post*, a tout d'abord permis d'expliquer notre choix de n'étudier que des échantillons MDE 52-55 et donc de ne pas analyser des échantillons MDE PACA. Ceci, en raison de la présence parmi ces derniers d'un certain nombre de cas ayant un usage d'une climatisation que nous savons pertinemment mal pris en compte pas les modèles de calcul.

Par ailleurs, les échantillons MDE 52-55 ont été précisés :

- 254 cas pour l'étude des écarts sur les consommations en situation avant travaux,
- et 119 cas pour l'étude des écarts sur les consommations en situation après travaux et sur les économies d'énergie.

Dans cette première partie, nous avons également présenté le modèle de calcul *ex-ante* utilisé. Un modèle thermique dynamique monozone développé par EDF-R&D sur la base d'une réduction d'un modèle physique plus complexe. Celui-ci permet le calcul de la consommation d'énergie (énergie finale PCI) tous usages (chauffage, production d'ECS, cuisson et électricité spécifique) d'un logement en tenant compte du comportement déclaré par le ménage et d'un nombre limité de paramètres, possibles de récupérer au travers d'une enquête téléphonique. La consommation simulée est ainsi identique en termes d'usage pris en compte à celle récupérée via l'évaluation *ex-post*.

Après la présentation de ces éléments de définition, nous nous sommes intéressés, dans une seconde partie, à la quantification des écarts entre consommations d'énergie simulées (*ex-ante*) et observées (*ex-post*) en situations avant travaux et après travaux mais également aux écarts en termes d'économies d'énergie. Pour cela nous avons utilisé un indicateur, nommé facteur d'écart, correspondant au rapport de la grandeur observée sur la grandeur simulée.

En situation avant travaux, nous avons observé globalement des consommations simulées surestimant les consommations observées, résultat cohérent avec la littérature au regard des caractéristiques énergétiques peu performantes de l'échantillon étudié (majoritairement des MI d'avant 1974 chauffées à partir de chaudières standards anciennes à des niveaux de température entre 19 °C et 21 °C pour les pièces de vie). En effet, **de manière équivalente à la littérature, nous avons trouvé pour les logements avec les consommations simulées les plus faibles une tendance à la sous-estimation évoluant vers une surestimation de plus en plus importante avec l'augmentation des consommations simulées.**

A contrario, dans la situation après travaux, malgré en moyenne une diminution des consommations d'énergie (amélioration de la performance), nous avons découvert une quasi-absence de changement de la surestimation moyenne. Par conséquent, il ne semble pas exister une seule et même fonction entre les facteurs d'écart et les consommations simulées, décrivant les écarts des consommations en situation avant travaux et leur évolution en situation après travaux.

Par ailleurs, nous avons pu remarquer que **cette quasi-non modification de la moyenne cachée des évolutions des écarts entre avant et après travaux en fonction de leur valeur avant travaux. Il a été mis en évidence que plus les écarts avant travaux sont élevés, qu'ils correspondent à des surestimations ou à des sous-estimations, plus la prise en compte des travaux amène une réduction des écarts en situation après travaux, ceci à partir d'une quasi-absence d'évolution pour des écarts avant travaux faibles.**

Concernant les écarts sur les économies d'énergie, nous avons montré que toute modification entre les situations avant et après travaux des écarts absolus entre les consommations simulées et observées crée un écart entre économies d'énergie simulées et observées, évoluant de surcroît de manière opposée à celui des consommations. Ainsi, plus la réduction d'une surestimation des consommations entre avant et après travaux est importante, plus les économies d'énergie sont surestimées. A partir d'un écart de consommations avant travaux donné non nul, il est donc impossible d'avoir un gain de précision à la fois sur les consommations après travaux et sur les économies d'énergie.

Ayant observé auparavant que la variation des écarts sur les consommations entre avant et après travaux est d'autant plus réduite que l'écart avant travaux est faible, il semble donc qu'il faudrait minimiser ce dernier pour obtenir les écarts les plus petits possibles à la fois sur les consommations après travaux et sur les économies d'énergie.

Ne semblant pas possible d'établir avec une bonne capacité d'explication de relations simples entre les facteurs d'écart et les consommations simulées que ce soit en situation avant ou après travaux, une amélioration de la précision des estimations du modèle de calcul à l'échelle d'un logement semble devoir passer par une identification des différentes sources d'écart entre simulation et observation. Pour cela, nous avons choisi dans une troisième partie de modéliser statistiquement, à travers les facteurs d'écart des consommations, les écarts avant travaux puis les écarts après travaux. Ceci pour l'avant travaux, entre autres à partir de caractéristiques techniques des logements mais également de comportements des ménages et pour l'après travaux, à partir de l'écart avant travaux et des différents changements de performance et de comportement engendrés par les travaux. Ce travail de modélisation statistique est peu présent dans la littérature de manière générale sur les écarts de consommations et à notre connaissance, absent de la littérature s'agissant de l'évolution des écarts entre des situations avant et après travaux.

Le modèle relatif aux écarts des consommations avant travaux, bien que n'expliquant qu'une partie des variations des écarts, a permis la détection de certaines sources d'écart. **Le modèle estime que les écarts avant travaux dépendent fortement de la performance thermique théorique du bâti et peu de la performance théorique des systèmes énergétiques.** Par le seul effet de la performance thermique théorique du logement, le modèle explique les tendances observées que ce soit dans la partie consacrée à la quantification des écarts ou dans la littérature.

Concernant les systèmes énergétiques, en dehors de la consommation de bois d'appoint de chauffage qui est liée à une spécificité du modèle de calcul employé, **le modèle statistique a trouvé que seule la nature centrale ou non du système de chauffage principal est à l'origine de différences significatives en termes d'écarts.** Un système de chauffage non centralisé, comme des convecteurs électriques pouvant se réguler émetteur par émetteur, semble moins bien s'adapter à un modèle monozone pour lequel la totalité de la surface est supposée chauffée à une même température de consigne qu'un système de chauffage central du type chaudière gaz.

Plusieurs des autres sources d'écart trouvées par le modèle concernent les mêmes limites d'utilisation d'un modèle monozone pour lequel la température de consigne de chauffage est définie comme la moyenne, non pondérée des surfaces, entre les températures intérieures déclarées par les ménages pour les pièces de vie et les autres pièces. **Plus la surface habitable du logement est grande, plus la probabilité d'avoir des pièces non chauffées est grande** et donc plus l'éloignement des hypothèses associées à un modèle monozone est important. De même, **plus la température de consigne de chauffage utilisée pour la simulation est élevée, plus celle-ci a de probabilité d'être en moyenne surestimée** de par le fait de la surreprésentation des pièces de vie dans son calcul et de l'absence d'intégration dans les températures déclarées par les ménages des températures des espaces moins ou non chauffés (*e.g.* salle de bain, espace de circulation).

En plus de ces sources d'écart toutes plus ou moins liées au final aux comportements des ménages s'agissant de leur gestion du chauffage, le modèle estime qu'un ménage déclarant ne jamais réaliser de réduits de température possède toutes choses égales par ailleurs une surestimation des consommations plus grande qu'un ménage déclarant effectuer des réduits diurnes et nocturnes les jours de semaine. La réponse des ménages à une telle question amène forcément une part d'approximation quant à leur comportement réel sur la totalité de la saison de chauffage.

Enfin, le modèle a identifié que **les écarts des consommations avant travaux sont également liés à la consommation annuelle de bois d'appoint de chauffage.** Du fait que cette dernière soit une entrée exigée par le modèle de calcul pour tenir compte d'un système de chauffage d'appoint au bois, elle entraîne une part intrinsèquement sans écart par rapport à l'observé dans la consommation totale de chauffage simulée. Ainsi, tant que la consommation de bois est modérée, les écarts de consommations sont réduits. **Au-delà d'un certain seuil de consommation** dépendant des besoins de chauffage du logement, **certains éléments de la modélisation ne permettent plus la prise en compte de la totalité de la consommation déclarée, engendrant une sous-estimation des consommations.** L'impossibilité dans le modèle de définir une cheminée, un insert ou un poêle bois comme système principal de chauffage semble être à l'origine de ces cas de sous-estimation.

Le modèle relatif aux écarts de consommations après travaux possède lui des capacités d'explication et de prédiction du facteur d'écart après travaux légèrement meilleures que celles du modèle sur les écarts avant travaux. Ceci notamment grâce à la présence **parmi les variables explicatives du facteur d'écart avant travaux. Le modèle attribuant en grande partie à ce dernier les évolutions entre écarts avant et après travaux observées lors de la quantification des écarts.**

Au-delà de cet effet des écarts initiaux, il a été détecté **parmi les deux variables relatives aux travaux de rénovation énergétique que seule la variable caractérisant l'amélioration de la performance thermique du logement due aux travaux d'isolation est significative.** L'effet trouvé par le modèle allant dans le même sens que celui du facteur d'écart avant travaux.

Le changement de température de chauffage suite aux travaux a été également trouvé comme ayant un effet significatif sur les écarts des consommations après travaux. Pour une augmentation de la température après les travaux (14,5 % des cas de l'échantillon), il est trouvé une augmentation du facteur d'écart traduisant dans le cas d'une surestimation une diminution des écarts et dans le cas d'une sous-estimation une augmentation des écarts. Les effets opposés sont estimés pour une diminution de la température après travaux (4,5 % des cas de l'échantillon). Cet effet du changement de température de chauffage estimé par le modèle pour des consommations d'énergie après travaux est bien le même, dans les cas d'une surestimation, que celui connu sous le nom d'effet rebond.

Le modèle estime que **la prise en compte, spécifique au modèle de calcul, d'un appoint de chauffage au bois et de ses consommations joue un rôle significatif également sur les écarts après travaux.** Ces derniers diminuent lors d'une réduction de la consommation de bois d'appoint et à l'opposé, augmentent lors d'un accroissement de la consommation.

Au final, le modèle statistique sur les écarts de consommations après travaux a confirmé l'influence sur ces derniers des écarts avant travaux et ainsi le meilleur moyen pour obtenir les écarts les plus petits possibles à la fois sur les consommations après travaux et sur les économies d'énergie est de minimiser les écarts avant travaux, pour lesquels différentes sources d'écart ont été identifiées par le modèle statistique leur étant dédié.

Bibliographie

ADEME Les chiffres clés du bâtiment. Energies-Environnement [Rapport] / Centre de Sophia Antipolis. - Valbonne (06) : [s.n.], 2012. - p. 97.

ALLIBE B Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel français à long terme [Rapport] : Thèse de doctorat / Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales. - 2012.

ARRETE 08 AOUT Arrêté du 08 août 2008 portant approbation de la méthode de calcul Th-C-E ex et son annexe [Revue] // Journal officiel de la République française. - 24 septembre 2008.

ARRETE 13 JUIN Arrêté du 13 juin 2008 relatif à la performance énergétique des bâtiments existants de surface supérieure à 1000 mètres carrés, lorsqu'ils font l'objet de travaux de rénovation importants [Revue] // Journal officiel de la République française. - 08 août 2008.

ARRETE 17 OCTOBRE Arrêté du 17 octobre 2012 modifiant la méthode de calcul 3CL-DPE introduite par l'arrêté du 9 novembre 2006 portant approbation de diverses méthodes de calcul pour le diagnostic de performance énergétique en France métropolitaine [Revue] // Journal officiel de la République française. - 10 novembre 2012. - 0262. - p. 17780. - texte n°9.

BONNEAU D, RONGERE D, COVALET B et GAUTIER B CLIM 2000: modular software for energy simulation in buildings [Conférence] // IBPSA 3rd International Conference on Building Simulation. - Adelaide (Australia) : [s.n.], 1993.

BRANCO G, LACHAL B, GALLINELLI P et WEBER W Predicted versus observed heat consumption of a low energy multifamily complex in Switzerland based on long-term experimental data [Revue] // Energy and Buildings. - 2004. - 36. - pp. 543-555.

CAYRE E, ALLIBE B, LAURENT M-H et OSSO D There are people in the house! How the results of purely technical analysis of residential energy consumption are misleading for energy policies [Conférence] // ECEEE Summer Study. - Presqu'île de Gien (France) : [s.n.], 2011.

CGDD Les déterminants de la température de chauffage adoptée par les ménages [Article] // Etudes & Documents / éd. Service de l'Économie de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD). - avril 2013. - 83.

DEQUE F, CATUSSE L et CASTENET S Residential SIMFAST: software for rapid technicals appraisals [Conférence] // IBPSA 6th International Conference on Building Simulation. - Kyoto (Japan) : [s.n.], 1999.

DEQUE F, OLLIVER F et POBLADOR A Grey boxes used to represent buildings with a minimum number of geometric and thermal parameters [Revue] // Energy and Buildings. - 2000. - 31. - pp. 29-35.

ENERTECH MULHOUSE, Quartier Franklin, Evaluation technico-économique de réhabilitations "basse consommation" d'immeubles d'habitation [Rapport]. - 2010.

GIRAUDET L-G Les instruments économiques de maîtrise de l'énergie : une évaluation multidimensionnelles [Rapport] : Thèse de doctorat / Université Paris-Est. - 2011.

GREENING L A, GREENE D L et DIFIGLIO C Energy efficiency and consumption - the rebound effect - a survey [Revue] // Energy Policy. - 2000. - 28. - pp. 389-401.

GUERRA-SANTIN O et ITARD L The effect of energy performance regulations on energy consumption [Revue] // Energy Efficiency. - 2012. - 5. - pp. 269-282.

HAAS R et BIERMAYR P The rebound effect for space heating. Empirical evidence from Austria [Revue] // Energy Policy. - 2000. - 28. - pp. 403-410.

HAAS R, AUER H et BIERMAYR P The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating [Revue] // Energy and Buildings. - 1998. - 27. - pp. 195-205.

HENS H, PARIJS W et DEURINCK M Energy consumption for heating and rebound effects [Revue] // Energy and Buildings. - 2010. - 42. - pp. 105-110.

HONG S H, ORESZCZYN T, RIDLAY I, THE WARM FRONT STUDY GROUP The impact of energy efficient refurbishment on the space heating fuel consumption in English dwellings [Revue] // Energy and Buildings. - 2006. - 38. - pp. 1171-1181.

LAURENT M-H, ALLIBE B, ORESZCZYN T, HAMILTON I, TIGCHELAAR C et GALVIN R Back to reality: How domestic energy efficiency policies in four European countries can be improved by using empirical data instead of normative calculation [Conférence] // ECEEE Summer Study. - Presqu'île de Gien (France) : [s.n.], 2013.

MAJCEN D, ITARD L et VISSCHER H Actual and theoretical gas consumption in Dutch dwellings: What causes the differences? [Revue] // Energy Policy. - 2013_b. - <http://dw.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.018>.

MAJCEN D, ITARD L et VISSCHER H Theoretical vs. actual energy consumption of labelled dwellings in the Netherlands: Discrepancies and policy implications [Revue] // Energy Policy. - 2013_a. - 54. - pp. 125-136.

MARCHIO D et RABL A Energy-efficient gas-heated housing in France: predicted and observed performance [Revue] // Energy and Buildings. - 1991. - 17. - pp. 131-139.

METEO CLIMAT [En ligne]. - <http://meteo-climat-bzh.dyndns.org/listenormale-1981-2010-1-p67.php>.

MOORE B C Principal component analysis in linear system: controllability, observability and model reduction [Revue] // IEE Trans Automatic Control. - 1981. - 26. - pp. 17-32.

SCHULER A, WEBER C et FAHL U Energy consumption for space heating of West German households: empirical evidence, scenario projections and policy implications [Revue] // Energy Policy. - 2000. - 28. - pp. 877-894.

SORRELL S et DIMITROPOULOS J The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions [Revue] // Ecological Economics. - 2008. - 65. - pp. 636-649.

SWAN LG et UGURSAL V I Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques [Revue] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2009. - 13. - pp. 1819-1835.

TIGCHELAAR C, DANIELS B et MENKVELD M Obligations in the existing housing stock: Who pays the bill? [Conférence] // ECEEE Summer Study. - Presqu'île de Gien (France) : [s.n.], 2011.

TNS SOFRES Enquête sur la motivation des propriétaires à entreprendre des travaux d'économies d'énergie [Rapport] : Etude pour le compte de l'association Cap Consommateurs Habitants. - 2009.

WIRL F Thermal comfort, energy conservation and fuel substitution: an economic-engineering approach [Revue] // Energy Systems and Policy. - 1988. - 11. - pp. 311-328.

ZGRAGGEN J-M Bâtiments résidentiels locatifs à haute performance énergétique : objectifs et réalités [Rapport] : Thèse de doctorat / Université de Genève. - 2010.

Chapitre 5. Pistes d'amélioration des modèles utilisés

Table des matières

Introduction.....	175
5.1. Pistes d'amélioration des évaluations <i>ex-ante</i> par modèle de calcul	175
5.1.1. Amélioration concernant l'estimation de la performance thermique des logements .	176
5.1.2. Amélioration concernant la prise en compte de la gestion spatiale du chauffage par les ménages	180
5.1.3. Amélioration concernant la prise en compte des consommations de bois d'appoint très élevées	181
5.2. Pistes d'amélioration des modèles statistiques des écarts.....	183
5.2.1. Amélioration du modèle statistique des écarts avant travaux	183
5.2.2. Amélioration du modèle statistique des écarts après travaux	186
5.3. Conclusion	189
Bibliographie.....	193

Introduction

Le chapitre précédent nous a permis d'identifier un certain nombre des sources d'écart entre consommations d'énergie observées et calculées par le modèle de calcul dit d'ingénieur utilisé. Sur la base de ces dernières, nous proposerons, dans la première partie de ce chapitre, des pistes d'amélioration du modèle afin de rendre les résultats de ses prédictions (évaluations *ex-ante*) de consommation d'énergie après travaux et d'économies d'énergie plus proches de la réalité.

Toutefois, les modèles statistiques que nous avons établis pour expliquer les écarts entre résultats observés et simulés restent perfectibles. Ainsi, dans la seconde partie de ce chapitre, nous tâcherons de repérer leurs limites, avant de présenter différentes pistes d'amélioration.

5.1. Pistes d'amélioration des évaluations *ex-ante* par modèle de calcul

Dans la littérature (SWAN, et al., 2009), deux grandes familles de modèles sont reconnues capables de réaliser les évaluations *ex-ante* (*i.e. a priori*) de consommation d'énergie après travaux et d'économies d'énergie à l'échelle d'un logement effectuant une rénovation énergétique : les modèles statistiques et les modèles de calcul dit d'ingénieur. Dans le cadre de ce travail, le modèle de calcul dit d'ingénieur est la seule technique que nous ayons exploitée.

En effet, au travers un travail annexe (voir Annexe 1) à ce qui est présenté dans ce manuscrit, évoqué dans le chapitre d'introduction (voir Chapitre 1, sous-partie 1.3), nous avons tout d'abord pu mettre en avant les limites de prédiction (évaluation *ex-ante*) d'un modèle statistique. Le modèle statistique de la consommation énergétique tous usages d'une MI, établi sur la base d'un échantillon représentatif à l'échelle nationale de 420 MI, malgré un jeu de variables relativement fourni avec à la fois des variables techniques (bâti, systèmes et travaux récents), d'environnement, de pratiques et socio-économiques a montré un pouvoir prédictif très faible (intervalle de confiance à 95 % sur la prédiction de la consommation d'une MI de [-45 % ; +83 %]). Enfin, et surtout, bien qu'ayant permis de mettre en avant un certain nombre de déterminants de la consommation d'énergie liée à une MI, ce modèle s'est révélé inadapté à l'évaluation de l'effet de travaux d'efficacité énergétique en trouvant non significative la variable relative à la réalisation de tels travaux au cours de la dernière année.

Si dans le Chapitre 3 (voir sous-partie 3.3), nous avons bien réalisé un modèle statistique ayant pour variable expliquée la consommation d'énergie après travaux, celui-ci a été fait dans une logique d'explication *a posteriori* de cette consommation et non de prédiction *a priori*. Pour preuve, nous avons pris en compte dans les variables explicatives des changements intervenus avec les travaux qui ne peuvent être connus qu'après réalisation de ces derniers (*e.g.* changement de température de chauffage, malfaçon).

De manière générale, du moins en France, les évaluations *ex-ante* de travaux d'efficacité énergétique à l'échelle d'un logement sont effectuées à partir d'un modèle d'ingénieur plus ou moins complexe (méthode de calcul Th-C-E ex pour la RT Existant globale, TRNSYS, EnergyPlus...). Il n'existe pas à notre connaissance un modèle statistique en capacité de réaliser les mêmes évaluations *ex-ante*.

Le modèle de calcul utilisé (voir Chapitre 4, sous-partie 4.1.2), SimFast (DEQUE, et al., 1999), est la réduction d'un modèle complexe, CLIM 2000 (BONNEAU, et al., 1993). Il permet de simuler la consommation d'énergie tous usages d'un grand nombre de cas différents de logements et de systèmes énergétiques en tenant compte de comportements réels, ceci tout en présentant un compromis en termes de nombre et de niveau de détail des paramètres à entrer (modélisation par « boîte grise » (DEQUE, et al., 2000)).

Dans le Chapitre 4, nous avons conclu que pour réaliser **des estimations les plus justes possibles à la fois sur la consommation après travaux et les économies d'énergie** avec le modèle de calcul, il

faut que l'estimation faite par ce dernier de la consommation d'énergie avant travaux soit la plus juste possible. Ceci **nécessite donc de minimiser les écarts entre consommations avant travaux simulée et observée**.

Le modèle statistique expliquant le facteur d'écart avant travaux (voir Chapitre 4, sous-partie 4.3.2) a permis de **détecter certaines des sources de ces écarts avant travaux** :

- la performance thermique théorique du bâti au travers de l'effet du coefficient de déperdition volumique G ,
- la gestion spatiale du chauffage par les ménages au travers des effets de la surface habitable du logement, de la température de consigne de chauffage utilisée par le logiciel et de la nature centrale ou non du système de chauffage,
- et la prise en compte des consommations de bois d'appoint très élevées.

Ainsi **à partir de celles-ci**, nous pouvons logiquement identifier **trois pistes d'amélioration**, des estimations faites de la situation avant travaux par le modèle de calcul, concernant :

- l'estimation de la performance thermique des logements,
- la prise en compte de la gestion spatiale du chauffage par les ménages,
- et la prise en compte des consommations de bois d'appoint très élevées.

5.1.1. Amélioration concernant l'estimation de la performance thermique des logements

Comme montré dans le Chapitre 4 (voir sous-partie 4.3.2.5), l'effet de la variable liée au coefficient G (coefficient de déperdition volumique théorique) sur le facteur d'écart avant travaux indique une surestimation des consommations pour les cas avec les plus mauvaises performances thermiques théoriques (coefficients G les plus grands) et à l'opposé, une sous-estimation des consommations pour les cas avec les meilleures performances théoriques (coefficients G les plus petits). **Ainsi, les performances thermiques réelles des logements semblent sous-estimées pour les plus mauvaises et surestimées pour les meilleures.**

Afin de structurer notre analyse, divisons l'échantillon MDE 52-55 avant travaux de 248 cas (voir Chapitre 4, sous-partie 4.3.2.1) par quartile de coefficient G ¹⁸⁶ et traçons la répartition moyenne des déperditions thermiques calculées pour chacun de ces quartiles (voir Figure 5.1).

¹⁸⁶ Min=0,53 W/(m³.°C) ; premier quartile=0,83 W/(m³.°C) ; médiane=1,01 W/(m³.°C) ; troisième quartile=1,44 W/(m³.°C) ; max=2,35 W/(m³.°C).

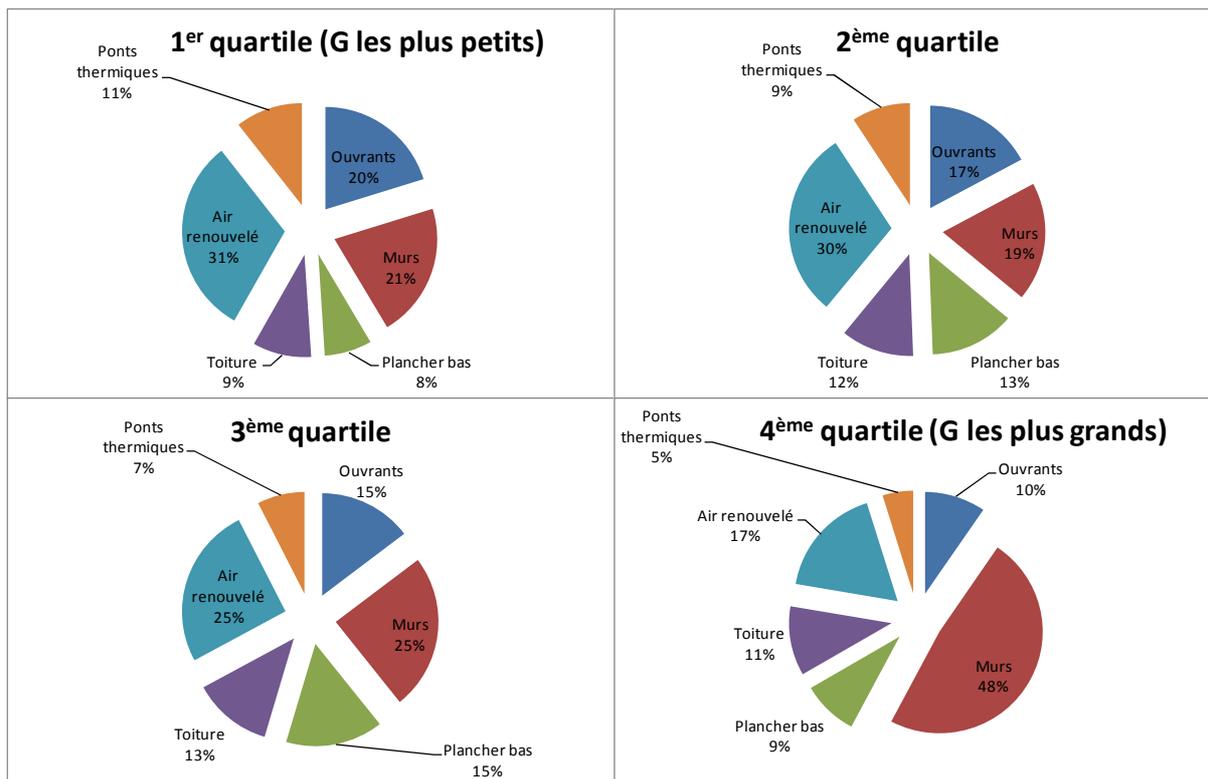


Figure 5.1 Répartitions moyennes des déperditions thermiques calculées par quartile de coefficient G

Pour le quatrième quartile, celui des coefficients G les plus grands, nous observons une très large supériorité des déperditions attribuées aux murs par rapport aux autres déperditions. Supériorité que nous ne retrouvons pas parmi les autres quartiles. Par conséquent, nous pouvons logiquement penser que la sous-estimation des performances thermiques réelles des logements avec les plus grands coefficients G est en grande partie à attribuer à une sous-estimation des performances des murs (*i.e.* à surestimation des déperditions au travers les murs).

Parmi les 62 MI composant ce quatrième quartile, 58 (soit 94 % du sous-échantillon) sont constituées de murs extérieurs sans isolant (déclarations des ménages). Pour rappel, nous avons effectués les calculs sur la base d'un U par défaut pour un mur extérieur sans isolant de $2,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ (voir Chapitre 4, sous-partie 4.1.2.2, Tableau 4.3). Tandis que la méthode de calcul 3CL-DPE¹⁸⁷ fixe une valeur maximale possible de U pour un mur sans isolant de $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ (ARRETE 17 OCTOBRE, 2012). Si le choix d'une limitation à une valeur maximale nous paraît décorrélé de la réalité physique, **la valeur par défaut du U d'un mur sans isolant semble pouvoir être abaissée.** Un abaissement à la valeur de $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ (réduction de 20 % des déperditions liées aux murs sans isolant) permettrait de réduire de manière significative la surestimation des déperditions pour ces MI avec des murs extérieurs sans isolant.

Par ailleurs, la nature et l'épaisseur des matériaux constituant les murs sans isolant peuvent être très diverses s'agissant notamment des logements construits avant la première RT¹⁸⁸ de 1974 (56 des 62 cas du quatrième quartile) et donc correspondre à des U très différents. Le modèle de calcul utilisé (SimFast) offre pour les murs sans isolant des logements conçus pour une autre énergie principale que

¹⁸⁷ Méthode de calcul des consommations conventionnelles d'un logement pour le Diagnostic de Performance Energétique (DPE). Dans le cadre d'une comparaison, pour un échantillon d'environ 900 logements français, des consommations énergétiques liées au chauffage observées et calculées par différents modèles de calcul, Allibe et al. (ALLIBE, et al., 2010) ont trouvé que la version précédente de la méthode 3CL-DPE (ARRETE 9 NOVEMBRE, 2006) engendrait plus d'erreur sur l'estimation de la consommation moyenne de l'échantillon que SimFast (65 % vs. 3 %). Pour cette raison, entre autres (voir Chapitre 4, sous-partie 4.1.2.1), l'utilisation de SimFast reste à privilégier.

¹⁸⁸ Pour rappel, Réglementation Thermique.

l'électricité, la possibilité de définir la nature du matériau constructif (choix entre briques creuses et autre matériau) et l'épaisseur des murs par tranche de 10 cm entre moins de 20 cm et plus de 60 cm (voir Tableau 5.1). Hélas, nous n'avons pas pu utiliser cette option faute d'avoir récupéré les éléments d'information via les enquêtes.

Tableau 5.1 Tableau de détermination des U des murs non isolés

Epaisseur (en cm)	U (en W/(m ² .°C))	
	Autre matériau	Briques creuses
< à 20	3,0	2,0
20 à 30	2,5	1,7
30 à 40	2,2	1,5
40 à 50	2,0	1,5
50 à 60	1,7	1,5
> à 60	1,5	1,5

Dans le cadre d'une estimation au plus juste du U des murs sans isolant, il conviendrait d'**élargir la bibliothèque des matériaux pris en compte**. Par exemple, un mur de 45 cm d'un matériau autre avec un U supposé de 2,0 W/(m².°C) peut aussi bien recouvrir un mur de pierres de taille et moellons avec un U de 2,15 W/(m².°C) (+7,5 %) qu'un mur en briques pleines simples avec un U de 1,65 W/(m².°C) (-17,5 %) (ARRETE 17 OCTOBRE, 2012).

Bien que cette amélioration soit du second ordre, il nous semble qu'il serait également souhaitable de revenir sur l'hypothèse consistant à supposer que toute paroi sur un local non chauffé (*e.g.* mur sur un garage) engendre les mêmes déperditions que la même paroi sur l'extérieur (*e.g.* pour une même épaisseur d'isolant, $(U*\tau^{189})$ mur sur local non chauffé = $(U*\tau)$ mur sur l'extérieur, voir Chapitre 4, sous-partie 4.1.2.2, Tableau 4.3). En effet, cela revient à ne pas tenir compte du fait même qu'à composition identique (même U), une paroi sur un local non chauffé est censée engendrer moins de déperditions qu'une même paroi sur l'extérieur. Dans le cas d'un mur sans isolant sur un local non chauffé, le τ étant supposé de 0,8 (voir Chapitre 4, sous-partie 4.1.2.2, Tableau 4.3), l'hypothèse existante amène une surestimation de 25 % des déperditions au travers du mur.

Enfin, bien que représentant en moyenne une part moindre des déperditions des MI du quatrième quartile (coefficients G les plus grands), le renouvellement d'air est la seconde source des déperditions (voir Figure 5.1). 49 cas parmi les 62 composant ce quartile (soit 79 % du sous-échantillon) ont une ventilation naturelle d'après les déclarations des ménages. Le modèle de calcul utilisé associé à ce type de ventilation un taux de renouvellement d'air de 1 vol/h (voir Chapitre 4, sous-partie 4.1.2.2, Tableau 4.7) alors que la méthode 3CL-DPE prend 0,77 vol/h (ARRETE 17 OCTOBRE, 2012) pour ce même type de ventilation. Ainsi, il semble que le taux de renouvellement d'air utilisé pour une ventilation naturelle puisse être surestimé, expliquant en partie la surestimation des déperditions pour ces logements avec les plus grands coefficients G équipés très majoritairement d'une **ventilation naturelle. La réduction du taux de renouvellement d'air pour ce type de ventilation constituerait donc une amélioration**. Un abaissement à la valeur de 0,77 vol/h fournirait une diminution de 23 % des déperditions engendrées par une ventilation naturelle.

Après nous être intéressés au problème de la sous-estimation des performances thermiques réelles des logements avec les plus grands coefficients G , étudions le problème de la surestimation des performances (*i.e.* la sous-estimation des déperditions) des logements avec les plus petits coefficients G . D'après la répartition moyenne des déperditions des logements appartenant au premier quartile des coefficients G (quartile des coefficients G les petits, voir Figure 5.1), leurs plus faibles déperditions sont liées au plancher bas. Sachant que la majorité des MI constituant ce quartile (53 %

¹⁸⁹ Pour rappel, τ est le coefficient de réduction des déperditions dû à la présence d'un espace tampon entre 0 (pas de déperdition) et 1 (pas de réduction des déperditions).

des 62 MI) ont été construites avant la première RT de 1974 et que les planchers bas font traditionnellement très peu l'objet de travaux d'isolation¹⁹⁰, dû à la difficulté technique associées à ces derniers, cette faible valeur semble anormale.

Toutefois, parmi ce premier quartile, il est à remarquer une surreprésentation des planchers bas de type « sur terre-plein » par rapport aux autres (44 % des cas dans le premier quartile, 15 % des cas dans les deuxième et troisième quartiles et 19 % dans le quatrième quartile). Dans le modèle de calcul utilisé, les déperditions au travers ce type de plancher sont supposées nulles ($U=0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$) voir Chapitre 4, sous-partie 4.1.2.2, Tableau 4.5) là où la méthode 3CL-DPE propose un U entre 0,37 et 0,22 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ (ARRETE 17 OCTOBRE, 2012). Ainsi bien que les U des planchers bas sur terre-plein soient faibles, les supposer nuls semble être une hypothèse excessive, expliquant en partie la sous-estimation des déperditions des logements les plus performants. Il est donc important de **revenir sur cette hypothèse de déperditions nulles au travers des planchers bas sur terre-plein.**

Le fait de revenir sur cette hypothèse pour les planchers sur terre-plein va entraîner une augmentation des déperditions pour toutes les MI possédant ce type de plancher dont certaines avec des problèmes de surestimation des déperditions totales. Cependant à la vue des faibles valeurs de U pour ce type de plancher, l'augmentation des déperditions ne devrait être significative sur les déperditions totales uniquement pour les logements ayant des déperditions faibles au travers des autres parois (logements les plus performants thermiquement).

L'estimation dans la méthode 3CL-DPE (ARRETE 17 OCTOBRE, 2012) des U de ce type de plancher en fonction de la période de construction (avant 2001 ou après 2001) et du rapport entre deux fois la surface du plancher et son périmètre pourrait être une piste. Du moins, toutes les informations nécessaires à cette estimation sont déjà disponibles dans la méthode de calcul.

Par ailleurs, bien que le renouvellement d'air soit la première source de déperditions en moyenne des MI du premier quartile (coefficients G les plus petits), il semble que parmi les 47 cas (soit 76 % du sous-échantillon) ayant une VMC¹⁹¹ simple flux auto-réglable, les 23 cas (soit 37 % des 62 cas) déclarant un système datant d'avant 1982 présentent une sous-estimation de leur taux de renouvellement d'air et donc des déperditions engendrées. En effet, le modèle de calcul utilisé suppose pour un tel système un taux de renouvellement d'air de 0,56 vol/h (voir Chapitre 4, sous-partie 4.1.2.2, Tableau 4.7) là où la méthode 3CL-DPE prend pour un système datant d'avant 1982, 0,67 vol/h (ARRETE 17 OCTOBRE, 2012). Le 0,56 vol/h employé est par contre très proche du 0,59 vol/h associé par la méthode 3CL-DPE à un système de même type datant d'après 1982 (ARRETE 17 OCTOBRE, 2012).

Par conséquent, il semble nécessaire d'intégrer dans le modèle de calcul **une distinction du taux de renouvellement d'air engendré par une VMC simple flux suivant la date d'installation de celle-ci.** Avec un taux de renouvellement d'air de 0,67 vol/h à la place de 0,56 vol/h pour une VMC simple flux datant d'avant 1982, les déperditions engendrées serait augmentées de 20 %.

Les différentes pistes d'amélioration avancées ici nous semblent être les plus importantes cependant d'autres sont certainement possibles. Pour les trouver, la prise en compte des caractéristiques du bâti pourrait être décomposée par élément (*i.e.* murs, toiture...) dans le cadre du modèle statistique servant à l'identification des sources d'écart entre résultats observés et simulés. Mais pour obtenir des résultats fiables, il conviendrait de réduire les incertitudes associées aux déclarations des ménages quant à la description technique de leur logement.

¹⁹⁰ Par exemple, quasiment aucun des 119 cas de l'échantillon MDE 52-55 « avant et après travaux » n'a réalisé une action d'isolation du plancher bas (voir Chapitre 3, sous-partie 3.3.3.1).

¹⁹¹ Pour rappel, Ventilation Mécanique Contrôlée.

5.1.2. Amélioration concernant la prise en compte de la gestion spatiale du chauffage par les ménages

Comme nous l'avons souligné auparavant (voir Chapitre 4, sous-partie 4.3.2.5), les effets trouvés par le modèle statistique sur le facteur d'écart avant travaux pour la surface habitable du logement, la température de consigne de chauffage utilisée par le logiciel et la nature centrale ou non du système de chauffage semblent tous cerner un même problème au niveau de la prise en compte par le modèle de calcul de la gestion spatiale du chauffage par les ménages, ou dit autrement, des différences de température entre les divers espaces d'une MI. En ce sens, **tout en conservant la nature monozone du modèle, il conviendrait de redéfinir le calcul de la température de consigne de chauffage utilisée par le modèle** (moyenne non pondérée des températures déclarées pour les pièces de vie et pour les autres pièces).

S'il nous semble difficile de démultiplier les températures intérieures demandées aux ménages, il nous apparaît plus aisé de redéfinir la part de la surface habitable attribuée à la température déclarée pour les pièces de vie. En effet, la supposition d'une surface identique pour les pièces de vie et pour les autres pièces (50 % chacun de la surface habitable totale) paraît surestimer l'importance de la température des pièces de vie dans un certain nombre de cas. Ceci d'autant plus que les températures intérieures dans une cuisine semblent plus à rapprocher de celles d'une chambre que de celles d'un séjour d'après l'étude du CGDD (CGDD, 2013 pp. 8, Graphique 1).

Afin de s'ajuster au plus près de la situation de chaque logement, il nous semble que le plus fiable et le plus simple serait **de demander directement aux ménages la part de la surface habitable totale (ou la surface en m²) qui correspond à la température intérieure déclarée pour les pièces de vie.**

Concernant les autres pièces, il nous semble nécessaire de faire *a minima* la distinction entre pièces chauffées et non chauffées. Là également, il serait souhaitable **de demander directement aux ménages s'il existe ou non dans leur logement des pièces non chauffées.** Derrière l'appellation « pièce non chauffée » devrait clairement être explicité que ne sont pas concernées uniquement les pièces de type chambre non chauffée mais également les espaces de circulations et les pièces techniques (*e.g.* WC, buanderie). Pour déterminer la part de la surface habitable totale non chauffée, il pourrait **être demandé aux ménages la part de la surface habitable totale (ou la surface en m²) qui correspond aux autres pièces chauffées.** Cette dernière nous semblant plus facile à déterminer que celle de la surface non chauffée (potentiellement plus fractionnée).

La détermination de la valeur exacte de la température de l'espace non chauffé est un problème complexe de bilans d'énergie faisant intervenir entre autres les températures des pièces chauffées du logement, la température extérieure, les surfaces et les propriétés thermophysiques des parois de l'espace non chauffé sur l'extérieur et sur les pièces chauffées. Au regard du niveau d'information que SimFast utilise (surfaces déperditives estimées à partir de la surface habitable déclarée et de la configuration de la MI, températures déclarées...), cela n'aurait pas de sens de tenter de résoudre un tel problème, un trop grand nombre d'hypothèses serait à faire. Cependant des recherches complémentaires pourraient être menées afin de créer une loi simplifiée avec un nombre modéré de paramètres (*e.g.* température moyenne de l'espace chauffé, température extérieure, performance thermique global du logement et part non chauffée du volume total) permettant d'approcher la température de l'espace non chauffé.

A défaut, il nous semble que prendre en compte dans la simulation la surface non chauffée comme une surface sans système de chauffage (température de consigne de chauffage imposée à la totalité du logement mais puissance de chauffage limitée), option offerte par le modèle de calcul mais non utilisée à notre connaissance dans aucun des outils basés sur SimFast, serait un premier pas vers une réduction des écarts.

Ainsi la nouvelle formule de calcul de la température de consigne de chauffage utilisée par le modèle (en °C) serait la suivante :

$$T_{i,av}^{ch,moy,p} = \frac{X_{fpvie}T_{i,av}^{ch,pvie,p} + X_{fautresch}T_{i,av}^{ch,autresch,p}}{X_{fpvie} + X_{fautresch}} \quad (\text{eq.46})$$

avec $T_{i,av}^{ch,pvie,p}$: température intérieure pour les pièces de vie (*pvie*) sur les périodes de présence (*p*) déclarée par le ménage du cas *i* pour la situation avant travaux (*av*) en saison de chauffage (*ch*), en °C,

$T_{i,av}^{ch,autresch,p}$: température intérieure pour les autres pièces chauffées (*autresch*) sur les périodes de présence (*p*) déclarée par le ménage du cas *i* pour la situation avant travaux (*av*) en saison de chauffage (*ch*), en °C,

X_{fpvie} : fraction de la surface habitable totale qui correspond à $T_{i,av}^{ch,pvie,p}$,

$X_{fautresch}$: fraction de la surface habitable totale qui correspond à $T_{i,av}^{ch,autresch,p}$.

Faute d'avoir récupéré au cours des enquêtes sur l'opération MDE 52-55, les parts relatives aux pièces de vie, aux autres pièces et aux espaces non chauffés au sein des logements, il ne nous est pas possible de tester les effets qu'aurait l'application du changement proposé dans le calcul de la température de consigne de chauffage. Il conviendrait de le faire avec un échantillon pour lequel sont connues ces informations.

Enfin, toujours concernant la prise en compte par le modèle de calcul de la gestion du chauffage par les ménages, il est à noter que nous ne proposons pas de piste d'amélioration du modèle de calcul en rapport avec la source d'écart liée à la gestion des réduits de température. En effet, ces écarts nous semblent dus à l'application stricte dans les simulations pour toutes les journées ouvrées de la saison de chauffage des réduits déclarés par les ménages, tandis que ces comportements déclarés correspondent certainement à leur comportement le plus fréquent au cours de la saison de chauffage. Ainsi, un tel procédé ne tient pas compte de la possibilité pour certaines journées d'un comportement « atypique » (*e.g.* réduit de température alors qu'habituellement pas de réduit) d'un jour à l'autre mais également de la possibilité d'une gestion du chauffage différente en début et fin de saison de chauffage par rapport au cœur de celle-ci.

Avant de proposer des pistes d'amélioration, il faudrait pouvoir observer, sur un certain nombre de ménages, l'écart existant entre les gestions des réduits de température de chauffage qu'ils déclarent et la réalité de ces gestions au jour le jour sur une saison entière de chauffage.

5.1.3. Amélioration concernant la prise en compte des consommations de bois d'appoint très élevées

Le modèle de calcul utilisé (SimFast) présente la particularité de tenir compte des appoints de chauffage au bois (voir Chapitre 4, sous-partie 4.1.2.3) par le biais d'une entrée définissant le nombre de stères consommés par an par l'appoint.

Le modèle statistique sur le facteur d'écart avant travaux a permis de mettre en avant que la consommation de bois d'appoint au-delà d'un seuil dépendant des besoins de chauffage du logement ne semble plus pouvoir être prise en compte dans sa totalité dans la simulation, engendrant une sous-estimation des consommations (facteur d'écart supérieur à 1) (voir Chapitre 4, sous-partie 4.3.2.5). Le fait que le modèle de calcul ne permette pas de définir une cheminée, un insert ou un poêle bois comme système principal de chauffage peut entraîner l'entrée dans le logiciel de simulation de consommations de bois d'appoint supérieures à 20 stères (*i.e.* >30 MWh).

Si nous ne traiterons ici que du problème spécifique lié au modèle de calcul utilisé, il est à noter que les modèles de calcul d'ingénieur présentent dans leur ensemble des difficultés à estimer les consommations de bois d'appoint de chauffage (*e.g.* la méthode 3CL-DPE fixe arbitraire une part de 25 % du besoin total de chauffage pris en charge par l'appoint (ARRETE 17 OCTOBRE, 2012)). En

effet, il est difficile de simuler la consommation liée à une cheminée, un insert ou un poêle bois en raison de l'absence pour la plus part de ces systèmes d'une régulation en fonction d'une consigne donnée. La chaleur qu'ils émettent dépend principalement de la quantité de bois qui est chargée par l'utilisateur.

Comme déjà détaillé au Chapitre 4 (voir sous-partie 4.3.2.5), le modèle de calcul utilisé a besoin pour déterminer la consommation du système « principal » de chauffage de calculer la part des besoins horaires de chauffage satisfait par l'appoint bois. La consommation annuelle de bois d'appoint, donnée d'entrée de la simulation, est convertie en masse puis répartie suivant le jour en semaine ou en week-end, à l'aide de *scenarii* de chargements mensuels et horaires. A cela s'ajoute les définitions d'une charge maximale de bois de l'appoint (32 kg) et d'un chargement ou non de l'appoint selon la température horaire intérieure (appoint non chargé à partir d'une température intérieure de 3 °C au-dessus de la température de consigne de chauffage). Trois *scenarii* de chargements horaires sur la journée sont définis sur la base d'un pour des consommations annuelles de moins de 2 stères, un pour des consommations entre 2 et 9 stères et un dernier au-dessus de 9 stères.

Seuls certains éléments de la modélisation de l'appoint bois peuvent être à l'origine de la limitation observée pour les consommations de bois d'appoint très élevées. **Si une étude complémentaire semble nécessaire** pour évaluer avec exactitude l'influence de chaque paramètre, le scénario de charge journalière en bois de l'appoint et l'hypothèse que pour une température intérieure de 3 °C au-dessus de la température de consigne de chauffage l'appoint est non chargé, semblent être pour au moins en partie impliqués dans cette limitation. Plus le nombre de chargements par jour est faible, plus la quantité chargée à chacun d'entre eux est élevée et ainsi plus celle-ci à l'occasion d'entraîner une surchauffe, pouvant annuler le prochain chargement prévu.

Le scénario de charge journalière pour une consommation au-delà de 9 stères par an prévoit 7 chargements dans une journée, il pourrait être envisagé des *scenarii* avec un nombre de chargements plus élevé (e.g. au-dessus d'une consommation de 14 stères par an, 10 chargements dans la journée et au-dessus d'une consommation de 20 stères par an, un chargement toutes les heures de la journée). Ceci permettrait de diminuer la quantité de bois contenue dans un chargement pour les consommations annuelles de bois d'appoint très élevées et donc limiter les risques de surchauffe à chaque chargement.

Il serait également bénéfique de modifier le seuil d'une température intérieure de 3 °C au-dessus de la température de consigne de chauffage en **un seuil en valeur absolue de 25 ou 26 °C**¹⁹². Au regard des fortes incertitudes qui peuvent être liées aux températures intérieures déclarées par un ménage utilisant de façon conséquente un appoint de chauffage au bois (risque d'importantes différences de température dans le volume du logement mais également dans le temps), il semble plus raisonnable d'utiliser un seuil en valeur absolue. Parmi les 7 % des 248 cas (soit 18 cas) de l'échantillon MDE 52-55 avant travaux déclarant une consommation annuelle de bois d'appoint supérieure à 17 stères (voir Chapitre 4, sous-partie 4.3.2.3, Tableau 4.12), 44 % (soit 8 cas) ont une température de consigne calculée¹⁹³ sur la base des températures déclarées par les ménages inférieure ou égale à 19 °C. Ceci correspondant à un seuil, peu élevé, de 22 °C au-delà duquel un chargement n'est pas autorisé.

Enfin, le modèle statistique sur le facteur d'écart après travaux identifie une influence d'un changement de la consommation de bois d'appoint sur ce dernier. La consommation de bois d'appoint étant directement une entrée du modèle de calcul, toute modification de celle-ci a logiquement une influence sur les écarts de consommations (écart plus grand lors de la diminution de la consommation lors d'une situation initial de surestimation) (voir Chapitre 4, sous-partie 4.3.3.5) mais toute absence

¹⁹² L'intervalle de 25 à 26 °C correspond au maximum de 25 °C de température intérieure déclarée pour les pièces de vie au sein de l'échantillon étudié (voir Chapitre 2, sous-partie 2.1.4.6) et au maximum de 25,5 °C trouvé pour le séjour par l'étude du CGDD (CGDD, 2013).

¹⁹³ Calculée sur la base de la moyenne non pondérée des températures déclarées pour les pièces de vie et pour les autres pièces.

de prise en compte d'une modification de cette consommation risquerait d'avoir des conséquences plus importantes. Ainsi, il convient au moment de l'évaluation *ex-ante* de la situation après travaux d'anticiper le plus précisément possible toutes les conséquences des travaux sur la consommation de bois d'appoint, d'autant plus que celle-ci est élevée.

De plus, dans la situation d'une déclaration de température intérieure élevée avant travaux pour les pièces de vie en raison de l'utilisation importante d'un appoint de chauffage au bois, en cas d'un abandon ou d'une forte diminution de l'utilisation de l'appoint bois qui pourrait être prévu, il serait recommandé de pouvoir diminuer la température intérieure pour les pièces de vie dans la simulation après travaux afin d'éviter une surestimation des consommations. Si la modification sur le seuil de température intérieure pour un chargement de l'appoint bois est effectuée (passage à une limite à 25 ou 26 °C), dans la situation inverse¹⁹⁴ le fait de ne pas modifier la température de consigne de chauffage ne devrait pas provoquer d'écart de consommations, la consommation de bois d'appoint devant pouvoir être comptabilisée dans sa totalité.

5.2. Pistes d'amélioration des modèles statistiques des écarts

Maintenant que nous venons de proposer des pistes d'amélioration du modèle de calcul basées sur les sources d'écart identifiées à partir principalement du modèle statistique obtenu sur le facteur d'écart des consommations avant travaux, effectuons une analyse critique de ce dernier.

Bien que le modèle statistique établi sur le facteur d'écart des consommations après travaux ait surtout souligné l'importance de l'influence du facteur d'écart avant travaux, il présente un intérêt tout particulier pour sa quantification de l'effet sur les écarts du changement de température de chauffage suite aux travaux. Ainsi, il est également intéressant d'opérer une analyse critique le concernant, ce que nous nous appliquerons à faire dans le deuxième temps de cette sous-partie.

5.2.1. Amélioration du modèle statistique des écarts avant travaux

Comme nous l'avons souligné lors du Chapitre 4, le modèle statistique réalisé sur le facteur d'écart des consommations avant travaux ne permet d'expliquer seulement qu'une partie des variations des écarts. Avec un R² ajusté de 0,51 (voir Chapitre 4, sous-partie 4.3.2.4, Tableau 4.25), le modèle statistique établi présente premièrement **une limite en termes d'explication**.

Deuxièmement, avec 6 coefficients sur 11 avec un t (rapport entre la valeur du coefficient et de son écart-type) inférieur à 5 (voir Chapitre 4, sous-partie 4.3.2.4, Tableau 4.25), le modèle statistique obtenu présente également **une limite en termes de précision des coefficients**. En effet, des t inférieurs à 5 correspondent à des intervalles de confiance à 95 % supérieurs à ±39 %¹⁹⁵. D'après la loi statistique indiquant que l'écart-type de la moyenne d'une variable sur un échantillon appartenant à une population plus grande est inversement proportionnel à la racine carré de la taille de l'échantillon (voir équation 47) (DODGE, 2010), cette limite est **en partie à attribuer à la faible taille de l'échantillon** exploité (248 cas).

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} * \sqrt{\frac{N-n}{N-1}} \quad (\text{eq.47})$$

avec $\sigma_{\bar{x}}$: écart-type (σ) de la moyenne de la variable x (\bar{x}) sur l'échantillon,

σ : écart-type sur la population,

n et N : tailles respectivement de l'échantillon et de la population.

¹⁹⁴ Absence ou faible consommation de bois d'appoint avant les travaux puis après travaux, prévision d'une forte augmentation de l'utilisation d'un appoint bois pouvant engendrer une augmentation de la température intérieure des pièces de vie.

¹⁹⁵ En raison d'une distribution supposée normale, ±1,96*écart-type soit ±1,96/5 pour un t de 5.

Enfin, dans le cadre d'une comparaison avec les caractéristiques majoritaires des logements ayant effectué des travaux de MDE à l'échelle nationale en 2010, nous avons pu constater dans le Chapitre 2 (voir sous-partie 2.1.4.9) que l'échantillon MDE 52-55 utilisé possède **une limite de représentativité à l'échelle nationale**¹⁹⁶. Celle-ci concerne également plus largement le parc existant de MI (voir Chapitre 2, sous-partie 2.1.4). Notons que l'absence de logements collectifs dans l'échantillon accentue encore sa non représentativité.

Ainsi dans le cadre d'une amélioration du travail de modélisation statistique mené afin d'identifier les sources d'écart entre les consommations d'énergie avant travaux estimées par le modèle de calcul (SimFast) et observées, il faudrait pouvoir tout d'abord disposer d'un **échantillon représentatif à l'échelle nationale du parc de bâtiments existants**. Sachant que nous nous intéressons aux écarts en situation avant travaux, il n'y a pas de raison particulière de se restreindre par exemple au parc de logements réalisant des travaux de MDE.

Les coefficients les moins précis du modèle présentent des t d'environ 3 (voir Chapitre 4, souspartie 4.3.2.4, Tableau 4.25) correspondant à des intervalles de confiance à 95 % d'environ ± 65 %. Pour obtenir pour ces mêmes coefficients des intervalles de confiance à 95 % entre ± 10 % et ± 20 %, nous devons diviser par un facteur 4,3 (0,65/0,15) leur écart-type. D'après l'équation 47, ceci revient à devoir **multiplier la taille de l'échantillon étudié** par 18,5 ($=4,3^2$), ce qui revient à un échantillon exploité d'environ 4590 cas ($=18,5*248$).

Cependant, il faut bien voir que ce nombre est indicatif et à prendre avec précaution. L'élargissement des caractéristiques des logements étudiés au travers un échantillon représentatif à l'échelle nationale pourrait modifier cette valeur. Entre autres, il est possible que l'ajout de dispersion dans les caractéristiques des cas analysés, *i.e.* dans les variables explicatives, viennent modifier les coefficients du modèle statistique et également leur intervalle de confiance.

L'autre possibilité pour améliorer la précision des coefficients calculés par le modèle est de réduire l'écart-type du coefficient sur la population (voir équation 47). Une **diminution des incertitudes liées aux variables utilisées** devrait permettre d'aller dans ce sens.

Enfin, afin d'améliorer l'explication des écarts par le modèle, il conviendrait de tester dans le jeu des variables explicatives de **nouvelles variables mais également des interactions** (*i.e.* le produit de deux variables pour une interaction d'ordre deux) entre variables explicatives (possible si la taille de l'échantillon est conséquente).

L'analyse de sensibilité de simulations énergétiques du bâtiment menée par Garcia Sanchez et al. (GARCIA SANCHEZ, et al., 2012) a montré clairement l'importance des interactions entre les données de taille, de niveau d'isolation, de taux de ventilation et de température de consigne de chauffage, tout en soulignant les limites d'un modèle statistique linéaire simple. Incorporer les principales interactions entre variables explicatives devrait également permettre d'augmenter la précision sur les coefficients, ceci en retour de la meilleure explication globale du modèle.

L'exploitation de l'enquête « Performance de l'Habitat, Equipements, Besoins et USages de l'énergie » (Phébus), lancée en avril 2013 par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. (MEDDE-CGDD, 2013), nous semble pouvoir répondre en grande partie aux exigences que nous venons de formuler.

L'enquête Phébus a pour objectif de réaliser un état des lieux des performances énergétiques du parc des résidences principales françaises, tout en étudiant la précarité énergétique des ménages. Elle comprend deux volets réalisés séparément, un entretien en face à face avec les occupants du logement et un Diagnostic de Performance Energétique (DPE) du logement (ARRETE 8 FEVRIER, 2012).

¹⁹⁶ Il présente sur un certain nombre de caractéristiques générales une relativement bonne concordance qualitative mais des discordances sur les caractéristiques plus détaillées que sont la surface et l'énergie principale de chauffage avant travaux.

Les thèmes abordés lors de l'entretien sont les suivants :

- les caractéristiques générales du logement et des occupants (taille, date d'achèvement, statut d'occupation...),
- les caractéristiques socio-économiques du ménage (composition, âge, profession, date d'installation dans le logement, charges, revenus...),
- les travaux d'amélioration de l'habitat effectués depuis 2008 et pouvant avoir un impact sur l'efficacité énergétique (travaux d'isolation, changement de la chaudière...),
- les modes de chauffage, les équipements ménagers et automobiles (description des modes de chauffage, des équipements ménagers les plus « énergivores » selon une quinzaine de postes...),
- les usages et comportements énergétiques (période de chauffe, réglage de température nuit/jour, pratique d'aération ...),
- les consommations d'énergie (toutes énergies, sur une période au minimum de 12 mois et au maximum de 24 mois).

Le DPE est réalisé à partir d'une visite sur site d'un diagnostiqueur certifié.

Ainsi, il est à noter que la récupération des informations relatives aux ménages et aux logements par le biais d'une enquête en face à face et d'une visite sur site d'un technicien devrait permettre de connaître ces caractéristiques avec une faible incertitude. Il est en tout cas certain que cette manière de procéder mène à **de plus faibles incertitudes qu'une enquête téléphonique**, procédé qui a été utilisé pour les enquêtes que nous avons exploitées.

L'échantillon des enquêtés de Phébus est tiré de l'échantillon maître de l'INSEE issu du recensement 2011. Il est constitué de 8000 logements représentatifs des régions, des zones climatiques, des types d'habitat (maison individuelle ou logement collectif) et des années de construction. L'objectif est d'obtenir 5000 répondants ayant réalisé les deux volets de l'enquête.

Au regard des informations disponibles, moyennant des hypothèses *a priori* sur les absences en week-end et sur les congés et sur la gestion du chauffage durant ces périodes, il nous semble possible d'effectuer une simulation à partir de SimFast des consommations de la très grande majorité des cas enquêtés (SimFast ne permet pas de tenir compte d'un chauffage collectif).

En y associant un nettoyage préliminaire des données recueillies, il nous semble raisonnable d'envisager au final **un échantillon exploitable de plusieurs milliers de logements**. En plus de sa taille, cet échantillon présenterait **une meilleure représentativité nationale** que l'échantillon MDE 52-55. Notamment, il devrait permettre l'étude des logements collectifs, type de logement non étudié dans le cadre de ce travail.

Concernant la modélisation statistique, de part la grande taille de l'échantillon, il semble envisageable d'étudier des interactions. Serait à **étudier en priorité des interactions entre les variables liées à la performance thermique des logements et celles relatives à la gestion du chauffage par les ménages**. Comme nous l'avons déjà souligné (voir Chapitre 4, sous-partie 4.3.2.5) et comme le montre Hens et al. (HENS, et al., 2010), une gestion du chauffage donnée (gestion dans le temps mais également entre les différentes pièces) entraîne des effets différents sur la consommation en fonction de la performance thermique du logement. Il pourrait également être étudié **des interactions entre ces mêmes variables caractérisant la gestion du chauffage et les variables concernant la nature du système principal de chauffage et sa régulation**. En effet, entre autres, la nature de la régulation (tout ou rien ou graduée plus ou moins finement) et le temps de réponse du système à une consigne donnée semblent pouvoir impacter les conséquences sur les consommations d'une gestion du chauffage donnée. Il y aurait également un intérêt à tester des interactions entre les trois groupes de variables, si la taille de l'échantillon est suffisante.

A priori, au travers des DPE réalisés à partir d'une visite sur site, il devrait être possible de connaître plus finement, et de manière plus précise, la **composition de l'enveloppe des logements** que pour l'échantillon MDE 52-55 (voir Chapitre 2, sous-partie 2.1.2). Par conséquent, **ces informations**

supplémentaires pourraient être traduites en nouvelles variables pour pouvoir étudier, par le biais de la modélisation statistique, plus précisément les sources d'écart liées aux caractéristiques du bâti.

En fonction de leur nombre, il pourrait être judicieux d'identifier par une variable les logements pour lesquels auront été effectués des travaux d'efficacité énergétique dans l'année précédant¹⁹⁷ la période des consommations fournies. D'éventuelles malfaçons dans la réalisation des travaux ou encore un changement graduel de la gestion du chauffage par les ménages suite aux travaux pourraient être des sources d'écart entre les consommations simulées et observées. Bien sûr, lors du nettoyage préliminaire des données, il faudra veiller à éliminer les logements pour lesquels des travaux d'efficacité énergétique auront été réalisés pendant la période des consommations fournies.

Enfin, au travers du volet « entretien en face en face » de l'enquête, **un certain nombre de caractéristiques générales et socio-économiques concernant les ménages devrait être connu**. Tandis que nous n'avons pris en compte que deux variables liées aux caractéristiques socio-économiques des ménages (nombre d'occupants et occupation en journée en semaine, voir Chapitre 4, sous-partie 4.3.2.3), **il conviendrait d'introduire dans la modélisation statistique ces nouvelles caractéristiques en tant que variables explicatives et ainsi analyser leur significativité et leur effet comme source d'écart**. Tout en faisant attention aux problèmes de colinéarité pouvant exister, entre autres, entre des variables relatives aux caractéristiques socio-économiques et aux comportements, il serait intéressant d'étudier les pouvoirs explicatifs des écarts des unes et des autres.

En « marge » de la question des sources d'écart entre les consommations d'énergie estimées et observées, derrière ce dernier point, est cachée la question plus large de quels sont les déterminants de la consommation d'énergie liée à un logement ? Question qu'une exploitation statistique de l'enquête Phébus similaire à celle développée dans l'article présenté en annexe (voir Annexe 1) permettrait de traiter.

5.2.2. Amélioration du modèle statistique des écarts après travaux

Le modèle statistique établi sur le facteur d'écart des consommations après travaux, se basant également sur un échantillon MDE 52-55, présente lui aussi **une limite en termes de représentativité nationale** (voir Chapitre 2, sous-partie 2.1.4.9). S'agissant ici de l'étude des écarts après travaux, la représentativité recherchée devrait se concentrer à celle du **parc de logements réalisant des travaux de MDE**.

Le modèle est également **limité en termes d'explication** (R^2 ajusté de 0,61 ; voir Chapitre 4, sous-partie 4.3.3.4, Tableau 4.33) et **en termes de précision des coefficients** (3 coefficients sur les 5 ayant un t de 3 ou moins soit un intervalle de confiance à 95 % de ± 65 % et plus ; voir Chapitre 4, sous-partie 4.3.3.4, Tableau 4.33).

Dans le cadre de ce modèle, les coefficients les moins précis présentent des t proches de 2,5 (voir Chapitre 4, sous-partie 4.3.3.4, Tableau 4.33) correspondant à des intervalles de confiance à 95 % de ± 78 %. Toujours pour obtenir pour ces coefficients des intervalles de confiance à 95 % entre ± 10 % et ± 20 %, nous devons diviser par un facteur 5,2 (0,78/0,15) leur écart-type. D'après l'équation 47 (voir sous-partie 5.2.1), ceci revient à devoir **multiplier la taille de l'échantillon étudié** par 27,0 ($=5,2^2$), ce qui revient à un échantillon exploité d'environ 3000 cas ($=27,0*111$). Ce nombre est toujours à prendre avec précaution en raison des changements possibles du modèle liés à l'élargissement des caractéristiques des logements étudiés au travers d'un échantillon représentatif à l'échelle nationale.

A notre connaissance, il n'existe pas en France d'enquête fournissant un échantillon exploitable d'environ 3000 logements représentatifs sur lesquels ont été effectués des travaux de rénovation énergétique et dont leurs situations avant et après travaux sont connues (caractéristiques des logements, des ménages et de leurs comportements ainsi que consommations d'énergie).

¹⁹⁷ Voir à tester sur deux années avant.

Toutefois, il existe deux enquêtes régulièrement réalisées à l'échelle nationale quant aux travaux de MDE réalisés par les ménages dans leur logement : **l'enquête « Maîtrise de l'énergie »** (TNS SOFRES, 2012) **et la campagne de l'Observatoire Permanent de l'amélioration ENergétique du logement (OPEN)** (OPEN, 2011). Il serait donc intéressant de travailler à partir de ces deux enquêtes commanditées par l'ADEME. Toutefois, l'enquête « Maîtrise de l'énergie » avec des questions au-delà du sujet des travaux et notamment sur les comportements de chauffage des ménages pourrait être à privilégier. Dans la suite de cette sous-partie, nous nous concentrerons sur cette enquête.

Afin d'estimer la taille des échantillons qui pourraient être récupérés, regardons les résultats de vagues d'enquêtes déjà réalisées. Sur la base de 10 000 ménages enquêtés, échantillon conçu afin d'être représentatif des ménages et des logements français, 1267 ménages pour l'enquête « Maîtrise de l'énergie – Bilan 2011 – 2ème Phase » (TNS SOFRES, 2012) déclarent avoir réalisé des travaux¹⁹⁸. Sans tenir compte des pertes liées à un nettoyage préliminaire des données recueillies, cet échantillon représente moins de 3000 cas, nombre estimé nécessaire ci-dessus. Cependant, il est toujours possible de regrouper les échantillons obtenus sur plusieurs vagues d'enquêtes.

Dans le cadre de cette enquête, qui se fait par voie postale, ne sont posées que des questions d'ordre plutôt général quant aux caractéristiques des logements et des travaux (*e.g.* type de logement, année de construction... nature des travaux réalisés). Par conséquent, **il serait nécessaire de rajouter au questionnaire actuel, pour les ménages ayant effectués des travaux, des questions plus techniques**, notamment concernant la constitution de l'enveloppe des logements et/ou des précisions sur les travaux d'isolation. Il faudrait également rajouter **des questions afin de récupérer au moins une année d'historique de consommations d'énergie** tous usages avant et après les travaux. Et enfin, **les questions quant aux comportements de chauffage des ménages seraient à dupliquer pour les situations avant et après travaux**. En raison de ces rajouts, nous pouvons nous attendre à une diminution de la taille des échantillons exploitables (voir les motifs d'élimination dans les enquêtes exploitées dans ce travail, Chapitre 2, sous-parties 2.1.3 et 2.2.3). Diminution néanmoins que nous ne savons pas quantifier.

Par ailleurs, bien que les ménages enquêtés appartiennent au panel consommateurs de la TNS Sofres (TNS SOFRES), *i.e.* qu'il s'agisse de ménages habitués à répondre à des enquêtes mais également appliqués dans leurs réponses, nous pouvons nous attendre qu'une certaine incertitude soit associée à leurs réponses notamment quant aux éléments techniques de leur logement.

Afin de réduire ces incertitudes nuisant à la précision des coefficients du modèle mais aussi à sa capacité d'explication, il pourrait être envisagé un autre dispositif d'enquête. En s'inspirant directement du dispositif utilisé pour l'enquête Phébus (voir sous-partie 5.2.1), il serait possible **de réaliser une enquête en face à face à domicile s'accompagnant du mesurage et/ou de l'observation par un professionnel des caractéristiques techniques du logement** (*e.g.* composition des parois, nature des systèmes énergétiques et de leur régulation). Par contre, ce dispositif aurait un coût à l'échelle d'un enquêté beaucoup plus élevé qu'une enquête par voie postale.

Idéalement, l'enquête serait à dupliquer avant et après travaux (possibilité d'observer des malfaçons) et au minimum, elle devrait être privilégiée avant les travaux. Dans ce cas, les informations concernant les travaux, la consommation d'énergie tous usages et les autres informations relatives à la situation après travaux pourraient être récoltées par enquête téléphonique, postale ou en ligne.

En effet, les travaux peuvent être connus avec une relativement bonne précision par les ménages soit parce qu'ils les ont accomplis par eux-mêmes, soit parce qu'une entreprise les a réalisés et dans ce cas, la facture devrait normalement détailler les travaux. La connaissance de l'état initial de leur logement par les ménages est elle beaucoup plus aléatoire et engendre ainsi une incertitude significative quant aux caractéristiques déclarées. Par ailleurs, le fait de récupérer les données relatives

¹⁹⁸ La différence entre les deux chiffres pouvant provenir que la première enquête citée ne concerne que les résidences principales quand la deuxième incorpore également les résidences secondaires, logements locatifs ou vacants.

aux situations avant et après travaux durant chacune des périodes correspondantes, soit en deux temps, permettrait de minimiser les incertitudes liées à des souvenirs plus ou moins viables, *e.g.* de comportements pouvant remonter à plus de deux années.

Toutefois, devant réaliser une visite sur site avant travaux, la mise en place d'un tel dispositif d'enquête nécessiterait d'être capable d'identifier un échantillon d'enquêtés allant réaliser prochainement des travaux d'efficacité énergétique. Via l'enquête « Maîtrise de l'énergie », il est possible de disposer d'un échantillon de ménages exprimant une intention de travaux pour l'année à venir. La vague 2011 de l'enquête « Maîtrise de l'énergie » (TNS SOFRES, 2012) a fourni un échantillon de 780 logements déclarant une telle intention, soit un nombre de cas inférieur d'environ 40 % à ceux déclarant avoir réalisé des travaux dans l'année. En y associant un taux de perte de 10 %, nous semblant réaliste (*e.g.* quelques cas n'ayant pas réalisé les travaux, quelques consommations d'énergie extrêmes), l'échantillon exploitable serait d'environ 700 logements.

Pour obtenir la même taille d'échantillon exploitable à partir des 1267 ménages déclarant avoir réalisé des travaux en 2011, il faudrait un taux de perte de 45 %. En raison de l'appartenance des ménages interrogés à un panel consommateurs, nous pouvons nous attendre à un taux de perte moindre et ceci malgré les rajouts de questions au questionnaire. Par conséquent, il semble que l'option consistant à conserver le dispositif d'enquête actuel fournirait une plus grande taille d'échantillon à chaque vague d'enquête que le dispositif « entretien en face en face + visite sur site ». **La question du choix du dispositif d'enquête à retenir** semble donc se poser sous la forme d'un **privilège à accorder à la taille de l'échantillon ou à l'incertitude liée aux données**.

Dans tous les cas, **les échantillons issus de ces deux dispositifs d'enquête** présenteraient, par rapport à l'échantillon MDE 52-55, **une amélioration en termes de représentativité nationale** avec notamment l'intégration de logements collectifs. Par ailleurs, **par leur taille plus élevée** que les 111 cas exploités dans le modèle établi, ils devraient entraîner des modèles statistiques fournissant **des coefficients plus précis**. **Un gain de précision devrait également être dû au fait que les incertitudes associées aux informations récupérées devraient être plus faibles**, et ceci dans les deux dispositifs d'enquête, que dans le cas des enquêtes téléphoniques auprès de ménages lambda (pas forcément habitués à répondre à des enquêtes et pas impliqués dans l'enquête) que nous avons utilisées.

Néanmoins, reste la question de la fiabilité de la **quantification de l'effet du changement de température de chauffage** suite aux travaux sur la base des déclarations des ménages. L'estimation ainsi réalisée ne l'étant que sur les cas déclarant un changement, *i.e.* certainement ceux ayant les changements les plus marqués, du moins suffisamment marqués pour qu'ils en aient pleinement conscience (voir Figure 5.2). Afin d'avoir une estimation fiable, il est **nécessaire de devoir utiliser des températures mesurées dans les situations avant et après travaux** et non déclarées.

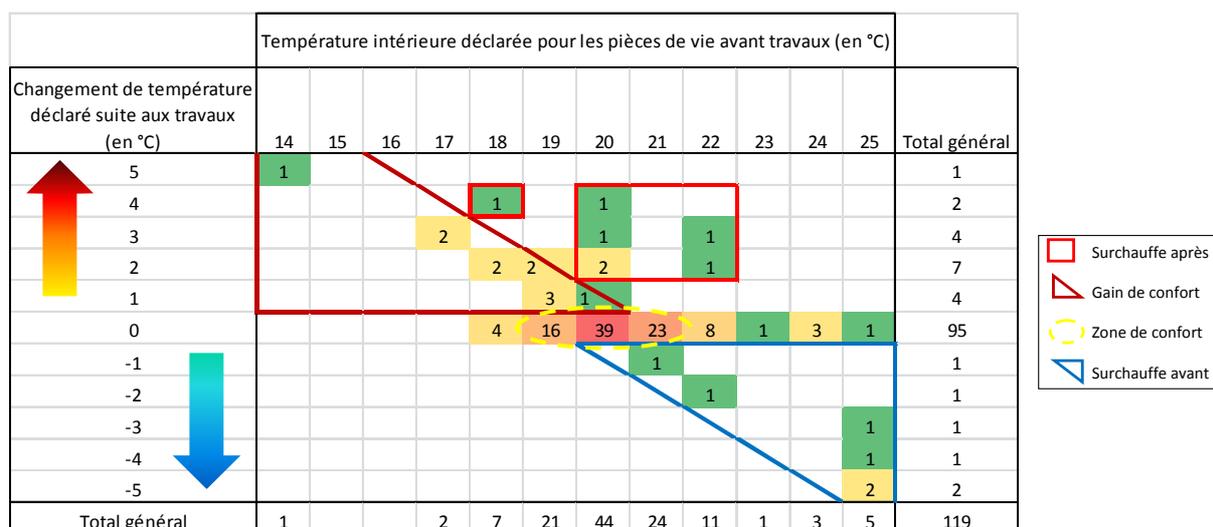


Figure 5.2 Croisement entre les températures intérieures déclarées pour les pièces de vie avant travaux et les changements de température pour ces mêmes pièces déclarés suite aux travaux pour l'échantillon MDE 52-55 avant et après¹⁹⁹

A chaque croisement est indiqué le nombre de ménages concernés. Le dégradé de couleur se faisant en fonction de ce nombre (vert pour les plus petites nombres et rouge pour les grands nombres).

Concernant les changements de comportement suite aux travaux, malgré le fait qu'ils soient déclarés et non mesurés, il serait quand même judicieux d'introduire dans le jeu de variables explicatives des **variables relatives aux changements des gestions spatiale et temporelle du chauffage**. Ces nouvelles variables devraient **améliorer la capacité d'explication du modèle**. La plus grande taille d'échantillon devrait permettre également de **détailler plus finement les travaux effectués** que ce que nous avons pu faire (voir Chapitre 4, sous-partie 4.3.3.3, Tableaux 4.27 et 4.28) et ainsi faire croître l'explication fournie par le modèle.

Enfin, il est à remarquer que ces échantillons permettraient également l'amélioration de l'évaluation (quantification, qualification et modélisation statistique) *ex-post* des économies d'énergie obtenues par les travaux d'efficacité énergétique. Le travail effectué dans le Chapitre 3 ayant des limites similaires à celles avancées pour les modèles statistiques étudiant les écarts. Par ailleurs, ces échantillons seraient l'occasion d'aborder l'étude des travaux dans les logements collectifs, non présents dans les échantillons exploités.

5.3. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur l'étude des pistes d'amélioration du modèle de calcul dit d'ingénieur (SimFast) utilisé dans le cadre de ce travail. Ayant conclu, dans le Chapitre 4, que pour que le modèle de calcul réalise des estimations les plus justes possibles sur à la fois la consommation après travaux et les économies d'énergie, **il fallait une estimation de la consommation d'énergie avant travaux la plus juste possible, nous avons utilisé les sources d'écart identifiées par le modèle statistique sur le facteur d'écart avant travaux pour proposer trois pistes d'amélioration.**

¹⁹⁹ Nous pouvons noter que si la très grande majorité des ménages (80 % des 119 cas) déclarent ne pas changer de température dans les pièces de vie suite aux travaux, ceux déclarant une augmentation ou une diminution de température déclarent, en très grande majorité (71 % des 24 changements déclarés), un changement correspondant à l'atteinte après travaux d'une zone de confort entre 19 °C et 21 °C. Zone correspondant également à la très grande majorité des températures déclarées par les ménages « sans changement » (94 % des 95 cas).

Dans le cadre de la **première piste** liée à l'amélioration de l'estimation de la performance thermique des logements, à partir de l'analyse des répartitions moyennes des déperditions thermiques par quartile de coefficient G, nous avons proposé :

- **concernant les murs sans isolant, d'abaisser la valeur par défaut du U et d'élargir la bibliothèque des matériaux pris en compte,**
- de revenir sur l'hypothèse consistant à supposer que toute paroi sur un local non chauffé (*e.g.* mur sur un garage) engendre les mêmes déperditions que la même paroi sur l'extérieur,
- **d'annuler l'hypothèse attribuant à un plancher bas sur terre-plein des déperditions nulles,**
- **et concernant la ventilation, de réduire le taux de renouvellement d'air supposé pour une ventilation naturelle et de faire une distinction du taux de renouvellement d'air engendré par une VMC simple flux suivant la date d'installation de celle-ci.**

Concernant la **deuxième piste** relative à l'amélioration de la prise en compte de la gestion spatiale du chauffage par les ménages, nous avons soumis l'idée de redéfinir le calcul de la température de consigne de chauffage utilisée par le modèle monozone :

- en remplaçant l'hypothèse d'une surface identique attribuée aux températures déclarées pour les pièces de vie et pour les autres pièces par **la définition par les ménages des parts de la surface habitable correspondantes aux températures déclarées,**
- et en intégrant la possibilité pour les ménages de définir l'existence dans leur logement d'une partie non chauffée (surface correspondante déduite à partir des surfaces chauffées déclarées), qui à défaut de mieux pour le moment pourrait être définie comme surface sans système de chauffage.

S'agissant de la **troisième piste** associée à l'amélioration de la prise en compte (particularité du modèle de calcul utilisé) **des consommations de bois d'appoint très élevées** (ayant tendance à engendrer des sous-estimations), bien qu'une étude complémentaire serait nécessaire, nous avons envisagé :

- de **rajouter un ou deux scénarii de charge journalière** afin d'avoir la possibilité d'un nombre de chargements plus élevé que 7,
- et de **modifier le seuil d'arrêt de chargement** de l'appoint à une température intérieure de 3 °C au-dessus la température de consigne **par une valeur absolue de 25 ou 26 °C**, les températures déclarées par des ménages utilisant de manière importante l'appoint bois pouvant être entachées d'une certaine incertitude.

Par ailleurs, il nous a semblé important de souligner qu'au moment de l'évaluation *ex-ante* de la situation après travaux, il faut anticiper le plus précisément possible toutes les conséquences des travaux sur la consommation de bois d'appoint, d'autant plus que celle-ci est élevée, mais également sur la température de consigne de chauffage, lorsque que celle-ci est déclarée initialement élevée par le ménage en raison de l'utilisation importante d'un appoint de chauffage au bois. Toute absence de prise en compte d'une modification risquerait d'engendrer une erreur plus importante qu'une estimation approximative de la modification.

Dans une seconde partie de ce chapitre, nous avons premièrement effectué un retour critique quant au modèle statistique sur les facteurs d'écart avant travaux. Celui-ci nous a permis de mettre en avant **des limites du modèle en termes d'explication et de précision des coefficients** dues en partie à la faible taille de l'échantillon utilisé **mais également des limites de représentativité de celui-ci**. Pour dépasser ces limites, nous avons **étudié la possibilité de modélisation statistique des écarts avant travaux à partir d'une exploitation de l'enquête Phébus**, lancée en avril 2013 par le Ministère (MEDDE-CGDD, 2013), auprès de 8000 ménages représentatifs à l'échelle nationale.

Ainsi, cet échantillon présenterait **une meilleure représentativité nationale** que l'échantillon MDE 52-55 utilisé. Nous semblant raisonnable d'envisager au final un **échantillon exploitable de**

plusieurs milliers de logements, cette grande taille devrait **permettre systématiquement d'améliorer la précision des coefficients**. Celle-ci devrait être également améliorée par la **réduction des incertitudes liées aux informations récupérées** par le dispositif d'enquête mis en place (entretien en face à face et une visite sur site d'un technicien).

Concernant la capacité d'explication du modèle, elle devrait être augmentée par l'introduction dans le jeu de variables explicatives :

- **d'interactions entre les variables liées à la performance thermique des logements et/ou concernant la nature du système principal de chauffage et de sa régulation et celles relatives à la gestion du chauffage par les ménages,**
- **de variables décrivant plus finement la composition de l'enveloppe des logements,**
- **et de variables décrivant les caractéristiques socio-économiques des ménages.**

Deuxièmement, dans la seconde partie de ce chapitre, nous avons également réalisé un retour critique quant au modèle statistique sur les facteurs d'écart avant travaux. **Les mêmes limites** d'explication, de précision des coefficients et de représentativité ont de nouveau été mises en avant.

En l'absence d'une enquête existante permettant de dépasser les limites soulignées, nous avons étudié comment pourrait être utilisées les enquêtes régulières dont se sert l'ADEME pour observer les travaux d'efficacité énergétique effectués par les ménages français dans leur logement : **l'enquête « Maîtrise de l'énergie »** (10 000 enquêtés issus d'un panel consommateurs) (TNS SOFRES, 2012) et **la campagne OPEN** (10 000 enquêtés) (OPEN, 2011). Deux démarches différentes ont été envisagées :

- l'une consistant à **rajouter au questionnaire actuel**, pour les ménages déclarant des travaux (*e.g.* 1267 ménages pour la vague 2011 de l'enquête « Maîtrise de l'énergie » (TNS SOFRES, 2012)), **des questions** afin de récupérer au moins une année d'historique de consommations d'énergie tous usages avant et après les travaux, des questions techniques notamment concernant la constitution de l'enveloppe des logements et/ou des précisions sur les travaux d'isolation mais également une duplication sur les situations avant et après travaux des questions concernant les comportements de chauffage des ménages,
- l'autre consistant, pour les ménages déclarant une intention de faire des travaux dans l'année à venir (*e.g.* 780 ménages pour la vague 2011 de l'enquête « Maîtrise de l'énergie » (TNS SOFRES, 2012)), **une enquête en face à face à domicile s'accompagnant du mesurage et/ou de l'observation par un professionnel des caractéristiques techniques du logement** (*e.g.* composition des parois, nature des systèmes énergétiques et de leur régulation) au minimum en situation avant travaux (connaissance des ménages plus aléatoire sur cette situation). Les renseignements relatifs aux travaux et à la situation après travaux, notamment la consommation d'énergie tous usages, seraient récupérés par une enquête téléphonique, postale ou en ligne.

Sur la base des échantillons de la vague 2011 de l'enquête « Maîtrise de l'énergie » (TNS SOFRES, 2012) et d'une anticipation des taux de perte entre enquêtés et exploités, nous avons estimé que l'option consistant à rajouter des questions au questionnaire existant fournirait la plus grande taille d'échantillon. Toutefois, le dispositif « entretien en face à face + visite sur site » devrait entraîner les plus faibles incertitudes liées aux données récupérées. Ainsi, **le choix du dispositif d'enquête** semble se poser sous la forme d'un **privilège à accorder à la taille de l'échantillon ou à l'incertitude liée aux données**.

Dans tous les cas, nous avons mis en avant que **les échantillons issus de ces deux dispositifs d'enquête** présenteraient, par rapport à l'échantillon MDE 52-55 de 111 cas, **une amélioration en termes de représentativité nationale** avec notamment l'intégration de logements collectifs. De plus, **par leur taille plus élevée**, les modèles statistiques les utilisant devraient fournir **des coefficients plus précis**. Un gain de précision devrait également être dû au fait que les incertitudes associées aux

informations récupérées devraient être plus faibles, et ceci dans les deux dispositifs d'enquête, que par rapport à des enquêtes téléphoniques auprès de ménages n'étant pas habitués à être enquêtés.

La capacité d'explication du modèle devrait être augmentée au travers :

- **d'une description plus fine des travaux effectués dans les variables explicatives**, permis par la taille importante des échantillons,
- **et de l'introduction de variables relatives aux changements des gestions spatiale et temporelle du chauffage.**

Concernant les changements de comportement suite aux travaux, nous avons souligné la nécessité **d'utiliser des températures mesurées dans les situations avant et après travaux** et non déclarées pour pouvoir quantifier de manière plus fiable leur effet.

Enfin, nous avons fait remarquer que de tels échantillons permettraient également l'amélioration de l'évaluation *ex-post* des économies d'énergie obtenues par des travaux d'efficacité énergétique. Le travail effectué dans le Chapitre 3 présentant des limites similaires à celles avancées pour les modèles statistiques étudiant les écarts.

Bibliographie

ALLIBE B, OSSO D et LAURENT M-H Modélisation thermique du chauffage individuel : d'un logement unique à l'ensemble du parc [Conférence] // International Building Performance Simulation Association Conference. - Moret sur Loing (France) : [s.n.], 2010.

ARRETE 17 OCTOBRE Arrêté du 17 octobre 2012 modifiant la méthode de calcul 3CL-DPE introduite par l'arrêté du 9 novembre 2006 portant approbation de diverses méthodes de calcul pour le diagnostic de performance énergétique en France métropolitaine [Revue] // Journal officiel de la République française. - 10 novembre 2012. - 0262. - p. 17780. - texte n°9.

ARRETE 8 FEVRIER Arrêté du 8 février 2012 modifiant l'arrêté du 15 septembre 2006 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants proposés à la vente en France métropolitaine [Revue] // Journal officiel de la République française. - 15 mars 2012. - 0064. - p. 4710. - texte n° 6.

ARRETE 9 NOVEMBRE Arrêté du 9 novembre 2006 portant approbation de diverses méthodes de calcul pour le diagnostic de performance énergétique en France métropolitaine [Revue] // Bulletin officiel du Ministère de l'Emploi, de la Cohésion Social et du Logement. - 2006. - BO 2006 22/SOCU 06 10 563 A.

BONNEAU D, RONGERE D, COVALET B et GAUTIER B CLIM 2000: modular software for energy simulation in buildings [Conférence] // IBPSA 3rd International Conference on Building Simulation. - Adelaide (Australia) : [s.n.], 1993.

CGDD Les déterminants de la température de chauffage adoptée par les ménages [Article] // Etudes & Documents / éd. Service de l'Économie de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD). - avril 2013. - 83.

DEQUE F, CATUSSE L et CASTENET S Residential SIMFAST: software for rapid technicals appraisals [Conférence] // IBPSA 6th International Conference on Building Simulation. - Kyoto (Japan) : [s.n.], 1999.

DEQUE F, OLLIVER F et POBLADOR A Grey boxes used to represent buildings with a minimum number of geometric and thermal parameters [Revue] // Energy and Buildings. - 2000. - 31. - pp. 29-35.

DODGE Y The concise encyclopaedia of statistics [Ouvrage]. - [s.l.] : Springer, 2010.

GARCIA SANCHEZ D, LACARRIERE B, MUSY M et BOURGES B Application of sensitivity analysis in building energy simulations: Combining first- and second-order elementary effects methods [Revue] // Energy and Buildings. - 2012. - <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.048>.

HENS H, PARIJS W et DEURINCK M Energy consumption for heating and rebound effects [Revue] // Energy and Buildings. - 2010. - 42. - pp. 105-110.

MEDDE-CGDD Sources et méthodes - Enquête Performance de l'Habitat, Equipements, Besoins et Usages de l'énergie (Phébus) [En ligne] // Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE), Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), Observation et Statistiques. - 09 avril 2013. - octobre 2013. - [http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sources-methodes/enquete-nomenclature/1541/0/enquete-performance-lhabitat-equipements-besoins-usages.html?tx_ttnews\[catdomaine\]=1542&cHash=9044dc3b29f5cf57f28a077726d372a8](http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sources-methodes/enquete-nomenclature/1541/0/enquete-performance-lhabitat-equipements-besoins-usages.html?tx_ttnews[catdomaine]=1542&cHash=9044dc3b29f5cf57f28a077726d372a8).

OPEN Campagne 2011 - Résultats 2010 [Rapport] / Service Bâtiment - Centre de Sophia Antipolis ; ADEME. - 2011. - p. 23.

SWAN LG et UGURSAL V I Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques [Revue] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2009. - 13. - pp. 1819-1835.

TNS SOFRES Le panel Métascope [En ligne]. - octobre 2013. - <http://www.tns-sofres.com/notre-offre/outils/25096226A30148689BD36FC625260267.aspx>.

TNS SOFRES Maîtrise de l'énergie - Bilan 2011 - Phase 2 [Rapport] : Note de synthèse. - 2012.

Chapitre 6. Conclusion générale et perspectives

Table des matières

6.1. Conclusion générale.....	197
6.2. Perspectives.....	198

6.1. Conclusion générale

Cette thèse nous a permis d'effectuer l'évaluation *ex-post* de solutions de rénovation énergétique en maison individuelle à partir de données issues d'enquêtes menées auprès de plusieurs centaines de ménages, propriétaires occupants, ayant participé à deux opérations distinctes de Maîtrise de la Demande en Energie (MDE). Ainsi ont été obtenus deux échantillons de logements ayant des caractéristiques avant les travaux différentes et complémentaires (échantillons MDE 52-55 vs. MDE PACA) :

- localisation au nord-est vs. sud-est de la France,
- maisons individuelles anciennes vs. récentes,
- chauffage combustible vs. électrique.

Dans un premier volet de la thèse, nous avons pu démontrer que dans la très grande majorité de ces ménages **des économies d'énergie sont bien présentes** suite aux travaux de rénovation énergétique réalisés. Economies d'énergie **dont l'existence a pu être qualifiée de sûre** à partir de calculs d'incertitude menés sur la base d'une étude de sensibilité au travers trois *scenarii*.

L'analyse statistique des économies d'énergie obtenues par le biais des types d'action de rénovation effectuée a mis en avant, pour l'échantillon MDE 52-55, qu'il n'existe **des différences significatives qu'entre des actions d'isolation du bâti seules (mono-lot ou multi-lots) et des actions d'isolation du bâti couplées à un remplacement du système de chauffage par un système plus performant (Pompe A Chaleur [PAC] ou chaudière à condensation)**. Ces dernières engendrant comme attendu plus d'économies que les premières. Il a été trouvé que dans le cadre de cet échantillon particulier, le seul remplacement du système de chauffage (majoritairement remplacé par une PAC air/air) fournit un niveau d'économies d'énergie très incertain.

Dans le cadre de l'analyse de l'échantillon MDE PACA, constitué uniquement d'actions de type multi-lots PAC (installation d'une PAC couplée à un second lot), nous avons pu différencier l'installation d'une PAC air/eau comme entraînant plus d'économies d'énergie que l'installation d'une PAC air/air. Cette différence étant notamment à imputer d'une part, à des consommations avant travaux des maisons individuelles s'équipant d'une PAC air/eau supérieures à celles des maisons individuelles s'équipant d'une PAC air/air²⁰⁰ et d'autre part, à de moindres utilisations de la climatisation/rafraîchissement après travaux dans le cas de PAC air/eau que de PAC air/air. La nature du second lot effectué n'a elle pas été trouvée comme une source de différences significatives en termes d'économies d'énergie, du moins entre des travaux d'isolation de la toiture et l'installation d'un CESI (Chauffe-Eau Solaire Individuel).

Toutefois, quelle que soit l'opération MDE, nous avons pu remarquer **des dispersions importantes d'économies d'énergie parmi les cas ayant effectué une même action**. Au-delà du **rôle important de la consommation d'énergie avant les travaux**, ces différences ont été partiellement expliquées à l'aide de modèles statistiques :

- Pour l'échantillon **MDE 52-55**, par la réalisation de travaux de MDE supplémentaires hors de l'opération (27 % de l'échantillon) et par **le changement déclaré de température de chauffage suite aux travaux** (pour 12 % de l'échantillon une augmentation et pour 5 % une diminution).
- Pour l'échantillon **MDE PACA**, par la déclaration pour 31 % de l'échantillon d'**un usage important de la climatisation** suite à l'installation d'une PAC air/air via l'opération. Sur les 88 % de l'échantillon ayant installé ou rénové une climatisation via l'opération, **seuls ces cas déclarant un usage important présentent de façon significative de moindres économies d'énergie** avec cependant **une quantification incertaine de l'effet**.

²⁰⁰ Des proportions de logement construit avant 1974 et de système principal de chauffage non électrique plus importantes parmi les cas avec PAC air/eau que parmi les cas avec PAC air/air.

Nous pouvons noter que malgré l'utilisation d'une même méthode pour ces deux modèles statistiques et de jeux initiaux de variables explicatives plutôt proches, chacun d'entre eux a fourni des résultats différents tant du point de vue des variables trouvées significatives que de la part d'explication de la variation des économies d'énergie (R^2 ajusté de 0,82 pour le modèle MDE 52-55 tandis que seulement de 0,37 pour le modèle MDE PACA).

Dans un second volet de la thèse, nous nous sommes intéressés aux écarts entre les résultats observés *ex-post* et ceux issus d'un modèle de calcul *ex-ante* d'estimation des consommations. Cette analyse s'est restreinte à l'échantillon MDE 52-55 en raison de la présence parmi les échantillons MDE PACA d'un certain nombre de cas ayant un usage de la climatisation que nous savons pertinemment mal pris en compte par les modèles de calcul actuels.

Au travers de l'analyse, nous avons montré que **le point clé** pour obtenir les écarts les plus petits possibles à la fois sur les consommations après travaux et sur les économies d'énergie est **la minimisation des écarts sur les consommations avant travaux** (*i.e.* une estimation plus juste des consommations initiales par le calcul).

Bien que n'expliquant qu'une partie des variations des écarts des consommations avant travaux, le modèle statistique établi a permis de détecter que **les écarts avant travaux dépendent fortement de la performance thermique théorique du bâti** et peu de la performance théorique des systèmes énergétiques. Le modèle ayant trouvé que seule la nature centrale ou non du système de chauffage principal est à l'origine de différences significatives en termes d'écarts. Cette dernière, à la façon de plusieurs des autres sources d'écart identifiées (surface habitable et température de consigne de chauffage), nous a semblé cerner **un même problème au niveau de la prise en compte par le modèle de calcul monozone de la gestion spatiale du chauffage par les ménages**. Le modèle a également mis en avant l'origine d'écarts liés à la gestion temporelle des réduits de température de chauffage ou à la consommation annuelle de bois d'appoint de chauffage.

Enfin, dans le troisième volet de la thèse, sur la base des sources d'écart identifiées, nous avons proposé différentes pistes d'amélioration du modèle de calcul utilisé. Dans cette dernière partie, nous avons également effectué **un retour critique quant aux limites d'explication, de précision des coefficients et de représentativité des modèles statistiques établis** pour étudier les écarts. **Des pistes ont été avancées pour permettre de dépasser ces limites.**

En résumé, ce travail de thèse est tout d'abord un retour terrain précieux, car relativement unique en France, quant aux rénovations énergétiques en maison individuelle à grande échelle (la centaine de logements). De plus, il aura été l'occasion de la mise en œuvre de méthodes d'analyse statistique, bien que présentes dans les guides de référence pour la mesure et la vérification des économies d'énergie, plutôt absentes des pratiques d'évaluation en France. Cette thèse aura également permis d'étudier les écarts entre résultats observés *ex-post* et calculés *ex-ante* par l'emploi d'une méthode de modélisation statistique peu utilisée dans la littérature internationale pour traiter cette question.

6.2. Perspectives

Toutefois, comme nous l'avons déjà souligné, les modèles statistiques établis présentent un certain nombre de limites. Ainsi, une première perspective à donner à ce travail serait de le poursuivre mais à partir d'enquêtes nationales (enquêtes Phébus, « Maîtrise de l'énergie » ou OPEN) qui permettraient de dépasser celles-ci, entre autres grâce à des tailles d'échantillon plus importantes et des incertitudes quant aux données récupérées plus faibles. Celles-ci seraient également la possibilité d'aborder le logement collectif qui n'a pas été traité dans cette thèse. Cependant, notons que l'exploitation des enquêtes nationales relatives aux travaux de MDE réalisés par les ménages (enquêtes « Maîtrise de l'énergie », OPEN) nécessiterait *a minima* des compléments d'enquête et *a maxima* un nouveau dispositif d'enquête dédié. Le choix de l'une ou l'autre des options se posant en termes de privilège à accorder à la taille d'échantillon (compléments au dispositif actuel) ou à l'incertitude liée aux données (nouveau dispositif).

Dans le cadre de la thèse, nous avons montré les limites de l'étude, sur la base de déclarations, des effets des changements de comportements des ménages suites à la réalisation d'une rénovation énergétique (le fameux effet rebond). Pour rendre plus fiable la quantification de ces effets, voire pour comprendre dans le détail les déterminants de ces changements et être capable d'anticiper leur existence, il conviendrait de mettre en place des suivis de ces changements sur la base de mesures. Les déclarations des ménages nous apparaissent entachées d'une trop grande incertitude.

S'agissant des incertitudes liées aux déclarations des ménages, elles ne sont surement pas concentrées sur leurs seuls comportements. Il existe également des incertitudes quant aux caractéristiques techniques qu'ils déclarent pour leur logement. Par conséquent, il serait bénéfique d'étudier l'influence de ces incertitudes sur les résultats fournis par les modèles de calcul. Cependant, la quantification de ces incertitudes passera par l'ajout de questions pour au minimum mieux connaître la personne répondante et qualifier son niveau de connaissance technique.

Enfin, cette thèse s'est concentrée uniquement sur les questions énergétiques des travaux de rénovation mais il serait propice de poursuivre ce travail en s'intéressant aux aspects financiers afin entre autres de pouvoir mener des analyses coûts/bénéfices de ces derniers. En complément, dans une approche plus globale des opérations de MDE, il pourrait être utile d'étudier les bénéfices non énergétiques (co-bénéfices²⁰¹) de ces opérations afin de les prendre en compte dans les processus de décision quant à la réalisation de travaux de rénovation énergétique dans le parc résidentiel français.

²⁰¹ Impact sur la santé, emploi local...

Annexes

Liste des annexes

Annexe 1 : Article soumis à la revue Energy and Buildings.....	203
Annexe 2 : Carte des zones climatiques de la RT	221
Annexe 3 : Liste complète des paramètres d'entrée de Diag Serie	223

Annexe 1 : Article soumis à la revue Energy and Buildings

Bottom-up statistical analysis of the energy consumption of French single-family dwellings

M. Raynaud^{a, b, *}, B. Bourges^c, D. Osso^b, B. Duplessis^a, J. Adnot^a

^a MINES ParisTech, CES, 60 boulevard Saint-Michel, 75272 Paris Cedex 06, France

^b EDF R&D, Site des Renardières, Avenue des Renardières - Ecuelles, 77818 Moret-sur-Loing Cedex, France

^c Ecole des Mines de Nantes, UMR GEPEA – FR IRSTV, 4 rue Alfred Kastler, 44300 Nantes, France

* Corresponding author. Tel.: +33 (0)1 60 73 67 93. Fax: +33 (0)1 60 73 65 70 E-mail address: maxime.raynaud@mines-paristech.fr

ABSTRACT

The implementation of effective energy policies in the residential sector requires better understanding of the sources for the dispersion of energy consumption amongst households. Bottom-up statistical models have been identified as one major modelling technique, particularly accounting for the diversity of inhabitants behaviours. In the various statistical models of the literature, behaviour characteristics are seldom incorporated in the data set but socio-economic data are most often used as “proxy” of occupant behaviour. The data source on which this paper is based, with a modest size but representative of French households, enables for combining technical, geographical, socio-economic and behavioural variables. The main determinants found for energy consumption in the sector of single-family dwellings in France are surface area, heads of the household aged 65 and older, as well as some categories of the heating system. Some categories of the variable relating to climate zones are also amongst the most important coefficients in the model. Finally, we detected that the most influential category of the behaviour variables is the lack of heating temperature setting reduction during the night. The explication and prediction capacities of the model as the accuracy of the model coefficients are studied and some possibilities of improvement are proposed.

Keywords: Total energy consumption, single-family dwellings, France, main determinants, occupant behaviour

1. Introduction

Faced with climate and energy-related issues, energy efficiency in the building sector (1) is one of the areas for action in European (2) and French (3) policies. In France the residential sector accounted for 30% of final energy consumption in 2009 (4). The implementation of effective energy policies requires, *inter alia*, proper understanding of the factors influencing energy consumption in this sector and of the variability sources amongst households.

Quantitative modelling is a key issue to select the main targets and the relevant solutions and to evaluate the impacts of implemented measures. Bottom-up statistical models (i.e. based on disaggregated data by households or groups of households) have been identified as one major modelling technique, particularly well suited for estimating actual energy consumptions, accounting for the diversity of inhabitants behaviours (5). Bottom-up statistical models are generally based on a sample of representative households, using data of energy billing for one or more years, complemented by a questionnaire collecting data on building, energy systems and household characteristics. Statistical techniques such as linear regression or neural networks are used to derive a predictive model of energy consumption via explanatory variables from the questionnaire (5) and to identify the most important predictors.

Alternate methods from a bottom-up perspective are engineering models. Those are knowledge based models (based on thermodynamics or heat transfer, e.g.) using *a priori* data on the building, its energy systems and the way they are operated. Some studies (6; 7) have shown the importance of occupants behaviour in determining the energy consumption of a dwelling and the limitations of engineering models, which are based on assumptions concerning behaviours (5). These assumptions in the engineering models are one of the main causes cited for explaining the deviations between observed and predicted consumptions when energy-efficiency measures have been implemented (8; 9).

So the present paper concentrates on bottom-up statistical models, the development of which has still been limited in many countries due to the cost of surveys.

2. Bottom-up statistical models of energy consumption in residential sector: a short literature review

A selection of studies based on bottom-up statistical models in various countries is reviewed below. Most of them make use of regression type analysis (6-7; 10-20). Neural networks or similar pure black-box approaches

have not been considered here, due to the lack of physical significance of the coefficients of these models, making difficult comparison between different studies.

Table 1 presents the selected studies as regards data sets, response variable considered and main explanatory variables by categories (building characteristics, energy systems, refurbishment, geography and climate, socio-economic characteristics of households and behavioural data). Explanation capacities of each model are summarized by the determination coefficient of the regression (R^2 or adjusted R^2), which represents the fraction of response variance explained by the model.

Table 1 emphasizes the diversity of situations and results. Sample size ranges from limited data sets (less than 100) to a few thousand households. Response variables may cover:

- different end-uses: space heating alone (7; 15; 16; 18; 20), space heating and hot water production (6; 14), all end-uses (11-13);
- or specific energy carriers: natural gas (17), electricity (19), wood (10), oil (16).

Often the yearly energy consumption (in kWh, MJ or specific units) is directly the response variable (6), but sometimes a transformed response is used with the energy consumption per unit area (18), or per room (15) or the logarithmic function of the energy (7; 20) or both transforms (18). In some cases, annual expenditure for energy (in € or £) is analysed, combined or not with former transforms (11; 13; 14; 15).

Depending on data sets used, explanatory variables incorporated in the model are very diverse, building characteristics being always significant. Behaviour characteristics are seldom incorporated in the data set (6; 7; 10; 16; 19) but socio-economic data are most often used as “proxy” of occupant behaviour. A distinction can be made between econometric studies mainly oriented towards estimate of price and income elasticities (generally using multi-year periods with varying energy prices) and more physical analyses trying to identify and to quantify all major influences on energy consumption, with a shorter term perspective and a predictive aim.

Most of the statistical models presented by these studies present a low level of explanation capacity (i.e. a coefficient of determination less than 0.5).

Moreover, noticing that most of these papers show the expected effects of some variables (technical, climate and socio-economic) on energy consumption (or bills), consensus is rarely reached and it is common to encounter studies that find, if not an opposite effect, at least a non-significant effect (e.g., Cavailles et al. (11) as well as Guerra-Santin et al. (6) find that the presence of double glazing generates a less energy consumption but Risch and Salmon (12) determine the effect non-significant). Non-significant effect does not necessarily mean that the corresponding variable has no effect. The effect can remain undetected by the statistical model because it is hidden by noise, lack of one or more major influences amongst predictors or by multicollinearity amongst predictors, particularly with small size samples.

Former comments clearly show that comparison between different bottom-up statistical models is difficult and must be made carefully. Furthermore, differences between countries -even with similar development levels- cannot be neglected, whatever their origin (building and energy regulation, building industry practices, climate, way of life, available census or energy billing information), even if partially taken into account by some predictors in the model. Comparisons are likely to be relevant only within one particular country or between very similar countries (the common framework given by European Union Directives for European countries is far from being sufficient in this respect). Representative open data bases should be developed in every country with such bottom-up modelling in order to support decision making, implementing and evaluation of energy efficiency policies.

Like in many other countries, the literature on bottom-up statistical modelling of French residential energy consumption is rather limited and more often published as grey literature. Only four recent studies (10-13) addressing the question of energy demand in the French residential sector, according to data panels on the household scale were identified.

The public database used by Cavailles et al. (11) and Risch and Salmon (12), following the example of their European counterparts (14; 15), provide data that relate to the features of the dwellings (type of dwelling, surface area, insulation level, etc.), the features of the energy systems (energy used, collective or individual heating, etc.), as well as geographical information (climate, urban density, etc.) and finally information relating to the households characteristics (number of people, income, occupation status, etc.). This database (“Enquête logement 2006”) is fully representative of the national building stock and of the population. However, these panels do not provide information on the behaviour of the households. Furthermore, energy data are not directly collected by the survey but they are estimated from energy expenditure data (in €), based on additional assumptions. Anyway, rich information is available on buildings and occupants, so these studies deserve careful analysis. More detailed results from references and their comparison with the results of this study can be found in the Discussion section.

Calvet and Marical work (13) is also based on expenditure data, from a 2006 national survey on family budgets, but very limited information on dwellings and occupants is available (nothing on behaviours) and reporting of the statistical model is not complete.

Finally, Couture et al. (10) developed an econometric model tackling a very specific problem related to fuelwood consumption in a particular region (Midi-Pyrénées) whereas only 16.4% of the sample use wood as primary heating source.

The present work wants to complement former studies for the French residential sector, using a new representative panel incorporating actual energy consumptions for all energy carriers and all end-uses. The data source on which this paper is based helps to fill the lack of behaviour information with practices reported by the occupants, while presenting information on all the elements mentioned above (technical, geographical and socio-economic) as well as on recent undertaken retrofit work—a situation that very few databases include.

Thus, this study aims to provide information that answer to the following questions:

- What share of the variation in energy consumption can be explained by a model combining technical (building, energy systems, recent work), geographical, socio-economic and behavioural variables? What is the prediction capacity of such a model?
- What are the main determinants for energy consumption in the sector of single-family dwellings in France? What behavioural elements do these factors include?
- What weights do the various variables amongst these determinants?

The first part of this paper presents the data and the statistical analysis method used. The next two parts set out the results obtained and a discussion. The last part contains the conclusions of the study and its outlook.

Table 1

International and French references

Reference	Information about data (sample size, country, years of observation, source of data)	Dependent variable (in unit used)	Main explanatory variables (significance at least 10% level)						Explanatory capacities
			Building	Energy systems	Retrofit	Geography	Socio-economic	Behaviour	
Guerra-Santin et al. (6)	15,000 observations – the Netherlands – 2000 (3 years of energy consumption) - interviews	Annual energy consumption for space and water heating (in MJ)	14	1	-	-	5	6	R ² =0.459 (total model = step 1 + step 2 + step 3)
Haas et al. (7)	400 households – Austria - 1993-1996 - accounting, monitoring and questionnaires	Logarithm of annual space heating energy consumption (in kWh)	3	1	-	-	1	1	Adj. R ² =0.795 (unrestricted model)
Kjaerbye et al. (17)	150,000 observations (34,700 single-family owner-occupied houses) - Denmark - 1998–2003 - different administrative data bases	Logarithm of annual natural gas consumption (in kWh)	3	1	1	2	3	-	R ² =0.243 (OLS_2003) R ² =0.234 (OLS_cluster)
Leth-Petersen and Togeby (18)	36,000 observations (4820 apartment blocks of 1500 m ² or more with a central heating system) – Denmark - 1984–1995 - different data bases	Logarithm of annual space heating energy consumption per square meter (in kWh/m ²)	2	2	-	-	1	-	R ² =0.322
Meier and Rehdanz (15)	64,000 observations -Great Britain - 1991-2005 excepted 1996 - interviews	Logarithm of annual space heating expenditure per room (in £/room)	3	1	-	2	7	-	R ² =0.274 (global model)
Ndiaye and Gabriel (19)	62 houses - Oshawa (Canada) – 2007-2008 - energy audits, phone surveys and smart meter.	Annual electricity consumption per square foot (in kWh/ft ²)	1	5	-	-	2	1	Adj. R ² =0.754
Rehdanz (14)	12,000 observations - Germany - 1998 and 2003 - interviews	Logarithm of monthly expenditure for space and water heating per square meter (in cent/m ²)	4	2	1	1	7	-	R ² =0.194 (global model)
Sardianou (16)	500 households – Greece - 2003 - interviews	Logarithm of annual fuel quantity consumed for space heating (in l)	1	-	-	-	4	3	Adj. R ² =0.37 (final model II)
Schuler et al (20)	15,000 observations – West Germany - 1998 - interviews	Utilization intensity (space heating utilization)	5	2	-	-	4	-	R ² =0.008 (explanation by household characteristics, main model) R ² =0.144 (explanation by building characteristics, main model)
Couture et al. (10)	2254 households – France (the Midi-Pyrénées region) - 2004 – 2005 - phone survey	Annual wood quantity consumed (in m ³)	1	2	-	-	1	1	R ² unknown
Cavailhes et al. (11)	47,000 observations – France – 2002 and 2006 - interviews	Logarithm of annual total energy expenditure per square meter (in €/m ²) Logarithm of annual total energy consumption per square meter (in kWh/m ²)	6	1	-	1	5	-	R ² between 0.12 and 0.20 (model about expenditure) R ² unknown (model about consumption)
Risch et Salmon (12)	37,000 observations – France – 2002 and 2006 - interviews	Logarithm of annual total energy consumption per square meter (in kWh/m ²)	9	2	-	1	4	-	R ² =0.36 (single-family dwelling model)
Calvet and Marical (13)	10,000 observations – France – 2006 - interviews	Logarithm of annual total energy expenditure per square meter (in €/m ²)	1	1	-	-	1	-	R ² unknown

3. A representative sample with a large set of explanatory variables and an adapted method

Results of a survey conducted by TNS Sofres on behalf of EDF in June 2009 were used as an input data set for the present study. This survey was conducted amongst 2,012 households selected from a panel of 20,000 households (“Métascope” panel (21)), to be representative of the population of households living in France. The questions related to energy consumption by energy type (electricity, gas, heating oil, LPG and wood) of households in 2008 and its determinants (characteristics of the dwelling, heating system, socio-economic characteristics of the household, household habits, etc.). The questionnaire used was drawn up by Cayla, who used the results to study the effect of behaviour on the long-term estimation of heating energy consumption in the French residential sector, mainly based on an engineering model (22; 23).

Before exploiting these data, we proceeded to clean up the panel. More than two third of data (1,392 dwellings) were removed. Amongst these were, in particular, households without every type of energy consumption (e.g., no electricity consumption), with collective heating (no individual metering of consumption), with inconsistencies between energy systems and declared consumption or with extreme total consumption levels (higher than 1000 kWh/(m².year) or lower than 40 kWh/(m².year)²⁰²). Finally, the size of the sample was reduced to 620 households or main residences (420 single-family dwellings and 200 apartments).

Since only 30% of the source sample was kept, we needed to verify that it remains nationally representative. To do so, we used four usual criteria to ensure the representativeness of the “Métascope” panel. Figure 1 compares the distribution, according to type of dwelling (1-a), the socio-professional group of the head of the household (1-b), the age of this person (1-c) and the number of people living in the household (1-d), between the data from the national institute of statistics INSEE (24) (national benchmark), the original sample (2,012 dwellings) and the final sample of 620 dwellings.

In figure 1-a, we can see that apartments are under-represented (-10%) in the final sample, mainly because we eliminated apartments that have collective heating.

In the diagram 1-b presenting the socio-professional group of the head of the household, we can see that the representativeness is quite good, with a maximum deviation of 4% for “executives”.

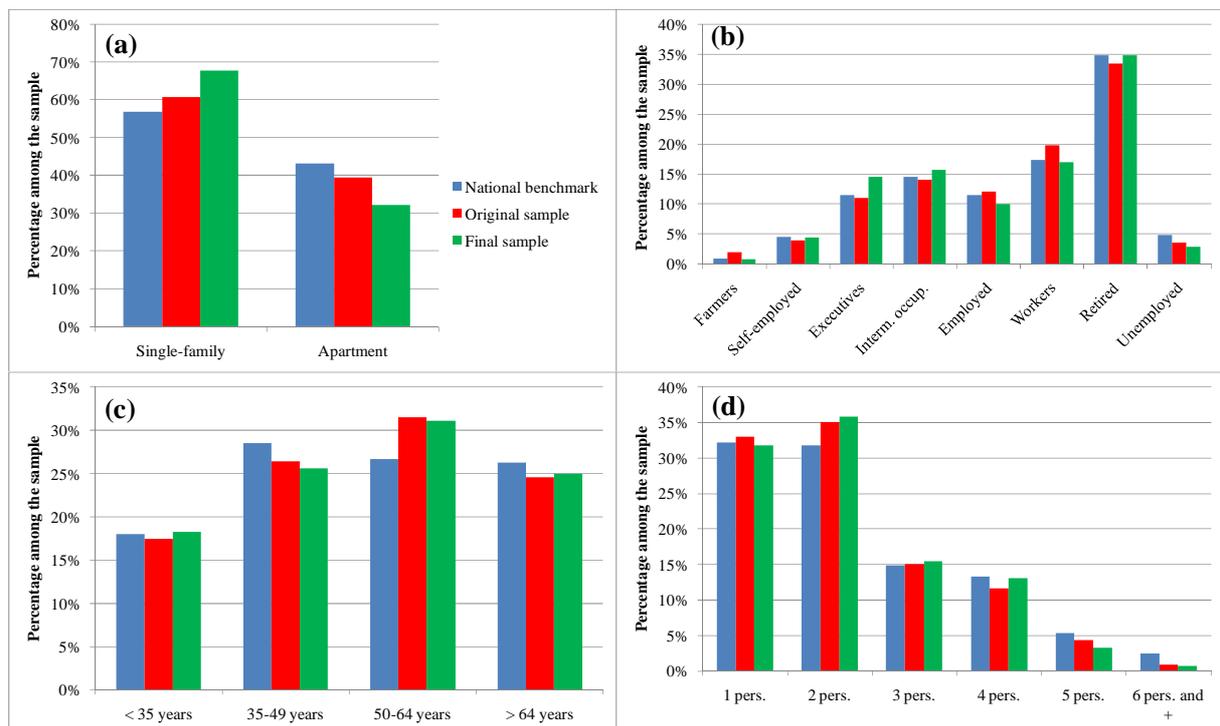


Fig. 1. Study of the representativeness of the final sample. (a) Type of dwelling, (b) Socio-professional category of the head of the household, (c) Age of the head of the household, (d) Number of people in the household

The graphic relating to the age of the head of the household shows maximum deviations of 4% in the two intermediate classes (35-49 years and 50-64 years). Figure 1-d shows the greatest deviation for the category “two people in the household”, with a difference of 5% between the data from INSEE and the final sample.

²⁰² Total consumption level per surface area, in final energy, slightly less than that of the most efficient dwellings currently being built.

In conclusion, compared with the national benchmark, the sample deviations are around 10% for one variable and less than 5% for the other three. We therefore postulate that the 620 households of the final sample are quite representative of French households.

However, due to the bias present (no cases with collective heating) amongst the 200 apartment dwellings, we chose not to study this sub-sample and, thus, we concentrated only on the 420 single-family dwellings.

In the context of this study, we sought to explain the natural logarithm (Ln) of consumptions in final energy for all end-uses of the dwellings for the year 2008. This total energy consumption was obtained from adding up five energy consumptions (electricity, gas, heating oil, LPG and wood), converted into kWh_{LCV}²⁰³, supplied by the questionnaire²⁰⁴. The use of the Ln is justified from an analytic point of view. Indeed, the main share of energy consumption in a dwelling is described mathematically by multiplying effects of building thermal characteristics, HVAC system efficiency (precisely inverse of efficiency) and degree-days (25). Thus, using the Ln makes it possible to transform these effects into additive relationships as required for a linear regression model.

In addition, the use of the Ln for the dependent variable is particularly interesting in terms of information given by the model coefficients. For a quantitative explanatory variable used with an Ln transform, the coefficient corresponds to the elasticity of the dependent variable in accordance with the explanatory variable. In the case of a quantitative explanatory variable not expressed in Ln, the coefficient is approximately the same as the percentage change in the dependent variable for an increase of one unit in the explanatory variable. In the last case of a qualitative explanatory variable, the coefficient of one category is also approximately equal to the percentage change of the dependent variable between the reference category and the considered category, everything else being equal.

Regarding the set of explanatory variables, we have obtained a set of twelve variables relating to the building, eight relating to energy systems, one relating to refurbishment, three relating to geography, four relating to socio-economic characteristics and ten relating to behaviour (Table 2). In order to check that multicollinearity of explanatory variables remains in a reasonable range, we made sure that none of the quantitative variables or qualitative variable categories has a Variance Inflation Factor (VIF) of more than 3.

²⁰³ LCV: Low Calorific Value. Energy content of heating oil: 9.96 kWh_{LCV}/litre. Energy content of LPG: 12,769 kWh_{LCV}/tonne. Energy content of wood: 1,480 kWh_{LCV}/stere.

²⁰⁴ A certain number of LPG consumption data for cooking use are missing. They are filled in with the mean national consumption for the year 2008 supplied by the Center of Studies and Economic Researches on Energy (CEREN) (33) segmented by type of dwelling. 700 kWh_{LCV} for cooking only with LPG added for 28% of the 420 dwellings. 465 kWh_{LCV} for mixed cooking with LPG and electricity added for 21% of the sample.

Table 2

Set of explanatory variables.

Variable	Definition (modality percentage of a qualitative variable) [min; max of a quantitative variable]
Building	
LnSurface	Ln of the surface area in m ² , [3.40; 5.94]
Ceiling_H	1- the ceiling height is less than 2.49 m (82.6% of the sample); 2- between 2.5 m and 2.99 m (12.9%); 3- 3 m or more (4.5%)
Num_storeys	1- one-storey house (54.5% of the sample); 2- two storeys (42.1%); 3- three or more storeys (15.5%)
Shape	1- the house has a compact shape (77.4% of the sample); 2- L-shaped or elongated (17.6%); 3- complex (5.0%)
Party_walls	1- detached house (57.1% of the sample); 2- semi-detached (27.4%); 3- terraced (15.5%)
Veranda	1- yes, the house has a veranda (14.8% of the sample); 2- no (85.2%)
Floor	1- the floor is on a platform or the ground (35.0% of the sample); 2- above a crawl space (20.2%); 3- above a basement, cellar or other unheated room (35.5%); 4- combination of the above (9.3%)
Roof	1- the roof has virgin loft (63.3% of the sample); 2- heated habitable roof space (17.4%); 3- unheated habitable roof space (11.7%); 4- flat roof or combination of the above (7.6%)
Building_vintage	1- the dwelling was built before 1975 (45.5% of the sample); 2- between 1975 and 1988 (28.6%); 3- between 1989 and 2000 (16.2%); 4- after 2000 (9.7%)
Double_glazing	1- the dwelling does not have double glazing (8.8% of the sample); 2- partial old double glazing (before 1990) (3.1%); 3- partial recent double glazing (after 1990) (12.1%); 4- all old double glazing (20.5%); 5- all recent double glazing (55.5%)
Outer_wall_insulation	1- the outer walls are not insulated (31.0% of the sample); 2- 5 cm or less (21.0% of the sample); 3- around 10 cm (33.5%); 4- around 15 cm (10.0%); 5- around 20 cm or more (4.5%)
Roof_insulation	1- the roof is not insulated (22.1% of the sample); 2- less than 10 cm (49.3%); 3- 10 cm or more (28.6%)
Energy systems	
Main_heating	1- heat pump (3.6%); 2- electrical heated floor (2.6%); 3- electrical heated panels (6.0%); 4.0- convectors, less than 5 years old (6.0%); 4.1- convectors, 5 to 10 years old (6.2%); 4.2- convectors, 11 to 15 years old (3.8%); 4.3- convectors, less than 16 to 25 years old (6.0%); 4.4- convectors, more than 25 years old (3.3%); 5- efficient gas boiler (6.2%); 6- efficient boiler, other energy (3.6%); 7.0- the main heating system is a standard gas boiler, less than 5 years old (4.8% of the sample); 7.1- standard gas boiler, 5 to 10 years old (9.3%); 7.2- standard gas boiler, 11 to 15 years old (4.0%); 7.3- standard gas boiler, at least 16 years old (3.8%); 8.0- standard oil boiler, less than 10 years old (6.0%); 8.1- standard oil boiler, 11 to 15 years old (3.8%); 8.2- standard oil boiler, 16 to 25 years old (3.3%); 8.3 standard oil boiler, more than 25 years old (2.6%); 9- standard boiler, other energy (3.6%); 10- wood-burning stove (3.1%); 11- enclosed wood roomheater (5.7%); 12- mobile electric radiator or kerdane stove, or heating cooker or others (2.9%).
Occasional_supplement	1- yes, the dwelling has at least one occasional supplementary heating system (more than 15 days per year) (39.3% of the sample); 2- no (60.7%)
Exceptional_supplement	1- yes, the dwelling has at least one exceptional supplementary heating system (15 days or less per year) (19.3% of the sample); 2- no (80.7%)
Regulator_system	1- yes, the dwelling has a heating temperature regulator or programmer (71.4% of the sample); 2- no (28.6%)
DHW_prod_system	1- DHW is produced by a boiler (38.1% of the sample); 2- electric storage tank (48.3%); 3- electric instant water heater (11.2%); 4- gas instant water heater (2.4%)
Cooking_energy	1- cooking with gas only (15.2% of the sample); 2- mixed gas and electricity (11.7%); 3- LPG only (30.2%); 4- mixed LPG and electricity (21.2%); 5- electricity only (21.7%)
Appliance_ratio	1- the household has at least two different types of electrical appliance (6.7% of the sample); 2- three different types of electrical appliance (12.1%)...8- eight or more different types of electrical appliance (7.1%)
Energy_saving_lights	1- yes, the dwelling is mostly fitted with energy-saving bulbs (31.4% of the sample); 2- yes, in part (47.6%); 3- no (21.0%)
Refurbishment	
Works_last 12 months	0- no energy-saving or improvement works conducted in the last year (77.6% of the sample); 1- improvement works conducted (6.2%); 2- energy-saving works conducted (11.4%); 3- energy-saving and improvement works conducted (4.8%)
Geography	
Climate_zone	1- the dwelling is located in thermal regulation zone H1a (north and Paris) (27.4% of the sample); 2- H1b (east) (17.1%); 3- H1c (northern part of the southeast) (12.4%); 4- H2a (Brittany) (6.2%); 5- H2b (west and centre) (13.3%); 6- H2c (southwest) (10.0%); 7- H2d (southern part of the southeast) (4.8%); 8- H3 (Mediterranean) (8.8%)
Urban_density	1- the dwelling is located in a rural area (62.9% of the sample); 2- suburban area (26.0%); 3- urban area (11.2%)

Altitude_km	mean altitude of the town in km, [0; 1.48]
<u>Socio-economics</u>	
Age_head_household	1- the head of the household is less than 35 years old (13.1% of the sample); 2- 35 to 49 years old (28.6%); 3- 50 to 64 years old (31.1%); 4- at least 65 years old (26.2%)
Monthly_income	1- the household has a monthly income of less than €1200 (8.8% of the sample); 2- €1200 to €1900 (23.8%); 3- €1901 to €3000 (42.4%); 4 - €3001 to €5300 (21.2%); 5- at least €5301 (3.8%)
Occupation_status	1- the dwelling is occupied by its owner (76.4% of the sample); 2- council tenant (4.8%); 3- other including leased for free (5.7%); 4- private tenant (13.1%)
LnNum_people	Ln of the number of people in the household, [0; 1.79]
<u>Behaviour</u>	
Bath_usage	1- less than one bath per week per person (81.2%); 2- one bath per week per person (6.4%); 3- more than one bath per week per person (12.4%)
Shower_usage	1- less than seven showers per week per person (69.3%); 2- seven showers per week per person (24.1%); 3- more than seven showers per week per person (6.7%)
Living_room_temp	1- the mean winter temperature in the living room is 19 °C or lower (42.6% of the sample); 2- 20 °C to 22 °C (54.5%); 3- 23 °C or higher (2.9%)
Less_heated_room	1- yes, in winter some rooms are not heated or are less heated than the living room (75.2% of the sample); 2- no (24.8%)
Half-day_temp_reduction	1- yes, the heating temperature setting is always reduced when absent for half a day (28.8% of the sample); 2- yes, sometimes (23.1%); 3- no, never (48.1%)
Night_temp_reduction	1- yes, the heating temperature setting is always reduced during the night (49.3%); 2- yes, sometimes (20.5%); 3- no, never (30.2%)
Ventilation_frequency	1- the dwelling is ventilated on average every day (69.5% of the sample); 2- several times a week (21.7%); 3- once a week or less (8.8%)
Ventilation_time	1- the mean ventilation time is less than 10 minutes (30.0% of the sample); 2- 10 to 29 minutes (54.5%); 3- 30 to 59 min (10.0%); 4- 1 hour or more (5.5%)
Lights_empty_rooms	1- when entering an empty room, the light is found on regularly to occasionally (68.1% of the sample); 2- never (31.9%)
Lights_during_day	1- the lights are on during the day regularly to occasionally (86.7% of the sample); 2- never (13.3%)

We conducted a covariance analysis (ANCOVA, generalisation of a multiple linear regression with both quantitative and qualitative explanatory variables), based on the ordinary estimator of the least squares. The natural logarithm of the total energy consumption of 420 single-family dwellings was taken as response variable (dependent variable). Since we were seeking the main determinants of the latter amongst a very large number of explanatory variables (38 variables), we started by selecting variables according to their contribution to the model. For this purpose, we recursively removed the variable that made the smallest contribution, by analyzing the probability associated with the F-test of Type III SS (null hypothesis test: "The variance of the model with the variable is not significantly different from that of the model without the variable (null variable coefficient(s))."), until only variables with a probability of no more than 0.15 remained. The table of the Type III SS (Sum of Squares) shows how—regardless of the order of selection of the variables in the model—removing one explanatory variable affects the adjustment of the model, all other variables being kept. Since this first selection was conducted only according to the global contribution of the variables, we applied the method of backward selection to the model as second selection.

This backward selection is applied with a critical probability (Pr) to the Student's t-test of 0.05 (null hypothesis test: "The coefficient is equal to zero."), in order only to keep in the model the variables or categories (for qualitative variables) that have at least this level of significance. In terms of reference for the qualitative variables, we chose to work with the sum of the coefficients of the categories equal to zero. This choice had the advantage of making the model independent from the encoding of the categories, unlike the references (coefficient zero) for the first or last most arbitrary category. For non significant categories, a zero effect is applied.

This statistical work was carried out using XLSTAT software, version 2010.5.07.

4. A valid model with significant effects

4.1. Validity of the model

An ANCOVA imply a set of statistical assumptions which must be verified before interpreting the results both from the statistical and from the physical points of views. The key assumptions to be checked concern the model errors which should have no auto-correlation and should be normally distributed with zero expectation and constant variance (homoscedasticity), whatever the values of explanatory variables. Most of these checkings

are based on the residuals of the regression model, defined as differences between observed values and values predicted by the model (estimations of model errors).

First of all, we used an F-test (null hypothesis test: "The variance of the model is not significantly different from that of the model with all coefficients equal to zero.") to verify the overall significance of the model. Since the critical probability associated with the F value of 30.04 for 33 and 386 degrees of freedom is lower than 10^{-4} , the null hypothesis can be rejected and the model can be considered as highly significant, concluding that the explanatory variables contribute a significant amount of information to the model.

The auto-correlation amongst the residuals was tested and nothing of significance was found.

Figure 2-a represents the standardized residuals (residuals divided by the estimate of the standard deviation on the error of the model) versus the values predicted by the model for the 420 dwellings of the sample. We observed a symmetric random distribution of the residuals around zero (by construction with the least squares, the residuals have a mean value of zero). Levene and Bartlett tests were conducted to compare variances of residuals between the levels of the qualitative variables and between different categories of the quantitative variables ("LnSurface" and "Altitude_km" were split into four classes while "LnNum_people" was split into six classes). All these tests confirmed the equality of the variances of the various categories, with the exception of the tests conducted on the "Building_vintage" (Pr = 0.020), "Occasional_supplement" (Pr = 0.020) and "Age_head_household" (Pr = 0.036) variables. For the "Building_vintage" variable, the oldest buildings (before 1975) have a bigger variance of residuals than the others (0.109 versus around 0.077), certainly due to a great heterogeneity in thermal characteristics amongst these dwellings (e.g., refurbished or not). For the "Occasional_supplement" variable, the dwellings having at least one occasional supplementary heating system have a bigger variance than these not having one (0.107 versus 0.075), possession of one supplementary system can hide various utilisations (e.g., all the days or sometime). For the "Age_head_household" variable, the heads of the household being 35 to 49 years old have a less variance than the others (0.062 versus around 0.098), without our having an explanation. The tests are negative for only three variables and the differences of variances being small thus we consider the hypothesis of homoscedasticity validated.

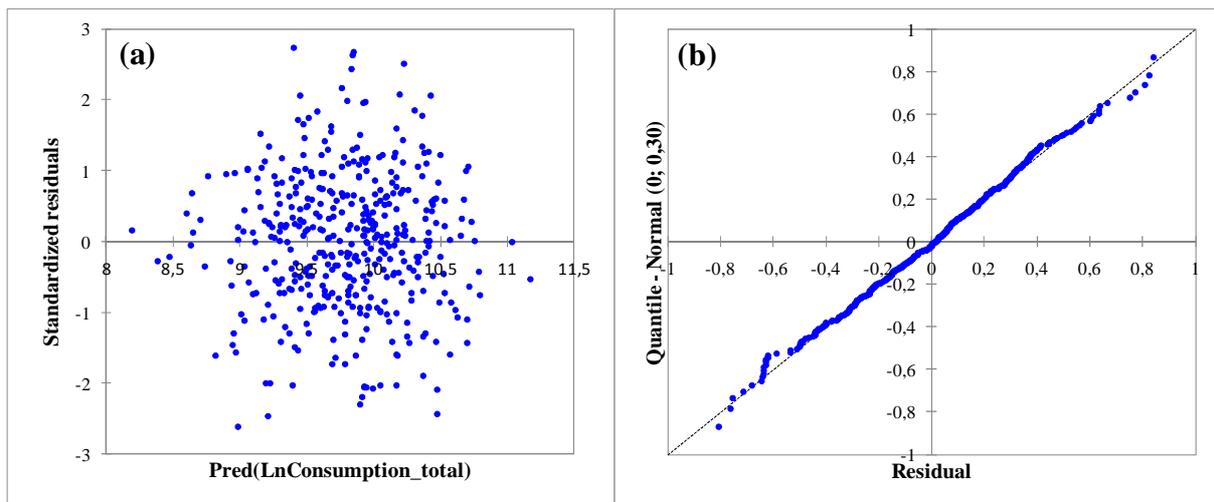


Fig. 2. Summary analysis of residuals of the model. (a) Standardized residuals according to values predicted by the model, (b) Normal Q-Q plot of residuals

Figure 2-b presents the normal probability plot of residuals (Q-Q plot); it makes it possible to compare the probability distribution of the residuals of the sample (on the abscissa, with increasing order) with that of a normal distribution with the same mean (zero) and the same variance would have (on the ordinates). The alignment of the points on the first bisector indicates the normality of the residuals of the model. The critical probability associated with the Jarque-Bera test (null hypothesis test: "The sample follows a normal distribution.") of 0.962 guarantees the hypothesis of normality. In parallel to this verification, we calculated that 93.8% of the standardized residuals are in an interval [-1.96; 1.96] which is totally consistent with the Gaussian assumption (about 95% are expected in this interval).

In conclusion, the main hypotheses are verified and the results of the model can be considered to be reliable. It is important to note that verifying usual assumptions of linear regression models (normality and homoscedasticity) here clearly justifies *a posteriori* the logarithmic transform of the energy consumption as a response variable in the model.

4.2. The statistical model

Table 3 provides the variables eliminated during the first selection of the variables according to their contribution to the model (probability associated with the F-Fisher test of the Type III SS higher than 0.15).

Table 3

List of variables discarded due to minimal contribution to the model.

Order of removal	Variable	Pr > F (Type III SS)
1 st	Shape	0.917
2 nd	Double_glazing	0.841
3 rd	Num_storeys	0.788
4 th	DHW_prod_system	0.747
5 th	Veranda	0.753
6 th	Roof_insulation	0.748
7 th	Occupation_status	0.706
8 th	Regulator_system	0.610
9 th	Less_heated_room	0.509
10 th	Lights_empty_rooms	0.491
11 th	Half-day_temp_reduction	0.450
12 th	Ventilation_frequency	0.351
13 th	Monthly_income	0.289
14 th	Urban_density	0.323
15 th	Appliance_ratio	0.241
16 th	Works_last 12 months	0.283
17 th	Ceiling_H	0.163

The model (significant terms only) is presented in Table 4. This one presents an adjusted R² (coefficient of determination taking into account the number of explanatory variables used by the model) of around 0.7.

$$\text{adjusted } R^2 = 1 - (1 - R^2) * \frac{n-1}{n-DF_{\text{model}}-1} \quad (1)$$

where R² is coefficient of determination, n is the number of observations in the sample and DF_{model} is the model degrees of freedom.

The RMSE (Root Mean Square Error)—estimator of the standard deviation in the error of the model—is 0.309.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i')^2}{n-DF_{\text{model}}-1}} \quad (2)$$

where y_i is the actual dependent variable and y_i' is the predicted dependent variable for the ith observation in the sample.

Assuming a normal distribution of model errors, we can derive that 95% of the values are within the interval [-1.96 * 0.309 ; + 1.96 * 0.309], i.e. [-0.606 ; + 0.606]. Keeping in mind that the model is based on the logarithm of energy consumption as response variable, the ratio between the observed energy consumptions and predicted values (exponential of the residual) may be in a range between exp(-0.606) = 0.55 and exp(+0.606) = 1.83, leading to an uncertainty range [-45% ; + 83%] for the predicted values.

The coefficient of each category or each variable indicates to what extent the latter affects the outcome of the model, with all other effects being maintained constant. This model has 50 coefficients distributed over 19 variables. Their effects are analysed in the Discussion section.

The last column of Table 5 provides the standardized coefficients of this model, representing ratio between the change in response variable for a change of one standard deviation in explanatory variable or category and the standard deviation in observed response variable. The higher the absolute value of a coefficient, the greater the relative weight of this variable or this category. On the other hand, if the confidence interval around the standardized coefficient comprises zero, its weight is non-significant. By design, this is the case for all the first categories of the qualitative variables of the model. Since the sum of the standardized coefficients of the categories of a qualitative variable should be null also, by our own choice, this necessarily leads to a non-significant relative weight for one of the categories (if we know the other categories, this is automatically deduced and thus knowing it does not provide any additional information).

Table 4

Results of the model. The response variable is the natural logarithm of the yearly total energy consumption (in kWh).

Variable	Coef.	Standard error	Lower bound (95%)	Upper bound (95%)	Pr > t	Standardized coef.
LnSurface	0.526	0.055	0.417	0.635	< 0.0001	0.302
Party_walls- detached	0.086	0.023	0.040	0.132	0.0003	0.114*
Party_walls- terraced	-0.086	0.023	-0.132	-0.040	0.0003	-0.114
Floor- on a platform	-0.061	0.019	-0.099	-0.022	0.002	-0.091*
Floor- above unheated room	0.061	0.019	0.022	0.099	0.002	0.091
Building_vintage- before 1975	0.109	0.029	0.052	0.166	0.0002	0.127*
Building_vintage- after 2000	-0.109	0.029	-0.166	-0.052	0.0002	-0.127
Outer_wall_insulation- not insulated	0.078	0.021	0.037	0.119	0.0002	0.112*
Outer_wall_insulation- 10 cm	-0.078	0.021	-0.119	-0.037	0.0002	-0.112
Main_heating- heat pump	-0.362	0.078	-0.516	-0.208	< 0.0001	-0.163*
Main_heating- electrical heated floor	-0.213	0.091	-0.392	-0.035	0.019	-0.095
Main_heating- electrical heated panels	-0.147	0.063	-0.271	-0.024	0.019	-0.081
Main_heating- convectors (less than 5 years old)	-0.318	0.064	-0.443	-0.193	< 0.0001	-0.175
Main_heating- convectors (5 to 10 years old)	-0.151	0.062	-0.274	-0.029	0.016	-0.084
Main_heating- convectors (11 to 15 years)	-0.211	0.076	-0.360	-0.061	0.006	-0.102
Main_heating- convectors (16 to 25 years)	-0.195	0.062	-0.318	-0.072	0.002	-0.107
Main_heating- convectors (more than 25 years old)	-0.192	0.082	-0.353	-0.031	0.020	-0.090
Main_heating- standard oil boiler (less than 10 years old)	0.200	0.064	0.075	0.326	0.002	0.110
Main_heating- standard oil boiler (11 to 15 years old)	0.340	0.076	0.191	0.489	< 0.0001	0.165
Main_heating- standard oil boiler (16 to 25 years old)	0.403	0.082	0.240	0.565	< 0.0001	0.189
Main_heating- standard boiler other energy	0.408	0.079	0.253	0.563	< 0.0001	0.195
Main_heating- enclosed wood roomheater	0.438	0.065	0.310	0.565	< 0.0001	0.238
Occasionnal_supplement- yes	0.094	0.017	0.060	0.128	< 0.0001	0.165*
Occasionnal_supplement- no	-0.094	0.017	-0.128	-0.060	< 0.0001	-0.165
Exceptional_supplement- yes	0.069	0.020	0.029	0.108	0.001	0.097*
Exceptional_supplement- no	-0.069	0.020	-0.108	-0.029	0.001	-0.097
Cooking_energy- gas only	0.096	0.027	0.043	0.149	0.0004	0.104*
Cooking_energy- electricity only	-0.096	0.027	-0.149	-0.043	0.0004	-0.104
Energy_saving_lights- yes, mostly	0.067	0.023	0.023	0.111	0.003	0.086*
Energy_saving_lights- no	-0.067	0.023	-0.111	-0.023	0.003	-0.086
Climate_zone- north and Paris	0.080	0.033	0.016	0.144	0.015	0.045*
Climate_zone- east	0.174	0.036	0.102	0.246	< 0.0001	0.205
Climate_zone- southwest	-0.122	0.045	-0.211	-0.034	0.007	-0.128
Climate_ southern part of the southeast	-0.132	0.056	-0.241	-0.022	0.018	-0.122
Altitude_km	0.191	0.081	0.032	0.351	0.019	0.071
LnNum_people	0.199	0.039	0.122	0.276	< 0.0001	0.175
Age_head_household- less than 35 years old	-0.140	0.034	-0.207	-0.073	< 0.0001	-0.152*
Age_head_household- 35 à 49 years old	-0.059	0.027	-0.113	-0.005	0.033	-0.066
Age_head_household- at least 65 years old	0.199	0.032	0.135	0.262	< 0.0001	0.218
Bath_usage- less than 1/week/person	-0.051	0.024	-0.098	-0.005	0.031	-0.062*
Bath_usage- more than 1/week/person	0.051	0.024	0.005	0.098	0.031	0.062
Shower_usage-less than 7/week/person	-0.074	0.019	-0.111	-0.038	< 0.0001	-0.114*
Shower_usage- 7/week/person	0.074	0.019	0.038	0.111	< 0.0001	0.114
Living_room_temp-19 °C or lower	-0.118	0.030	-0.177	-0.060	< 0.0001	-0.115*
Living_room_temp- 23 °C or higher	0.118	0.030	0.060	0.177	< 0.0001	0.115
Night_temp_reduction- yes, always	-0.091	0.018	-0.126	-0.056	< 0.0001	-0.142*
Night_temp_reduction- no, never	0.091	0.018	0.056	0.126	< 0.0001	0.142
Ventilation_time-less than 10 min	-0.051	0.018	-0.087	-0.016	0.005	-0.081*
Ventilation_time- 10 to 29 min	0.051	0.018	0.016	0.087	0.005	0.081
Intercept	7.231	0.253	6.733	7.729	< 0.0001	
Number of observations	420					
DF of model	33					
Adjusted R ²	0.696					
RMSE	0.309					

* = the confidence interval of the standardized coefficient comprises 0 (confidence level 95%).

5. Comparison with the literature and lessons to draw

5.1. Explanation and prediction capacities

First, a comparison of explanation and prediction capacities of the present model with literature data is proposed here.

The established model is based on 38 explanatory variables (of which 3 are quantitative), grouped in different sets: technical (building and energy systems), geographical, socio-economic and behavioural; its adjusted R^2 is around 0.7. Most of reviewed papers presenting similar models in different countries (11; 12; 14; 15; 16-18; 20), have much lower adjusted R^2 , typically in the range 0.1-0.4, so with a very limited prediction capacity. Although based on similar data sets, they generally include much less detailed information either on the building (size, shape, insulation, etc.) or on energy systems installed. Furthermore information regarding behaviour is not available. Corresponding data sets have not been collected in a specific way for developing energy bottom-up statistical model, but these models are developed *a posteriori* on existing data sets.

By introducing inhabitant practices in their data, Guerra-Santin et al. (6) found a model that helps explaining 46% of the variations in annual consumption for heating and DHW production in Dutch single-family dwellings. Only two reported models give comparable results with the present model, in terms of prediction capacity with adjusted R^2 of 0.75-0.78, using data from Austria (7) and Canada (19), including preliminary building energy rating and monitoring of consumption (7) or complete energy audit (19) (with ventilation rate measurement, e.g.). Sample size is comparable to ours (7) or much smaller (19) and larger samples of such detailed data would be very difficult to gather. Representativeness at a national scale had not been analysed and is probably questionable for the Canadian case with only 62 dwellings in the sample (19).

The former comparison with models from literature is based only on the coefficient of determination. Even with its adjusted form, R^2 is only a rough criterion for comparing different models based on totally different input data sets or different forms of the response variable. The RMSE or estimator of standard deviation of model error is a better criterion for models using the same response variable; it characterizes the statistical distribution of errors caused by non controlled phenomena not included amongst explanatory variables. But this important characteristic of a statistical model is seldom reported in literature. Actually, none of the papers analysed above provide an estimation of the errors in their model.

Anyway, the RMSE deserves some additional discussion. The RMSE value of 0.309 characterizes obviously an inaccurate prediction model: as stated above, the average 95% confidence interval for the predicted energy consumptions of each house is the interval of [-45%; +83%]. Consequently, the model is not accurate enough to predict energy consumption on the scale of one particular dwelling.

5.2. Building characteristics

One of the main determinants is the surface area, as in almost all of the literature studied (7; 14; 16). The positive sign of the coefficient (0.526) is in line with the thermal rating of the building and the cited literature (consumption increases with surface area). The number of party walls is also significant (a terraced house consumes 17.2% less than a detached house), as in the model of Guerra-Santin et al. (6). In accordance with the rules for calculating current French thermal regulations (26), a house with its floor above an unheated room has higher consumption (+12.2%) than a similar house with its floor on a platform.

Regarding building vintage, as expected, the model found that the more recent dwellings have lower consumption (houses built before 1975 consume 21.8% more than houses built after 2000). This result is identical to those provided by Cavailhes et al. (11) and Kjaerbye et al. (17). However, only the difference between dwellings built before 1975 (date of the first French thermal regulation) and the most recent dwellings (since 2000) is identified as being significant. Moreover, in a similar fashion to Kjaerbye et al. (17) for Danish data, we noted that the recorded difference in consumption (-21% between before 1975 and after 2000) is lower than expected by the theoretical assessments of the thermal regulations²⁰⁵.

On the subject of dwelling insulation, as in the study by Guerra-Santin et al. (6), the model shows that 10 cm of insulation on the outer walls leads to a consumption that is 15.6% lower than that of dwellings with no insulation.

Roof insulation is considered to be non-significant as in Cavailhes et al. (11) but unlike in the papers by Risch and Salmon (12). Amongst the other variables relating to the thermal rating of the dwelling, the model considers the presence of double glazing to be non-significant, this time contradicting Cavailhes et al. (11) as well as Guerra-Santin et al. (6) but similar to Risch and Salmon (12).

²⁰⁵ -20% corresponds, for new residential buildings, to the theoretical difference in the maximum authorised consumption between the thermal regulations of 1988 and 2000. Two thermal regulations were passed between 1975 and 1988 (respectively RT 1974 and RT 1981).

5.3. Characteristics of the energy systems

The type of main heating system is a very important variable for explaining consumption. According to the model, a wood-burning stove or standard oil boilers or boilers using other energies result in higher consumption, in terms of final energy, than electric heating systems (convectors, heating panels, heating floors and heat pumps). According to the theoretical efficiency of the various systems²⁰⁶, these observations appear to be logical, in particular the fact that wood-burning stoves and heat pumps are the systems that result, respectively, in the highest (43.8% higher than average) and lowest (36.2% lower than average) consumption levels.

Furthermore, this variable confirms that, overall, the older the heating system, the higher its consumption (e.g.: a standard oil boiler that is 16 to 25 years old consumes 20.3% more than an equivalent boiler that is less than 10 years old). This observation is identical to the results of Kjaerbye et al. (17). On the other hand, it should be noted that the model identifies an age effect in the efficiency of convectors (those that are more than 25 years old consume 12.6% more than those that are less than 5 years old), while the calculation models used to diagnose energy efficiency in France (26) do not consider this effect. This age effect is very probably linked to technological developments regarding convector control and comfort.

The presence of occasional (more than 15 days per year) or exceptional (up to 15 days per year) supplementary heating is considered to be a source of increased consumption (+18.8% and +13.8%, respectively). These results match those of Cavailhes et al. (11) with a supplementary fireplace but not those of Guerra-Santin et al. (6), which have a non-significant “supplementary heating” variable. Also contradicting Guerra-Santin et al. (6), we found that the presence of a temperature control system is not a determinant for consumption.

As regards energy systems for end-uses other than space heating, in a similar fashion to Ndiaye and Gabriel (19), the type of system used for producing DHW is not significant. On the contrary, the energy used for cooking is significant in the model (cooking using only electricity leads to consumption that is 19.2% lower than when cooking using only gas). Under this value of 19.2%, that seems to be a very great percentage for a secondary end-use as cooking (in 2008, less than 10% of the average consumption in final energy per dwelling of the French dwellings (28)), this variable hides probably other effects than those of cooking equipments.

Concerning end-uses linked to specific electricity, it was found that a house that does not have energy-saving light bulbs has lower energy consumption (-13.4%) than the same house using mostly this type of bulbs. This effect is not confirmed by Ndiaye and Gabriel (19), who found the number of energy-saving bulbs to be non-significant. In other respects, Wallenborn and Dozzi (29) highlight that amongst the households having a high environmental consciousness, so likely to have energy-savings light bulbs, there are predominantly people having the greatest incomes, the highest education level and also the highest energy consumptions notably due to great electrical appliance ratio. Thus, the variable “Energy_saving_lights” could hide an “environmental consciousness” effect and/or an effect of electrical appliance ratio (not selected in the model).

5.4. Characteristics of refurbishment

According to the model obtained, the variable relating to energy-saving or improvement works conducted during the previous 12 months is not significant for explaining the consumption of a dwelling. Ndiaye and Gabriel (19) obtained an identical result, while Kjaerbye et al. (17) and Rehdanz (14), for a new heating system, showed reduced consumption due to the retrofit performed. Thus, due to the scarcity of information at our disposal regarding the refurbishment performed, we could not draw any conclusions regarding the influence of this type of works.

Otherwise, through an *ex-post* billing analysis of an energy efficiency scheme, Scheer et al. (30) show that after refurbishment, the energy demand of the retrofitted houses is approximately equal to the rest of the stock because the before refurbishment energy efficiency of these houses is much lower than this of the others. This result could explain the non effect of energy-saving or improvement works when the statistical analysis is done on energy consumption of one year.

This shows us the usefulness of working with panels of dwellings that have undergone energy-saving works and provide precise information from before and after the works, if we want to study the effects of energy-efficiency actions (31).

²⁰⁶ According to (26), the generation performance of electric convectors or electric heating panels or of an electric heating floor = 1, generation performance (on LHV) of a standard oil or LPG boiler between 0.67 (installed before 1988) and 0.87 (installed after 2000), generation performance of a heat pump between 2.2 (air/air heat pump) and 4 (air/water heat pump), overall efficiency of a wood-burning stove = 0.5.

5.5. Geographical characteristics

With the "Climate_zone" variable in the model, we found results similar to those of Risch and Salmon (12). Namely, as an expected result, the coldest zones in winter (H1b – east and H1a – north and Paris) have higher consumption than milder zones (H2c – southwest and H2d – southern part of the southeast)²⁰⁷. While this matches the findings of Meier and Rehdanz (15), the recorded effects are far from being weak as they are for the latter, with a "heating degrees-days" variable. Due to large diversity of climates in France compared to most of European countries, regional sensitivity of energy consumption is probably less in other countries.

Furthermore, the model logically estimates that the higher the altitude at which the dwelling is located, the higher its consumption (+19.1% per 1000 m).

As regards urban density, it is not significant in the model, while Kjaerbye et al. (17) found that it had a significant effect. Its effect may be partially hidden by the variable regarding party walls, which was not included in the model of Kjaerbye et al. (17).

5.6. Socio-economic characteristics of households

Socio-economic variables are also amongst the main determinants for the consumption of a single-family dwelling. As in the vast majority of the literature (13; 16; 20), the model estimated that the consumption of a household increases with the age of the head of the household, with a particularly marked effect for people aged 65 and older (33.9% higher than the group of under 35 and 25.8% higher than the group aged 35 to 49). It was also found that the greater the number of people living in the household, the greater the consumption (+19.9% for each additional person). This is in line with Rehdanz (14), Risch and Salmon (12) and Schuler et al. (20).

Unlike these latter studies and Sardanou (16), occupation status is not significant in the model.

The models of Risch and Salmon (12) as well as Cavailhes et al. (11) show that household income has a significant effect on consumption, while we found a non-significant effect. This lack of significance for household income can also be found in the works of Ndiaye and Gabriel (19). It appears to us that it may, to a large extent, be explained by the fact that income is, *inter alia*, a "proxy" of the practices of households and thus, as soon as a certain number of behaviour variables are found in the models, this variable loses a large amount of the information that it contains.

5.7. Behavioural characteristics

Indeed, the model contains several behaviour variables, not included in most other studies reported, like other French studies (10-13). As regards behaviour relating to space heating, it has been verified that the higher the temperature setting in the main living room, the higher the consumption (consumption with a temperature of 19°C or less is 23.6% lower than with a temperature of 23°C or more). This observation matches the observations of Haas et al. (7) and Guerra-Santin et al. (6). Like the latter reference, never reducing the heating temperature during the night leads to a higher consumption (+18.2%) compared with reducing the temperature every night. It is more surprising that reducing the temperature while away for half a day is not significant. We would need information on the frequency of this type of absence in order to be able to provide an explanation.

As for ventilation practices, in a more or less similar manner to Ndiaye and Gabriel (19) and Iwashita and Akasaka (32), ventilation time seems to be a determinant. Thus, ventilation periods of 10 to 29 min on average lead to higher consumption (+10.2%) than ventilation periods of less than 10 min.

Furthermore, it was found—as expected—that the higher the number of showers taken, the higher the consumption (a household in which less than seven showers are taken per person per week consumes 14.8% less than a household in which seven showers are taken per week per person). The same influence is determined for the number of baths taken (a household in which less than one bath is taken per person per week consumes 10.2% less than a household in which more than one bath is taken per week per person).

Finally, according to the model, leaving the light on in empty rooms is not significant. This is in line with the lack of significance found for leaving the lights on when leaving a room for a short time in the model of Ndiaye and Gabriel (19). Using the lights during the day is also considered to be non-significant.

5.8. Weight of variables

Having identified the main determinants for energy consumption, we will now look at the most influential factors amongst them. For this purpose, we have used the absolute values of the standardized coefficients of the model presented in the preceding section. The only article we found in the literature which presents the

²⁰⁷ H1b – east: 2852 HDD base 18, H1a – north and Paris: 2688 HDD base 18, H2c – southwest: 2192 HDD base 18 and H2d – southern part of the southeast: 2054 HDD base 18.

standardized coefficients of its model is that by Guerra-Santin et al. (6). Like the latter, the variables with the greatest weight include the natural logarithm of the surface area. On the other hand, unlike this study, the age of the head of the household, in particular the oldest category is amongst the first in terms of weight in the obtained model. Five categories of the variable relating to the main heating system are amongst the ten greatest weights in the model. This variable accounts in the weights of the model. It is not part of the set of explanatory variables used by Guerra-Santin et al. (6).

On the subject of geographical variables with the greatest weight, we find certain categories of the variable dedicated to climate zones to be amongst the most important coefficients in the model. The most influential category of the behaviour variable is that of never reducing the heating temperature setting during the night. This variable is ranked 12th in the classification of variables and categories with the greatest weight in the model.

5.9. Accuracy of the model coefficients

Accuracy of model coefficients is another item to be discussed, in order to determine how the model could be relevant for sensitivity analysis of average energy consumption with respect to the different parameters. In Table 4, uncertainties of the coefficients are characterized by standard errors and 95% confidence intervals. The three more accurately estimated coefficients (highest absolute value of t-values, ratios between the estimated coefficients and their standard errors) are indicated below with their confidence intervals, estimated values (from Table 4) and relative uncertainties:

- LnSurface (Ln of building area) [0.42; 0.64] 0.53 ±21% (t-value 9.5)
- Main Heating with WoodHeater [0.31; 0.57] 0.44 ±29% (t-value 6.7)
- Age_Head Household at least 65 years old [0.14; 0.26] 0.20 ±32% (t-value 6.1)

All other coefficients have t-values lower than 5.5 and relative uncertainties equal or larger than ±36%. With such uncertainties, it is only possible to check orders of magnitude and physical meaning of coefficients. Use for precise quantitative assessment (of the impact of such category of space heating system or type of behaviour, e.g.) is not relevant. Decreasing the relative uncertainties of the main parameters to ±10% - ±20% would be necessary before planning quantitative application of the model, typically reducing standard errors (and increasing t-values) by a factor 2 or more. With the usual statistical rule of thumb of standard errors being proportional to the inverse of square root of sample size, a complete data set of 1600 households or more (instead of 420) would be necessary to reach this accuracy target.

Furthermore, larger samples could make possible to identify models accounting for interactions between the main explanatory variables. Sensitivity analysis of energy engineering models (25) clearly showed the importance of interactions between size parameters, insulation level, ventilation rate and set-point temperature for space heating when explanatory variables are defined in a rather extended range, emphasizing the limits of simple linear models for statistical prediction. Incorporating major interactions could improve the accuracy of the prediction model, leading to smaller RMSE and, due to positive feedback, further reduced standard errors for the coefficients.

These results should be kept in mind when specifying future surveys to improve bottom up statistical models. However, based on the most significant coefficients of the model and their orders of magnitude, the present results enable to draw lessons regarding the main determinants for energy consumption in the French residential sector thanks to the high overall significance of the model.

6. Conclusion

This study is based on French data from 420 single-family dwellings occupied by households that are representative of the whole population. One of the goals was to determine the explanation and prediction capacities of a bottom-up statistical model regarding the total energy consumption of these dwellings that have technical (building, energy systems and refurbishment), geographical, socio-economic and behavioural explanatory variables. Other goals included obtaining the main determinants of energy consumption in the French residential sector in order ultimately to analyse the weights distribution of the various variables therein.

The created model has an explanation capacity (adjusted R² of around 0.7) that is close to the best we found in the literature, knowing that we paid extra attention to the national representativeness of the dwellings in the panel and that no energy audit or monitoring was available (only questionnaire data provided by occupants). Moreover, the explanation capacity we obtained is higher than that of studies conducted using similar sets of explanatory variables by which do not include behaviour. On the other hand, by analysing the estimations of errors made by the model, we determined that the latter was not suitable for predicting consumption on the scale of one dwelling. Indeed, the 95% confidence interval for the predicted energy consumption of one house is too large.

Despite of its low prediction capacity but thanks to its high overall significance, such statistical model may be used as rough benchmark before energy audits for a first selection of houses to be handled in priority and in

depth: houses of the sample with greatest and smallest residuals because in the two cases, some information are missing or erroneous.

We have examined the main determinants for energy consumption in the single-family dwelling sector in France. This allowed us to find a certain number of effects, either predicted by theory, or found in the literature. However, it also highlighted the difference between theory and practice for certain results (e.g. efficiency of thermal regulations). It also stressed the lack of significance of household income when the models have a certain amount of behaviour information. Thanks to the database to which we had access, we were also able to analyse certain practices of households, which is something rarely found in the literature.

Amongst the variables or categories that have the greatest weight in the model, there are surface area, heads of the household aged 65 and older, as well as certain categories of the main heating system. Some categories of the variable relating to climate zones are also amongst the most important coefficients in the model. Finally, we detected that the most influential category of the behaviour variable was that of never reducing the heating temperature setting during the night.

Finally, the study confirmed that in order to study the effects of energy efficiency actions it made sense to use dedicated panels of dwellings that have undergone energy-saving measure, with precise information before and after refurbishment, allowing us to draw unambiguous conclusions.

In terms of outlooks, an analysis of the results seen from the point of view of energy-savings potentials and energy policy could be proposed. To verify the robustness of results obtained, a study with behaviours measured or monitoring instead declared (less uncertainty) could be interesting. For identifying more robust statistical model in terms of prediction capacity, we would need of a bigger data sample which could enable both to decrease standard errors of coefficient and to account for the major interactions between explanatory variables. At last, a similar study should be realized on sample of apartments, representative of the French households living in collective dwelling, for knowing all the determinants of the French dwelling stock.

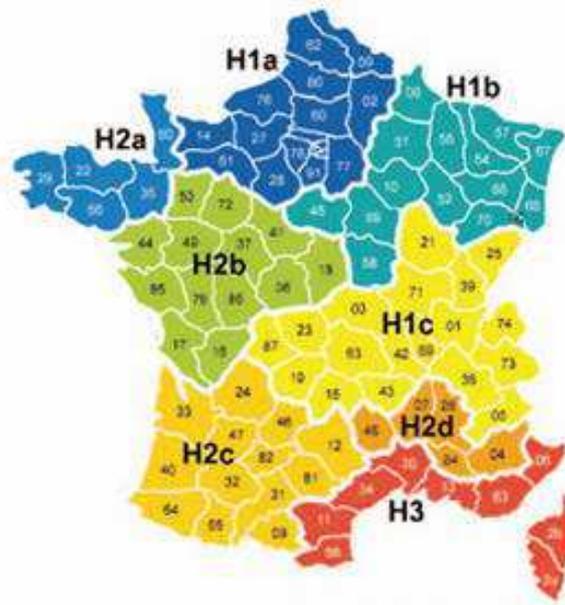
References

- [1] The Parliament and the Council, Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings, The European Parliament and the Council of the European Union, 19 May 2010.
- [2] Europa, Energy efficiency for the 2020, 29 March 2009. http://europa.eu/legislation_summaries/energy/energy_efficiency/en0002_en.htm (accessed on June 05, 2012).
- [3] Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, Efficacité énergétique: la France soutient activement la proposition de directive européenne, 16 April 2012, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Efficacite-energetique-la-France.html> (accessed on June 05, 2012)
- [4] Service de l'Observation et des Statistiques, Bilan énergétique de la France pour 2010, Commissariat général au développement durable, Références, 2011.
- [5] L.G. Swan, V.I. Ugursal, Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 1819-1835.
- [6] O. Guerra-Santin, L. Itard, H. Visscher, The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock, *Energy and Buildings* 41 (2009) 1223-1232.
- [7] R. Haas, H. Auer, P. Biermayr, The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating, *Energy and Buildings* 27 (1998) 195-205.
- [8] A. Audenaert, K. Briffaerts, L. Engels, Practical versus theoretical domestic energy consumption for space heating, *Energy Policy* 39 (2011) 5219-5227.
- [9] G. Branco, B. Lachal, P. Gallinelli, W. Weber, Predicted versus observed heat consumption of a low energy multifamily complex in Switzerland based on long-term experimental data, *Energy and Buildings* 36 (2004) 543-555.
- [10] S. Couture, S. Garcia, A. Reynaud, Household energy choices and fuelwood: An econometric approach using French data, *Energy Economics* 34 (2012) 1972-1981.
- [11] J. Cavailles, D. Joly, T. Brossard, H. Cardot, M. Hilal, P. Wavresky, La consommation d'énergie des ménages en France, Convention MEEDM - INRA no. 22 0009 3249, 2011.
- [12] A. Risch, C. Salmon, French residential energy demand: Micro-econometric analysis of household multi-fuel energy consumption, Note de recherche (<http://www.irege.univ-savoie.fr>) (Also published in: 5th Annual International Symposiums on Economic Theory, Policy and Applications, Athens, Greece, 2010), 2010.
- [13] L. Calvet, F. Marical, Le budget "énergie du logement": les déterminants des écarts entre les ménages, Commissariat Général au Développement Durable (Eds), *Le point sur* 56 (2010).
- [14] K. Rehdanz, Determinants of residential space heating expenditures in Germany, *Energy Economics* 29 (2007) 167-182.
- [15] H. Meier, K. Rehdanz, Determinants of residential space heating expenditures in Great Britain, *Energy Economics* 32 (2010) 949-959.
- [16] E. Sardianou, Estimating space heating determinants: An analysis of Greek households, *Energy and Buildings* 40 (2008) 1084-1093.
- [17] V.H. Kjaerbye, M. Togeby, A.E. Larsen, Do changes in regulatory requirements for energy efficiency in single-family houses result in the expected energy savings?, *Proceedings of the ECEEE Summer Study 2011*, Presqu'île de Gien, France, 2011.
- [18] S. Leth-Petersen, M. Togeby, Demand for space heating in apartment blocks: measuring effects of policy measures aiming at reducing energy consumption, *Energy Economics* 23 (2001) 387-403.
- [19] D. Ndiaye, K. Gabriel, Principal component analysis of the electricity consumption in residential dwellings, *Energy and Buildings* 43 (2011) 446-453.
- [20] A. Schuler, C. Weber, U. Fahl, Energy consumption for space heating of West-German households: empirical evidence, scenario projections and policy implications, *Energy Policy* 28 (2000) 877-894.
- [21] TNS SOFRES, Le panel postal: Métascope, <http://www.tns-sofres.com/notre-offre/outils/25096226A30148689BD36FC625260267.aspx> (accessed on June 05, 2012).
- [22] J-M. Cayla, N. Maizi, C. Marchand, The role of income in energy consumption behaviour: Evidence from French households data, *Energy Policy* 39 (2011) 7874-7883.
- [23] J-M. Cayla, B. Allibe, M-H. Laurent, From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption, *Proceedings of the ACEEE Summer Study 2010*, Pacific Grove, United States, 2010.
- [24] Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques, Bases de données, <http://www.insee.fr/fr/bases-de-donnees/> (accessed on June 01, 2012).
- [25] D. Garcia Sanchez, B. Lacarrière, M. Musy, B. Bourges, Application of sensitivity analysis in building energy simulations: Combining first- and second-order elementary effects methods, *Energy and Buildings* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.048>
- [26] Réglementation thermique 2005, Règles Th-U - Fascicule 4, 2006.
- [27] Ministère de l'emploi, de la cohésion sociale et du logement, Arrêté portant approbation de diverses méthodes de calcul pour le diagnostic de performance, 9 November 2006.
- [28] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Chiffres clés – Energie et climat – édition 2009, 2009
- [29] G. Wallenborn, J. Dozzi, Du point de vue environnemental, ne vaut-il pas mieux être pauvre et mal informé que riche et conscientisé ?, in : P. Cornut, T. Bauler, E. Zaccà, Université de Bruxelles (Eds.), *Environnement et inégalités sociales*, Bruxelles, 2007, pp. 47-59
- [30] J. Scheer, M. Clancy, S. N. Hógáin, Quantification of energy savings from Ireland's Home Energy Saving scheme: an ex post billing analysis, *Energy Efficiency* (2012)
- [31] M. Raynaud, D. Osso, J. Adnot, B. Bourges, B. Duplessis, An energy efficiency program analysis to understand the gaps between ex-ante and ex-post evaluations, *Proceeding of the 2012 International Energy Program Evaluation Conference*, Rome, Italy, 2012.

- [32] G. Iwashita, H. Akasaka, The effects of human behavior on natural ventilation rate and indoor air environment in summer - a field study on southern Japan, *Energy and Buildings* 11 (1997) 267-275.
- [33] Centre d'Etudes et de Recherches Economiques sur l'Energie, Secteur résidentiel - Suivi du parc et des consommations d'énergie - Consommations en 2008, Etude 9102, 2009.

Annexe 2 : Carte des zones climatiques de la RT

Zones d'hiver	Zones d'été
zone H1	zone H1a zone H1b zone H1c
zone H2	zone H2a zone H2b zone H2c zone H2d
zone H3	zone H3



Source : <http://www.wicon.fr/fr/Entreprises/Reglementation-thermique-2012/Le-Cepmax/>

Annexe 3 : Liste complète des paramètres d'entrée de Diag Serie

Col.	En-tête	Type	Signification de la donnée et contenu
1	Cas	Entier	Indice du diagnostic
<i>Données Diagnostic</i>			
2	Lgmt	Enuméré	Type de logement : 0=Maison Individuelle 1=Logement Collectif
3	DateConstr	numéré	Date de construction : 0=Avant 1974 1=1974-1976 2=1977-1981 3=1982-1988 4=1989-1996 5=1997-2001 6=2002-2005 7=Après 2005
4	G	Réel > 0	G du logement (en $W \cdot ^\circ C^{-1} \cdot m^{-3}$). Si ce champ n'est pas renseigné, sa valeur est déterminée à partir des caractéristiques thermiques du logement (date de construction, rénovations...)
5	Energie Bati	Enuméré	Energie de référence du bâti : 0=Aucune 1=Electricité 2=Gaz 3=Fioul 4=GPL 5=Bois
6	Energie Chauff	Tab Enuméré	Energie des systèmes de chauffage (séparés par un « ; ») : 0=Aucune 1=Electricité 2=Gaz 3=Fioul 4=GPL 5=Bois

Col.	En-tête	Type	Signification de la donnée et contenu
7	Système Chauff	Tab Enuméré	Types des systèmes de chauffage (séparés par un « ; ») : 0=Aucun 1=Convecteur 2=Panneau rayonnant 3=Radiateur électrique (à inertie) 4=Plancher rayonnant élec 5=Radiateur à accumulation 6=Plancher chauffant-rafr. avec PAC 7=VCV avec PAC 8=Système centralisé à air avec PAC 9=Split avec PAC 10=Chaudière autre ancienne 11=Chaudière autre standard 12=Chaudière autre haut rendement 13=Chaudière autre basse température (ne plus utiliser) 14=Chaudière autre à condensation (ne plus utiliser) 15=Chaudière électrique 16=Chaudière Basse Température (Plancher) 17=Chaudière Basse Température (Radiateurs) 18=Chaudière à condensation (Plancher) 19=Chaudière à condensation (Radiateurs) 20=PAC Eau/Eau (PCR) 21=PAC Eau/Eau (VCV/Radiateurs) 22=PAC Sol/Eau (PCR) 23=PAC Sol/Eau (VCV/Radiateurs) 24=PAC Air/Eau HT (VCV/Radiateurs) 25=Plafond rayonnant plâtre (PRP) 26=Chaudière bois ancienne 27=Chaudière bois à combustion améliorée 28=Chaudière bois à combustion améliorée couplée à une hydroaccumulation 29=Chaudière bois automatique 30=Radiateur sèche serviettes 31=Plancher à accumulation électrique + Appoint élec 32=PAC hybride Fioul (PCR) 33=PAC hybride Fioul (VCV) 34=PAC hybride Gaz (PCR) 35=PAC hybride Gaz (VCV)
8	Surf Chauff	Tab Réel	Surfaces des systèmes de chauffage (séparées par un « ; »)
9	Indice syst mixte	Entier	Indice du système assurant le double usage ECS. Vaut 0 en l'absence de double usage. Vaut 1 pour le 1 ^{er} système déclaré, 2 pour le 2 ^{ème} ...
10	Perche Chauff	Tab Booléen	Présence d'une PAC en relève pour les systèmes de chauffage (séparées par un « ; ») 0=non 1=oui
11	Perfo Chauff	Booléen	Performance des systèmes de chauffage (séparée par un « ; ») 0=Standard 1=Effet joule Norme NF Cat. C 2=Flamme Verte
12	Présence Appoint Bois	Booléen	Présence d'un appoint bois : 0=non 1=oui
13	Nb steres Appoint Bois	Réel	Nombre de stères par an utilisés pour l'insert bois

Col.	En-tête	Type	Signification de la donnée et contenu																								
14	Type Appoint bois	Enuméré	Type de l'appoint bois 0=Cheminée à foyer ouvert 1=Cheminée à foyer fermé / insert 2=Poêle ancien 3=Poêle performant 4=Poêle de masse																								
15	Flamme verte Appoint bois	Booléen	Certification Flamme Verte de l'appoint bois : 0=non 1=oui																								
16	EcsMode	Enuméré	Mode de l'ECS 0=Classique 1=Solaire 2=Aucune 3=Thermodynamique																								
17	EcsEnergie	Enuméré	Energie de l'ECS 0=Aucune 1=Electricité 2=Gaz 3=Fioul 4=GPL 5=Bois																								
18	EcsType	Enuméré	Type d'ECS 0=Electrique à accumulation 1=Autre à accumulation 2=Autre instantané 3=Autre à micro-accumulation 4=Accumulation assurée par la PAC HT 5= Accumulation assurée par la PAC hybride																								
19	EcsElecEte	Booléen	Utilisation d'une ECS électrique l'été (dans le cas de chaudière ou PAC hybride double usage) : 0=non 1=oui																								
20	EcsSurfCapteursSol	Réel	Surface des capteurs pour l'ECS solaire en mètres carrés																								
21	NbOccupants	nb_max ≥ Entier > 0	Nombre d'occupants du logement Pour le cas « Logement Collectif » : - surface < 40 m ² : nb_max = 4 - surface ≥ 40 m ² : nb_max = 15																								
22	Sh	1000 ≥ Réel ≥ 10	Surface habitable du logement (en m ²).																								
23	TarifElec	Enuméré	Type de tarif : 0=Bleu 1=MCE 2=GOOPIL 3=Corse																								
24	DateTarifElec	Date	Date de souscription du tarif élec. Date du jour si non renseignée																								
25	OptionTarifElec	Enuméré	Option du tarif élec : <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Bleu</th> <th>MCE</th> <th>GOOPIL</th> <th>Corse</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0=Base</td> <td>0=Base</td> <td>0=12sem+WE (Hc1)</td> <td>0=Base</td> </tr> <tr> <td>1=HC</td> <td>1=HC</td> <td>1=16sem+WE (Hc2)</td> <td>1=HC</td> </tr> <tr> <td>2=Tempo</td> <td></td> <td>2=8sem+WE</td> <td></td> </tr> <tr> <td>3=EJP</td> <td></td> <td>(LibWE)</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>3=Base+WE</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Bleu	MCE	GOOPIL	Corse	0=Base	0=Base	0=12sem+WE (Hc1)	0=Base	1=HC	1=HC	1=16sem+WE (Hc2)	1=HC	2=Tempo		2=8sem+WE		3=EJP		(LibWE)				3=Base+WE	
Bleu	MCE	GOOPIL	Corse																								
0=Base	0=Base	0=12sem+WE (Hc1)	0=Base																								
1=HC	1=HC	1=16sem+WE (Hc2)	1=HC																								
2=Tempo		2=8sem+WE																									
3=EJP		(LibWE)																									
		3=Base+WE																									
26	PSous	Enuméré	Index de la puissance souscrite : 0=3kVA 1=6kVA 2=9kVA																								
27	AvecTarifElecTpn	Booléen	Application du tarif élec TPN																								

Col.	En-tête	Type	Signification de la donnée et contenu
28	NiveauReducTpn	Enuméré	Niveau de réduction du tarif TPN : 0=Fort (50%) 1=Moyen (40%) 2= Faible (30%)
29	TarifGaz	Enuméré	Type de tarif gaz : 0=GDF 1=MCGN 2=MCGNPF 3=Ponctuel
30	DateTarifGaz	Date	Date de souscription du tarif gaz. Date du jour si non renseignée
31	ZoneGazEdf	Enuméré	Zone gaz EDF de la commune : 0=zone A 1=zone B 2=zone C 3=zone Z 4=zone 1 5=zone 2 6=zone 3 7=zone 4 8=zone 5 9=zone 6 Si non renseigné, utilise la zone gaz de la commune Insee
32	OptionTarifGazEdf	Enuméré	Option tarifaire gaz EDF : 0=Cuisson/ECS 1=Chauffage
33	OptionTarifGazGdf	Enuméré	Option tarifaire gaz GDF : 0=Base 1=B0 2=B1 3=3UR (ne plus utiliser)
34	NiveauGazGdf	6 ≥ Entier ≥ 1	Niveau du tarif gaz GDF
35	AvecTarifGazTss	Booléen	Application du tarif gaz TSS
36	NiveauReducTss	Enuméré	Niveau de réduction du tarif TSS : 0=Fort (> 2UC) 1=Moyen (1 à 2 UC) 2= Faible (1UC)
37	Tarif fioul	Réel	Tarif fioul TTC en cts€/l.
38	Tarif GPL	Réel	Tarif GPL TTC en cts€/kWh PCI
39	Dpt	95 ≥ Entier ≥ 1	Numéro de département
40	CodeInsee	Chaîne	Code Insee de la commune Ce champ est considéré uniquement si le département n'est pas renseigné
41	DJU	Réel	Nombre de DJU sur la période de simulation. Si ce champ n'est pas renseigné, sa valeur est déterminée à partir des caractéristiques du logement et des DJU corrigés.
42	DebutSimu	Date	Date de début de simulation
43	FinSimu	Date	Date de fin de simulation
44	ZoneCotiere	Booléen	0 : Non 1 : Oui Prend la valeur par défaut si non renseigné
45	Altitude	Réel	Altitude de la commune (en m.) Prend la valeur par défaut si non renseigné
46	Eclairage	Enuméré	Type d'éclairage : 0 : Classique 1 : Fluo Compact 2 : Mixte
47	NbHalo	Entier ≥ 0	Nombre d'halogènes

Col.	En-tête	Type	Signification de la donnée et contenu
48	EqCuisson	Ensemble	<p>Liste des équipements de cuisson. Codé sous la forme d'une chaîne de chiffres 0 ou 1 suivant la présence de l'équipement cuisson.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Plaque Fonte - Plaque Vitro - Plaque Induction - Four Electrique - Mini Four - Micro Onde - Table de cuisson Gaz/GPL - Four Gaz/GPL <p>Ex : 100101 Plaque Fonte : oui Plaque Vitro : non Plaque Induction : non Four Electrique : oui Mini Four : non Micro Onde : oui</p>
49	EqElectro	Ensemble	<p>Liste des équipements électroménagers. Codé sous la forme d'une chaîne de chiffres 0 ou 1 suivant la présence de l'équipement électroménager.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Réfrigérateur - Congélateur - Réfrigérateur Congélateur - Lave Linge - Sèche Linge - Lave Vaisselle - Télévision - PC - Magnéscope - Petit Electroménager - Console de jeu - Hifi - Lecteur DVD <p>Ex : 1101001101000 Réfrigérateur : oui Congélateur : oui Réfrigérateur Congélateur : non Lave Linge : oui Sèche Linge : non Lave Vaisselle : non Télévision : oui PC : oui Magnéscope/HiFi/DVD : non Petit Electroménager : oui Console de jeu : non Hifi : non Lecteur DVD : non</p>

Col.	En-tête	Type	Signification de la donnée et contenu
50	NbElectro	Tableau d'entiers ≥ 0	Nombre d'équipements électroménagers (séparés par un « ; »). Ex. : 2;1;0;1;0;0;2;1;0;0;0;0 Réfrigérateurs : 2 Congélateur : 1 Lave linge : 1 Télévision : 2 PC : 1 Rmq : le 10 ^{ème} chiffre relatif au petit-électro correspond au nombre d'entité de petit électroménager; à ne pas confondre avec l'indice de quantité subjective.
51	PetitElectro	Enuméré	Quantité subjective de petits équipements électroménagers. 0 : Peu 1 : Moyen 2 : Beaucoup
52	EqAutres	Ensemble	Liste des autres équipements Codé sous la forme d'une chaîne de chiffres 0 ou 1 suivant la présence de l'équipement : - Cave à Vin - Réfrigérateur Américain - Aquarium
53	Clim	Booléen	Indicateur de présence d'un système de climatisation 0 : non 1 : oui
54	Sclim	SurfaceHab \geq Réal ≥ 10	Surface climatisée (en m ²).
55	ClimTypeConsigne	Enuméré	Indicateur du type de consigne de la climatisation 0 : Tc 1 : Tc-Text
56	ClimConsigne	Réal	Valeur de consigne de la climatisation (en °C)
57	Piscine	Booléen	Indicateur de présence d'une piscine 0 : non 1 : oui
58	PiscineChauff	Enuméré	Si présence piscine, indique son type : 0 : chauffée par un réchauffeur électrique, 1 : chauffée par une PAC 2 : autre cas 3 : piscine non chauffée
59	PiscineNbMoisFct	$1 \leq$ Entier ≤ 12	Nombre de mois d'utilisation de la piscine sur l'année. Valeur par défaut si non renseigné
60	PiscineNbMoisChauf	$0 \leq$ Entier ≤ 12	Nombre de mois de chauffage de la piscine sur l'année. Valeur par défaut si non renseigné
61	EqSpecNom	Tableau de chaînes	Noms des équipements spécifiques (séparés par un « ; ») Ex : Spec1;Spec2;Spec3
62	EqSpecP	Tableau de réels ≥ 1	Puissance de ces équipements (séparés par un « ; ») (en W) Ex : 500;200.5;300
63	EqSpecNbH	Tableau de réels > 0	Nombre d'heures d'utilisation hebdomadaire de chacun des équipements (séparés par un « ; ») Ex : 5.3;2;4.5
64	TcVie	$30 \geq$ Réel ≥ 10	Température de confort des pièces de vie (en °C)
65	TcVieReduc	Booléen	Indique la réduction en journée du chauffage des pièces de vie 0 : non 1 : oui
66	TcAutres	$30 \geq$ Réel ≥ 10	Température de confort des autres pièces (en °C)
67	TcAutresReduc	Booléen	Indique la réduction en journée du chauffage des autres pièces 0 : non 1 : oui

Col.	En-tête	Type	Signification de la donnée et contenu
68	PChaudiere	Double ≥ 10	Puissance des chaudières autre énergie en W (séparée par un « ; ») Valeur par défaut si non renseignée. Ex pour 3 systèmes : « ;1500; » : défaut;1500 W;défaut « ;; » ou « » : défaut pour tous les systèmes
69	Residence	Enuméré	Type de résidence 0 : Principale 1 : Secondaire
70	AbsWE	Enuméré	Type d'absence Week End : 0 : Tous les WE 1 : 1 WE sur 2 2 : 1 WE sur 3 3 : 1 WE par Mois 4 : Moinsd'1 WE par mois (rarement ou jamais)
71	AbsWEReduc	Enuméré	Indique la réduction de chauffage lors des absences en Week End 0 : Sans réduction 1 : Avec Réduction 2 : Avec mise en hors gel
72	Prog GE	Booléen	Présence d'un programme de gestion d'énergie 0 : Non 1 : Oui
73	Jour1 GE	Tab de réels [5 ; 40]	Consignes horaires constituant le jour type. Codé sous forme de chaîne de 24 réels (séparés par un « ; »), représentant la consigne (en °C) de 0h à 23h. Lorsque ce champ n'est pas renseigné, le jour type correspondant n'est pas actif.
74	Jour2 GE		
75	Jour3 GE		
76	Jour4 GE		
77	Jour5 GE		
78	Jour6 GE		
79	Jour7 GE		
80	Jour8 GE		
81	Jour9 GE		
82	Jour AbsWe GE	Tab de réels [5 ; 40]	Consignes horaires constituant le jour type utilisé pour les absences courtes et WE. Codé sous forme de chaîne de 24 réels (séparés par un « ; »), représentant la consigne (en °C) de 0h à 23h. Lorsque ce champ n'est pas renseigné, ce jour type n'est pas actif.
83	SemaineType GE	Tab d'entiers	Semaine type du GE décrivant le jour type GE à utiliser pour chaque jour de la semaine (du lundi au dimanche). Codé sous forme de chaîne de 7 entiers (séparés par un « ; »), représentant l'indice du jour type (1 pour Jour1 GE, 2 pour Jour2 GE...).
84	SemaineConges GE	Tab d'entiers	Semaine type du GE décrivant le jour type GE à utiliser pour chaque jour de la semaine (du lundi au dimanche) lors des absences longues (congés). Codé sous forme de chaîne de 7 entiers (séparés par un « ; »), représentant l'indice du jour type (1 pour Jour1 GE, 2 pour Jour2 GE...). Lorsque ce champ n'est pas renseigné, la semaine type congés GE n'est pas active.
85	NbOccupJour	Entier ≥ 0	Nombre d'occupants en journée. 0 = pas d'occupant.
86	Conges	Chaîne	Semaines de congés sur l'année. Codé sous forme de chaîne de 53 chiffres 0 ou 1 selon la présence de congés. Lorsque ce champ n'est pas renseigné, ce sont les congés types (hiver+été) qui sont pris en compte.
87	CongesHiver	Enuméré	Durée des congés en hiver 0 : Aucun 1 : 1 Semaine 2 : 2 Semaines 3 : 3 Semaines

Col.	En-tête	Type	Signification de la donnée et contenu
88	CongesEte	Enuméré	Durée des congés en été 0 : Aucun 1 : 1 Semaine 2 : 2 Semaines 3 : 3 Semaines
89	AppointNonElec	Enuméré	Type d'appoint non électrique : 0 : Aucun 1 : Appareil sans thermostat (non régulé) 2 : Appareil avec thermostat (régulé) 3 : Appoint bois
90	OuvFen	Booléen	Indicateur d'ouverture quotidienne des fenêtres 0 : non 1 : oui
91	FermVoletsNuit	Booléen	Indicateur de fermeture des volets la nuit 0 : non 1 : oui
92	ProtecOuvNuit	Enuméré	Si fermeture volets nuit, type de protection : 0 : Persienne 1 : Roulant 2 : Bois
93	EcsVolume	Réel	Volume du ballon de l'ECS (en l.) Valeur par défaut si non renseignée
94	EcsPuissance	Réel	Puissance de l'ECS indépendante autre énergie (en W) Valeur par défaut si non renseignée
95	EcsHabitudes	Enuméré	Indique les habitudes ECS des occupants 0 : Plutôt des douches 1 : Des douches et quelques bains 2 : Plutôt des bains
96	Balneo	Booléen	Indicateur de présence d'un système balnéo 0 : non 1 : oui
97	EcsEmplacementBallonMi	Enuméré	Indique l'emplacement du ballon ECS en MI 0 : En volume chauffé 1 : En local accolé 2 : En local enterré 3 : En local semi-enterré
98	EcsJaquetteBallonMi	Booléen	Indicateur de présence d'une jaquette pour le ballon ECS en MI 0 : non 1 : oui
99	MitoyenMi	Booléen	Indicateur de pavillon mitoyen pour le cas « Maison Individuelle ». 0 : non 1 : oui
100	VerandaMi	Booléen	Indicateur de véranda pour le cas « Maison Individuelle ». 0 : non 1 : oui
101	EtageMi	Booléen	Indicateur d'étage pour le cas « Maison Individuelle ». 0 : non 1 : oui
102	ComblesAmenMi	Booléen	Indicateur de combles aménagés pour le cas « Maison Individuelle ». 0 : non 1 : oui
103	GarageMi	Booléen	Indicateur de présence d'un garage accolé pour le cas « Maison Individuelle ». 0 : non 1 : oui
104	FormeMi	Enuméré	Forme du logement pour le cas « Maison Individuelle ». 0 : rectangle 1 : en U 2 : en L

Col.	En-tête	Type	Signification de la donnée et contenu
105	EmplLc	Enuméré	Type d'emplacement du logement pour le cas « Logement Collectif » : 0 : Intermédiaire 1 : Sous Terrasse 2 : Rdc 3 : En combles aménagés 4 : Sous combles non aménagés
106	PignonLc	Booléen	Indicateur d'appartement en pignon (cad en bout d'immeuble) pour le cas « Logement Collectif » 0 : non 1 : oui
107	Renov	Ensemble	Liste des types de rénovation Codé sous la forme d'une chaîne de chiffres 0 ou 1 suivant la présence de la rénovation. - Fenêtre - Mur - Mur Extérieur - Combles Rmq : quel que soit le type de logement, il faut renseigner toutes les rénovations. Celles qui ne sont pas propres à un type de logement seront à 0
108	Svitree	Enuméré	Surface vitrée du logement : 0 : Peu de vitrage 1 : Normal 2 : Grande baie vitrée
109	SsudEq	Réel	Surface sud équivalente des ouvrants (en m ²). Lorsque ce champ n'est pas renseigné, la surface vitrée est déterminée à partir de l'orientation globale des ouvrants.
110	OrientOuvrants	Enuméré	Orientation globale des ouvrants. Lorsque ce champ n'est pas renseigné, c'est la surface des ouvrants par orientation qui est utilisée. 0 : Au Sud (+ des 3/4) 1 : Au Nord (+ des 3/4) 2 : Beaucoup au Sud (env. les 3/4) 3 : Beaucoup au Nord (env. les 3/4) 4 : La moitié au Sud 5 : La moitié au Nord 6 : Autant au Nord qu'au Sud'
111	Ssud	Réel	Surface sud des ouvrants avec cadre (en m ²).
112	Snord	Réel	Surface nord des ouvrants avec cadre (en m ²).
113	Sest	Réel	Surface est des ouvrants avec cadre (en m ²).
114	Souest	Réel	Surface ouest des ouvrants avec cadre (en m ²).
115	H	Réel ≥ 1.5	Hauteur sous plafond (en m.).

Evaluation *ex-post* de l'efficacité de solutions de rénovation énergétique en résidentiel

RESUME : En France, les rénovations énergétiques en résidentiel, et ceci tout particulièrement pour les maisons individuelles, font peu l'objet après réalisation d'une évaluation *ex-post* permettant de quantifier la performance atteinte.

Cette thèse se propose donc d'effectuer une évaluation *ex-post* de l'efficacité de solutions de rénovation énergétique en résidentiel, à partir de données (environ 100 cas par échantillon étudié) provenant d'enquêtes menées auprès de ménages, propriétaires occupants de maison individuelle, ayant participé à des opérations de maîtrise de la demande en énergie conduites à l'échelle régionale dans le nord-est et le sud-est de la France. Une approche statistique tant descriptive que de modélisation est principalement employée pour aborder ce travail.

Le premier volet de l'évaluation *ex-post* consiste en une quantification des économies unitaires obtenues associée à un calcul d'incertitude. Pour chacune des opérations, la modélisation statistique de la consommation énergétique après travaux permet l'étude de l'influence des actions elles-mêmes mais aussi de certains facteurs tels que le changement de la gestion du chauffage ou l'utilisation après travaux de la climatisation.

Le second volet de cette évaluation *ex-post* a pour but d'identifier les causes des écarts entre les consommations observées et celles simulées par un modèle de calcul *ex-ante* (dit d'ingénieur). Ainsi, nous étudions l'évolution des écarts des états avant à après travaux. Tout d'abord, une quantification et une modélisation statistique des écarts en situation avant travaux est réalisée. Puis, les écarts en situation après travaux sont à leur tour quantifiés et modélisés statistiquement en intégrant notamment l'erreur commise initialement (avant travaux). Les différences entre économies d'énergie observées et simulées sont également étudiées.

Enfin, dans la dernière partie de la thèse, sur la base des sources d'écart identifiées, nous proposons des pistes de perfectionnement du modèle de calcul d'ingénieur utilisé. Plus largement, à partir d'un retour critique quant aux limites des modèles statistiques établis pour étudier les causes des écarts, des pistes sont avancées pour permettre de les améliorer.

Mots clés : Rénovation énergétique, maison individuelle, évaluation *ex-post*, économies d'énergie, écart entre *ex-ante* et *ex-post*, modélisation statistique.

Ex-post evaluation of energy efficiency measures for retrofit in residential buildings

ABSTRACT: In France, *ex-post* evaluations of energy retrofits in residential buildings, allowing to quantify the performance achieved, are rarely realized, particularly for the dwelling houses.

This thesis is an *ex-post* evaluation of energy efficiency measures for retrofit in residential buildings from surveys data (around 100 cases by studied sample) of households, house owners, that participated in regional energy efficiency operations (northeast and southeast of France). This work is mainly tackled by descriptive statistics and statistical models.

The first part of the *ex-post* evaluation is a quantification of unitary energy savings associated to an uncertainty assessment. For the two operations, a statistical model of energy consumption after retrofitting studies the effect of energy efficiency measures and also the effects of factors as space heating management modification or air-conditioning use after refurbishment.

The second part of the *ex-post* evaluation has for aim to identify the sources of gaps between observed consumptions and ones simulated by an *ex-ante* engineering model. Thus, we study gaps evolution from before retrofitting to after retrofitting situations. In the first time, we realise a quantification and a statistical modelling of gaps before retrofitting. Then, we repeat the method for gaps after retrofitting, in taking into account gap before retrofitting in the statistical model. Deviations between observed energy savings and calculated ones are also studied.

In the last part of the thesis, we propose some improvements of the engineering model on the base of the gaps sources identified. From a critical analysis of statistical models realised to study gaps, some propositions are did to improve them.

Keywords : Energy retrofit, dwelling house, *ex-post* evaluation, energy savings, gap between *ex-ante* and *ex-post*, statistical modelling.