



Rénovation énergétique de l'habitat en France : analyse microéconométrique du choix des ménages.

Elena Stolyarova

► To cite this version:

Elena Stolyarova. Rénovation énergétique de l'habitat en France : analyse microéconométrique du choix des ménages.. Economies et finances. Université Paris sciences et lettres, 2016. Français. <NNT : 2016PSLEM011>. <tel-01419489>

HAL Id: tel-01419489

<https://pastel.hal.science/tel-01419489v1>

Submitted on 19 Dec 2016

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.



HAL Authorization

THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres
PSL Research University

Préparée à MINES ParisTech

Rénovation énergétique de l'habitat en France : analyse
micro-économétrique du choix des ménages

Ecole doctorale n° 84

SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION

Spécialité CONTROLE, OPTIMISATION, PROSPECTIVE

COMPOSITION DU JURY :

M. Frédéric LANTZ
IFP School, Rapporteur

M. Mindjid MAIZIA
Université de Tours, Rapporteur

M. Marie-Laure NAULEAU
ADEME, Examineur

M. Louis-Gaëtan GIRAUDET
CIRED, Examineur

M. Nadia MAIZI
MINES ParisTech, Examineur

M. Dominique Osso
EDF R&D ENRBAT, Examineur

Soutenue par Elena STOLYAROVA
le 7 avril 2016

Dirigée par **Nadia MAIZI**



Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier Frédéric Lantz et Mindjid Maïzia pour avoir accepté d'être rapporteur de ce travail, ainsi que Marie-Laure Nauleau et Louis-Gaëtan Giraudet de se joindre à eux pour l'évaluer. Je suis très touchée par la qualité et la richesse de leurs analyses, commentaires et suggestions.

J'adresse mes sincères remerciements à l'ensemble de mes encadrants de thèse : Nadia Maïzi, Hélène Le Cadre, Dominique Osso et Benoit Allibe. Tout d'abord merci à Nadia, ma directrice de thèse, qui m'a donné l'opportunité d'effectuer ce travail et m'a accordé la confiance. La richesse et la pertinence de ses conseils m'ont permis de bien structurer la thèse et de progresser dans les travaux, tout particulièrement à la fin. Je remercie chaleureusement Hélène qui m'a fait découvrir et m'a appris les modèles de choix discrets. Ses compétences mathématiques et scientifiques associées à des méthodes de travail rigoureuses, ont été très précieuses pour l'avancement des travaux. Merci beaucoup à Dominique pour un encadrement industriel exemplaire tout au long de la thèse. Grâce à lui j'ai pu acquérir les compétences et les connaissances nécessaires pour rendre l'analyse quantitative le plus réaliste possible. Plus encore, ses qualités littéraires, son soutien et nos nombreux échanges au quotidien ont été d'un secours indispensable pour mes travaux, les communications scientifiques et la rédaction de ce manuscrit. Je remercie aussi Benoit pour son enthousiasme face au potentiel des modèles de choix discrets et pour son encouragement à faire une enquête expérimentale.

J'aimerais remercier EDF R&D d'avoir soutenu financièrement cette thèse CIFRE et tout particulièrement la réalisation de l'enquête expérimentale qui n'était pas prévue dans le projet de thèse. Merci à Jean-Michel Cayla et Cécile Futtersack qui ont accepté de financer l'enquête et qui ont aidé à améliorer le questionnaire.

Un grand merci à l'ensemble des équipes Résidentiel et Tertiaire du département ENERBAT, ainsi qu'à l'équipe Prospective et Appui Stratégique, pour leur accueil chaleureux au sein d'EDF R&D. Je remercie tout particulièrement Christophe Marchand pour l'organisation de mon travail à EDF et pour m'avoir trouvé de si merveilleux encadrants. Un grand merci à Guillaume Binet qui m'a donné l'accès aux données TNS SOFRES 2013. Merci aussi à Marie-Hélène Laurent pour avoir partagé ses connaissances et travaux avec moi, notamment sur le confort thermique. Et merci à Jean, mon voisin de bureau.

J'aimerais exprimer le plaisir que ce fut de venir travailler au CMA à Sophia-Antipolis. Merci pour cela aux membres permanents de l'équipe (Sophie, Jean-Paul, Gilles, Edi, Sandrine et Amel), aux anciens doctorants (François, Sébastien, Stéphanie et Paul) et aux doctorants (Vincent, Rémy, Elise, Thomas, Gratien, Jérôme, Seungwoo, Aurélien et Ariane).

Merci beaucoup à Catherine Auguet-Chadaj pour sa présence, son aide, ses conseils et, tout particulièrement, pour la relecture de ce manuscrit. Merci à Valérie Roy pour l'organisation administrative du doctorat et pour m'avoir aidé à installer et utiliser Biogeme sur Linux. Je remercie aussi Sebastien Folio et Evariste Chaintreau pour leur aide informatique.

Enfin, je remercie mes amis et mes parents d'être là et me soutenir. Des remerciements spéciaux à Wen et Simona, que j'ai rencontrées à EDF et qui y sont encore en thèse. Merci à Tatiana qui est venue en France de Mourmansk pour être présente à ma soutenance.

Table des matières

| | |
|--|-------------|
| Remerciements | ii |
| Liste des figures | vii |
| Liste des tableaux | ix |
| Liste des abréviations | xi |
| Glossaire | xiii |
| Introduction | i |
| Contexte et enjeux | i |
| Motivations de recherche | iv |
| Organisation du travail | vii |
| Structure de la thèse | x |
| Contributions écrites et orales | xi |
| 1 Utilité aléatoire pour modéliser les préférences des ménages | 1 |
| 1.1 Théorie du consommateur et modèles de choix discrets | 2 |
| 1.2 Utilité aléatoire | 5 |
| 1.3 Typologie des modèles de choix discrets | 6 |
| 1.3.1 Logit Multinomial | 7 |
| 1.3.2 Logit Emboité | 11 |
| 1.3.3 Hétérogénéité des préférences | 16 |
| 1.3.3.1 Logit Mixte à paramètres aléatoires | 16 |
| 1.3.3.2 Modèle des classes latentes | 19 |
| 1.4 Mesures de performance et tests | 20 |
| 1.4.1 Qualité du modèle | 20 |
| 1.4.2 Tests de significativité des paramètres estimés | 23 |
| 1.4.3 Test d’IIA | 24 |
| 1.4.4 Rapport de risque relatif | 25 |
| 1.5 Nature des données | 26 |
| 1.6 Interprétations économiques | 29 |
| 1.6.1 Consentement à payer et prix de réservation | 29 |
| 1.6.2 Taux d’actualisation implicite | 31 |
| 1.6.3 Demande indirecte, identité de Roy et modèle discret-continu | 32 |
| 1.7 Conclusion | 34 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2 | Mesure des contraintes dans le cadre du choix de chauffage | 36 |
| 2.1 | Modélisation des contraintes lors du choix de moyen de chauffage | 37 |
| 2.1.1 | Comment définir les contraintes ? | 37 |
| 2.1.2 | Présentation de la méthodologie | 42 |
| 2.1.3 | Choix du système de chauffage | 44 |
| 2.1.4 | Description des contraintes utilisées | 45 |
| 2.2 | Présentation des données | 47 |
| 2.3 | Résultats d'estimation | 52 |
| 2.3.1 | Résultats globaux pour les années 2006 et 2013 | 54 |
| 2.3.2 | Chauffage dans les maisons individuelles en 2006 | 55 |
| 2.3.3 | Chauffage dans les appartements en 2006 | 56 |
| 2.3.4 | Chauffage dans les logements en 2013 | 56 |
| 2.4 | Quels ménages ont les choix les plus contraints ? | 57 |
| 2.5 | Résultats de classification en groupes par l'algorithme Espérance-Maximisation | 59 |
| 2.6 | Degré des contraintes et implications pour les politiques énergétiques | 65 |
| 2.7 | Conclusion | 67 |
| 3 | Conception et mise en œuvre de l'enquête expérimentale | 69 |
| 3.1 | Méthodologie | 70 |
| 3.1.1 | Plan du travail | 70 |
| 3.1.2 | Méthode des plans factoriels | 73 |
| 3.1.3 | Quels attributs pour quels choix énergétiques ? | 76 |
| 3.1.4 | Les limites de l'enquête expérimentale | 79 |
| 3.2 | Conception du questionnaire | 80 |
| 3.2.1 | Contexte, objectif et structure du questionnaire | 81 |
| 3.2.2 | Situations expérimentales | 83 |
| 3.2.3 | Description des attributs | 86 |
| 3.3 | Résultats de l'enquête et statistiques descriptives | 92 |
| 3.3.1 | Consommation d'électricité et utilisation d'énergie | 94 |
| 3.3.2 | Chauffage et son utilisation | 95 |
| 3.3.3 | Confort thermique | 97 |
| 3.3.4 | Expériences de choix | 99 |
| 3.4 | Conclusion | 102 |
| 4 | Quelles sont les préférences des ménages pour les travaux de rénovation ? | 105 |
| 4.1 | Spécification globale des modèles | 105 |
| 4.1.1 | Utilité aléatoire | 106 |
| 4.1.2 | Spécification des effets | 108 |
| 4.1.2.1 | Effet revenu | 108 |
| 4.1.2.2 | Inertie des préférences | 109 |
| 4.1.2.3 | Montant d'investissement et signal de qualité | 110 |
| 4.1.2.4 | Confort thermique | 112 |
| 4.2 | Homogénéité des préférences | 113 |
| 4.2.1 | Situation 1 : choix du chauffage suite à une panne | 113 |
| 4.2.2 | Situation 2 : choix du chauffage et focus sur le financement des travaux | 115 |
| 4.2.3 | Situation 3 : choix d'un chauffage électrique suite à une panne | 118 |
| 4.2.4 | Situation 4 : choix des travaux de rénovation | 120 |

| | | |
|--|--|------------|
| 4.2.4.1 | Influence des attributs sur le choix de la rénovation | 122 |
| 4.2.4.2 | Influence des caractéristiques individuelles sur les alternatives de choix | 124 |
| 4.3 | Hétérogénéité des préférences | 127 |
| 4.3.1 | Modèle Logit Mixte ou à paramètres aléatoires | 127 |
| 4.3.1.1 | Situation 1 : choix du chauffage suite à une panne | 127 |
| 4.3.1.2 | Situation 2 : choix du chauffage et focus sur le financement des travaux | 130 |
| 4.3.1.3 | Situation 3 : choix d'un chauffage électrique suite à une panne | 132 |
| 4.3.1.4 | Situation 4 : choix des travaux de rénovation | 135 |
| 4.3.2 | Hétérogénéité discrète des préférences | 138 |
| 4.4 | Interprétations économiques des résultats | 140 |
| 4.4.1 | Taux d'actualisation implicite | 140 |
| 4.4.2 | Consentements à payer | 144 |
| 4.4.2.1 | Réduction de la facture de chauffage | 145 |
| 4.4.2.2 | Équipements de Chauffage | 145 |
| 4.4.2.3 | Réglage du chauffage | 147 |
| 4.4.2.4 | CAP pour les autres attributs | 148 |
| 4.4.2.5 | Prix de réservation pour les travaux de rénovation | 149 |
| 4.4.3 | Mesure des effets | 150 |
| 4.4.3.1 | Effet revenu | 150 |
| 4.4.3.2 | Inertie des préférences | 153 |
| 4.4.3.3 | Signal de qualité | 156 |
| 4.5 | Conclusion | 158 |
| Conclusion générale | | 160 |
| | Résultats des travaux effectués | 160 |
| | Pistes d'amélioration et perspectives pour de futurs travaux | 166 |
| A Résultats de la classification des ménages selon le degré des contraintes | | 169 |
| B Contenne du questionnaire internet, IPSOS 2015 | | 172 |
| C Statistiques descriptives de l'enquête IPSOS 2015 | | 185 |
| D Résultats intermédiaires d'estimation des préférences, IPSOS 2015 | | 187 |
| E Intervalles de confiance pour les consentements à payer | | 194 |
| Bibliographie | | 198 |

Liste des figures

| | | |
|------|---|-----|
| 1.1 | Logit Emboité à trois niveaux | 14 |
| 1.2 | Equivalence entre ρ^2 et R^2 | 21 |
| 2.1 | Zones climatiques d'après la définition de l'ENL 2006 | 49 |
| 2.2 | Le taux de croissance des prix des énergies entre 1983 et 2013 | 49 |
| 2.3 | Distribution des probabilités estimées pour les maisons individuelles en 2006 | 58 |
| 2.4 | Distribution des probabilités estimées pour les appartements en 2006 | 58 |
| 2.5 | Distribution des probabilités estimées pour les logements en 2013 | 59 |
| 2.6 | Boîtes à moustaches des probabilités estimées en 2006 et 2013 | 59 |
| 2.7 | Comparaisons des caractéristiques moyennes pour chaque moyen de chauffage dans les maisons individuelles en 2006 (à gauche), dans les appartements en 2006 (centre) et dans l'ensemble des logements en 2013 (à droite) | 60 |
| 3.1 | La présentation des tarifs d'électricité utilisés dans la situation 3 | 93 |
| 3.2 | Quelle est l'option de votre tarif d'électricité ? | 94 |
| 3.3 | Boîtes à moustaches des dépenses d'électricité par m^2 | 95 |
| 3.4 | Estimation par noyau de la distribution des dépenses par m^2 | 95 |
| 3.5 | Distributions des températures intérieures en fonction de la pièce chauffée | 98 |
| 3.6 | Cartographie des températures intérieures en fonction de l'âge du répondant | 98 |
| 3.7 | Le sentiment d'inconfort thermique en fonction de la température déclarée dans le séjour | 99 |
| 3.8 | La part des ménages qui refusent les travaux de rénovation en fonction de la tranche d'âge | 101 |
| 3.9 | Le montant moyen investi par tranche de revenu | 102 |
| 3.10 | Le taux de refus des travaux de rénovation par tranche de revenu | 102 |
| 3.11 | Les parts de marché de chaque alternative de choix par système de chauffage installé | 102 |
| 3.12 | L'âge moyen du répondant selon le système de chauffage installé | 102 |
| 3.13 | Les parts de marchés de chaque alternative de choix en fonction de l'inconfort thermique ressenti | 103 |
| 4.1 | Voici une série d'affirmations. Pourriez-vous dire pour chacune d'elles, si elles vous correspondent ? | 110 |
| 4.2 | Estimation par noyau des distributions des paramètres individuels (S1) | 129 |
| 4.3 | Estimation par noyau des distributions des paramètres individuels (S2) | 132 |
| 4.4 | Estimation par noyau des distributions des paramètres individuels (S3) | 134 |
| 4.5 | Estimation par noyau des distributions des paramètres individuels (S4) | 137 |
| 4.6 | CAP en € pour 1 % de réduction de la facture de chauffage dans les situations 1 à 4 | 146 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.7 | CAP en € pour les moyens de chauffage comparés à une chaudière gaz . . . | 147 |
| 4.8 | CAP en € pour les différents réglages du chauffage comparés au réglage manuel | 148 |
| 4.9 | CAP en € pour d'autres attributs | 150 |
| 4.10 | Les prix de réservations pour les différentes options de rénovation | 151 |
| 4.11 | Le taux d'acceptabilité du covoiturage en fonction de l'âge | 152 |
| 4.12 | Le taux d'acceptabilité du covoiturage en fonction du revenu | 152 |
| 4.13 | CAP en € pour l'inertie du chauffage ou sa gestion (réglage) | 154 |
| 4.14 | Degré d'inertie en fonction de l'âge (CAP en €) | 155 |

Liste des tableaux

| | | |
|------|---|-----|
| 1.1 | Rapport de Risque Relatif (exemple d'utilisation). | 25 |
| 1.2 | Comparaison entre les données des préférences révélées et préférences déclarées | 28 |
| 2.1 | Les variables d'environnement du ménage utilisées dans les modèles de choix discrets | 41 |
| 2.2 | Contraintes : Statistiques descriptives pour les variables continues | 48 |
| 2.3 | Contraintes : statistiques descriptives pour les variables qualitatives | 51 |
| 2.4 | Résultat d'estimation pour les maisons individuelles en 2006 | 52 |
| 2.5 | Résultat d'estimation pour les appartements en 2006 | 53 |
| 2.6 | Résultat d'estimation pour les logements en 2013 | 54 |
| 2.7 | La description des groupes cibles obtenus grâce à la classification EM | 61 |
| 2.8 | Les probabilités moyennes pour chaque alternative de choix et pour chaque groupe cible | 61 |
| 3.1 | La description des attributs utilisés dans les expériences de choix | 85 |
| 3.2 | Le nombre de ménages (%) qui ont changé de type de chauffage lors de l'installation du nouveau chauffage | 97 |
| 3.3 | Moyenne de l'investissement de l'offre choisie par le répondant en fonction de sa tranche de revenu | 100 |
| 4.1 | Résultat d'estimation du modèle MNL pour la situation 1 | 114 |
| 4.2 | Résultat d'estimation du modèle MNL pour la situation 2 | 117 |
| 4.3 | Résultat d'estimation du modèle MNL pour la situation 3 | 119 |
| 4.4 | Résultat du test IIA d'Hausman & McFadden pour le modèle complet avec l'ensemble des observation et le modèle restreint aux ménages qui ont choisi de faire les travaux | 122 |
| 4.5 | Résultats du modèle MNL pour la situation 4 (début) | 123 |
| 4.6 | Résultats du modèle MNL pour la situation 4 (fin) | 126 |
| 4.7 | Résultat d'estimation du modèle Logit Mixte pour la situation 1 | 129 |
| 4.8 | Résultat d'estimation du modèle Logit Mixte pour la situation 2 | 131 |
| 4.9 | Résultat d'estimation du modèle Logit Mixte pour la situation 3 | 134 |
| 4.10 | Résultat d'estimation du modèle Logit Mixte pour la situation 4 | 136 |
| 4.11 | Capacité d'estimation du Modèle des Classes Latentes (S1) | 139 |
| 4.12 | Capacité d'estimation du Modèle des Classes Latentes (S2) | 139 |
| 4.13 | Capacité d'estimation du Modèle des Classes Latentes (S3) | 139 |
| 4.14 | Taux d'actualisation implicites dans chaque situation expérimentale en fonction du logement occupé | 143 |
| 4.15 | Taux d'actualisation implicites dans chaque situation expérimentale en fonction du revenu du ménage | 143 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.16 | Comparaison des préférences des ménages entre les situations expérimentales | 165 |
| A.1 | Valeur du critère <i>BIC</i> pour la classification des habitants des maisons individuelles en 2006 | 169 |
| A.2 | Valeur du critère <i>BIC</i> pour la classification des habitants des appartements en 2006 | 169 |
| A.3 | Valeur du critère <i>BIC</i> pour la classification des logements en 2013 | 170 |
| A.4 | Probabilité moyenne pour chaque groupe et par moyen de chauffage | 171 |
| C.1 | Situation 1 – deux offres les plus et les moins choisies, IPSOS 2015 | 185 |
| C.2 | Situation 2 – deux offres les plus et les moins choisies, IPSOS 2015 | 185 |
| C.3 | Situation 3 – deux offres les plus et les moins choisies, IPSOS 2015 | 185 |
| C.4 | Statistiques descriptives pour les variables continues, IPSOS 2015 | 186 |
| C.5 | Statistiques descriptives pour les variables continues en %, IPSOS 2015 | 186 |
| D.1 | Resultats d'estimation pour la situation 1 en fonction de type du logement | 187 |
| D.2 | Resultats d'estimation pour la situation 1 en intégrant pas à pas les effets économiques | 188 |
| D.3 | Resultats d'estimation pour la situation 1 avec et sans effet revenu | 189 |
| D.4 | Résultats d'estimation pour la situation 2 selon le type du logement | 190 |
| D.5 | Résultats d'estimation pour la situation 2 en fonction d'acceptabilité de limiter le chauffage à 19C | 191 |
| D.6 | Resultats d'estimation pour la situation 2 avec et sans effet revenu | 192 |
| D.7 | Résultats intermédiaire d'estimation du modèle MNL (S4) | 193 |
| E.1 | Intervalles de confiance des CAP pour 1 % de réduction de la facture (€) | 195 |
| E.2 | Intervalles de confiance des CAP pour les moyens de chauffage (€) | 195 |
| E.3 | Intervalles de confiance des CAP pour les réglages du chauffage en maison (€) | 195 |
| E.4 | Intervalles de confiance des CAP pour les réglages du chauffage en appartement (€) | 196 |
| E.5 | Intervalles de confiance des CAP pour la garantie, l'énergie de chauffage et le montant d'aide (€) | 196 |
| E.6 | Intervalles de confiance des CAP pour la disponibilité d'aide, le prêt à taux 0 % et le DPE (€) | 196 |
| E.7 | Intervalles de confiance des prix de réservation pour les travaux de rénovation (€) | 196 |
| E.8 | Intervalles de confiance des CAP pour l'inertie de préférences (€/an) | 197 |

Liste des Abréviations

ADEME Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

AIC *Akaike Information Criterion*

ANAH Agence Nationale de l'Habitat

BBC Bâtiment à Basse Consommation

BFGS algorithme de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno

BHHH algorithme de Berndt-Hall-Hall-Hausman

BIC *Bayesian Information Criterion*

CAP Consentement A Payer

CAR Consentement A Recevoir

CED Chauffage électrique direct

CEREN Centre d'Etudes et de Recherches Economiques sur l'ENergie

CITE Crédit d'Impôt pour la Transition Energétique

DJU Degré Jour Unifié

DPE Diagnostic de Performance Énergétique

ECS Eau Chaude Sanitaire

EDF Electricité de France

EM algorithme Espérance-Maximisation

ENL Enquête Nationale Logement

GES Gaz à Effet de Serre

GPL Gaz de Pétrole Liquéfié

HLM Habitation à Loyer Modéré

IIA *Independence of Irrelevant Alternatives*

INSEE Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

LC Logement Collectif

MI Maison individuelle

MNL *Multinomial Logit Model*

NR algorithme de Newton-Raphson

PAC Pompe A Chaleur

RGE Reconnu Garant de l'Environnement

RRR Rapport de Risque Relatif

RT Réglementation Thermique

SLL *Simulated Log Likelihood*

VAN Valeur Actuelle Nette

Glossaire

| | |
|------------------------------|--|
| Attribut : | caractéristiques des offres qui permettent de comparer les alternatives de choix. Par exemple : source d'énergie, type de chauffage, montant d'investissement. |
| Offre : | combinaison des niveaux d'attribut qui forme une alternative de choix. |
| Trade-off : | un ensemble des alternatives de choix (offres) proposées à l'individu parmi lesquelles il doit choisir. |
| Situation de choix : | description de la situation hypothétique dans laquelle l'individu doit choisir. Il est possible de proposer à l'individu plusieurs Trade-Offs qui se déroulent dans la même situation de choix. |
| Choix non labellisé : | les alternatives de choix (offres) qui se distinguent qu'au niveau des attributs. Par exemple choisir un chauffage parmi les chauffages proposés. |
| Choix labellisé : | les alternatives de choix dont l'intitulé en soi influence le choix. Par exemple choisir quels travaux de rénovation entreprendre : améliorer le chauffage, améliorer l'isolation ou faire les deux à la fois. |
| L-M-A : | Méthode de conception de l'enquête avec les choix labélisés où L est le nombre des niveaux par attribut, M – nombre d'alternatives de choix, A – nombre d'attributs. |

Introduction

Contexte et enjeux

L'énergie est un bien indispensable au bon fonctionnement de l'ensemble des secteurs économiques. Un bien qui n'est pas toujours produit sur place, exposant ainsi les pays importateurs d'énergie aux risques d'approvisionnement. Ces risques correspondent à une dépendance vis-à-vis des fournisseurs d'énergie, ou à la volatilité des prix des énergies notamment pour les énergies fossiles. D'autre part, l'énergie est responsable d'environ deux tiers des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) qui sont à la source du changement climatique ([IEA, 2015](#)).

Dans ce contexte mondial, la France s'est engagée, comme les autres pays de l'Union Européenne, à réduire sa consommation d'énergie primaire de 20 % et à diviser par 4 en 2050 ses émissions de CO₂ par rapport au niveau de 1990 ([SEEIDD, 2015](#)). Le secteur des bâtiments (résidentiel et tertiaire) est le plus gros consommateur d'énergie finale (44 %), suivi par le secteur des transports (32 %) et l'industrie (20 %) ([ADEME, 2014b](#)). Afin d'atteindre les objectifs fixés, la France a décidé de réduire les consommations d'énergie dans tous les secteurs et tout particulièrement dans les bâtiments existants d'au moins 38 % d'ici 2020 ([SEEIDD, 2015](#)).

La maîtrise de la consommation d'énergie est un enjeu majeur pour atteindre les engagements pris et décliner une politique énergétique efficace. En effet, maîtriser la consommation énergétique revient à maîtriser une partie des émissions de GES. Or, comme nous l'avons indiqué, le secteur des bâtiments représente 44 % de la consommation d'énergie finale en France. Et entre 50 et 70 % de la consommation en énergie finale du secteur résidentiel provient du chauffage, dépendant de la performance énergétique du logement ([ADEME, 2014b](#)).

Historiquement, la performance énergétique d'un logement varie en fonction de la date de construction : plus le bâtiment est ancien, moins son isolation thermique est efficace et plus il est énergivore. Ainsi, la France, attachée à l'amélioration de ce facteur, accroît

régulièrement ses exigences pour le parc des bâtiments neufs. La première Réglementation Thermique (RT) a été adoptée en 1974 afin de réduire la consommation d'énergie. Cette RT a été motivée par la hausse des prix du pétrole, conséquence du choc pétrolier de 1973. Depuis, la RT est constamment améliorée entraînant le changement des standards de consommations qui sont passés de 225 kWhep/m².an pour les logements neufs en 1975 à 50 kWhep/m².an pour les logements construits depuis 2013¹. Néanmoins l'impact des RT sur la consommation d'énergie est limité car le parc ne se renouvelle que lentement. En 2014 la construction de 352 700² nouveaux logements a été commencée et environ 30 000 ont été détruits. Cela ne constitue qu'1 % du parc existant et donne lieu à un accroissement de la surface bâtie et non de son renouvellement (Traisnel *et al.*, 2010). Les logements construits avant la RT 1974 représentent aujourd'hui 55 % du parc existant. Si l'on suppose que les logements détruits sont tous construits avant 1974 et que le nombre détruit reste le même (30 000/an), il faudrait plusieurs siècles pour que le nombre de logements construits avant 1974 diminue considérablement en apportant un changement de consommation substantiel. A ce rythme il est impossible d'atteindre les objectifs fixés en se reposant uniquement sur logements neufs. Il est donc nécessaire d'associer à ces RT d'autres mesures, en améliorant la performance énergétique du parc existant et de réduire ses consommations.

Nous pouvons distinguer quatre leviers d'action au niveau du ménage pour la mise en œuvre de mesures destinées à la maîtrise de l'énergie dans les logements existants :

1. Améliorer l'isolation thermique du logement (réduire les besoins énergétiques).
2. Améliorer la performance des équipements en les remplaçant (réduire la consommation finale).
3. Recourir aux énergies renouvelables locales.
4. Changer les pratiques des habitants pour adapter un comportement permettant de réaliser ces économies d'énergie.

Ces actions font déjà l'objet de politiques gouvernementales (Charlier, 2012). Une RT spécifique aux bâtiments existants a été mise en place à partir de 2007. Elle établit des exigences sur la performance globale des bâtiments de plus de 1000 m² lors de travaux de rénovations lourds, ou des exigences « dites par éléments » sur la performance minimale des équipements installés pour la rénovation diffuse (chauffage, isolation, ventilation, etc.). Plusieurs politiques d'information sur les performances énergétiques des logements (Diagnostic de Performance Energétique - DPE) et des équipements (écolabel, étiquette haute performance) ont été implémentées. Elles ont pour but d'informer les ménages des opportunités en matière d'économie d'énergie et de les inciter à choisir le logement et/ou

1. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Chapitre-I-La-reglementation.html>
2. <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>

les équipements qui minimisent la consommation. Parmi les moyens incitatifs, nous pouvons mentionner les aides financières à la rénovation : le Crédit d'Impôt pour la Transition Énergétique (CITE)³, la réduction de la taxe sur la valeur ajoutée, les prêts à taux zéro. Pour ce qui concerne le comportement des ménages, nous retrouvons la loi qui préconise de limiter la température de chauffage à 19°C⁴ et les publicités sociales dont le but est d'informer le ménage et d'influencer son comportement (Kotler et Zaltman, 1971).

L'efficacité et l'utilité de la plupart des actions entreprises par le gouvernement dépendent du comportement du ménage. Les aides financières, qui représentent un coût pour l'état, sont acceptées par le ménage lorsqu'elles sont gratuites et d'obtention facile. Toutefois, dans le cas où le réel besoin d'aide n'est pas certain, on parlera d'effet d'aubaine : le ménage aurait réalisé les travaux si l'aide n'avait pas existé (SEEIDD, 2015). Nauleau (2014) évalue que le niveau de l'effet d'aubaine pour le CITE varie de 40 % à 85 % du nombre total d'aides accordées sur la période 2006 - 2011. Il existe donc un potentiel théorique d'optimisation de cette aide. Néanmoins nous ne connaissons jamais avec certitude qui, parmi les demandeurs, profitera de l'aide sans en avoir besoin. Il se peut également que l'aide ait permis au ménage d'investir dans des travaux de rénovation plus performants, déplaçant alors le marché non plus en volume mais en efficacité.

Un autre point important à considérer est le comportement et les préférences des ménages qui influencent les consommations d'énergie et qui peuvent niveler les effets des politiques gouvernementales. C'est par exemple le cas pour ce qui concerne les préférences pour le confort thermique. Ainsi, la préférence des ménages est en faveur d'une température intérieure de 20°C en moyenne, soit un degré de plus que la température préconisée par la loi (Dujin et Maresca, 2010). De plus, les travaux de rénovation réduisent le coût annuel de chauffage et peuvent encourager un ménage à augmenter sa température intérieure. Dans ce cas il est question de l'effet rebond (Allibe, 2012) qui est évalué entre 15 % et 20 % sur la base de déclaratif des ménages après rénovation énergétique (Allibe, 2012, Raynaud, 2014). Ce comportement peut être justifié si le ménage est en précarité énergétique ou restreint son niveau de chauffage faute de moyens financiers suffisants. La situation de restriction de niveau du chauffage est appelé l'effet pré-bond (*prebound* en anglais) (Galvin et Sunikka-Blank, 2016).

Finalement, l'ensemble des préférences des ménages pour les travaux énergétiques, ainsi que son environnement (situation personnelle, logement, etc.), jouent un rôle décisif dans l'adoption des nouvelles technologies et la décision d'entreprendre des travaux de rénovation énergétique. Prenons pour exemple illustratif les systèmes de chauffage. Le gouvernement encourage les ménages en proposant des aides financières pour l'installation de Pompes

3. Anciennement Crédit d'Impôt Développement Durable.

4. <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F32563>

A Chaleur (PAC) air/eau – eau/eau, de chauffage au bois ou de chaudières à gaz performantes (micro-cogénération, condensation) ([ADEME, 2015b](#)). Même si le nombre de logements équipés de PAC ou du chauffage au bois a progressé, cette progression n'est pas suffisante. D'après les données de l'enquête EDF R&D ⁵, le chauffage au bois et les PAC ne représentaient qu'environ 10 % des équipements utilisés comme moyen de chauffage principal en 2013. La vente des appareils de chauffage au bois (comprenant 60 % des ventes de poêles à bois) et des PAC reste stable ([ADEME, 2014b](#)). Quelles sont les raisons de cette faible progression ? Les ménages peuvent ne pas apprécier ces moyens de chauffage. Le montant de l'investissement pour ces systèmes peut être trop élevé et dépasser le prix maximal que le ménage est prêt à payer, ou bien le ménage peut manquer d'information sur ces nouveaux moyens de chauffage et a peur d'investir. Enfin, le ménage peut également rencontrer des contraintes, techniques ou autres, qui réduisent ses possibilités de choix (son environnement, sa situation financière ou la réglementation peuvent l'empêcher de réaliser ses projets de maîtrise d'énergie).

La problématique des préférences ne se restreint pas au chauffage. Nous retrouvons les mêmes questions face à la faible progression des travaux de rénovation sur l'enveloppe du bâtiment. D'après l'ADEME, en 2012, 12 % des ménages ont réalisé des travaux en vue d'améliorer la maîtrise de l'énergie. Les travaux les plus fréquents sont le changement de fenêtres, pour 33 %, tandis que l'isolation du toit représente 19 %, l'isolation des murs 13 % et le changement du chauffage 25 %. Il a été établi que ces choix observés des ménages ne se font pas selon la rentabilité économique au seul titre des économies d'énergie ([Laurent et al., 2011](#)).

Si l'on veut atteindre l'ensemble des gisements d'économie d'énergie, il est donc nécessaire de connaître les préférences et les contraintes des ménages pour proposer des politiques énergétiques adéquates.

Motivations de recherche

Compte tenu de la part importante qu'il occupe dans les consommations d'énergie, le secteur résidentiel a fait l'objet de nombreuses études, et en particulier plusieurs thèses ([Cayla \(2011\)](#), [Raynaud \(2014\)](#), etc.) réalisées entre 2000 et 2015 dans le contexte français. Ces travaux se sont concentrés sur l'amélioration de la maîtrise de l'énergie dans les logements existants d'un point de vue à la fois économique et technologique. Ces études ont permis d'affiner la compréhension du secteur, de proposer des solutions d'amélioration des politiques énergétiques et de comprendre si les objectifs en matière de réduction de la

5. La base des données est présentée dans le Chapitre 2.

consommation d'énergie et des émissions de GES étaient atteignables. Pour mieux comprendre comment l'éclairage apporté par nos travaux de recherche apporte des éléments complémentaires et supplémentaires par rapport à ces travaux, nous proposons de revisiter brièvement les plus récents d'entre eux. Ainsi nous parcourrons les travaux de recherche de [Raynaud \(2014\)](#), [Allibe \(2012\)](#) et [Cayla \(2011\)](#) qui, comme cette thèse, ont été menés dans le cadre de conventions CIFRE avec EDF R&D, et dans la continuité desquels nous nous inscrivons. Puis, nous parcourrons les travaux de [Giraudet \(2011\)](#), [Charlier \(2012\)](#) et [Risch \(2013\)](#) qui se sont concentrés sur les instruments d'incitation à l'amélioration de la maîtrise d'énergie dans le secteur résidentiel.

[Cayla \(2011\)](#) modélise conjointement le secteur résidentiel et le secteur des transports dans un modèle *bottom-up* d'optimisation de type TIMES afin de proposer un exercice d'analyse prospective de l'évolution de ces secteurs à l'horizon 2050. Pour cela, l'auteur réalise une enquête auprès de 2000 ménages représentatifs pour affiner le modèle existant et intégrer les comportements des ménages. Cette enquête lui permet de faire une classification des ménages en 15 types différents. L'auteur étudie alors l'influence du revenu et des caractéristiques sociodémographiques sur la consommation de chauffage et le choix des équipements énergétiques.

Dans son travail de thèse, [Giraudet \(2011\)](#) utilise à la fois un module technico-économique de type *bottom-up* et un modèle d'équilibre général IMACLIM-R. Il étudie l'impact de l'effet rebond, du taux d'actualisation et propose une analyse coût-efficacité des instruments politiques qui visent à améliorer la maîtrise de l'énergie. Il se concentre dans l'un des chapitres de sa thèse sur l'étude empirique du dispositif de certificats blancs. Ce dispositif a pour but d'obliger les opérateurs énergétiques à promouvoir les mesures d'efficacité énergétique auprès de leurs clients.

Dans ses travaux [Allibe \(2012\)](#), quant à lui, développe un modèle technico-économique du secteur résidentiel qui intègre les comportements de chauffage des ménages français notamment pour étudier et comprendre l'effet rebond. Les scénarios prospectifs (2030-2050) issus de ce modèle montrent que les moyens mis en œuvre actuellement ne permettent pas d'atteindre les objectifs fixés par les politiques énergétiques. Il met en évidence que les consommations théoriques, p.ex. DPE, sont surestimées. Or, ce sont ces consommations-là qui sont souvent utilisées à tort pour calculer les gains énergétiques à l'issue des travaux de rénovation. L'auteur souligne qu'il est nécessaire de prendre en compte l'hétérogénéité des préférences des ménages, et pas uniquement l'hétérogénéité de la performance énergétique des logements.

[Charlier \(2012\)](#) étudie les déterminants des investissements en travaux de rénovation énergétique dans les logements français. Elle propose d'abord une étude économétrique des dépenses en travaux de rénovation. Ensuite, l'auteur analyse le problème des incitations

divergentes des politiques publiques et l'irréversibilité des travaux de rénovation. Cette irréversibilité, par exemple, empêche les locataires de bénéficier pleinement des résultats des travaux. Une étude prospective à l'horizon 2050 est proposée pour analyser la faisabilité des politiques existantes. L'auteur en déduit que le CITE est une des mesures les plus efficaces, bien que non suffisante pour atteindre les objectifs fixés.

La thèse de [Raynaud \(2014\)](#) propose une évaluation *ex-post* des travaux d'efficacité énergétique entrepris dans les maisons individuelles. L'un des buts est de mettre en évidence les montants des économies d'énergie après les travaux de rénovation. L'auteur cherche à comprendre les écarts entre les consommations simulées et les consommations réelles obtenues après les travaux. Les données utilisées dans cette thèse montrent bien qu'il y a des économies d'énergie après les travaux, mais avec une grande variation des niveaux pour la même action. Cette dispersion des niveaux est notamment due aux changements de la température de chauffage après les travaux et au fait que d'autres travaux sont faits en même temps dans certains cas. Les écarts entre les consommations d'énergie observées avant et après les travaux sont principalement dus à la différence de la performance de l'enveloppe thermique du bâtiment.

La consommation d'énergie dans le résidentiel est le sujet d'étude de [Risch \(2013\)](#). L'auteur propose d'abord une estimation de la consommation d'énergie à l'aide d'un modèle discret-continue qui estime, d'une part, la probabilité d'avoir chez soi différents moyens de chauffage, et, d'autre part, la consommation d'énergie par m^2 . Puis, elle étudie les impacts des instruments d'incitation sur les travaux de rénovation énergétique. Une étude empirique de l'impact du CITE sur les travaux de rénovation entre 2001-2008 montre que le CITE a permis d'augmenter le taux des travaux réalisés, mais de 1 % seulement. L'auteur met en évidence que l'effet d'aubaine du CITE est grand : de l'ordre de 79 % en 2005-2008. Par ailleurs, l'auteur observe la hausse du coût des travaux de +25 %, cette hausse serait due à la mise en place du CITE.

Nous pouvons citer aussi les travaux de [Bourdon \(2003\)](#) qui a fait plusieurs études micro-économétriques sur les substitutions entre énergies dans le résidentiel à l'aide d'une modélisation Translog et les modèles de choix discrets. Ou encore la thèse de [Nauleau \(2015\)](#) qui analyse les déterminants des investissements dans les travaux de rénovation énergétique, et qui propose un modèle de choix d'investissement et estime l'efficacité des politiques énergétiques. Elle trouve, par exemple, que l'effet d'aubaine touche 40 à 85 % des travaux de rénovation subventionnés par CITE. Cela rejoint les résultats de [Risch \(2013\)](#). En dehors de ces travaux de thèse, nous pouvons citer [Couture et al. \(2012\)](#) qui étudient le choix et la consommation du bois de chauffage dans la région Midi-Pyrénées, en utilisant, comme [Risch \(2013\)](#), un modèle discret-continu. Par ailleurs, [Bousquet et Vielle \(2008\)](#)

font une étude micro-économétrique sur le choix des énergies de chauffage lors de l'achat d'un logement neuf.

Ces quelques exemples illustrent bien une orientation des recherches, ces dernières années, vers la compréhension et la modélisation du secteur résidentiel, l'intégration des comportements des ménages et l'analyse des politiques énergétiques. Quant aux scénarii prospectifs, les travaux de recherche sont unanimes : il est impossible d'atteindre les objectifs fixés par les politiques énergétiques avec les moyens mis en place actuellement.

L'ensemble de ces études souligne qu'il est nécessaire de tenir compte des comportements et des préférences des ménages dans la modélisation de la consommation d'énergie dans les logements. Mais jusqu'à présent les préférences des ménages français lors du choix des travaux de rénovation énergétique restent peu connues. Ceci est principalement dû au manque de données. Il existe plusieurs bases de micro-données riches en information, comme l'Enquête Nationale Logement (ENL) fait par l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE). Elles donnent une information détaillée sur le logement, le chauffage installé, le niveau d'isolation et les travaux effectués. Mais elles n'informent ni sur le processus du choix, ni sur les alternatives de choix auxquelles le ménage fait face. Compte tenu de ces constats, nous proposons dans cette thèse de placer l'analyse des préférences des ménages français pour les travaux de rénovation énergétique au cœur du notre travail de recherche.

Organisation du travail

Notre travail de recherche est avant tout un travail empirique et vise les trois objectifs suivants pour le périmètre français :

1. La construction ou la recherche de bases des données qui retranscrivent le processus du choix de travaux de rénovation.
2. L'analyse empirique des préférences des ménages pour les différents travaux de rénovation.
3. L'étude des contraintes que rencontrent le ménage et qui réduisent les choix possibles.

Le but est d'améliorer la compréhension des préférences des ménages français grâce à des résultats qui pourront être utilisés par les pouvoirs publics, par les modélisateurs pour calibrer les modèles existants et par les professionnels du secteur énergétique.

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons choisi d'utiliser une approche basée sur les modèles de choix discrets dédiés à la compréhension des préférences des ménages et avons réalisé une enquête expérimentale afin d'obtenir les données nécessaires à notre analyse. Les enquêtes expérimentales permettent de placer le répondant dans une situation hypothétique de

choix en lui demandant de choisir parmi les offres proposées. Cette méthode permet non seulement d'avoir une bonne vision du processus de choix, mais aussi de proposer des offres ou des caractéristiques d'offres qui n'existent pas encore. Quant aux modèles de choix discrets, ils s'appuient sur le concept de l'utilité aléatoire : le choix de l'individu est appréhendé de façon probabiliste. Cela signifie qu'il est considéré qu'à chaque alternative de choix soit associée la probabilité que cette alternative soit retenue.

Les modèles de choix discrets utilisent les enquêtes expérimentales quand il est difficile, voire impossible, de retranscrire le processus réel de choix. Ces modèles, ainsi que l'économétrie qualitative⁶, ont déjà été utilisés pour comprendre les choix des ménages dans le secteur résidentiel, y compris dans les travaux de recherches présentés précédemment (Bourdon, 2003, Charlier, 2012, Nauleau, 2015, Risch, 2013). Dans le cas des travaux de rénovation, seules les données sur la situation du ménage, les caractéristiques techniques de son logement et parfois ses attitudes ont été utilisées. En conséquence il a été supposé que l'environnement du ménage peut expliquer indirectement le choix effectué. Or, dans les faits, ces études ne permettent pas de statuer sur le fait que le choix est le résultat de contraintes ou de préférences.

Nous avons organisé le travail autour des 4 questions de recherche suivantes :

Question de recherche 1 : *Quels sont les apports possibles des modèles de choix discrets pour comprendre le choix des travaux de rénovation en France ?*

Avant de procéder à l'analyse micro-économétrique des préférences et des contraintes des ménages, il est important de comprendre les apports théoriques possibles des modèles de choix discrets. Tout d'abord nous aimerions savoir ce que le concept de l'utilité aléatoire apporte à la théorie du consommateur, y compris pour l'achat des biens et services énergétiques. Dans un second temps, il s'agira de déterminer les modèles les plus adaptés à l'étude des préférences des ménages lors du choix des travaux de rénovation, ainsi que les différentes applications économiques potentielles auxquelles ils pourront être appliqués.

Question de recherche 2 : *Comprendre l'environnement du ménage. Quelles sont les contraintes ? Qui est contraint ? Combien de ménages n'ont pas le choix ? Est-ce que toutes les contraintes sont des contraintes ?*

Le faible taux des travaux de rénovation peut être expliqué par les contraintes et les barrières que rencontrent les ménages. Plus il y a de contraintes, moins le ménage a de choix. Il peut s'agir de contraintes purement techniques : par exemple un ménage n'installe pas le chauffage au gaz si le logement n'est pas raccordé au réseau de gaz ou si le coût de

6. Le modèle aux variables dépendantes qualitatives sont, du point de vue mathématique, les mêmes ou proches des modèles de choix discrets. Le modélisateur estime la probabilité qu'un état se réalise ou non. Mais l'utilisation et l'interprétation sont plus larges. Par exemple, le modèle Logit est utilisé en apprentissage automatique pour faire une classification non supervisée des données.

raccordement est trop élevé (contrainte financière). Il peut aussi exister des contraintes réglementaires qui interdisent ou obligent le ménage à faire certains travaux. Par exemple, pour faire une rénovation par l'extérieur d'un logement, le ménage doit obtenir l'accord de sa municipalité et parfois des architectes des Bâtiments de France. Et enfin, le ménage doit parfois se plier à des contraintes dues à sa situation : par exemple s'il est locataire, il n'a pas le droit de faire de travaux sans l'accord du propriétaire du logement. Notre objectif est de proposer une méthodologie qui permettra d'analyser ces contraintes, de détecter quels ménages sont contraints, ainsi que leur profil. A notre avis, il est important d'analyser les contraintes en même temps que les préférences, parce qu'il n'est pas toujours possible de distinguer une contrainte d'une préférence. Les pouvoirs publics peuvent proposer des incitations financières ou mettre en place des dispositifs dont le but est de lever ces contraintes. Une dépense peut se révéler inutile si la contrainte est en réalité une préférence. Reprenons ici, pour illustration, l'exemple de l'accès au gaz de réseau. Certes le ménage ne peut pas installer une chaudière gaz s'il n'a pas accès au gaz de réseau. Mais il est possible que de toute façon il ne désire pas le gaz et qu'il n'aurait jamais envisagé d'installer ce type de chaudière même si son logement avait été connecté au réseau. Dans ce cas l'accès au réseau n'est pas une contrainte. Si l'état propose une aide financière pour faciliter le raccordement au gaz de réseau, le ménage ne l'utilisera pas parce qu'il n'est, de toute façon, pas intéressé par ces travaux. Et cependant, la mise en place de ce dispositif a un coût pour le gouvernement.

Question de recherche 3 : *Quelles sont les préférences des ménages pour les travaux de rénovation ?*

L'objet principal de cette thèse est de découvrir les préférences des ménages français pour leur système de chauffage et les autres travaux de rénovation (i.e. isolation). Nous aimerions connaître quels moyens de chauffage, ou quelle source d'énergie, le ménage préfère. Est-ce que certaines catégories de travaux sont plus appréciées que d'autres et pourquoi ? Est-ce que les aides qui existent déjà influencent la décision du ménage et si oui, dans quelle mesure ? Quelles autres préférences jouent un rôle clé lors du choix des travaux liés à la maîtrise de l'énergie ?

Question de recherche 4 : *Combien le ménage est prêt à payer pour les travaux de rénovation ? Est-ce que ce montant est suffisant pour couvrir le coût réel des travaux ?*

Cette dernière question de recherche consiste à exprimer les préférences des ménages en valeurs monétaires. Tout d'abord nous aimerions savoir comment le revenu du ménage influence ses choix, si le revenu est une contrainte et dans quelle mesure. Puis nous sommes intéressés par les Consentements A Payer (CAP) des ménages et le niveau du taux d'actualisation implicite qui reflète les préférences des ménages pour le présent. Ces deux derniers indicateurs peuvent être déduits directement des modèles de choix discrets.

En répondant à la question 2 nous contribuons au niveau méthodologique en proposant une approche sur l'analyse des contraintes que rencontre le ménage. Tandis que les questions de recherche 3 et 4 contribuent de façon empirique à la compréhension des préférences des ménages français lors du choix des travaux de rénovation.

Structure de la thèse

Le présent manuscrit est divisé en 4 chapitres. Dans chaque chapitre nous tenons à répondre aux questions de recherche énoncées précédemment.

Dans le **Chapitre 1** nous présentons la théorie du consommateur et la place des modèles de choix discrets dans cette théorie. Nous présentons en détail les modèles utilisés, la procédure d'estimation et les mesures de performances qui permettent de juger de la qualité des modèles estimés. Nous finissons le chapitre en présentant les interprétations économiques possibles des modèles de choix discrets.

Le **Chapitre 2** est consacré à l'étude des contraintes que rencontrent les ménages et qui les empêchent de choisir librement. Nous commençons par une revue de la littérature et listons les contraintes potentielles. Ensuite nous proposons une méthode qui permet d'étudier les contraintes et d'en déduire les profils des ménages contraints. Le chapitre se conclut par une étude empirique des contraintes des ménages français lors du choix des moyens de chauffage en nous basant sur des enquêtes réalisées en 2006 et 2013.

Le **Chapitre 3** présente la méthodologie et la conception de notre enquête expérimentale. Après avoir analysé les enquêtes existantes dont le sujet d'étude est proche du nôtre, nous expliquons comment l'enquête a été conçue. Le chapitre se termine par la présentation de résultats descriptifs de l'enquête qui nous donnent les premières indications sur la situation et les préférences des ménages.

L'analyse économétrique des préférences à partir de l'enquête expérimentale est au cœur du **Chapitre 4**. Nous entamons cette partie avec la spécification des modèles pour chaque situation de choix et présentons les différents effets économiques à tester. L'étude économétrique commence par des estimations des modèles simples où les préférences des ménages sont considérées être homogènes. Ensuite nous intégrons la variation des préférences individuelles. A la fin du chapitre nous analysons l'efficacité des différentes méthodes utilisées et les améliorations possibles. Nous continuons dans le même chapitre d'analyser les préférences des ménages et les résultats des estimations obtenus précédemment. L'objectif est d'analyser les différents effets économiques. Nous commençons par les taux d'actualisation

implicites, les consentements à payer et les prix de réservations. Cette analyse « monétaire » est suivie par l'étude de l'inertie des préférences des ménages et du signal-qualité pour les travaux de rénovation.

Contributions écrites et orales

Ces travaux de thèse ont été l'objet de publications sous forme de documents écrits et de participation à des conférences.

1. Conférence Proceedings :
 - “*Stated Preferences for Space Heating Investment*”, E. Stolyarova, D. Osso, H. Le Cadre et B. Allibe – **EcoMod 2015** – Boston – 16/07/2015
2. Documents de travail :
 - “*Residential Space Heating Determinants and Supply-Side Restrictions : Discrete Choice Approach*”, E. Stolyarova, H. Le Cadre, D. Osso, B. Allibe et N. Maïzi – en préparation pour **Energy Policy**
3. Participation à des conférences scientifiques :
 - “*Stated Preferences for Space Heating Investment*”, E. Stolyarova, D. Osso, H. Le Cadre, B. Allibe – **EcoMod 2015** – Boston – 16/07/2015
 - “*Renovation and Energy-related Household Behaviors in French Dwellings*”, E. Stolyarova, D. Osso, H. Le Cadre – **10th Conference on Energy Economics and Technology (ENERDAY)** – Dresde – 17/04/2015
 - “*Determinants of Household Energy Consumption in France : Behavior Approach*”, E. Stolyarova, H. Le Cadre, D. Osso, B. Allibe et N. Maïzi – **14th IAEE European Conference** – Rome – 31/10/2014
 - “*Determinants of Household Energy Consumption in France : Behavior Approach*”, E. Stolyarova, H. Le Cadre, D. Osso, B. Allibe et N. Maïzi – **6th FAEE Student Workshop** – Paris – 04/07/2014
 - “*Les choix énergétiques des ménages français dans le secteur résidentiel : approche par les modèles de choix discrets*”, E. Stolyarova, H. Le Cadre, D. Osso, B. Allibe et N. Maïzi – **ROADEF 2014** – Bordeaux – 26/02/2014

Chapitre 1

Utilité aléatoire pour modéliser les préférences des ménages

Les modèles de choix discrets, appelés également utilité aléatoire, constituent un vaste domaine de recherche proposant maintes applications économiques qui complètent la compréhension des choix. Par exemple [Hensher *et al.* \(2005\)](#) utilisent les modèles de choix discrets pour estimer les montants que les ménages australiens sont prêts à payer pour les différents niveaux des services de distribution d'eau. [Aksoy-Pierson *et al.* \(2013\)](#) analysent l'équilibre de marché sous la concurrence en prix. L'utilité aléatoire permet de construire les fonctions de demande des différents segments du marché. [Greene et Liu \(1988\)](#), quant à eux, estiment la variation du surplus des consommateurs américains pendant la période 1978–1985 pour l'achat d'automobile. [Hausman \(1979\)](#) calcule le taux d'actualisation lors de l'achat des climatiseurs en utilisant les résultats d'estimation de l'utilité aléatoire.

Dans ce chapitre nous exposons notre méthodologie de modélisation. Nous commencerons par rappeler rapidement quelle est la place des modèles de choix discrets dans la théorie du consommateur. Puis nous présenterons les modèles économétriques utilisés tout au long de la thèse. Le choix de ces modèles a été dicté par la nature des données et le sujet traité, ainsi que par les résultats d'estimations. Nous y reviendrons plus en détails dans les chapitres consacrés aux résultats (Chapitre 2 et Chapitre 4). Le lecteur intéressé par l'ensemble des modèles à utilité aléatoire pourra consulter les livres de [Train \(2009\)](#) ou [Ben-Akiva et Lerman \(1985\)](#). La description des modèles de choix discrets est suivie par une liste des mesures de performance pour juger de la qualité des modèles. La section suivante nous permet d'aborder le problème des données utilisées pour les estimations. Il arrive souvent que les données qui retracent la situation du choix avec toutes les alternatives ne soient pas disponibles ou difficiles à obtenir. Dans ce cas le modélisateur pourra réaliser une enquête expérimentale dont le but est de proposer aux enquêtés de faire un choix hypothétique.

Le chapitre se termine par les interprétations économiques possibles des modèles de choix discrets.

1.1 Théorie du consommateur et modèles de choix discrets

Le choix du consommateur est au cœur de la problématique économique. Afin de comprendre les décisions du consommateur, il est important de connaître à la fois les préférences des consommateurs par rapport au bien ou service proposé et également le mécanisme de décision. La théorie néoclassique postule que chaque choix procure un certain niveau de satisfaction au consommateur, appelé l'utilité et représentée par une fonction mathématique. Cette fonction d'utilité aide à classer les choix possibles par ordre de préférence et à choisir celui, qui apporte le plus d'utilité et qui satisfait la contrainte budgétaire. Ainsi définie, la fonction d'utilité doit satisfaire l'hypothèse de rationalité de l'individu. L'individu est rationnel s'il peut comparer tout couple de bien ou service (critère de complétude). Les préférences doivent être transitives, c'est-à-dire si le bien a est préféré au bien b et si le bien b est préféré au bien c , alors le bien a est préféré au bien c . Et, finalement, un bien doit pouvoir être comparé à lui-même (critère de réflexivité). Par conséquent, la théorie néoclassique présume que les choix sont déterministes ([de Palma et Tisse, 1987](#)).

Néanmoins, en regardant les situations réelles de choix, les choses ne sont pas si simples. Les consommateurs ne sont pas constants lors de choix répétés dans des circonstances similaires. Le choix peut résulter d'une décision impulsive et non rationnelle. Les individus peuvent avoir des comportements altruistes ou manquer d'information ce qui empêchera de choisir le bien qui maximisera l'utilité. Si le choix est fait en commun par plusieurs décideurs, la transitivité des préférences n'est plus vérifiée. Ce paradoxe est énoncé par Condorcet en 1785 et prouvé mathématiquement par [Arrow \(1950\)](#). L'individu peut oublier de prendre en compte tous les facteurs ou il peut se tromper dans ses jugements.

L'énergie et les équipements utilisant l'énergie ne font pas exception à ces observations. Dans les logements l'énergie n'est pas toujours achetée directement en tant qu'un bien distinct, que le ménage peut stocker et utiliser en quantité plus ou moins précise. Si cela peut être le cas du fioul, du GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) ou du bois (énergies de stock), ce n'est plus le cas de l'électricité et du gaz de réseau (énergies de réseau ou de flux). Ces deux énergies sont utilisées pour faire fonctionner plusieurs appareils à la fois et de ce fait il est impossible de savoir directement quel appareil a consommé quelle quantité d'énergie et à quel moment sans installer des compteurs de consommation électrique. Par ailleurs les factures d'électricité et de gaz, telles qu'elles existent en France, sont un moyen assez peu efficace pour suivre sa consommation. Prenons l'exemple de l'électricité. Les factures sont soit mensuelles établies grâce à une estimation de la consommation annuelle basée sur la

consommation de l'année précédente et vérifiée par un relevé du compteur une à deux fois par an. Soit trimestrielles avec deux relevés du compteur et la possibilité de déclarer par soi-même le relevé. A défaut des moyens techniques qui enregistrent régulièrement le relevé du compteur, le ménage devra le faire manuellement s'il veut suivre sa consommation de près. Ou encore il peut adopter une stratégie qui consiste à minimiser d'abord la consommation des gros équipements aux usages fréquents (Desjeux, 1996).

Les équipements utilisant l'énergie (ou qui l'économisent) sont variables. Certains, comme par exemple le système de chauffage, entraînent des dépenses d'installation qui dépassent le revenu mensuel du ménage et sont considérés comme de l'investissement. Utilisant des études empiriques, les chercheurs notent que certains équipements avec un bon rapport coût-efficacité sont négligés par le consommateur et ont, contre toute logique, une faible part de marché. Ce paradoxe est appelé le paradoxe de l'efficacité énergétique et a plusieurs explications (Jaffe et Stavins, 1994). Les ménages pourront subir un manque d'informations sur les nouvelles technologies et considérer que la recherche de l'information est trop coûteuse. Le coût de l'équipement en termes des dépenses d'énergie pourrait être négligeable et ne pas être le critère de décision. Si en moyenne l'équipement est intéressant du point de vue de l'investissement, il peut ne pas l'être pour une partie des ménages. Il faut noter aussi que l'acheteur de l'équipement n'est pas toujours celui qui l'utilise. C'est le cas des logements loués. Les propriétaires bailleurs ne sont pas intéressés par les investissements en efficacité énergétique du moment que les dépenses d'énergie sont à la charge du locataire. Inversement, le locataire n'est pas prêt à financer l'investissement en intégralité si la durée d'occupation du logement est courte.

En tenant compte des limites de la théorie néoclassique exposées plus haut, les chercheurs ont développé des modèles de choix discrets à utilité aléatoire dans lesquels les choix sont appréhendés de façon probabiliste. Les psychologues sont les premiers à considérer les choix comme étant stochastiques. Fechner (1948) introduit pour la première fois l'hypothèse que les actions d'un individu peuvent être décrites par une variable discrète qui vaut 1 si l'action se produit ; 0 sinon. Thurstone (1927) développe le modèle à l'utilité aléatoire pour décrire la variabilité des réactions d'un individu au même stimulus physique. Luce (1959) propose le modèle aux décisions stochastiques et introduit l'axiome de choix pour formaliser les relations entre les probabilités (voir encadré 2.1). Marschak (1960) interprète le stimulus psychologique comme une utilité dérivée du processus de maximisation. Tversky (1972) considère que la procédure stochastique de choix est faite par une élimination successive des alternatives de choix. En partant des modèles de choix discrets utilisés en psychologie, les économistes proposent une approche conceptuellement différente introduite par McFadden (1974).

Ce dernier considère non plus les individus les uns indépendamment des autres, mais comme une population confrontée à la même situation de choix dans des conditions comparables. Ces individus présentent des similitudes de sorte qu'il est finalement possible de déduire les comportements communs de la population en utilisant un échantillon représentatif de celle-ci. Les comportements pourront être expliqués par les caractéristiques des actions à choisir, par l'environnement de choix ou, par exemple, par les facteurs sociodémographiques. Il n'y a qu'une partie de ces variables qui est observable par le modélisateur. Alors, comme le soulignent [de Palma et Tisse \(1987\)](#), « *le modélisateur peut, au mieux, prédire le comportement d'un individu à une fonction de probabilité près* ».

Encadré 2.1 : L'axiome de Luce et IIA

L'indépendance des alternatives non-pertinentes (IIA) est un axiome fondamental de la théorie décisionnelle. Si l'action A est préféré à l'action B , l'ajout d'une action supplémentaire C ne peut changer l'ordre de préférence entre A et B .

[Luce \(1959\)](#) propose l'axiome relatif aux probabilités de choix qui lui permet de déduire les utilités associées aux actions. Cette axiome reflète l'idée que l'individu élimine d'abord une partie des actions qui sont peu probables (apportant peu d'utilité), puis choisit l'action optimale parmi celles qui restent.

Notons R , T et S les ensembles de choix qui vérifient $R \in T \in S$:

i) Si pour $\forall a \in R$ et $\forall b \in S$ nous avons $\mathbb{P}(a, b) \neq 0, 1$ alors :

$$P_s(R) = P_T(R)P_S(T)$$

$$\frac{P_S(R)}{P_S(T)} = P_T(R)$$

C'est-à-dire : si on est en présence d'un ensemble d'actions dont chacune a une probabilité de réalisation non nul et non absolue, alors la probabilité que R soit choisi dans S est indépendante du sous ensemble T contenant R dans le processus de sélection à deux étapes (d'abord on choisit une partie T de l'ensemble S , puis une action de l'ensemble R).

ii) S'il existe des actions $a \in S$ pour lesquelles la probabilité d'être choisit est nulle, on peut les éliminer sans affecter les probabilités de choix dans S .

1.2 Utilité aléatoire

Cette section a pour but de présenter le principe et la notation générale de l'utilité aléatoire. Prenons une population de N décideurs où chaque individu $n \in N$ a une utilité déterministe. Ces décideurs font face à un ensemble J des choix possibles, qui sont mutuellement exclusifs et exhaustifs. Ces choix sont discrets et en nombre fini $j = 1, 2, \dots, J$. Alors à chaque choix j le décideur n associe une utilité U_{nj} . Le modélisateur qui observe les choix n'a pas une information parfaite sur l'environnement du choix et les individus. Et il n'a pas une connaissance parfaite de la forme de la fonction d'utilité. L'utilité U_{nj} est dédoublée en V_{nj} , qui est une partie observable par le modélisateur, et en ξ_{nj} qui ne l'est pas. Dans ce cas ξ_{nj} est le terme aléatoire continu. U_{nj} est, par conséquent, une utilité aléatoire qui s'écrit comme suit :

$$U_{nj} = V_{nj} + \xi_{jn} \quad (1.1)$$

La partie observée par le modélisateur V_{nj} est expliquée tout d'abord par les attributs X_{nj} qui caractérisent chaque choix j et permettent à l'individu n de comparer les alternatives. Afin de compléter la partie observée, il est possible d'y ajouter les caractéristiques Z_n propres aux individus, mais invariantes aux alternatives de choix (comme par exemple le niveau de revenu). La fonction $V_{nj} = V(X_{nj}, Z_n)$ est l'utilité représentative dont la forme fonctionnelle et les liens entre les variables X_{nj} et Z_n dépendent de paramètres inconnus que le modélisateur est amené à estimer (Train, 2009). En supposant que l'utilité aléatoire suit toujours le principe de maximisation, on peut en déduire que l'alternative i est choisie si et seulement si $U_{ni} > U_{nj}, \forall j \neq i$ (Marschak, 1960). Et la probabilité que l'individu n choisisse l'alternative i est donnée par :

$$P_{ni} = \mathbb{P}(U_{ni} > U_{nj}, \forall j \neq i) \quad (1.2)$$

$$= \mathbb{P}(V_{ni} + \xi_{ni} > V_{nj} + \xi_{nj}, \forall j \neq i) \quad (1.3)$$

$$= \mathbb{P}(\xi_{ni} - \xi_{nj} > V_{nj} - V_{ni}, \forall j \neq i) \quad (1.4)$$

En partant de l'équation (1.4) et en notant $f(\xi_n)$ – la densité jointe associée au vecteur de l'utilité non observable $\xi'_n = \langle \xi_{n1}, \xi_{n2}, \dots, \xi_{nj}, \dots, \xi_{nJ} \rangle$, on réécrit la probabilité cumulative :

$$P_{ni} = \int_{\xi} \mathbb{1}(\xi_{nj} - \xi_{ni} > V_{ni} - V_{nj}, \forall j \neq i) f(\xi_n) d\xi_n \quad (1.5)$$

Où $\mathbb{1}$ est une fonction indicatrice, qui vaut 1 si l'expression entre les parenthèses est vérifiée, 0 sinon. La probabilité est une intégration multidimensionnelle sur la densité de probabilité de l'utilité non observable $f(\xi_n)$. La loi de probabilité, utilisée par le modélisateur, définit la formulation du modèle de choix discrets. On y retrouve deux grandes familles : les modèles

Probit (Bliss, 1934) où ξ_n suit la loi normale et les modèles de la famille **Logit** (Berkson, 1944), où ξ_n est distribuée suivant la loi de Gumbel des valeurs extrêmes.

D’une part la définition universelle pour les modèles de choix discrets implique que l’ordre de préférence est stable par addition et multiplication. Cette propriété est utilisée dans les modèles Logit pour normaliser l’utilité par un paramètre de position $\mu = 0$ afin d’obtenir la loi Gumbel standard et simplifier ainsi le calcul des probabilités. D’autre part, ce qui compte c’est la différence entre les valeurs d’utilités pour les différents choix j et non le niveau d’utilité. Cela permet d’inclure dans les modèles des constantes spécifiques à chaque alternative du choix, si les choix sont labélisés. C’est-à-dire quand on s’attend à ce que le type du bien, du service ou de l’action peut être en soi un critère de choix. Par exemple le ménage décide d’entreprendre des travaux d’efficacité énergétique dans son logement et hésite entre : installer un nouveau chauffage ou améliorer l’isolation des murs. De la même manière il est possible d’introduire des variables sociodémographiques en supposant qu’elles peuvent influencer l’une ou l’autre alternative de choix. La valeur de ces variables est la même pour toutes les alternatives de choix, ce qui force le modélisateur à évaluer l’impact de ces variables pour chaque alternative. En reprenant l’exemple des travaux de rénovation, on peut supposer que selon le type de logement les ménages préfèrent soit améliorer l’isolation, soit installer un nouveau chauffage. Le type de logement est une variable qualitative avec deux modalités (maison ou appartement). Il est mathématiquement impossible d’estimer l’impact de chaque modalité de logement pour chaque choix. Mais en fixant l’une des modalités à 0 (modalité de référence), on peut estimer l’impact de l’autre modalité en la comparant à celle de référence (Train, 2009, pp. 20–22). Par exemple la maison est une modalité de référence fixée à 0, tandis que l’effet de l’appartement reste à estimer. Si l’effet de l’appartement est proche de 0 et donc proche de celui de la maison, alors on conclura que le type de logement n’influence pas le choix de l’alternative en question. Si l’effet de l’appartement est positif (resp. négatif) pour le choix j , alors on peut dire que la probabilité que l’alternative j soit choisie est plus forte (resp. plus faible) si le ménage habite dans un appartement.

1.3 Typologie des modèles de choix discrets

Dans cette section nous ne présenterons que les modèles utilisés pendant la thèse. Nous avons décidé d’étudier les choix des moyens de chauffage dans le logement, ainsi que les décisions d’investissement en équipement de chauffage et d’isolation thermique. Cette analyse sera présentée plus en détail dans les chapitres suivants. Quatre modèles économétriques ont été choisis : Logit multinomial, Logit emboité, Logit mixte et Modèles des Classes Latentes. Les modèles de comptage ont été écartés parce que les choix étudiés sont uniques

(par exemple un seul système de chauffage pour le logement). Nous avons écarté également le modèle Probit. Ce type de modèle est similaire en tous points aux modèles Logit, mais il est plus difficile à estimer parce que la fonction de Vraisemblance du Probit ne peut pas être résolue analytiquement. L'intérêt du modèle Probit réside dans la flexibilité de la matrice de variance-covariance du terme d'erreur. Cette matrice est prédéfinie par le modélisateur et les différentes configurations pourront être testées. Cette flexibilité est par exemple utilisée dans les études empiriques portant sur l'aléa moral et la sélection adverse ([Chiappori et Salanie, 2000](#)). La flexibilité de la matrice est aussi le point faible. Si la matrice est mal définie, les résultats de l'estimation seront erronés. Dans cette thèse nous n'analysons pas la matrice de variance-covariance, alors les modèles de la famille Logit répondent entièrement à nos besoins de recherche. Plusieurs modèles autres que Logit Multinomial, Logit emboité, Logit Mixte et Modèle des Classes Latentes ont été envisagés, mais les résultats d'estimation montrent que le Logit Multinomial est le plus adapté à notre analyse.

1.3.1 Logit Multinomial

Le modèle Logit Multinomial, couramment connu sous le single MNL, est le plus simple à mettre en place et le plus utilisé. [Luce \(1959\)](#) a été le premier à proposer la formule du modèle Logit en partant de son axiome de choix ([voir encadré 2.1](#)). Le modèle MNL présume que la propriété de l'indépendance des alternatives non-pertinentes (angl. : IIA – *Independence of Irrelevant Alternatives*) est vérifiée, ce qui permet à [Marschak \(1960\)](#) de prouver la consistance du modèle avec la logique de maximisation de l'utilité.

Reprenons l'écriture générale de l'utilité aléatoire de l'individu n pour l'alternative de choix j :

$$U_{nj} = V_{nj} + \xi_{nj} \quad ((1.1))$$

Nous prenons comme hypothèse que les ξ_{nj} sont indépendamment et identiquement distribués (*iid*) selon la loi d'extremum généralisé de type I (la loi standard de Gumbel) avec une variance¹ de $\pi^2/6$. Nous rappelons l'expression de la densité $f(\xi_{nj})$ et la fonction de répartition $F(\xi_{nj})$ ci-dessous ([Gumbel, 1958](#)) :

$$f(\xi_{nj}) = e^{-\xi_{nj}} e^{-e^{-\xi_{nj}}} \quad (1.6)$$

$$F(\xi_{nj}) = e^{-e^{-\xi_{nj}}} \quad (1.7)$$

1. En posant la variance $\pi^2/6$ on normalise à 1 le paramètre d'échelle de Loi Gumbel.

Sachant que la différence des variables distribuées selon la loi de Gumbel suit la loi logistique (Train, 2009), nous pouvons poser $\xi_{nji}^* = \xi_{nj} - \xi_{ni}$ qui aura pour fonction de répartition $F(\xi_{nji}^*)$. Cela permet d'obtenir le Logit binaire avec $J = 2$ (Train, 2009) :

$$F(\xi_{nji}^*) = \frac{e^{\xi_{nji}^*}}{1 + e^{\xi_{nji}^*}} \quad (1.8)$$

Afin de passer du Logit binaire au Logit Multinomial, McFadden (1974) propose de prendre une répartition cumulative pour chaque ξ_{nj} . En combinant les équations (1.4) et (1.7), nous obtenons la fonction de répartition cumulative $F(\xi_{nj})$ (Train, 2009) :

$$F(\xi_{nj}) = e^{-e^{-(\xi_{ni} + V_{ni} - V_{nj})}} \quad (1.9)$$

Si ξ_{nj} sont *iid*, la fonction de répartition pour toutes les alternatives $j \neq i$ est le produit des distributions cumulatives individuelles :

$$P_{ni} \mid \xi_{ni} = \prod_{j \neq i} e^{-e^{-(\xi_{ni} + V_{ni} - V_{nj})}} \quad (1.10)$$

Les ξ_{nj} ne sont pas connues et donc la probabilité est une intégrale de $P_{ni} \mid \xi_{ni}$ pondérée par toutes les valeurs de ξ_{ni} (Train, 2009) :

$$P_{ni} = \int \left(\prod_{j \neq i} e^{-e^{-(\xi_{ni} + V_{ni} - V_{nj})}} \right) e^{-\xi_{ni}} e^{-e^{-\xi_{ni}}} d\xi_{ni} \quad (1.11)$$

Les manipulations algébriques de McFadden (1974) permettent d'obtenir :

$$P_{ni} = \frac{e^{V_{ni}}}{\sum_j e^{V_{nj}}} \quad (1.12)$$

En prenant l'hypothèse que la part connue de l'utilité V_{nj} est linéaire en ses paramètres, nous obtenons l'expression finale de la probabilité que l'alternative i soit choisie :

$$P_{ni} = \frac{e^{\beta^\top X_{ni}}}{\sum_j e^{\beta^\top X_{nj}}} \quad (1.13)$$

Avec β le vecteur des paramètres associés aux attributs des choix X_{ni} .

Pour estimer les paramètres, nous utilisons la méthode du Maximum de Vraisemblance. Le principe de cette méthode est de chercher les paramètres qui sont les plus vraisemblables

ou les plus « réalistes » pour les données observées. Pour illustrer ce principe prenons l'exemple du dé. Nous pouvons calculer la probabilité d'obtenir toujours 6 en lançant le dé non pipé 100 fois. Ou nous pouvons nous poser la question à quel point il est vraisemblable que le dé est non pipé si on obtient 6 à chacun de 100 lancements. La fonction de vraisemblance mesure la vraisemblance de l'événement pour un vecteur des paramètres donnés. Les paramètres les plus **vraisemblables** sont ceux pour lesquels la fonction de vraisemblance atteint le maximum.

Posons y_{ni} la variable indicatrice, qui vaut 1 si on observe que l'individu n a choisi l'alternative i , 0 sinon. Alors la probabilité que l'individu n choisisse l'alternative i sachant qu'il l'a réellement choisie est donnée par :

$$\prod_i (P_{ni})^{y_{ni}} \quad (1.14)$$

Si les individus font leurs choix indépendamment les uns des autres, la fonction de Vraisemblance $L(\beta)$ s'écrira comme le produit des probabilités individuelles :

$$L(y \mid \beta) = \prod_{n=1}^N \prod_i (P_{ni})^{y_{ni}} \quad (1.15)$$

Afin de faciliter la recherche du maximum, nous prenons le logarithme de la fonction Vraisemblance :

$$\ln L(y \mid \beta) = \sum_n \sum_i y_{ni} \ln P_{ni} \quad (1.16)$$

En remplaçant P_{ni} dans (1.16) par son expression (1.13), nous obtenons :

$$\ln L(y \mid \beta) = \sum_n \sum_i y_{ni} \ln \left(\frac{e^{\beta^\top X_{ni}}}{\sum_j e^{\beta^\top X_{nj}}} \right) \quad (1.17)$$

$$= \sum_n \sum_i y_{ni} \beta^\top X_{ni} - \sum_n \sum_i y_{ni} \ln \left(\sum_j e^{\beta^\top X_{nj}} \right) \quad (1.18)$$

L'estimateur $\hat{\beta}$ est obtenu en maximisant la fonction de Log-Vraisemblance, c'est-à-dire en égalisant à 0 la dérivée première de Log-Vraisemblance. La fonction Log-Vraisemblance du modèle MNL est globalement concave et par conséquent atteint un unique maximum (Train, 2009). Comme la fonction de Log-Vraisemblance (1.18) n'est pas linéaire

en paramètres, il est nécessaire d'utiliser l'un des algorithmes de maximisation. Quatre algorithmes sont implémentés dans STATA² : Newton-Raphson (NR), Berndt-Hall-Hausman (BHHH), Davidon-Fletcher-Powell (DFP) et Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS). Nous avons choisi l'algorithme BFGS qui est le plus efficace et le plus rapide parmi les quatre cités (Train, 2009).

L'algorithme BFGS a été proposé simultanément par Broyden (1970), Fletcher (1970), Goldfarb (1970) et Shanno (1970). L'avantage de l'algorithme BFGS est de calculer l'approximation de la matrice Hessienne B_t à chaque pas de l'optimisation au lieu de la valeur exacte de la matrice $H(\beta)$, comme le font les algorithmes NR et BHHH. La matrice Hessienne pour une fonction donne la valeur des dérivées partielles d'ordre 2 et permet de mesurer le changement de valeur de pente entre deux points de la courbe. L'algorithme BFGS utilise cette valeur pour approximer la matrice Hessienne à chaque itération. Notons p_t la recherche de la direction de descente de la fonction Log-Vraisemblance $\ln L(y \mid \beta)$ à l'étape t , alors p_t est égale à (Nocedal et Wright, 2006) :

$$p_t = -B_t^{-1} \nabla L(y \mid \beta) \quad (1.19)$$

L'approximation de la matrice Hessienne à l'étape suivante $t + 1$ est donnée par (Nocedal et Wright, 2006) :

$$B_{t+1}(\beta_{t+1} - \beta_t) = \nabla L(y \mid \beta_{t+1}) - \nabla L(y \mid \beta_t) \quad (1.20)$$

Chaque itération de l'algorithme se déroule en 5 étapes (Nocedal et Wright, 2006) :

1. Trouver p_t qui résolve $p_t = -B_t^{-1} \nabla L(y \mid \beta)$.
2. Effectuer une recherche linéaire du pas optimal a_t dans la direction trouvée à l'étape 1. et mettre à jour $\beta_{t+1} = \beta_t + a_t p_t$.
3. Poser $s_t = a_t p_t$.
4. Poser $w_t = \nabla L(y \mid \beta_{t+1}) - \nabla L(y \mid \beta_t)$.
5. Calculer $B_{t+1} = B_t + \frac{w_t w_t'}{w_t' s_t} - \frac{B_t s_t s_t' B_t}{s_t' B_t s_t}$.

La fonction Log-Vraisemblance $\ln L(y \mid \beta)$ atteint son maximum quand le gradient vaut 0. Nous définissons le critère de convergence pour savoir quand il faut stopper l'algorithme. Dans le cas présent l'algorithme tourne tant que $\| \nabla \ln L(y \mid \beta) \| > 10^{-5}$.

2. <http://www.stata.com/>

1.3.2 Logit Emboité

Le modèle MNL, présenté dans la Section précédente, n'est valide que si l'hypothèse IIA est vérifiée. C'est-à-dire qu'il n'y a pas de corrélation entre les facteurs non observés et que l'ajout ou la suppression d'une alternative de choix ne change pas l'ordre de préférence. Du point de vue mathématique cela implique, que le rapport entre les probabilités de choix ne change pas. [Debreu \(1960\)](#) démontre en utilisant le paradoxe du « Bus Bleu – Bus Rouge » que l'IIA n'est pas toujours vérifié. Prenons l'individu qui est indifférent entre faire le trajet en bus bleu ou en voiture. Mathématiquement parlant, la probabilité de choisir l'une des options est 0,5 et le rapport des probabilités vaut 1. Une nouvelle alternative de choix est proposée à cet individu : le bus rouge. Sachant qu'il est indifférent à la couleur du bus, nous nous attendons intuitivement que la probabilité de choisir la voiture reste 0,5. Toutefois l'IIA implique que le rapport des probabilités entre le bus bleu et la voiture reste le même, c'est-à-dire 1. La conséquence de cette hypothèse est que la probabilité de prendre la voiture passe de 0,5 à $1/3$ ([voir encadré 2.2](#)).

Encadré 2.2 : Le paradoxe du Bus Bleu – Bus Rouge

Un individu doit se rendre à une destination donnée, pour ce faire il peut prendre soit la voiture, soit le bus bleu. L'individu est indifférent entre les deux modes de transport, c'est-à-dire il a la même utilité pour «prendre bus» et «prendre voiture». Si on retranscrit cela en utilité probabiliste :

$$P(\text{voiture}) = P(\text{bus}_{\text{bleu}}) = 1/2$$

La mairie décide d'ajouter un bus supplémentaire, mais de couleur rouge. On a un nouvel ensemble A des actions possibles $A = \{\text{voiture}, \text{bus}_{\text{bleu}}, \text{bus}_{\text{rouge}}\}$. Sachant que l'individu n'accorde aucune importance à la couleur de bus, on obtient de façon intuitive :

$$P(\text{voiture}, \text{bus}_{\text{rouge}}) = P(\text{voiture}, \text{bus}_{\text{bleu}}) = 1/2$$

$$P_A(\text{voiture}) = 1/2$$

$$P_A(\text{bus}_{\text{bleu}}) + P_A(\text{bus}_{\text{rouge}}) = 1 - P_A(\text{voiture}) = 1/2$$

Sachant que l'individu est indifférent entre le bus bleu et le bus rouge, on a :

$$P_A(\text{bus}_{\text{bleu}}) = P_A(\text{bus}_{\text{rouge}})$$

D'où on déduit :

$$2P_A(\text{bus}_{\text{bleu}}) = 1/2$$

$$P_A(\text{bus}_{\text{bleu}}) = P_A(\text{bus}_{\text{rouge}}) = 1/4$$

Si on suppose que l'Axiome d'IIA est vérifiée, on ne retrouve plus les probabilités intuitives. Puisque l'introduction d'un choix supplémentaire ne doit pas affecter les préférences de l'individu et que le rapport des probabilités doit rester le même. C'est-à-dire :

$$P_A(\text{bus}_{\text{bleu}}) = P_A(\text{bus}_{\text{rouge}})$$

$$\frac{P_A(\text{voiture})}{P_A(\text{bus}_{\text{bleu}})} = 1$$

$$P_A(\text{bus}_{\text{bleu}}) = P_A(\text{bus}_{\text{rouge}}) = P_A(\text{voiture}) = 1/3$$

$$P_A(\text{bus}_{\text{bleu}}) + P_A(\text{bus}_{\text{rouge}}) > P_A(\text{voiture})$$

Ce qui est contraire au fait que l'individu est indifférent entre « prendre la voiture » ou « prendre le bus ».

En réponse à ce problème, [Ben-Akiva \(1973\)](#) propose le modèle Logit Emboité (Nested Logit) qui permet de configurer les substitutions entre les actions par une procédure emboîtée en deux ou plusieurs étapes. Le cas du paradoxe « Bus Bleu – Bus Rouge » donne le Logit emboité à deux niveaux avec deux « nids » ou classes, une pour la voiture et une pour le bus. Le premier niveau permet au décideur de choisir s’il prend la voiture ou le bus, le deuxième niveau permet de choisir si le bus est bleu ou rouge. [McFadden \(1978\)](#), quant à lui, propose le théorème des valeurs extrêmes généralisées qui permet de définir n’importe quelle conception du modèle de choix discrets en relâchant l’hypothèse IIA, le Logit emboité y compris. Il prouve aussi que le modèle est consistant avec le principe de maximisation d’utilité.

Le modèle Logit Emboité est utilisé dans le cas où il est possible de regrouper les alternatives de choix autour des classes appelées « nids » (angl. : *nests*). Les classes ont les propriétés suivantes :

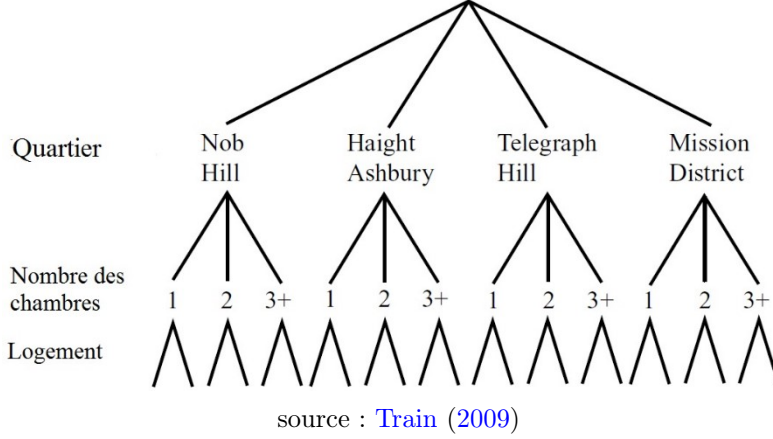
- Pour deux alternatives quelconques appartenant au même nid l’axiome IIA est vérifié, c’est-à-dire le ratio entre deux alternatives de choix est indépendant de l’absence ou de la présence d’autres alternatives.
- Pour deux alternatives quelconques qui appartiennent à des nids différents, l’axiome IIA n’est plus vérifié. L’ajout d’une nouvelle alternative de choix changera le rapport des probabilités.

Les alternatives se trouvant dans un nid sont plus similaires que les alternatives en dehors du nid : prendre le transport public ou privé, motorisé ou non, acheter une maison ou un appartement. Ou bien, une ou plusieurs alternatives se démarquent des autres. C’est surtout le cas des choix avec l’option « ne rien choisir ».

Le modèle est présenté sous forme d’un arbre à plusieurs niveaux. La Figure 1.1 donne l’exemple issu du livre de [Train \(2009\)](#). Le ménage vivant à San Francisco est face à l’ensemble des logements en vente sur le marché. Il est fort probable qu’il y ait des facteurs non observés qui sont commun aux logements du même quartier (écoles, proximité des transports en commun, proximité et type des commerces). Dans ce cas les utilités non observées ξ_{nj} seront corrélées pour toutes les offres de logement du même quartier. On peut s’attendre aussi aux facteurs non observés qui sont communs aux logements avec le même nombre des chambres à coucher. Dans ce cas il y a trois sous-modèles : la probabilité de choisir le logement dans tel ou tel quartier, la probabilité de choisir le nombre des chambres à coucher pour un quartier donné, et la probabilité de choisir l’offre de logement connaissant le quartier et le nombre des chambres à coucher.

Reprenons la formulation générale de l’utilité aléatoire U_{nj} avec $j = 1, \dots, J$ les alternatives de choix (1.1). Les J alternatives sont réparties en P nids qui ne se recouvrent pas et qui

FIGURE 1.1: Logit Emboité à trois niveaux



sont notés $C_1, C_2, \dots, C_p, \dots, C_P$. Le modèle suppose que l'utilité non-observable ξ_{nj} a pour fonction de répartition [Train \(2009\)](#) :

$$F(\xi_{nj}) = \exp \left(- \sum_{p=1}^P \left(\sum_{j \in C_p} \exp \left(- \frac{\xi_{nj}}{\mu_p} \right) \right)^{\mu_p} \right), \forall C_p, 0 \leq \mu_p \leq 1 \quad (1.21)$$

Où μ_p est le degré d'indépendance de l'utilité inobservée pour le nid p et dont la valeur est comprise entre 0 et 1. Avec deux cas extrêmes : 0 pour les alternatives de choix du même nid parfaitement corrélées et 1 pour les alternatives de choix du même nid qui sont indépendantes. Si $\mu_p = 1, \forall p$ alors toutes les alternatives de choix sont indépendantes et le modèle Logit Emboité se ramène au modèle simple de Logit Multinomial [Train \(2009\)](#) :

$$F(\xi_{nj}) = \exp \left(- \sum_{p=1}^P \left(\sum_{j \in C_p} \exp \left(- \frac{\xi_{nj}}{1} \right) \right)^1 \right) = e^{-e^{-\xi_{nj}}} \quad (1.22)$$

Dans le cas contraire, si les deux alternatives j et i se trouvent dans le même nid C_p , alors la covariance $\text{Cov}(\xi_{nj}, \xi_{ni}) \neq 0$. Par contre si $j \in C_p$ et $i \in C_l$, la covariance est nulle $\forall p \neq l$. La probabilité que l'alternative $i \in C_p$ sera choisie est ([Ben-Akiva, 1973](#)) :

$$P_{ni} = \frac{e^{\frac{V_{ni}}{\mu_p}} \left(\sum_{j \in C_p} e^{\frac{V_{nj}}{\mu_p}} \right)^{\mu_p - 1}}{\sum_{l=1}^P \left(\sum_{j \in C_l} e^{\frac{V_{nj}}{\mu_l}} \right)^{\mu_l}} \quad (1.23)$$

Si μ_p est compris entre 0 et 1, alors le modèle est consistant avec le processus de maximisation d'utilité. Si $\mu_p > 1$, le principe de maximisation d'utilité est observé, mais pas

pour toutes les valeurs de variables explicatives. Dans le cas contraire, $\mu_p < 0$, le modèle est inconsistant avec la maximisation d'utilité. En général, μ_p est une constante estimée par le modèle et il est donc supposé que tous les décideurs ont la même corrélation pour l'utilité non observée. Il est possible d'introduire l'hétérogénéité en estimant μ_p en fonction des caractéristiques Z_n (revenu, âge, etc.) des décideurs.

Comme dans le cas de MNL, le modèle est estimé en utilisant la méthode de Maximum de Vraisemblance. Par contre la fonction de Log-Vraisemblance du Logit Emboité n'est pas globalement concave et cela a comme conséquence que la solution optimale n'est pas toujours atteinte (Train, 2009). L'utilisation des différents algorithmes d'optimisation est plus que souhaitable (Section 1.3.1). Si ce n'est pas suffisant pour trouver un optimum, le modélisateur peut estimer le modèle de façon séquentielle en deux étapes : en commençant par le bas de l'arbre structurel du model (Figure 1.1), et corriger par la suite le biais dû à la modélisation (Ben-Akiva et Lerman, 1985).

L'autre problème vient de l'estimation du paramètre μ_p qui représente le degré d'indépendance à l'intérieur du nid. Par construction du modèle, le vecteur des paramètres estimés β est divisé par μ_p qui est différent pour chaque nid. Cela pose un problème pour l'estimation des variables génériques, c'est-à-dire qui ont les mêmes effets sur les probabilités de choix pour chaque alternative de choix. Prenons l'exemple de la situation où l'individu doit choisir entre faire le trajet en voiture ou prendre les transports publics. S'il compare la durée des deux trajets et préfère le plus court, alors on estimera un seul coefficient générique qui capture l'impact de la durée du trajet sur les probabilités de choix. Par contre le coût du trajet n'est pas directement comparable, parce que le coût de déplacement en voiture est surement plus cher qu'un ticket pour les transports publics. Il est plus logique d'estimer deux paramètres β associés au coût, l'un qui capture l'impact du prix de billet β_{public} , l'autre pour capturer le coût de déplacement en voiture $\beta_{voiture}$. Le coefficient générique et les coefficients propres à chaque alternative des choix sont divisés par μ_p où p est le numéro du nid auquel appartiennent l'alternative. Le coefficient générique est mis à l'échelle lors de l'estimation à la fois par μ_p et par μ_l , avec $p \neq l$ et $\mu_p \neq \mu_l$: l'égalité $\frac{\beta}{\mu_p} = \frac{\beta}{\mu_l}$ ne tient plus. Cela a pour résultat que le vrai coefficient β n'est plus générique. Hensher et Greene (2002) et Silberhorn *et al.* (2007) analysent avec des applications empiriques les différentes configurations des modèles avec les coefficients génériques et les coefficients spécifiques aux alternatives. Le résultat montre que l'utilisation des coefficients génériques avec le degré d'indépendance $\mu_p \neq \mu_l, \forall p \neq l$ propre à chaque nid n'est plus compatible avec le principe de la maximisation d'utilité. Si le modélisateur veut estimer les coefficients génériques, il est souhaitable de contraindre le degré d'indépendance μ_p à être le même dans tous les nids. Par ailleurs dans le cas d'une branche dégénérée, c'est-à-dire quand un nid ne comporte qu'une seule alternative de choix, il faut contraindre μ_p à être égal à 1, parce qu'une seule alternative de choix ne présente pas de corrélation par définition.

1.3.3 Hétérogénéité des préférences

Les deux modèles décrits dans les sections précédentes ont pour hypothèse que les préférences des décideurs sont homogènes. C'est-à-dire que le vecteur β des paramètres à estimer est le même pour tous les décideurs. En revenant à la situation du choix de l'énergie pour le chauffage ou d'un équipement énergétique, l'hypothèse d'homogénéité des préférences implique que tous les ménages ont les mêmes préférences pour l'électricité, le gaz, les équipements utilisant des énergies renouvelables ; ont la même sensibilité face aux coûts ; etc. C'est une hypothèse forte qui peut ne pas être vérifiée. Il est possible d'introduire cette hétérogénéité de plusieurs façons. Les plus simples c'est de redéfinir les variables. Soit en croisant les attributs des offres avec des caractéristiques individuelles Z_n (par exemple locataire ou propriétaire). Soit en estimant les coefficients par palier en utilisant l'une des variables individuelles pour caractériser les paliers (p.ex. faire la distinction entre le décideur à bas, moyen et haut revenus). L'avantage de cette technique est qu'elle est relativement simple à estimer. Néanmoins c'est au modélisateur de définir quelles caractéristiques individuelles vont expliquer l'hétérogénéité et de quelle façon ce qui peut introduire le biais de modélisation.

Deux autres approches existent pour généraliser l'hétérogénéité des préférences à n'importe quel attribut tout en évitant les erreurs dues à la définition de l'hétérogénéité. Tout d'abord nous pouvons supposer que les préférences individuelles sont aléatoires et chacune suit une loi de probabilité dont les paramètres seront estimés par le modélisateur. Il s'agit du Logit Mixte, appelé encore Logit à paramètres aléatoires (Boyd et Mellman, 1980, Cardell et Dunbar, 1980). Concernant la deuxième approche, le Modèle des Classes Latentes, elle suppose que les décideurs peuvent être regroupés en classes avec des préférences homogènes (Greene et Hensher, 2003). Il est possible de combiner les approches afin d'avoir une distribution des paramètres estimés à la fois discrète pour former les classes et continue à l'intérieur des classes. Dans cette sous-section nous présentons séparément les deux approches.

1.3.3.1 Logit Mixte à paramètres aléatoires

Le modèle Logit Mixte, ou encore le modèle à paramètres aléatoires, a été proposé pour la première fois par Boyd et Mellman (1980) et Cardell et Dunbar (1980), mais sa véritable utilisation commence au début des années 2000. Le Logit mixte propose d'utiliser les densités des lois pour estimer les paramètres du modèle afin de capter l'hétérogénéité des préférences, en tenant compte de la corrélation de l'utilité inobservée ou des différents schémas de substitution. Dans notre étude nous sommes intéressés par l'hétérogénéité des

préférences. La forme générale du Logit Mixte reste la même que dans l'équation (1.1), mais la définition du paramètre β change :

$$U_{nj} = \beta_n^\top X_{nj} + \xi_{nj} \quad (1.24)$$

Où les X_{nj} sont les attributs de l'offre j présentée au décideur n , le vecteur des paramètres β_n à estimer est maintenant spécifique à chaque décideur n et ξ_{nj} est l'utilité inobservable *iid*. Le paramètre à estimer varie selon le décideur avec une densité de probabilité $f(\beta \mid \theta)$ où θ sont les paramètres de la densité. Par exemple si on suppose que β est distribué selon la loi normale, le vecteur des paramètres θ va contenir l'espérance et la variance associées à la densité. Les β_n sont connus des décideurs, mais non observables par le modélisateur. Par conséquent la probabilité de choisir l'alternative i est conditionnée par la valeur des paramètres individuels β_n :

$$P_{ni} \mid \beta_n = \frac{e^{\beta_n^\top X_{ni}}}{\sum_j e^{\beta_n^\top X_{nj}}} \quad (1.25)$$

Les β_n ne sont pas observables par le modélisateur, la probabilité s'écrit comme l'intégrale sur tous les β_n :

$$P_{ni} = \int \left(\frac{e^{\beta_n^\top X_{ni}}}{\sum_j e^{\beta_n^\top X_{nj}}} \right) f(\beta \mid \theta) d\beta \quad (1.26)$$

Le modèle a une densité mixte : d'une part $\xi_{nj} - \xi_{ni}, \forall j \neq i$ suit une loi Logit, d'autre part β suit une loi définie par le modélisateur à paramètres θ . Autrement dit le modèle est une moyenne des modèles Logit individuels. On cherche l'estimateur $\hat{\beta}$ de la densité des préférences individuelles β_n . L'estimateur $\hat{\beta}$ est obtenu en utilisant la méthode de Maximum de Vraisemblance Simulée. Notons R le nombre total des tirages aléatoires et β^r – le r -ième tirage simulé pour le paramètre individuel à partir de la densité $f(\beta \mid \theta)$, alors on pourra calculer l'estimateur non biaisé de la probabilité P_{ni} sur l'ensemble des tirages :

$$\hat{P}_{ni} = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R L_{ni}(\beta^r) \quad (1.27)$$

Les probabilités ainsi simulées sont insérées dans la fonction de Log-Vraisemblance Simulée (SLL) :

$$SLL = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J y_{nj} \ln \hat{P}_{nj} \quad (1.28)$$

Où y_{nj} représente la variable indicatrice qui vaut 1 si l'individu n a choisi l'alternative j , 0 sinon. Comme dans le cas de la méthode standard du Maximum de Vraisemblance, l'estimateur des paramètres $\hat{\theta}$ de la distribution des préférences $f(\beta \mid \theta)$ est obtenu en trouvant le maximum de la fonction SLL.

Le modèle Logit Mixte est apprécié pour sa flexibilité et la possibilité de rapprocher n'importe quel modèle de choix discrets, y compris MNL et Logit Emboité (McFadden et Train, 2000). Quelques exemples des lois paramétriques utilisées pour estimer l'hétérogénéité des paramètres β_n :

- Normale — est la plus utilisée comme la densité des paramètres β_n .
- Lognormale — si on sait que le signe du paramètre à estimer est le même pour tous les individus. Par exemple on sait que les coefficients associés aux prix et aux coûts ont en général un impact négatif sur le choix des individus. Grâce à la loi Lognormale on peut forcer les coefficients à être négatifs.
- Uniforme — si on veut borner les valeurs de β_n entre deux valeurs en supposant que sur cet intervalle les préférences ont une distribution uniforme.
- Triangulaire — si on veut borner β_n et supposer que leur valeur augmente linéairement avant un certain seuil et diminue linéairement après. Les pentes des côtés peuvent être différentes.

Toutefois il est conseillé au modélisateur de laisser un des paramètres du modèle être égal à une constante (Train, 2009). Le choix de la loi de probabilité pour décrire l'hétérogénéité est critique pour les résultats du modèle et peut donner lieu à une estimation fallacieuse. Par exemple si le modélisateur pose que les β sont distribués selon la loi normale, alors que dans la réalité l'hétérogénéité est uniforme, ou une mixture des lois, ou homogènes.

Nous estimons les modèles Logit Mixte en utilisant STATA et BIOGEME. STATA propose un package *mixlogit* pour estimer Logit Mixte et *mixlbeta* qui permet d'obtenir la distribution des paramètres individuels (Hole, 2007b). BIOGEME³, quant à lui, permet de paralléliser le processus d'estimation et par conséquent d'augmenter la vitesse de calcul (Bierlaire, 2003). En plus le programme propose des algorithmes d'optimisation plus performants que ceux implantés en STATA.

3. <http://biogeme.epfl.ch/>

1.3.3.2 Modèle des classes latentes

Le modèle Logit Mixte, présenté dans la section précédente, a pour hypothèse que l'hétérogénéité des préférences peut être décrite par une loi de probabilité continue (loi normale, loi triangulaire, etc.). Cette configuration pourrait être inappropriée, si les préférences sont discrètes ou sont un mélange de plusieurs lois. Par exemple prenons le cas du choix de l'électricité comme l'énergie utilisée pour le chauffage et l'ECS (Eau Chaude Sanitaire). Imaginons qu'il y a 3 groupes d'individus : 1/3 qui aiment l'électricité, 1/3 qui ne l'aiment pas et 1/3 qui sont indifférents. Si les préférences dans les groupes sont homogènes, alors il y aura trois valeurs des paramètres réels β associés à l'électricité pour décrire le choix du chauffage ou de l'ECS. Si les individus dans chacun des groupes ont des préférences très variées, on pourra approcher l'hétérogénéité globale des préférences par une loi uniforme. Mais si les paramètres individuels sont concentrés autour d'une valeur dans chaque groupe, alors utiliser une loi continue n'a pas de sens.

Les modèles des classes latentes viennent en réponse à cette problématique en proposant de regrouper les décideurs en classes avec des préférences homogènes et d'estimer les paramètres propres à chaque groupe de décideurs. La classification est non-supervisée, c'est-à-dire la composition des groupes et les déterminants qui permettent de faire la classification ne sont pas connus à l'avance. L'analyse des classes ou variables latentes est connue depuis les années 60-70 : [Lazarsfeld et al. \(1968\)](#) et [Goodman \(1974\)](#). [Dempster et al. \(1977\)](#) a introduit l'algorithme d'Espérance-Maximisation (**EM**) qui est très utilisé pour les modèles des classes latentes. [Greene et Hensher \(2003\)](#) proposent son adaptation pour les modèles de choix discrets à utilité aléatoire.

Prenons comme hypothèse que les décideurs pourront être rangés en Q groupes à l'intérieur desquelles les préférences sont homogènes. Le modèle de choix discrets utilisé est Logit. La probabilité que l'individu n choisisse l'alternative i sachant que l'individu appartient à la classe q est donnée par :

$$\mathbb{P}(U_{ni} > U_{nj}, \forall i \neq j \mid q) = \frac{e^{\beta_q^\top X_{ni}}}{\sum_{j=1}^J e^{\beta_q^\top X_{nj}}} \quad (1.29)$$

Nous ne savons pas à priori à quelle classe appartient le décideur n . On dérive la probabilité que l'individu n appartienne à la classe l en tenant compte des caractéristiques Z_n du décideur :

$$P_{nl} = \frac{e^{\alpha_l' Z_n}}{\sum_{q=1}^Q e^{\alpha_q' Z_n}}, \forall l \neq q \quad (1.30)$$

La fonction Log Vraisemblance s'écrit alors comme ⁴ :

$$\ln L = \sum_{n=1}^N \ln \left(\sum_{q=1}^Q P_{nq} P_{n|q} \right) \quad (1.31)$$

Pour des raisons mathématiques (voir le dernier paragraphe de la section 1.2) on estime $Q-1$ vecteurs des paramètres β_q , en égalisant à 0 l'une des classes qui servira de référence à laquelle on comparera les autres classes. Comme dans le cas du modèle Logit Multinomial et Logit Emboité, on trouve l'estimateur des β_q en maximisant la fonction Log Vraisemblance. Le nombre des classes est défini à priori par le modélisateur. Pour choisir le nombre optimal des classes, il est conseillé d'estimer plusieurs modèles avec des nombres de classes différents : par exemple 9 modèles en commençant par le modèle à 2 groupes et allant jusqu'à 10 groupes. On utilise les critères d'information, expliqués dans la section suivante, pour choisir le meilleur modèle.

Les modèles sont estimés en utilisant STATA : *lclogit* (Pacífico et Yoo, 2013) qui est la commande pour trouver les coefficients de départ et *gllamm* (Rabe-Hesketh *et al.*, 2002) qui est celle pour estimer le modèle final.

1.4 Mesures de performance et tests

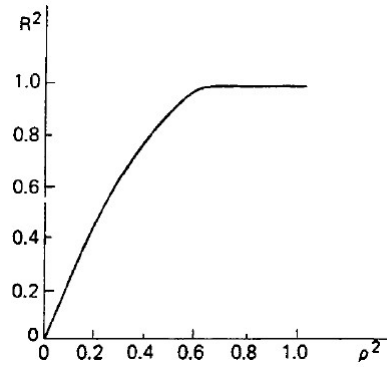
Le but de cette sous-section est de présenter les techniques qui permettent de savoir dans quelle mesure le modèle estimé est bon du point de vue statistique. On commencera par présenter les critères de qualité du modèle et le test de significativité des coefficients estimés, en finissant par le test qui vérifie la présence ou l'absence de l'hypothèse IIA.

1.4.1 Qualité du modèle

Dans le cas du modèle économétrique standard, l'erreur d'estimation est l'écart entre la valeur observée et la valeur estimée par le modèle. Dans le cas du modèle du choix discrets, la valeur observée est le choix qui a été fait par l'individu exprimé par la variable indicatrice y_{nj} : 1 si le décideur n a choisi l'alternative j et 0 sinon. Tandis que la valeur estimée – est la probabilité que l'individu fasse ce choix. Les deux mesures ne sont plus quantitatives. A partir de quel niveau de probabilité estimée pour l'alternative j réellement choisie on peut dire que le modèle ne se trompe pas ? La probabilité qui est supérieure à 0,5 ? Comme la réponse n'est pas évidente, il existe un éventail d'indicateurs de la qualité du modèle. Ces

4. On suppose ici qu'il y a une seule situation de choix par décideur. S'il y a T situations de choix, alors Log Vraisemblance s'écrit comme : $\ln L = \sum_{n=1}^N \ln \left(\sum_{q=1}^Q P_{nq} \left(\prod_{t=1}^T P_{nt|q} \right) \right)$.

FIGURE 1.2: Equivalence entre ρ^2 et R^2



source : [Domencich et McFadden \(1975, p. 124\)](#)

indicateurs essayent de se rapprocher du coefficient de détermination (R^2 dans le cas des modèles quantitatifs), mais ont une interprétation légèrement différente. Parce que dans le cas du modèle où la variable dépendante est quantitative, le R^2 représente le pourcentage de la variance expliquée par le modèle, ce qui ne peut pas être le cas pour les modèles de choix discrets.

Nous présentons ici les méthodes les plus courantes et les plus polyvalentes. [McFadden \(1974\)](#) avait proposé l'indicateur pseudo ρ^2 proche dans l'esprit de R^2 des modèles quantitatifs :

$$\rho^2 = 1 - \frac{\ln L(\hat{\beta})}{\ln L(0)} \quad (1.32)$$

Où $\ln L(\hat{\beta})$ est la valeur de la fonction Log Vraisemblance pour le modèle estimé avec $\hat{\beta}$ le vecteur des paramètres estimés et $\ln L(0)$ – la valeur de la fonction Log Vraisemblance du modèle réduit aux seuls termes constants. Comme la valeur absolue de $\ln L(\hat{\beta})$ est forcément⁵ plus petite que la valeur absolue de $\ln L(0)$, ρ^2 est toujours inférieur à 1. Les deux mesures, ρ^2 et R^2 pour la régression linéaire, ne sont pas directement comparables parce que ρ^2 prend en général des valeurs faibles. Dans ces conditions à partir de quelles valeurs de ρ^2 le modélisateur pourrait dire que le modèle a un « bon pouvoir explicatif » ? Afin de répondre à cette question [Domencich et McFadden \(1975\)](#) proposent l'équivalence entre ρ^2 et R^2 de la régression linéaire. La Figure 1.2, issue de leur livre, montre cette relation. Les valeurs de ρ^2 entre 0,6 et 1 sont équivalentes aux valeurs de R^2 proches de 1. Si ρ^2 est entre 0,2 et 0,6, alors le pseudo ρ^2 est équivalent à R^2 du modèle linéaire compris entre 0,4 et 0,9. De ce fait il est considéré que les modèles de choix discrets avec $\rho^2 > 0,2$ ont un bon ajustement ([Louviere et al., 2010](#)).

5. La fonction Log Vraisemblance est négative pour toutes les valeurs de β .

Etant donné que ρ^2 n'est pas équivalent à R^2 et présente des valeurs faibles, [Estrella \(1998\)](#) propose l'indicateur ϕ_0 :

$$\phi_0 = 1 - \left(\frac{\ln L(\hat{\beta})}{\ln L(0)} \right)^{-\frac{2 \ln L(0)}{N}} \quad (1.33)$$

Les deux précédents indicateurs ne tiennent pas compte de la parcimonie. Plus il y a de variables explicatives dans le modèle, plus la valeur de ρ^2 est élevée indépendamment de la significativité de ces variables explicatives. [Ben-Akiva et Lerman \(1985\)](#) proposent le pseudo $\bar{\rho}^2$ ajusté avec K le nombre des paramètres estimés⁶ :

$$\bar{\rho}^2 = 1 - \frac{\ln L(\hat{\beta}) - K}{\ln L(0)} \quad (1.34)$$

Il est possible également de regarder le taux de bonnes prédictions ou l'histogramme des probabilités estimées pour les alternatives choisies. On considère que le modèle prédit bien l'observation si la probabilité estimée pour le choix réellement effectué est la plus grande. Toutefois il faut faire attention au pourcentage des bonnes prédictions. On n'est plus dans la logique néo-classique où l'individu choisit toujours l'action qui apporte le plus d'utilité. Si l'individu a choisi une alternative avec un faible niveau de probabilité par rapport aux probabilités d'autres alternatives, cela ne veut pas dire forcément que le modèle « se trompe » en prédiction. Concernant l'histogramme des probabilités estimées pour les alternatives choisies, il doit montrer un faible taux des décideurs dont la probabilité est faible pour les alternatives choisies.

Pour comparer la qualité des performances des différentes configurations du même modèle, les modélisateurs utilisent les pseudos $\bar{\rho}^2$ ajustés ou les critères d'information. Le critère d'information est un indicateur de parcimonie dont le principe est basé sur l'entropie avec le but de mesurer l'écart « d'information » entre le vrai modèle et le modèle estimé. Le modélisateur cherche le modèle estimé le plus proche du modèle réel, c'est-à-dire le modèle avec l'écart le plus faible. Cela revient à choisir le modèle avec le critère d'information le plus faible. Il existe de nombreux critères d'information. Comme il n'y a pas de critère « idéal », le modélisateur en utilise plusieurs à la fois par mesure de précaution. Dans cette sous-section nous vous présentons les critères qui ont été utilisés lors de nos estimations.

[Akaike \(1973\)](#) propose le premier critère d'information dit d'Akaike, couramment connu sous le sigle AIC :

6. K est le nombre de tous les paramètres utilisés dans le modèle, y compris les constantes.

$$AIC = -2 \ln L(\hat{\beta}) + 2K \quad (1.35)$$

Où $\ln L(\hat{\beta})$ est le maximum de Vraisemblance du modèle estimé et K le nombre des paramètres utilisés dans le modèle. La première partie mesure le manque d'ajustement du modèle aux données, la deuxième - la pénalité pour chaque nouveau paramètre ajouté au modèle.

En 1978 Schwarz propose un nouveau critère d'information basé dans le contexte bayésien du modèle et développé à partir de critère d'information AIC ([Schwarz, 1978](#)) :

$$BIC = -2 \ln L(\hat{\beta}) + K \ln N \quad (1.36)$$

Il tient compte à la fois de la taille d'échantillon et du nombre des paramètres. Il est aussi le plus adapté pour les modèles non-linéaires et/ou avec des variables qualitatives.

1.4.2 Tests de significativité des paramètres estimés

Les tests de significativité des coefficients estimés permettent de savoir si l'utilisation d'une variable explicative donnée est pertinente. Si la partie connue de l'utilité V_{nj} est linéaire en paramètres K , alors pour l'individu n la part connue de l'utilité associée au choix j est égale à :

$$V_{nj} = \sum_{k=1}^K \beta_k X_{njk} \quad (1.37)$$

Si le paramètre estimé β_k est 0 ou proche de 0, alors la présence ou l'absence de la variable explicative $X_{..k}$ n'apporte rien au modèle et il est possible de la supprimer. Nous citons dans cette thèse deux tests de significativités : le test de Ward et le rapport de maximum de Vraisemblance ([Greene, 2012](#)). Les hypothèses sont les mêmes pour les deux tests :

$$\begin{aligned} H_0 : \beta &= 0 \\ H_1 : \beta &\neq 0 \end{aligned} \quad (1.38)$$

La statistique du test de Ward sous H_0 est :

$$W_k = \hat{\beta}_k^2 / \hat{\sigma}_{kk}^2 \stackrel{H_0}{\rightsquigarrow} \chi^2(1) \quad (1.39)$$

Où $\hat{\beta}_k^2$ est le paramètre estimé dont on teste la significativité et $\hat{\sigma}_{kk}^2$ – la variance de l'estimateur du coefficient β_k ⁷. Cette statistique du test suit la loi de χ^2 à 1 degré de liberté. Compte tenu que $\chi^2(1)$ est équivalent à la loi normale centrée réduite au carré, les logiciels utilisent plutôt la loi normale (z -statistique dans SAS ou encore dans STATA).

Le deuxième test, le rapport de Vraisemblance, compare le modèle non contraint avec la fonction Log Vraisemblance $\ln L$ et la Vraisemblance du modèle contraint $\ln L^c$. La statistique du test sous l'hypothèse nulle H_0 suit la loi de $\chi^2(1)$ et est asymptotiquement équivalente au test de Ward ([Greene, 2012](#)) :

$$LRT_k = -2(\ln L - \ln L^c) \xrightarrow{H_0} \chi^2(1) \quad (1.40)$$

1.4.3 Test d'IIA

L'utilisation du modèle MNL n'est justifiée que si la propriété d'IIA est vérifiée. L'encadré [2.2](#) montre sur l'exemple du paradoxe « Bus Bleu – Bus Rouge » la problématique liée à l'IIA. Dans cette section nous présenterons le test statistique qui permet de tester cette hypothèse.

Rappelons que l'hypothèse l'IIA dit que l'ajout d'une nouvelle alternative de choix ne doit pas changer l'ordre des préférences. Du point de vu mathématique, le rapport des probabilités entre les alternatives de choix a et b (odds ratio, rapport des chances ou encore rapport des cotes) ne doit pas changer si le modélisateur ajoute ou supprime une alternative de choix c .

Le test d'[Hausman et McFadden \(1984\)](#) consiste à estimer deux modèles :

- Le modèle complet (non contraint) avec toutes les alternatives de choix.
- Le modèle contraint en enlevant une alternative de choix et les observations pour lesquelles cette alternative était choisie.

Sous l'hypothèse nulle les deux modèles sont statistiquement identiques et l'hypothèse IIA est vérifiée. La statistique du test sous l'hypothèse H_0 est ([Hausman et McFadden, 1984](#)) :

$$(\hat{\beta}^c - \hat{\beta}^{nc})' \left(\hat{\Omega}(\hat{\beta}^c) - \hat{\Omega}(\hat{\beta}^{nc}) \right)^{-1} (\hat{\beta}^c - \hat{\beta}^{nc}) \xrightarrow{H_0} \chi^2(K^c) \quad (1.41)$$

Avec $\hat{\beta}^c$ le vecteur des paramètres estimés du modèle contraint, $\hat{\beta}^{nc}$ le vecteur des paramètres issus du modèle complet et qui apparaissent à la fois dans les deux modèles⁸, $\hat{\Omega}$

7. L'indice kk signifie le k^{ieme} élément de la diagonale de la matrice Variance-Covariance estimée

8. C'est-à-dire il faut enlever les paramètres qui ne sont pas utilisés dans le modèle contraint, ainsi que la variance-covariance associée. Le but est de pouvoir comparer les vecteurs et matrices du même rang.

TABLEAU 1.1: Rapport de Risque Relatif (exemple d'utilisation).

| Variable | Paramètre | RRR |
|----------------|-----------|------|
| Aucun des deux | – | – |
| Chauffage | | |
| Age | –0,066 | 0,93 |
| Femme | – | – |
| Homme | –1,5 | 0,22 |
| Isolation | | |
| Age | 0,012 | 1,01 |
| Femme | – | – |
| Homme | 1,1 | 3 |

est l'estimateur des matrices de variance-covariance des vecteurs des paramètres $\hat{\beta}^c$ et $\hat{\beta}^{nc}$. Sous l'hypothèse nulle la statistique suit la loi de χ^2 à K^c degrés de liberté où K^c est le nombre des paramètres utilisés dans le modèle contraint. Il faut répéter le test autant de fois qu'il y a d'alternatives de choix.

Le modèle Logit Emboité peut aussi indiquer si l'hypothèse IIA est vérifiée ou non. Rappelons que μ_p est le degré d'indépendance de chaque nid p . Si pour chaque nid p μ_p est statistiquement proche de 1, alors l'ajout ou la suppression des nids ne change pas les rapports des probabilités et donc pour cette configuration du modèle l'hypothèse IIA est vérifié⁹.

1.4.4 Rapport de risque relatif

Les paramètres issus de l'estimation nous montrent uniquement pour chaque variable explicative si elle a un effet positif ou négatif sur les probabilités de choix. Nous ne pouvons pas interpréter directement la valeur des paramètres estimés. En plus nous ne pouvons pas comparer la valeur des paramètres issus des différents modèles. Parce que dans le cas des modèles de la famille Logit, l'utilité non observable ξ_{nj} est normalisée pour avoir l'espérance 0 et la variance $\pi^2/6$ qui suit une loi standard de Gumbel et facilite l'estimation. Ceci a comme implication que les paramètres estimés sont une normalisation des vrais paramètres du modèle β ou α par $1/\mu^2$ où μ est le paramètre d'échelle de la loi Gumbel non normalisée (Train, 2009). Le paramètre d'échelle est propre à chaque modèle est inconnu de l'utilisateur.

Le rapport de risque relatif (RRR) est utilisé avec les modèles où seules les variables individuelles sont utilisées. RRR donne l'information dans quelle mesure une variable Z

9. Pour rappel : dans le modèle Logit Emboité la propriété IIA est vérifiée dans le nid, mais pas entre les différents nids.

modifie le rapport de la probabilité étudiée de l'alternative j sur la probabilité de base (alternative de référence r dans les choix labellisés) (Cahuzac et Bontemps, 2008) :

$$RRR_j | z_k = \frac{P_j}{P_r} = \frac{\mathbb{P}(y_{nj} = j | Z)}{\mathbb{P}(y_{nr} = r | Z)} = \exp(Z\beta_j) \quad (1.42)$$

Afin de comprendre l'utilisation du RRR, prenons un modèle simple avec 3 alternatives de choix et purement imaginaire : nouveau chauffage, faire l'isolation des murs, aucun des deux (alternative de référence). Ce modèle est expliqué par deux variables Z_n : l'âge du l'acheteur (variable continue) et le sexe (femme ou homme). Ce modèle est présenté dans le Tableau 1.1 et donne lieu aux interprétations suivantes :

- Si la personne est un homme : la probabilité de choisir le chauffage diminue de 78 % (1-0,22) par rapport à la probabilité de choisir « aucun des deux ». Tandis que la probabilité de choisir l'isolation augmente de 200 % (1-3) par rapport à la probabilité de « aucun des deux ».
- Si la personne est une femme : la probabilité de choisir le chauffage est multipliée par 4,54 (1/0,22) et la probabilité de choisir l'isolation est multipliée par 0,33 (1/3) plutôt que choisir « aucun des deux ».
- Une année supplémentaire de la variable âge diminue la probabilité de choisir le chauffage plutôt que rien choisir de 7 % : $\exp(-0,066 \times 1) = 0,93$. Dix années supplémentaire de la variable âge augmentent la probabilité de choisir l'isolation plutôt que rien choisir de 12 % : $\exp(0,012 \times 10) = 1,12$.

1.5 Nature des données

La modélisation microéconomique et l'estimation des modèles de choix discrets nécessitent des données détaillées au niveau du décideur qui fait le choix : les caractéristiques des consommateurs (données démographiques et socio-économiques), la description de la situation du choix, ainsi que les attributs des alternatives de choix des consommateurs y compris les alternatives non choisies. Par exemple, prenons le choix d'une machine à laver le linge. La base de données « idéale » devrait contenir tous les produits qui ont été présentés aux décideurs avec les prix correspondants, les caractéristiques techniques, etc. L'entreprise qui commercialise ces produits pourrait partager ces données. Toutefois on sera limité uniquement aux produits déjà commercialisés, aux prix et aux caractéristiques techniques données. Les choses se compliquent pour les gros équipements énergétiques pour le logement tels que le chauffage et le chauffe-eau. Une partie des ménages ira directement les acheter dans une Grande Surface de Bricolage. D'autres s'adresseront aux artisans pour l'installation et l'achat. Les troisièmes choisiront leur nouveau logement en fonction des

équipements installés ou demanderont de les installer lors de la construction du logement. Les derniers ne choisiront rien et ces équipements leur seront « imposés ». Ces choix ne sont pas comparables et pourtant on aimerait avoir les préférences de n'importe quel ménage.

On distingue deux types de données. Les données de ***Préférences Révélées*** qui sont récoltées directement lors des choix ou auprès des décideurs sur leurs choix passés. Elles ont l'avantage de refléter le choix réel, mais ne tiennent compte que des biens et services qui existent déjà. Par ailleurs dans la plupart des cas ces données ne donnent aucune information sur les choix non retenus, ni sur la situation du choix. C'est particulièrement le cas des données concernant le chauffage et les travaux de rénovation. L'INSEE mène régulièrement des enquêtes qui s'intéressent entre autre à la situation énergétique des ménages. L'*Enquête Nationale Logement* (ENL) étudie les conditions et les caractéristiques physiques de logements, les difficultés d'accès, la qualité de l'habitat et les dépenses associées (INSEE, 2006). C'est une enquête quinquennale qui propose des données complémentaires socio-économiques : informations sur les ressources, opinions des ménages, etc. L'enquête *Statistiques sur les Ressources et les Conditions de Vie* (SRCV) est une enquête annuelle qui se fait dans le cadre du projet européen EU-SILC¹⁰. Pour une partie des ménages enquêtés il est possible de retrouver l'historique dans les enquêtes antérieures. En 2013 le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie a mené une enquête ponctuelle *Performance de l'Habitat, Équipements, Besoins et Usages de l'énergie* (PHEBUS) pour connaître les performances énergétiques du secteur résidentiel¹¹. De son côté EDF R&D mène ses propres enquêtes afin de mieux connaître le marché énergétique. Ces enquêtes sont très détaillées avec un très grand échantillon allant jusqu'à 40 000 ménages pour l'ENL, mais sont inadaptés aux modèles de choix discrets parce qu'elles ne donnent aucune information sur les alternatives de choix.

Afin de combler le manque d'information des enquêtes des préférences révélées, les enquêtes de ***Préférences Déclarées*** sont une technique qui a pour but de mettre les répondants dans une situation de choix hypothétique et d'enregistrer les choix faits. Les situations de choix doivent être modélisées avant d'être présentées aux répondants. Ainsi le modélisateur contrôle entièrement l'étude et peut introduire des biens et des technologies non présents sur le marché, ou par exemple changer les conditions d'achat pour voir les impacts de futures politiques publiques sur les comportements des gens. Cette technique est très utilisée en marketing pour introduire sur le marché un nouveau bien ou service, en ingénierie et gestion des transports ou encore pour l'évaluation des comportements ayant un impact sur l'environnement. Il existe très peu de travaux en France utilisant cette méthode pour analyser les choix énergétiques dans le secteur résidentiel tandis qu'on trouve un large panel d'études au niveau international. Les travaux qui existent sont soit très généraux soit ils ne

10. EU-SILC

11. PHEBUS

TABLEAU 1.2: Comparaison entre les données des préférences révélées et préférences déclarées

| | Préférence révélées | Préférences déclarées |
|---|--|--|
| Préférences des répondants | <ul style="list-style-type: none"> • Choix réel • Consistant avec le marché réel | <ul style="list-style-type: none"> • Choix hypothétique • Biais possible entre ce qui est déclaré et ce qui aurait été choisi dans la situation réelle |
| Alternatives des choix | <ul style="list-style-type: none"> • Uniquement les alternatives existantes • Manque d'information sur les alternatives non choisies | <ul style="list-style-type: none"> • Information complète sur l'ensemble des alternatives • Possibilité d'intégrer les biens ou services qui n'existent pas encore |
| Attributs des choix | <ul style="list-style-type: none"> • Erreurs de mesures • Faible variation entre les attributs • Plusieurs attributs pourront être corrélés | <ul style="list-style-type: none"> • Pas d'erreur de mesure • Possibilité d'ajouter des valeurs non observées sur le marché • Modélisateur contrôle les liens entre les attributs |
| Environnement de choix | <ul style="list-style-type: none"> • Non clair | <ul style="list-style-type: none"> • Détaillé et connu |
| Nombre d'observations | <ul style="list-style-type: none"> • Un seul choix par répondant | <ul style="list-style-type: none"> • Possibilité de faire des choix répétés |
| Source : Louviere et al. (2010) | | |

concernent pas directement l'énergie. Citons par exemple le travail de [Bonnet \(2013\)](#) qui étudie les choix des logements en France et utilise le système de chauffage installé dans le logement comme l'une des caractéristiques de l'offre du logement. Soit l'enquête répond à une question très pointue soit elle est restreinte géographiquement, comme c'est le cas de l'enquête sur l'acceptabilité sociale des éoliennes menée auprès des riverains de deux sites éoliens ([Terra et Fleuret, 2009](#)).

Le Tableau 1.2 compare les deux types de données. Outre les différences que nous avons citées plus haut, les données des préférences déclarées pourront avoir un biais lié au choix hypothétique. Il se peut que si on met le répondant dans la situation réelle, il se comportera différemment. Dans les données de préférences révélées le modélisateur est amené parfois à reconstituer la valeur de certains attributs qui n'ont pas été mesurés lors de l'enquête ou bien n'a pas une information claire, ce qui peut amener à des erreurs de mesures. Tandis que dans le cas des préférences déclarées le modélisateur contrôle la valeur des variables et les liens entre elles. Et finalement les enquêtes expérimentales sont moins coûteuses à mettre en place. Tout d'abord les réponses sont généralement récoltées à partir d'Internet avec en supplément la possibilité d'adaptation de l'enquête à chaque répondant. Puis, à l'opposé de l'enquête des préférences révélées, il est possible de répéter plusieurs fois le choix expérimental fait par l'individu. Ainsi si on demande de choisir 4 fois à chacun des 500 répondants, on aura $4 \times 500 = 2000$ observations. Etant donné que chaque type d'enquêtes présente des points faibles et forts, nous avons décidé d'utiliser les deux dans cette thèse. Les données de préférences révélées seront utilisées pour comprendre la situation des ménages et cerner les contraintes possibles (Chapitre 2). Les données de préférences déclarées, quant à elles, nous permettront de comprendre les préférences réelles des ménages français (Chapitre 3 et Chapitre 4).

1.6 Interprétations économiques

Dans cette section nous allons décrire quelques champs de l'utilisation des modèles de choix discrets et les applications possibles en énergie.

1.6.1 Consentement à payer et prix de réservation

Le consentement à payer (CAP) (ou *Willingness to Pay* en anglais) – mesure le montant maximum qu'un individu consent à payer pour une amélioration d'un bien ou d'un service (Rotillon, 2010). On peut distinguer deux mesures. Le CAP marginal est le montant maximal que le décideur est prêt à payer pour améliorer d'un niveau une caractéristique quantitative d'un bien ou d'un service. Par exemple dans le cas du choix de l'équipement de chauffage, nous pourrions être intéressés à connaître combien le ménage est prêt à payer pour avoir une réduction supplémentaire d'1 % sur ses dépenses annuelles d'énergie. Sinon, le CAP est équivalent à la notion du prix de réservation. Dans les cas extrêmes quand le CAP est négatif, on parle plutôt du Consentement A Recevoir (CAR).

Notons $\mathbb{E}(U_{nj})$ l'espérance d'utilité de l'individu n pour l'alternative j où p_{nj} est le prix ou le montant d'investissement de l'offre j proposé à l'individu n et X_{njk} l'attribut k de l'offre pour lequel on aimerait obtenir le CAP. Alors le décideur maximise son espérance d'utilité (Ben-Akiva et Lerman, 1985) :

$$\max \mathbb{E}(U_{nj}(V_{n1}, \dots, V_{nj}(p_{nj}, \dots, X_{njk}, \dots), \dots, V_{nJ})) \quad (1.43)$$

Si l'état de l'attribut X_{njk} s'améliore d'un niveau δx pour un coût supplémentaire δp , alors on peut retrouver cette valeur en utilisant le théorème des fonctions implicites :

$$CAP_{X_{njk}} = - \frac{\frac{\partial \max \mathbb{E}(p_{nj}, X_{njk})}{\partial X_{njk}}}{\frac{\partial \max \mathbb{E}(p_{nj}, X_{njk})}{\partial p_{nj}}} \quad (1.44)$$

Sachant que (Ben-Akiva et Lerman, 1985) :

$$\frac{\partial (\max_{i \in J} U_{ni})}{\partial V_{nj}} = P_n(i), \forall i \in J \quad (1.45)$$

On en déduit que le CAP est le rapport des dérivées partielles :

$$CAP(X_{njk}) = - \frac{\frac{\partial V_{nj}}{\partial X_{njk}}}{\frac{\partial V_{nj}}{\partial p_{nj}}} \quad (1.46)$$

Si la partie observable V_{nj} de l'utilité aléatoire est linéaire en paramètres, alors le CAP est le rapport entre le paramètre β_k associé à l'attribut k pour lequel on évolue le CAP et le paramètre γ associé au prix :

$$CAP(X_{njk}) = - \frac{\beta_k}{\gamma} \quad (1.47)$$

Nous avons vu plus haut que le CAP est équivalent au prix de réservation pour les attributs X_{njk} qualitatifs. Le modélisateur pourrait chercher les prix de réservation pour le bien lui-même, dans la situation de choix labélisé ou non. Prenons d'abord le choix labélisé : afin d'améliorer la performance énergétique du logement, le ménage pourrait choisir entre les différents types de travaux à faire (changer le chauffage, améliorer l'isolation des murs, remplacer les fenêtres, etc.). Dans ce cas, le modèle de choix discrets est estimé avec les constantes spécifiques aux alternatives de choix qu'on appellera β_j^{AC} dont l'une est fixée à 0. Le CAP pour l'alternative j est égale à :

$$CAP_j = - \frac{\beta_j^{AC}}{\gamma} \quad (1.48)$$

Comme l'une des constantes β_j^{AC} est fixée à 0, l'alternative de référence, le modélisateur est amené à comparer les autres constantes par rapport à 0. Ainsi, le CAP_j est le montant maximal que le décideur est prêt à payer en plus pour avoir plutôt l'alternative j que l'alternative de référence. Par contre le modélisateur ne connaît pas le consentement à payer pour l'alternative de référence. L'une des solutions est, par exemple, de considérer que l'utilité aléatoire est équivalente à la demande stochastique¹² si on ajoute l'alternative supplémentaire de choix « ne rien choisir » (Jedidi et Zhang, 2002). Ou encore Kohli et Mahajan (1991) qui proposent de considérer que le prix de réservation est le prix maximal que le consommateur est prêt à payer pour acheter le bien j au lieu d'acheter le bien qu'il préfère le plus. Anderson et De Palma (2005) considèrent que les prix de réservations ne varient pas en fonction des consommateurs, mais sont propres aux biens sur le marché. Si le prix est plus grand ou égal au prix de réservation d'un individu donné, cet individu n'achètera pas ce bien. Si le prix est strictement inférieur au prix de réservation, le consommateur choisira de façon équiprobable un bien parmi les biens dont les prix sont inférieurs au prix de réservation. Aksoy-Pierson *et al.* (2013) ne parlent pas des prix de réservations, mais ils proposent de borner la valeur du prix qui est utilisé dans la fonction de l'utilité

12. Il est possible d'utiliser la demande stochastique pour trouver l'équilibre du marché.

stochastique. Parce que le prix peut être plafonné par le régulateur du marché ou parce que le prix excède le prix de réservation du consommateur.

Dans le cas du modèle à paramètres aléatoires 1.3.3.1 le calcul du CAP dépend de la nature des paramètres. Les paramètres associés au prix et à l'attribut pour lequel on cherche le CAP pourront être tous les deux aléatoires. Dans ce cas l'équation (1.47) devient le rapport entre deux densités. La loi de ce rapport n'est pas connue et on ne peut donc pas en déduire la distribution du CAP. La solution la plus simple est de poser γ – une constante. Dans ce cas le rapport (1.47) devient la densité multipliée par $1/\gamma$. La deuxième solution est d'estimer le modèle dans ce qu'on appelle « l'espace de consentement à payer » (*WTP space* en anglais). Rappelons que l'utilité aléatoire, dont la partie observable est linéaire en paramètres, s'écrit comme :

$$U_{nj} = \gamma \times \text{prix} + \sum_{k=2}^K (\beta_k \times X_{nj k}) + \xi_{nj} \quad (1.49)$$

En remplaçant les paramètres β_k par $\gamma \times \text{CAP}_k / \gamma$ nous obtenons $\gamma \times \text{CAP}_k$ et nous pourrions obtenir l'estimation directe des CAP pour chaque attribut k (Scarpa *et al.*, 2008) :

$$U_{nj}^{CAP} = \gamma \times \text{prix} + \sum_{k=2}^K (\gamma \times \text{CAP}_k \times X_{nj k}) + \xi_{nj} \quad (1.50)$$

1.6.2 Taux d'actualisation implicite

Au début de ce chapitre nous avons évoqué le paradoxe de l'efficacité énergétique (Jaffe *et Stavins*, 1994) : les ménages n'investissent pas ou peu en gros équipements énergétiques très performants et intéressants du point de vu de l'investissement. L'une des explications de ce paradoxe est que les ménages utilisent des taux d'actualisation très élevés (20 % - 200 %, voire plus) pour lesquels l'investissement n'est alors plus rentable (Min *et al.*, 2014).

Les montants associés aux travaux énergétiques peuvent être très élevés et excéder facilement le revenu mensuel du ménage. De ce fait on considère le plus souvent que de tels achats sont des investissements comme par exemple l'achat d'une voiture ou du logement. Les entreprises utilisent comme un des critères de décision d'investir – la Valeur Actuelle Nette (*VAN*). La *VAN* est la différence entre les gains actualisés sur une période du temps donnée moins l'investissement :

$$VAN = \sum_{t=1}^T \left(\frac{(F_t - F_t^0)}{(1 + \tau)^t} \right) - INV \quad (1.51)$$

Avec $t \in T$ le nombre de périodes considérées, F_t – les dépenses d’énergie qu’engendre le nouveau équipement à la période t , F_t^0 – les dépenses d’énergie à la période t avec l’ancien équipement, τ est le taux d’actualisation et INV – le montant investi. On décide d’investir si la VAN est positive. Le signe de la VAN dépend fortement du nombre des périodes considérées et du taux d’actualisation τ . Comme le ménage n’est pas un habitué des taux d’actualisation et ne les utilisera pas explicitement, on parle souvent du taux d’actualisation implicite τ^{im} correspondant au choix effectué.

[Hausman \(1979\)](#) propose pour la première fois d’estimer le taux d’actualisation implicite en utilisant les modèles de choix discrets et plus tard [Train \(1985\)](#) donne une revue de la littérature sur les méthodes d’estimation de ce taux. Reprenons l’utilité aléatoire U_{nj} pour le choix de l’équipement $j \in J$:

$$U_{nj} = \beta_{inv} INV_{nj} + \beta_f F_{nj} + \beta_x^T X_{nj} + \xi_{nj} \quad (1.52)$$

Où INV_{nj} est le montant d’investissement, β_{inv} – le paramètre associé à l’investissement, F_{nj} la facture annuelle d’énergie pour l’équipement j et ménage n avec β_f le paramètre associé, X_{nj} – les autres attributs qui expliquent le choix avec β_x les paramètres associés et ξ_{nj} – la part non observable de l’utilité. Les deux coefficients, β_{inv} et β_f sont utilisés pour calculer le taux d’actualisation implicite τ^{im} :

$$\frac{\beta_{inv}}{\beta_f} = \frac{\tau^{im}}{1 - (1 + \tau^{im})^{-T}} \quad (1.53)$$

En prenant pour hypothèse que la durée de vie de l’équipement est infinie, l’équation (1.53) se simplifie et le taux d’actualisation est égal simplement au rapport entre le paramètre associé au coût et le paramètre associé au gain sur la facture. En fonction des modèles et des conditions considérées, les modélisateurs jouent sur l’équation (1.53) pour en déduire le taux d’actualisation implicite.

1.6.3 Demande indirecte, identité de Roy et modèle discret-continu

Les modèles de choix discrets ne permettent d’obtenir que les probabilités de choix pour les alternatives considérées, par exemple le choix du chauffage. Cependant il pourrait être utile d’obtenir une estimation de la quantité d’énergie nécessaire pour satisfaire la demande qu’engendre l’utilisation de ces équipements de chauffage. C’est ce que proposent de faire [Dubin et McFadden \(1984\)](#) avec leur modèle discret-continu en s’appuyant sur la notion de la demande Marshallienne et l’identité de [Roy \(1947\)](#). La demande Marshallienne est définie comme le programme de maximisation de l’utilité sous contrainte budgétaire.

La fonction d'utilité indirecte reflète le maximum d'utilité du consommateur en fonction du prix du bien et du revenu du consommateur. La fonction est dite indirecte parce que de façon générale l'individu fait les choix en fonction de la quantité du bien à consommer et non directement en fonction du prix. L'utilité indirecte est trouvée en maximisant l'utilité directe. A partir de l'utilité indirecte on peut trouver la demande Marshallienne. Il existe un lien entre l'utilité indirecte et la demande Marshallienne, qui est donné par l'identité de Roy. Soit V_j l'utilité indirecte pour le bien j avec p_j le prix du bien et Y le revenu du consommateur, la demande Marshallienne d_j pour ce bien est :

$$d_j = - \frac{\partial V_j / \partial p_j}{\partial V_j / \partial Y} \quad (1.54)$$

Le modèle de [Dubin et McFadden \(1984\)](#) propose une estimation simultanée des probabilités de choix et de la quantité d'énergie demandée pour satisfaire ces choix. La particularité du modèle est qu'il apporte une correction à la corrélation qui existe entre les résidus du modèle linéaire et l'utilité non observable du modèle de choix discrets. Le modèle discret-continu est utilisé dans plusieurs articles pour la demande d'énergie dans le secteur résidentiel. Dans cette thèse nous ne nous intéressons pas à la consommation d'énergie des équipements, toutefois il nous semble important de citer ces travaux. Tout particulièrement parce qu'ils utilisent les données de préférences révélées. Nous pourrions utiliser une partie de leurs résultats liés à la partie probabiliste du modèle.

[Couture et al. \(2012\)](#) s'intéressent à la consommation du bois pour le besoin de chauffage en France (Midi Pyrénées) en distinguant la principale source d'énergie et la secondaire. Les auteurs considèrent que les ménages français font face à 5 alternatives de choix : ne pas consommer le bois, consommer le bois comme la source principale d'énergie ou utiliser le bois comme source secondaire (avec l'électricité, le gaz ou le fioul). D'autres alternatives de choix ont été écartées comme non existantes ou très minoritaires. Leur modèle indique que pour chaque source d'énergie on a une combinaison des usages possibles qui est propre au type d'énergie. En utilisant l'identité de Roy ils estiment la demande de bois par les moindres carrés ordinaires.

[Mansur et al. \(2008\)](#) étudient à la fois la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel et dans le secteur tertiaire aux Etats-Unis. Ils estiment la demande d'énergie afin de présenter les scénarios prospectifs et analyser l'impact sur le changement climatique. Ils portent un intérêt particulier aux effets marginaux des modèles de choix discrets (changement de la probabilité si une variable change, autrement dit – les élasticités). Les alternatives de choix pour les ménages et le tertiaire sont l'électricité, le gaz et le fuel. Pour le résidentiel, ils estiment deux modèles de choix en distinguant les ménages qui ont accès au réseau du gaz naturel et ceux qui n'en ont pas.

Nesbakken (1999) analyse la relation entre le choix du système de chauffage et son utilisation en Norvège. La Norvège présente une particularité au niveau des sources d'énergie de chauffage présentes dans le même logement : plus des deux tiers de logements ont plusieurs systèmes de chauffage qui leur permettent de changer facilement le type d'énergie suite aux variations du prix des énergies. L'analyse se fait sur les années 1993–1995 : un modèle par année d'étude et le modèle global mais qui divise les ménages en deux catégories selon leur niveau de revenu.

Braun (2010) s'intéresse aux déterminants de chauffage résidentiel en Allemagne tout en tenant compte de deux particularités : la différence entre l'Allemagne de l'est et de l'ouest, et aussi le statut d'occupation (propriétaire ou locataire).

1.7 Conclusion

Ce chapitre est une revue de la bibliographie sur les modèles de choix discrets qui nous ont servi de base pour l'analyse empirique des préférences des ménages français. Considérer de façon déterministe l'utilité des consommateurs est intéressant pour les approches macro-économiques ou les modèles généraux ce qui permet de simplifier l'étude. Toutefois en étudiant les décisions individuelles, on constate que les décisions sont prises de façon aléatoire. En regardant les choix parmi les mêmes offres pour un ensemble assez grand de décideurs, le modélisateur pourra en déduire les probabilités d'être choisie pour chaque offre. C'est à ce moment-là que la théorie de l'utilité aléatoire et les modèles de choix discrets interviennent pour étudier les choix individuels.

La première chose à prendre en compte afin de faire un bon usage des modèles de choix discrets – c'est la base de données qui donne l'information sur les alternatives de choix présentées au décideur. Nous avons commencé le travail de cette thèse en utilisant les données de préférences révélées : Enquête Logement (INSEE, 2006) et l'Enquête SOFRES 2013 faite pour le compte d'EDF R&D. L'intérêt de ces bases réside dans la réalité des données et les informations qu'elles apportent sur le logement des ménages et l'utilisation de l'énergie. L'ENL 2006 contient les informations détaillées sur plus de 40 000 ménages et a plus d'un millier de variables. C'est l'enquête la plus détaillée, mais elle date d'environ 10 années¹³. En vue d'inclure les changements récents nous avons aussi considéré les enquêtes ponctuelles d'EDF faites en 2008 et 2013. Le point commun de ces enquêtes est l'absence d'information sur les alternatives non-choisies et les conditions de choix. Au début nous avons tenté de reconstituer les alternatives non choisies en utilisant le savoir-faire d'EDF

13. Une nouvelle vague de l'enquête a été faite récemment (2013), mais l'accès n'y est pas encore disponible pour des études statistiques. Les premiers résultats et les comparaisons entre les années 2001, 2006 et 2013 pourront être consultés sur le site de l'INSEE : [voir le site internet d'INSEE](#)

R&D et les données existantes sur le coût des technologies. Même si les données sont très détaillées, nous n'avons pas réussi à obtenir des alternatives suffisamment bien reconstruites pour une utilisation économétrique. Mais le point décisif qui nous a forcés à abandonner cette approche, ce sont les contraintes et les barrières que rencontrent les ménages qui réduisent les choix possibles. Ils sont impossibles à reconstituer en utilisant les données citées. Prenons comme exemple un ménage qui utilise des convecteurs dans un logement non desservi par le gaz de réseau. Doit-on considérer que le ménage n'était pas face à l'alternative « choisir un chauffage utilisant le gaz de réseau » ? D'un point de vue – oui. Si le ménage ne peut pas utiliser le chauffage à gaz, il ne le considérera pas comme un choix possible. Mais le ménage avait pu tenir compte du chauffage installé en choisissant ce logement-là parce qu'il préfère l'électricité au gaz de réseau et cela ne le dérange pas que son logement n'ait pas accès au gaz.

Au lieu d'utiliser les données de préférences révélées (ENL 2006, SOFRES 2013) dans le modèle de choix pour étudier les préférences, nous les utilisons pour quantifier le degré des contraintes et classer les ménages entre ceux qui ont la flexibilité et l'opportunité de choix et ceux qui semblent ne pas en avoir ou en avoir moins. Le modèle MNL est utilisé pour estimer la probabilité d'avoir telle ou telle énergie ou tel ou tel chauffage en fonction des caractéristiques du logement et du ménage. Si pour une sous-population des ménages la probabilité d'une des alternatives de choix est proche de 1, alors cette population est fortement contrainte par son environnement. Le modèle et les résultats de cette analyse seront présentés dans le chapitre suivant.

Etant données les limites des bases des données ENL 2006 et SOFRES 2013, nous avons décidé de monter notre propre enquête des préférences déclarées. La méthodologie de l'enquête, la mise en place et les résultats descriptifs de l'enquête seront présentés dans le Chapitre 3 suivi par le Chapitre 4 sur des résultats issus des estimations économétriques.

Chapitre 2

Mesure des contraintes dans le cadre du choix de chauffage

Quand on aborde le choix du système de chauffage, il faut tenir compte des situations dans lesquelles se trouve le ménage et savoir dans quelle mesure il choisit son système de chauffage. La situation la moins contraignante est le choix du chauffage à installer lors de la construction d'une maison individuelle, avec pour seules contraintes possibles : l'accès à l'énergie et le coût d'installation. Par exemple, une pompe à chaleur eau-eau est impossible à installer dans certains endroits en raison de contraintes de terrain qui peuvent être géologiques ou administratives (ADEME, 2015b). Si le logement n'a pas accès au gaz de réseau, le ménage pourrait être obligé de ne pas considérer la chaudière au gaz naturel comme un choix possible. Certes, il peut utiliser le fioul au lieu du gaz naturel, mais ce moyen de chauffage était le plus coûteux parmi les moyens existants en France (CEREN, 2014). En ce qui concerne le coût du raccordement au réseau de gaz, il est compris entre 390-620 €¹ si la commune est raccordée au gaz et si le réseau passe non loin du logement. Par contre si le réseau est éloigné, le raccordement peut coûter plusieurs dizaines de milliers d'euros. Les choses se compliquent pour l'achat d'un appartement neuf dans un immeuble. Le ménage peut demander à une entreprise de faire les aménagements nécessaires, quoique très limités par les choix initiaux du promoteur. Le parc des logements ne se limite pas aux logements neufs, bien au contraire comme nous avons vu dans l'introduction de ce manuscrit. Ainsi, dans les logements déjà construits, il peut être difficile de changer le moyen de chauffage. Outre la chaudière et son installation, le ménage devra installer le réseau des émetteurs de chaleur à eau s'ils ne sont pas présents dans le logement. Par ailleurs, les ménages doivent tenir compte des contraintes financières qui ne sont pas facilement modifiables.

1. D'après le site <http://www.grdf.fr/particuliers/services-gaz-en-ligne/demander-raccordement-gaz-naturel>

Ces quelques exemples nous montrent que les ménages peuvent se retrouver dans des situations où les alternatives de choix sont limitées ou, pire, les choix sont imposés. Non parce qu'il n'y a pas d'autres alternatives, mais parce que les autres alternatives ne sont pas envisageables à cause des contraintes liées à l'environnement du ménage. De telles contraintes pourraient rendre inefficace ou fortement limiter les incitations gouvernementales pour promouvoir l'efficacité énergétique et pourraient expliquer la faible part de marché de certains équipements énergétiquement efficaces. Le gouvernement qui met en place ces politiques et les incitations doit tenir compte de ces contraintes, voire proposer des solutions pour les réduire.

Le but de ce chapitre est, donc, de proposer une méthodologie qui permet de quantifier les contraintes, analyser leurs impacts sur les probabilités d'avoir les différents systèmes de chauffage et de définir les groupes des ménages qui sont les plus contraints. Une fois la méthodologie proposée, nous l'appliquons au cas du choix de moyen de chauffage en France en 2006 et 2013.

2.1 Modélisation des contraintes lors du choix de moyen de chauffage

2.1.1 Comment définir les contraintes ?

Dans le cas des données de préférences révélées (voir Section 1.5) nous ne pouvons qu'observer le moyen de chauffage installé et la situation du ménage, décrite par les caractéristiques sociodémographiques et son environnement. Ces données ne donnent pas d'informations sur les choix non retenus et les préférences des ménages. Certains chercheurs proposent de considérer que le ménage est libre de choisir et/ou que sa situation reflète ses préférences et explique les décisions prises (Bourdon, 2003). D'autres précisent que le modèle ne doit pas être considéré comme le modèle de choix, mais plutôt comme la disponibilité des alternatives de choix compte tenu des circonstances (Braun, 2010).

La situation du ménage peut, en effet, soit résulter de contraintes subies, soit être le reflet de ses préférences, soit les deux à la fois. Par exemple, si l'âge de la personne de référence influence les probabilités d'avoir les différents moyens de chauffage, certains auteurs interprètent cela comme une différence de préférences entre les générations (Ameli et Brandt, 2014, Couture *et al.*, 2012). Mais il est possible que les préférences soient les mêmes et que l'influence observée résulte de contraintes subies par l'une des générations. Un prêt bancaire peut être refusé à cause de l'âge de la personne, par exemple. Les personnes âgées peuvent ne pas envisager d'investir dans des technologies coûteuses parce qu'elles pensent ne pas avoir assez de temps pour les rentabiliser de leur vivant. Ou bien au contraire les

personnes âgées peuvent avoir plus d'argent disponible que les jeunes, parce qu'elles n'ont plus d'enfant à la charge et, que leur prêt immobilier est déjà remboursé.

Etant donné qu'à ce stade de l'étude nous sommes incapables de dire dans quelle mesure les caractéristiques du ménage et du logement reflètent les préférences des ménages, nous proposons de considérer que ces variables ne peuvent représenter que des contraintes. Si les contraintes, à elles seules, permettent de prédire et d'expliquer correctement la probabilité d'avoir un des moyens de chauffage, alors nous pourrions dire que le ménage est contraint. En regardant de près les probabilités obtenues grâce au modèle de choix discrets, nous pourrions quantifier le nombre de ménages qui ont pour une alternative donnée, une probabilité proche de 1, c'est-à-dire une alternative qui domine les autres. Nous verrons plus tard dans le Chapitre 4, qui utilise les données issues de l'enquête expérimentale, si la situation du ménage reflète aussi ses préférences.

Les données réelles de préférences révélées, concernant la situation du ménage sont souvent utilisées dans les modèles de choix discrets, tout particulièrement dans le cadre du modèle discret-continue de [Dubin et McFadden \(1984\)](#) (voir Section 1.6.3). [Braun \(2010\)](#), [Liao et Chang \(2002\)](#), [Mansur et al. \(2008\)](#), [Nesbakken \(1999\)](#) et [Vaage \(2000\)](#) étudient le choix et la consommation d'énergie pour le chauffage et/ou pour la production d'eau chaude sanitaire. [Liao et Chang \(2002\)](#) trouvent pour les Etats-Unis que toutes les variables sociodémographiques, à l'exception de l'âge, n'ont pas d'effet sur les probabilités de choix. Le gaz pour le chauffage est plutôt utilisé dans les maisons individuelles et en milieu rural. Une autre étude portant sur les Etats-Unis, [Mansur et al. \(2008\)](#), montre que l'âge, la taille du ménage, la taille du logement et l'année de construction ont un effet négatif sur la probabilité d'avoir un chauffage électrique. Les résultats d'estimation de [Braun \(2010\)](#) indiquent que le revenu, la taille du ménage, le niveau d'éducation, l'âge du logement et le fait d'être propriétaire augmentent la probabilité d'avoir un chauffage au gaz en Allemagne. [Nesbakken \(1999\)](#) et [Vaage \(2000\)](#) s'intéressent au cas de la Norvège où le chauffage électrique est très répandu et les ménages ont souvent plusieurs sources d'énergie pour chauffer leur logement. Les auteurs trouvent que le revenu et la taille du ménage n'ont pas d'impact sur les probabilités, et que la probabilité d'avoir un chauffage multi-sources est plus forte dans les maisons individuelles.

[Scasny et Urban \(2009\)](#) et [Ameli et Brandt \(2014\)](#) estiment la probabilité d'investir dans des équipements basse consommation et la rénovation du logement dans les pays de l'OCDE. Les deux études proposent un modèle de régression commun à tous les pays étudiés. Cela suppose que les déterminants ont les mêmes effets dans tous les pays. [Scasny et Urban \(2009\)](#) trouvent qu'en 2008 le revenu, le nombre de personnes dans le ménage, la taille du logement, le statut d'occupation (propriétaire) augmentent la probabilité d'investir dans un chauffage efficace, tandis que l'âge et la durée d'occupation du logement la diminue.

[Ameli et Brandt \(2014\)](#) s'intéressent plutôt aux déterminants qui influencent la probabilité d'installer ou non des PAC, des panneaux solaires, un double vitrage ou de faire des travaux d'isolation thermique. Ils trouvent aussi que plus la durée d'occupation du logement par un ménage est longue, plus la probabilité d'investir dans des travaux d'efficacité énergétique est faible. Le revenu a un effet positif sur la probabilité, mais n'est pas linéaire. L'effet est plus important pour le ménage qui passe d'un faible revenu à un revenu moyen, que pour le ménage au revenu moyen qui devient aisé.

Nous observons aussi le même type d'études appliquées au cas de la France. [Bourdon \(2003\)](#) étudie dans sa thèse le choix du combustible de chauffage par les ménages propriétaires en se basant sur l'Enquête Nationale Logement 1996. Ses résultats montrent que le type du logement et l'accès au gaz de réseau expliquent pour beaucoup les estimations. En 1996, les ménages, qui habitaient des maisons non raccordées au gaz de réseau, préféraient avoir le chauffage au fioul plutôt que le chauffage électrique. Le fioul était également préféré dans les logements construits après la première réglementation thermique de 1974. Seul le climat méditerranéen impactait les choix du chauffage, en 1996 où les gens préféraient se chauffer à l'électricité. [Couture et al. \(2012\)](#) s'intéressent à la consommation du bois pour le besoin de chauffage en région Midi Pyrénées en distinguant les sources d'énergie principale et secondaire. Le bois est surtout utilisé comme source principale de chauffage par de grands ménages à faible revenu, habitant dans des maisons non raccordées au gaz de réseau, plutôt jeunes et qui sont propriétaires de leur logement. [Bousquet et Vielle \(2008\)](#), quant à eux, analysent le choix de l'énergie de chauffage pour les logements neufs dans les différentes régions françaises entre 1996 et 2006. [Legendre et Ricci \(2015\)](#) utilisent les données de l'Enquête Logement 2006 pour déterminer les probabilités qu'un ménage français se retrouve en situation de précarité énergétique.

Le Tableau 2.1 présente les caractéristiques du ménage et du logement qui ont été utilisées pour estimer les probabilités de choix dans les études citées dans cette partie de chapitre. Le revenu du ménage et l'âge des occupants sont les variables utilisées le plus souvent, suivies par la taille du ménage, le statut d'occupation du logement et le type du logement. Les caractéristiques sociales du ménage, tel que le niveau d'éducation, la catégorie socio-professionnelle et le type du ménage, sont utilisés dans 5-6 études. Toutefois soit ces déterminants ne sont pas significatifs ([Bourdon, 2003](#), [Liao et Chang, 2002](#)), soit ils sont utilisés dans les études où il manque l'information sur le revenu ([Legendre et Ricci, 2015](#)). En effet, il y a une certaine corrélation entre les caractéristiques socio-professionnelles et le revenu. Par exemple, d'après l'INSEE le salaire moyen des cadres s'élevait à 4032 €/mois en 2012, tandis que le salaire moyen des ouvriers était de 1650 €/mois². Le salaire moyen d'une personne sans aucun diplôme était compris entre 1000 €/mois et 1500 €/mois en

2. voir www.insee.fr

2009 et le salaire moyen d'une personne titulaire au moins d'un diplôme BAC +2³ s'établissait entre 1500 €/mois et 3500 €/mois⁴.

3. BAC +2 : 2 ans d'études supérieures après le baccalauréat

4. voir www.insee.fr

TABLEAU 2.1: Les variables d'environnement du ménage utilisées dans les modèles de choix discrets

| Etude : | Legendre et Ricci | Couture <i>et al.</i> | Bousquet et Vielle | Bourdon | Liao et Chang | Mansur <i>et al.</i> | Braun | Nesbakken | Vaage | Scasny et Urban | Ameli et Brandt |
|---------------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--|-----------------|
| Pays | France | France | France | France | USA | USA | Allemagne | Norvège | Norvège | OCDE ¹ | OCDE |
| Domain de choix | Précarité énergétique | Energie pour le chauffage | Energie pour le chauffage | Energie pour le chauffage | Choix de l'énergie | Choix de l'énergie | Energie pour le chauffage | Energie pour le chauffage | Energie pour le chauffage | Investissement dans équipements basse consommation | |
| Revenu du ménage | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Age | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Taille du ménage | | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ |
| Niveau d'éducation | ✓ | | | | | | ✓ | | | ✓ | ✓ |
| Type du ménage | | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | | ✓ | ✓ |
| Catégorie socio professionnelle | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | | | | ✓ | |
| Surface du logement | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | | ✓ | |
| Climat | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | |
| Région | | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | |
| Année de construction | | | | ✓ | | | ✓ | | ✓ | | |
| Prix d'énergie ou dépenses | | ✓ | | | | ✓ | | | | | |
| Accès au gaz | | ✓ | | ✓ | | ✓ | | | | | |
| Statut d'occupation | ✓ | ✓ | | | | | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| Type du logement | | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | ✓ | | | ✓ |
| Unité urbaine | | | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | ✓ |

¹ OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques
Source : compilation faite par l'auteur

La moitié des études utilise les prix des énergies et les dépenses d'énergie. Les prix ont surtout un impact dans le cas de l'achat ou de la construction du logement (Bousquet et Vielle, 2008), tandis que les dépenses associées au chauffage semblent avoir un impact limité (Couture *et al.*, 2012). Concernant les caractéristiques du logement, outre celles qu'on a déjà citées, les auteurs utilisent aussi la surface du logement (ou le nombre de pièces à chauffer), l'accès au gaz du réseau, le climat, les différences régionales et l'unité urbaine. Toutes ces variables sont plus au moins colinéaires comme nous l'avons montré sur l'exemple du niveau d'étude et du revenu. Il est conseillé d'éviter d'utiliser en même temps les variables soupçonnées d'être fortement colinéaires ou bien expliquer en quoi elles se différencient et peuvent avoir un impact différent sur les probabilités de choix (Afsa Essafi, 2003).

2.1.2 Présentation de la méthodologie

Le modèle Logit Multinomial ou MNL (Section 1.3.1) est utilisé afin d'obtenir les estimations des probabilités individuelles. La probabilité que le ménage n choisisse l'alternative j en tenant compte des contraintes Z_n liées à sa situation individuelle est donné par :

$$U_{nj} = Z_n \alpha_j + \xi_{nj} \quad (2.1)$$

Avec α_j – le vecteur des paramètres associés aux contraintes Z_n . ξ_{nj} est la part aléatoire de l'utilité non observable par le modélisateur, y compris l'information sur d'autres contraintes dont nous n'avons pas connaissance et les attributs X_{nj} associés aux alternatives de choix j que nous n'observons pas dans les données de préférences révélées. En estimant un tel modèle par la méthode de maximum de vraisemblance, nous obtenons l'estimateur du vecteur des paramètres $\hat{\alpha}_{nj}$ qui nous est utile pour calculer les probabilités estimées pour chaque ménage n et alternative $i \in J$:

$$\hat{P}_{nj} = \frac{\exp Z_n \hat{\alpha}_i}{\sum_{j=1}^J \exp Z_n \hat{\alpha}_j} \quad (2.2)$$

Une fois les probabilités calculées, nous prenons comme hypothèse qu'elles sont déterministes⁵ et que l'ensemble des probabilités estimées pour chaque alternative j est un mélange univarié f_g^j de g densités gaussiennes. C'est-à-dire que la probabilité \hat{P}_{nj} du ménage n pour une alternative donnée j appartient à un groupe g qui suit une loi normale de moyenne μ_g et de la variance σ_g^2 . On note ω_g le poids de chaque groupe dans le mélange gaussien f_g^j . Si

5. Cela signifie que nous ne tenons pas compte de l'erreur d'estimation des probabilités lors de la classification des probabilités.

Ω – l’ensemble des poids $\omega_1, \dots, \omega_g$ et Θ – l’ensemble des paramètres $(\mu_1, \sigma_1^2), \dots, (\mu_g, \sigma_g^2)$ des lois normales, alors le mélange gaussien s’écrira comme (Fraley *et al.*, 2012) :

$$f^j(\hat{P}, \Omega, \Theta) = \sum_{l=1}^G \omega_l f(\hat{P}, (\mu_l, \sigma_l^2)) \quad (2.3)$$

Les paramètres Ω et Θ du mélange gaussien sont obtenus par la méthode de maximum de vraisemblance en utilisant l’algorithme Espérance-Maximisation connu sous le sigle **EM** (Dempster *et al.*, 1977). La première étape **E** (Espérance) consiste à trouver la valeur des poids Ω pour tous les \hat{P}_n . A l’étape **M** (Maximisation) les paramètres Θ des densités gaussiennes sont calculés en tenant compte des poids obtenus à l’étape **E** (Fraley *et al.*, 2012).

Nous utilisons le package *Mclust* (Fraley *et al.*, 2012) dans le logiciel *R* pour trouver les densités qui forment le mélange \hat{P}_{nj} pour chaque alternative j . Pour les données univariées, ce qui est notre cas, le package propose deux types de mélange gaussienne : avec la même variance pour chaque groupe $\sigma_g^2 = \sigma^2 \forall g$ et avec une variance propre à chaque groupe $\sigma_g^2 \neq \sigma_l^2 \forall g \neq l$. Le nombre g des densités dans la mixture est donné par le modélisateur. Afin de définir le nombre optimal des groupes et le type de la mixture, nous faisons la classification 9 fois pour chaque type de mixture : avec g allant de 2 groupes à 10 groupes. La meilleure classification pour \hat{P}_{nj} est celle pour laquelle le critère d’information *BIC* (voir (1.36)) est le plus faible.

Notre but est de trouver pour chaque alternative de choix le groupe de ménages dont la probabilité moyenne est la plus forte. On considère que le ménage est fortement contraint par les caractéristiques du logement et sa condition sociodémographique si la probabilité de l’une des alternatives de choix est proche de 1 et si le pseudo ρ^2 du modèle est élevé. Cela signifiera que les contraintes du côté offre Z_n définissent à elles seules le moyen de chauffage installé. D’un point de vue théorique, nous aurions pu utiliser les modèles des classes latentes ou bien une classification non automatique (EM, hiérarchique, etc.) directement sur les données sans passer par l’estimation des modèles de choix discrets. Toutefois, cela aurait nécessité un ordinateur puissant, compte tenu du nombre de données dont nous disposons⁶. Cela implique aussi une partition en faible nombre de groupes et/ou de déclarer le même nombre de groupes par moyen de chauffage. Notre technique permet non seulement d’arriver au bout de la classification, mais aussi de mesurer les contraintes et d’avoir les probabilités de choix par groupe.

6. Plusieurs méthodes ont été testées sans succès (*poLCA* dans *R*, classification hiérarchique en utilisant les résultats d’analyse en correspondances multiples, etc.)

2.1.3 Choix du système de chauffage

Nous nous intéressons ici à l'influence de la situation sociodémographique du ménage et des caractéristiques de son logement sur les probabilités d'avoir différents moyens de chauffage. Les ménages sont supposés choisir la situation qui maximise leur utilité en tenant compte de contraintes : le revenu, la composition du ménage, les caractéristiques du logement et le prix des énergies.

Nous considérons dans ce modèle les moyens de chauffage les plus communs en France : c'est-à-dire le Chauffage Electrique Direct (CED) tels que les convecteurs, panneaux rayonnants, etc., les chaudières individuelles ou collectives qui représentaient en 2006 respectivement 27 %, 47 % et 17 % des systèmes installés (INSEE, 2006). A cela on ajoute les Pompes A Chaleur (PAC) et les cheminées, inserts et poêles à bois (chauffage au bois) en tant que source principale de chauffage afin de tenir compte des moyens de chauffage basés sur des énergies renouvelables.

Le ménage fait donc face, au plus, à 5 alternatives de choix : CED, chaudière individuelle, chaudière collective, PAC et chauffage au bois. Les alternatives de choix utilisées dans le modèle de choix discrets doivent satisfaire trois critères : présenter un ensemble fini, être mutuellement exclusives et être exhaustives, c'est-à-dire que le modèle doit contenir toutes les alternatives de choix. Le dernier critère d'exhaustivité n'est donc pas vérifié dans notre modèle puisqu'il y a plus que cinq moyens de chauffage en France. Par exemple, le chauffage urbain, les poêles à énergies fossiles, les cuisinières chauffantes, etc. Nous aurions pu les inclure dans le modèle en ajoutant la sixième alternative : « autres moyens de chauffage ». Cependant cette alternative inclus des ménages aux profils très variables et des moyens de chauffage variés. Prenons comme hypothèse que le ménage utilise ces autres moyens de chauffage parce qu'il y est obligé (chauffage urbain) ou parce qu'il ne peut pas utiliser ni le CED, ni une chaudière, ni un chauffage au bois. Alors les 5 alternatives considérées deviennent exhaustives et les autres moyens de chauffage peuvent être négligés.

Au final l'ensemble J^{CH} des alternatives de choix pour le modèle de chauffage est donné par :

- Chauffage électrique direct (CED)
- Chaudière individuelle
- Chaudière collective
- Pompe à chaleur (PAC)
- Systèmes utilisant la biomasse (cheminées, insert et poêles à bois)

Pour des raisons purement mathématiques nous devons choisir une alternative de référence à laquelle on comparera l'ensemble des résultats d'estimation. Nous avons choisi de retenir le CED comme alternative de référence pour deux raisons. Tout d'abord, cette alternative

est assez fréquemment choisie (entre 25,8 % et 31,5 %), ensuite, nous aimerions comparer les autres moyens de chauffage à ceux qui utilisent l'électricité.

2.1.4 Description des contraintes utilisées

Dans nos estimations nous avons décidé de tester le maximum de variables possibles et disponibles à la fois dans les deux bases des données utilisées. Nous pouvons regrouper ces variables en trois grands groupes : caractéristiques du ménage, caractéristiques techniques du logement et spécificités régionales, auxquelles on ajoute si possible le prix des énergies.

Caractéristiques du ménage

Nous utilisons dans les estimations finales trois variables : le revenu mensuel du ménage, la taille du ménage et l'âge de la personne de référence. Le revenu mensuel du ménage est une variable importante pour laquelle nous nous attendons à avoir un effet négatif sur le chauffage au bois et un effet positif sur les PAC. En effet, la PAC est le moyen de chauffage le plus cher à installer : la PAC eau-eau coûte en moyenne 13500 € tandis qu'une chaudière seulement 4300 € (UFE, 2012). Le bois quant à lui est considéré, comme une des sources d'énergie la moins onéreuse, voire gratuite pour une partie des ménages (Couture *et al.*, 2012, INSEE, 2006). Notons que nous avons aussi testé le niveau d'éducation et la catégorie socio-professionnelle de la personne de référence, mais ces variables ne sont pas significatives.

Caractéristiques du logement

La première variable retenue est l'accès au gaz de réseau. C'est l'une des contraintes techniques dont il est fait état dans l'introduction de ce chapitre. La deuxième variable est l'année de construction du logement qui est en lien avec sa performance thermique parce que le gouvernement français améliore régulièrement la réglementation thermique des bâtiments depuis 1974⁷.

Comme l'année de construction du logement ne reflète pas entièrement sa performance thermique, il est nécessaire d'ajouter l'information sur l'isolation des murs et du toit, ainsi que la présence de double vitrage (les variables 4, 5 et 6). En effet, le ménage peut avoir fait des travaux de rénovation dans son logement afin de réduire les pertes thermiques.

La septième variable est le statut d'occupation du logement qui indique le degré de liberté dans la prise de décision pour entreprendre les travaux de rénovation. Dans les maisons individuelles, les propriétaires sont libres de choisir les travaux à faire, pour eux et pour leurs locataires. Dans le cas des copropriétés, par exemple, en logements collectifs, tous

7. La première réglementation thermique a été mise en place en 1974, suivie par les nouvelles réglementations en 1988, 2000, 2005 et 2012.

les propriétaires participent à la prise de décision des travaux à faire. Cependant, la durée moyenne entre la décision de faire les travaux et la fin effective des travaux est d'environ 4-5 ans (ADEME, 2014c). Les locataires, quant à eux, ne prennent pas de décision. Ils ne peuvent qu'influencer le choix et participer financièrement à l'installation du nouveau moyen de chauffage, allégeant ainsi les dépenses du propriétaire. Toutefois ce n'est possible que pour les locataires du secteur privé. Les locataires de logements sociaux (HLM) ne sont pas inclus dans le processus de décision et ne peuvent pas l'influencer.

Nous ajoutons à ces variables la taille du logement, la variable 8. Il y a un lien entre la taille du logement et la taille du ménage, puisque en moyenne plus il y a de personnes dans le ménage, plus le logement est grand. Mais la surface du logement est aussi un indicateur de la quantité d'énergie nécessaire pour le chauffer. A performance égale, plus le logement est grand, plus le volume à chauffer est important et la facture d'énergie conséquente. Les ménages qui occupent un grand logement pourront être contraints de ne pas utiliser certains moyens de chauffage et/ou énergies au risque de s'exposer à la précarité énergétique. Par ailleurs, les études précédentes ont montré l'importance d'utiliser les deux variables, la taille du ménage et la taille du logement, en même temps (Bousquet et Vielle, 2008, Mansur *et al.*, 2008, Scasny et Urban, 2009).

Au total nous avons 8 caractéristiques du logement :

- Accès au gaz de réseau.
- Année de la construction du logement.
- Année d'arrivée de la première personne du ménage dans le logement.
- Isolation des murs.
- Isolation du toit.
- Double vitrage.
- Statut d'occupation du logement.
- Taille du logement en m^2 .

Les bases des données, que nous utilisons dans cette étude, proposent d'autres caractéristiques du logement. Mais ces bases étant différentes, nous sommes obligés de ne considérer que les variables communes aux bases. Parmi les variables communes qui ont été testées et se sont révélées être non significatives nous trouvons : l'orientation du logement et les dépenses d'énergies.

Spécificités liées au lieu de résidence

Plusieurs variables sont disponibles dans les bases des données afin de tenir compte des différences climatiques entre les régions françaises. Nous savons exactement dans quelle commune habite le ménage et donc nous pouvons calculer les Degrés Jours Unifiés (DJU) qui reflètent la rigueur climatique et permettent de calculer les besoins de chauffage du logement. Cette mesure est utilisée par exemple par Mansur *et al.* (2008). Mais nous avons

décidé d'utiliser plutôt les zones climatiques que les DJU parce que les DJU se focalisent uniquement sur la température extérieure, alors que nous aimerions voir l'impact d'autres variables climatiques : les précipitations, les cycles et rythmes climatiques, le nombre et la durée des événements extrêmes par an, etc. Nous avons choisi la définition détaillée des zones climatiques issue de l'Enquête Nationale sur le Logement ENL ([INSEE, 2006](#)) parce que cette définition est plus proche du climat local réel que les zones climatiques définies par les réglementations thermiques françaises. Nous avons testé les définitions selon les différentes réglementations thermiques françaises comme [Bourdon \(2003\)](#) et [Couture et al. \(2012\)](#) l'ont fait, toutefois soit les zones ainsi définies n'étaient pas significatives, soit elles expliquaient peu les probabilités de choix.

La deuxième variable utilisée est la densité urbaine qui explique, par exemple, les difficultés d'accès au bois pour le chauffage et au gaz de réseau.

Prix des énergies

Il est important aussi à ce stade de différencier les prix des énergies des coûts d'installation du chauffage. Si le ménage est amené à choisir entre les différents moyens de chauffage, il tiendra compte des coûts d'installation. Ces coûts d'installations sont des attributs des offres dont nous avons décidé de ne pas tenir compte. Nous considérons ainsi que ce coût n'est pas une contrainte en lui-même. C'est plutôt le revenu du ménage qui l'oblige à tenir compte des coûts. Il faut noter que le prix de l'électricité et du gaz de réseau en France sont imposés au ménage et sont indépendants des technologies de chauffage. C'est-à-dire le ménage a le choix entre les mêmes tarifs de l'électricité, indépendamment du fait qu'il installe un convecteur ou une pompe à chaleur.

Les prix des énergies peuvent se révéler être un facteur décourageant pour l'utilisation de certains moyens de chauffage qui nécessitent une énergie considérée par le ménage comme « trop chère ». Nous proposons de considérer que le prix de l'énergie est pris en compte par le ménage lors du choix de son moyen chauffage, c'est-à-dire soit au moment de la construction du logement, de son achat ou de sa location soit quand l'ancien chauffage est changé par un nouveau. Nous partons de l'hypothèse que l'ancien chauffage est remplacé par le même moyen de chauffage⁸.

2.2 Présentation des données

Pour l'année 2006, nous utilisons les données de l'Enquête Nationale Logement 2006 (ENL 2006) menée par l'INSEE dont l'objet est de décrire les conditions de vie dans les logements

8. Cette hypothèse est confirmée par l'enquête expérimentale qui est l'objet du Chapitre 3 de ce manuscrit. Parmi 2000 répondants, seulement 4 % ont indiqué avoir changé le moyen de chauffage utilisé.

TABLEAU 2.2: Contraintes : Statistiques descriptives pour les variables continues

| Variables | Min | Moyenne | Max | Ecart-type |
|---|----------------|---------|-------|------------|
| Prix de l'électricité - petit appartement (€/100 kWh) | 10.59 | 12.51 | 15.29 | 0.92 |
| Prix de l'électricité - appartement (€/100 kWh) | 9.84 | 11.95 | 14.34 | 0.83 |
| Prix de l'électricité - maison (€/100 kWh) | 9.13 | 11.31 | 14.06 | 0.93 |
| Prix du gaz - appartement (€/100 kWh PCI) | 3.31 | 4.42 | 7.37 | 1.20 |
| Prix du gaz - maison (€/100 kWh PCI) | 3.06 | 4.20 | 7.04 | 1.18 |
| Prix du fioul - maison (€/100 kWh PCI) | 2.80 | 4.72 | 9.72 | 2.03 |
| Nombre d'habitants en 2006 | 1 | 2.3 | 14 | 1.27 |
| Nombre d'habitants en 2013 | 1 | 2.16 | 6 | 1.11 |
| Surface habitable (m ²) 2006 | 1 ¹ | 93.5 | 999 | 46 |
| Surface habitable (m ²) 2013 | 15 | 97.5 | 350 | 41 |
| Age de la personne de référence en 2006 | 16 | 52.3 | 101 | 17.4 |
| Age de la personne de référence en 2013 | 20 | 52.2 | 97 | 16 |

¹ La surface habitable est calculée pour l'espace dont le plafond est plus haut que 1,80 mètre.

Source : INSEE, 2006 ; EDF, 2014 ; SOeS, 2015

français et les dépenses associées (INSEE, 2006). L'ENL est une enquête qui est faite régulièrement depuis 1955⁹. L'ENL 2006 couvre un large échantillon de 42701 résidences principales. L'enquête fournit les données détaillées des caractéristiques physiques du logement, les conditions de vie des ménages, l'environnement (quartier, accès aux commerces), la mobilité résidentielle, les énergies utilisées avec les dépenses associées, les caractéristiques sociodémographiques des ménages ainsi que leurs revenus, et bien d'autres variables¹⁰. Cette base nous permet d'identifier pour chaque logement les moyens de chauffage utilisés, les émetteurs de chaleur, de même que les moyens de production d'ECS, les différentes énergies utilisées pour les usages domestiques (chauffage, ECS, cuisson) avec les dépenses par énergie. Nous ne pouvons pas utiliser l'ensemble des ménages de l'enquête dans notre étude. Tout d'abord, nous écartons 13 % des ménages qui habitent dans les départements d'outre-mer, une partie des variables que nous utilisons n'étant pas disponible pour ces ménages. Puis nous avons exclu les observations avec les logements occupés par plusieurs ménages, soit 302 observations, parce que notre modèle suppose que pour chaque logement il n'y ait qu'un seul ménage qui décide. Nous avons aussi supprimé quelques catégories minoritaires de variables « type de logement » et « statut d'occupation » : les logements qui ne sont ni une maison, ni un appartement (1 %) et les ménages avec le statut d'occupation qui n'est ni propriétaire, ni locataire à loyer libre, ni locataire en HLM (3,3 %). Et finalement, nous ne tenons pas compte des ménages avec des moyens de chauffage non considérés par notre modèle de choix de chauffage pour les raisons exposées dans la Section 2.1.3.

Etant donné que la dernière enquête ENL n'est disponible que pour l'année 2006¹¹, nous avons décidé d'utiliser un deuxième jeu de données plus récent. Cette deuxième base est une

9. <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=sources/ope-enq-logement.htm>

10. Retrouvez la description complète de l'ENL 2006 et le questionnaire utilisé : <http://www.cmh.greco.ens.fr/enquetes/XML/lil.php?lil=lil-0410>

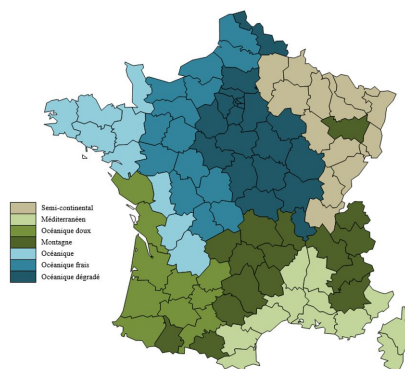
11. Une nouvelle version d'ENL 2013/2014 sera disponible en 2016.

enquête conduite par **TNS SOFRES** en 2013 pour les besoins d'EDF avec 1350 observations après nettoyage des données. L'enquête est une étude détaillée de l'utilisation de l'énergie dans les logements français pour tous les usages domestiques. Elle s'intéresse entre autres aux habitudes de chauffage, les horaires de présence dans le logement et à l'électricité spécifique.

Comme nous avons l'information sur l'année d'arrivée dans le logement actuel (uniquement pour l'ENL 2006), on peut intégrer les prix des énergies au moment du déménagement. A cet effet nous utilisons la base des données Pégase (**SOeS, 2014**). Etant donné que les prix sont utilisés pour le modèle de choix de chauffage, nous avons choisi les tarifs actuels pour les consommations importantes. Le tarif Heures Pleines – Heures Creuses est utilisé pour les prix de l'électricité en tenant compte de la taille approximative du logement : 6 kVA pour les petits appartements dont l'espace à chauffer est inférieur à 35 m^2 , 9 kVA pour les autres appartements et 12 kVA pour les maisons individuelles. Pour le gaz naturel, nous prenons deux tarifs : B1 pour l'appartement et B2I pour la maison individuelle. Quant au fioul, la base ne donne que le tarif C1 du FOD (Fioul Oil Domestique) pour les maisons individuelles. Les prix sont donnés en euros courants pour : 100 kWh pour l'électricité et 100 kWh PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) pour le gaz et le fioul. Ces prix tiennent compte de l'abonnement (part fixe du tarif). Les prix ne sont disponibles qu'à partir de 1983, alors qu'environ 20 % des ménages en 2006 sont arrivés dans le logement avant 1983. Pour ces ménages nous avons essayé de faire une approximation des prix à cette époque et/ou des prix de 1983, mais cela a eu pour effet de diminuer la qualité du modèle. En définitive, nous avons choisi de n'estimer les paramètres associés aux prix que pour les ménages dont l'arrivée dans le logement date de 1983 ou plus tard.

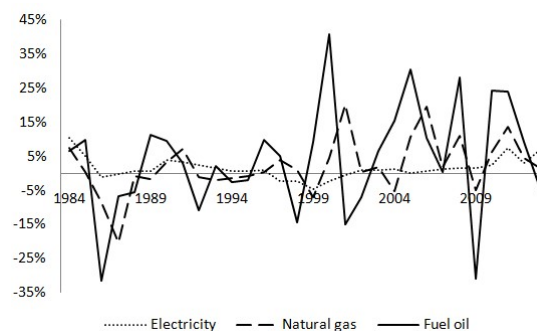
Les statistiques descriptives sont présentées dans les Tableaux 2.2 et 2.3. La Figure 2.1 montre la carte des zones climatiques et la Figure 2.2 le taux de croissance des prix des énergies entre 1983 et 2013.

FIGURE 2.1: Zones climatiques d'après la définition de l'ENL 2006



source : **INSEE (2006)**

FIGURE 2.2: Le taux de croissance des prix des énergies entre 1983 et 2013



source : **SOeS (2014)**

Deux types de données, à savoir l'accès au gaz de réseau et l'isolation du toit, ne sont pas directement comparables entre les deux bases. L'ENL 2006 nous renseigne sur le raccordement de chaque logement au réseau de gaz, tandis que dans l'enquête SOFRES 2013 nous n'avons que l'information sur l'accès au gaz de réseau de la commune. Il existe 36614 communes en France dont 72 % n'ont pas accès au gaz de réseau d'après le site GDF-Suez DolceVita¹². Selon le CEREMA¹³ ces communes couvrent environ 75 % de la population. Si on regarde les statistiques descriptives des données SOFRES, on voit que la commune est raccordée au gaz de réseau pour 82 % des ménages considérés. Les communes avec un accès au gaz de réseau sont légèrement surreprésentées dans les données SOFRES 2013. Les statistiques concernant l'isolation du toit sont aussi difficilement comparables entre les deux bases. Dans l'ENL, cette information n'est disponible que pour les maisons individuelles, tandis que dans l'enquête SOFRES les ménages habitant dans les logements collectifs, pouvaient renseigner cette information si elle était pertinente (par exemple si l'appartement est situé au dernier étage).

Pour la plupart des variables nous n'observons pas de différence entre 2006 et 2013 à trois exceptions près. Tout d'abord, le taux de pénétration du double vitrage passe de 71 % en 2006 à 85,3 % en 2013. Puis, en 2013, le nombre de logements construits après 1998 est deux fois plus important qu'en 2006. Ce qui est logique par définition. La tranche « après 1998 » couvre 8 ans dans l'ENL 2006 contre 15 années dans SOFRES 2013. En dernier lieu, la part des ménages ayant des revenus inférieurs à 1200 € /mois a diminué entre 2006 et 2013 au profit de la tranche 1201-1900 € /mois. Cela est dû à l'augmentation du Salaire Minimum Interprofessionnel de Croissance (SMIC) qui passe de 984,61 € /mois net en 2006 à 1121,71 € /mois net en 2013. Nous remarquons aussi, que la dernière tranche, plus de 3800 € /mois, est passé de 17,9 % en 2006 à 15 % en 2013. Les données SOFRES donnent le revenu en tranches¹⁴.

Plus de la moitié des ménages sont propriétaires de leur logement, 16-17 % sont des locataires sociaux dans un HLM, 21 % sont des locataires non-sociaux. Environ 57 % des logements sont des maisons individuelles. Les logements situés dans une aire urbaine comptent pour 77,3 %, dont un quart se situe en Ile-de-France. Un tiers des ménages habite dans le climat océanique dégradé. En moyenne un ménage est composé de 2,2 personnes occupants un logement avec une surface moyenne de 93,5-97,5 m². L'âge moyen de la personne de référence est de 52,2 ans. L'évolution des prix des énergies est présentée sur la Figure 2.2.

12. <https://www.gdfsuez-dolceVita.fr/contrat-gaz-naturel/raccordement-branchement-gaz-naturel.html>

13. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement : <http://www.ouest.cerema.fr>

14. Il est à noter que les données SOFRES 2013 ne donnent le revenu que par tranches. Pour l'ENL 2006 nous avons choisi de déclarer les mêmes tranches afin de faciliter les comparaisons. L'INSEE a corrigé et recalé à la hausse le revenu dans l'ENL 2006 parce qu'il était observé une sous-estimation du revenu dans les premiers déciles par rapport aux résultats de l'Enquête Budget des Familles. Nous ne pouvons pas faire de même pour les données SOFRES 2013, parce que nous n'avons pas assez d'informations.

TABLEAU 2.3: Contraintes : statistiques descriptives pour les variables qualitatives

| | Année | |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|
| | 2006 | 2013 |
| Pas d'accès au gaz de réseau | 50.2 ¹ | 18.2 ² |
| Pas de fenêtre double-vitrage | 29 | 14.7 |
| Toiture non isolée | 89.2 ³ | 49.7 |
| Revenu en €/mois | | |
| < 1200 | 22.3 | 13.5 |
| 1201–1900 | 21.2 | 27.9 |
| 1901–2700 | 19.7 | 21.6 |
| 2701–3800 | 18.9 | 22 |
| > 3800 | 17.9 | 15 |
| Statut d'occupation | | |
| à titre gratuit | 3.5 | 1.5 |
| propriétaire | 60.8 | 58.5 |
| locataire HLM | 15.8 | 17 |
| locataire à loyer libre | 19.9 | 23 |
| Année de construction | | |
| Avant 1974 | 55.1 | 47.9 |
| 1974-1989 | 25.6 | 25.3 |
| 1990-1998 | 10.6 | 9 |
| Après 1998 | 8.7 | 17.8 |
| Type de logement | | |
| Maison individuelle | 56 | 57.2 |
| Appartement | 44 | 42.8 |
| Densité urbaine | | |
| Rural | 23.4 | 22.6 |
| Urban | 57.7 | 59.5 |
| Ile-de-France | 18.9 | 17.9 |
| Zone climatique | | |
| Méditerranée | 12.5 | 14 |
| Océanique doux | 10.9 | 9.5 |
| Océanique | 9.0 | 10.7 |
| Océanique frais | 12.9 | 12.4 |
| Océanique dégradé | 32.6 | 31 |
| Semi-continental | 13.1 | 10.8 |
| Montagne | 9.0 | 11.5 |
| Moyen de chauffage | | |
| Chaudière individuelle | 48 | 45 |
| Chaudière collective | 20.1 | 11 |
| Pompe à chaleur | 1.3 | 7 |
| Chauffage électrique direct | 28.9 | 29.5 |
| Cheminées et poêles à bois | 1.7 | 7.5 |

¹ Le logement n'a pas d'accès au gaz de réseau, mais la commune peut l'avoir.

² La commune de résidence a accès au gaz de réseau.

³ Uniquement pour les maisons individuelles.

Source : INSEE, 2006 ; EDF, 2014.

TABLEAU 2.4: Résultat d'estimation pour les maisons individuelles en 2006

| Choice alternatives (Frequency of alternatives) | Individual boiler (64%) | | Heat pump (1.5%) | | Wood (3%) | |
|--|----------------------------|----------|---------------------|----------|--------------|----------|
| | Coefficient | RRR# | Coefficient | RRR# | Coefficient | RRR# |
| Constant | 2.21*** | NA | -5.817*** | NA | -0.322*** | NA |
| Electricity price | 0.0387** | 1.039** | -0.128*** | 0.879*** | 0.07** | 1.072** |
| Gas price | -0.279*** | 0.756*** | 0.243 | 1.275 | -0.046 | 0.954 |
| Fuel price | 0.0136 | 1.013 | 0.122 | 1.130 | -0.22 | 0.801 |
| Size of dwelling | 0.012*** | 1.011*** | 0.015*** | 1.015*** | 0.0013 | 1.001 |
| Household size | 0.097*** | 1.101*** | 0.123** | 1.131** | 0.269*** | 1.309*** |
| Age of RP | 0.004** | 1.004** | 0.009 | 1.009 | -0.011*** | 0.988*** |
| No access to gas grid | -3.543*** | 0.029*** | -0.505** | 0.603** | -0.3813* | 0.683* |
| No double-glazing | 0.647*** | 1.910** | -0.116 | 0.889 | 0.493*** | 1.637*** |
| No roof insulation | -0.007 | 0.992 | -0.411 | 0.662 | 0.683*** | 1.981*** |
| Climate zone | | | | | | |
| Mediterranean | base | base | base | base | base | base |
| middle oceanic | 0.114 | 1.122 | -0.118 | 0.888 | -0.23 | 0.794 |
| oceanic | 0.442*** | 1.557 | -0.572*** | 0.564*** | -0.664*** | 0.514*** |
| fresh oceanic | 0.605*** | 1.831 | -0.498** | 0.607** | -0.045 | 0.955 |
| modified oceanic | 0.378*** | 1.459 | -0.779*** | 0.458*** | -0.334* | 0.715* |
| semi-continental | 1.302*** | 3.679 | -0.113 | 0.893 | 0.481*** | 1.618*** |
| mountain | 0.761*** | 2.139 | -0.29 | 0.741 | 0.024 | 1.024 |
| Income per month (euro) | | | | | | |
| < 1200 | base | base | base | base | base | base |
| 1201-1900 | 0.189** | 1.208 | 0.754* | 2.125* | -0.122 | 0.884 |
| 1901-2700 | 0.198** | 1.219 | 0.544 | 1.723 | -0.388*** | 0.678*** |
| 2701-3800 | 0.134* | 1.143 | 1.092*** | 2.987*** | -0.83*** | 0.436*** |
| > 3800 | 0.01 | 1.010 | 0.921** | 2.512** | -1.737*** | 0.176*** |
| Dwelling occupancy status | | | | | | |
| owner | base | base | base | base | base | base |
| tenant of HLM | 0.098 | 1.103 | -15.01 | 0 | -1.186*** | 0.305*** |
| other tenant | -0.686*** | 0.503 | -1.891*** | 0.150*** | -0.942*** | 0.389*** |
| free | -0.310** | 0.733 | -0.514 | 0.597 | -0.188 | 0.828 |
| Dwelling age | | | | | | |
| before 1974 | base | base | base | base | base | base |
| 1974-1989 | -1.058*** | 0.346 | 0.812*** | 2.254*** | -1.304*** | 0.271*** |
| 1990-1998 | -1.327*** | 0.265 | -0.256 | 0.773 | -0.893*** | 0.409*** |
| after 1998 | -1.124** | 0.325 | 0.183 | 1.201 | -0.924*** | 0.396*** |
| Urban density | | | | | | |
| rural | base | base | base | base | base | base |
| urban | -0.159*** | 0.852 | 0.14 | 1.150 | -0.642*** | 0.525*** |
| Paris area | -0.438*** | 0.645 | -0.72* | 0.483* | -1.815*** | 0.162*** |
| Pseudo ρ^2 | 0.3232 | | | | | |
| Adjusted Pseudo $\bar{\rho}^2$ | 0.317 | | | | | |
| Estrella ϕ_0 | 0.473 | | | | | |
| Count R^2 | 78.5 % | | | | | |
| Log-likelihood | -9789 | | | | | |
| Observations | 17618 | | | | | |
| Base category : Direct Electric Heating | | | | | | |

Relative Risk Ratio of one preference over other
 * Coefficient significant at 90 confidence level
 ** Coefficient significant at 95 confidence level
 *** Coefficient significant at 99 confidence level

On remarque que les prix de l'électricité sont les moins volatiles, contrairement au prix de fioul dont le taux de croissance annuel varie entre -35 % et +35 %. Le prix du gaz naturel suit les variations du prix de fioul, mais avec une variance plus faible.

Si les contraintes semblent être les mêmes en 2006 et 2013, les parts de marché des moyens de chauffage ne sont plus les mêmes. Le nombre de ménages utilisant une PAC ou un chauffage au bois a progressé. En 2006, la part de marché de ces deux moyens de chauffage, parmi les alternatives qu'on considère, s'élevait à 3 % contre 14,5 % en 2013. En contrepartie, la part des chaudières collectives a été divisée par 2 et la part des chaudières individuelles a perdu 3 % du marché. La part des ménages avec un CED dans le logement reste stable.

2.3 Résultats d'estimation

En utilisant les données ENL 2006 et SOFRES 2013, nous avons estimé trois modèles de choix du moyen de chauffage : choix en maisons individuelles en 2006, choix en appartements en 2006 et choix dans les logements toutes catégories confondues en 2013. Nous avons fait deux modèles pour 2006, parce que le bois n'était pas utilisé dans les appartements

TABLEAU 2.5: Résultat d'estimation pour les appartements en 2006

| Choice alternatives (Frequency of alternatives) | Individual boiler (30%) | | Collective boiler (44%) | | Heat pump (0.2%) | |
|--|----------------------------|----------|----------------------------|----------|---------------------|----------|
| | Coefficient | RRR# | Coefficient | RRR# | Coefficient | RRR# |
| Constant | -0.057*** | NA | -0.879*** | NA | -7.79*** | NA |
| Electricity price | -0.038* | 0.962* | -0.048** | 0.952** | -0.209 | 0.811 |
| Gas price | 0.46 | 1.047 | 0.059 | 1.060 | 0.853 | 2.347 |
| Fuel price | 0.008 | 1.008 | 0.027 | 1.027 | -0.151 | 0.859 |
| Size of dwelling | 0.02*** | 1.021*** | 0.016*** | 1.016*** | 0.019** | 1.019** |
| Household size | -0.01 | 0.991 | 0.037 | 1.038 | 0.129 | 1.137 |
| Age of RP | -0.01 | 0.996 | 0.003 | 1.003 | 0.002 | 1.002 |
| No access to gas grid | -4.26*** | 0.014*** | -2.637*** | 0.071*** | -0.404 | 0.667 |
| No double-glazing | 0.416*** | 1.516*** | 0.906*** | 2.476*** | 1.368*** | 3.928*** |
| Climate zone | | | | | | |
| Mediterranean | base | base | base | base | base | base |
| middle oceanic | 0.642*** | 1.901*** | 0.329** | 1.390*** | -0.685 | 0.503 |
| oceanic | 0.907*** | 2.478*** | 0.765*** | 2.150*** | -13.84 | 0 |
| fresh oceanic | 1.09*** | 2.995*** | 1.612*** | 5.014*** | -13.66 | 0 |
| modified oceanic | 0.764*** | 2.148*** | 1.25*** | 3.491*** | -0.676 | 0.508 |
| semi-continental | 1.444*** | 4.239*** | 1.852*** | 6.374*** | -13.29 | 0 |
| mountain | 1.355*** | 3.877*** | 1.861*** | 6.433*** | 0.64 | 0 |
| Income per month (euro) | | | | | | |
| < 1200 | base | base | base | base | base | base |
| 1201-1900 | 0.023 | 1.023 | 0.099 | 1.104 | 0.658 | 1.932 |
| 1901-2700 | 0.102 | 1.107 | 0.248*** | 1.282*** | 0.932 | 2.539 |
| 2701-3800 | 0.056 | 1.058 | 0.19* | 1.210* | -0.06 | 0.939 |
| > 3800 | -0.006 | 0.993 | 0.022 | 1.022 | 0.4 | 1.493 |
| Dwelling occupancy status | | | | | | |
| owner | base | base | base | base | base | base |
| tenant of HLM | 0.717*** | 2.049*** | 1.696*** | 5.456*** | 1.081** | 2.947** |
| other tenant | -0.305*** | 0.737*** | -0.609*** | 0.543*** | -3.202*** | 0.040*** |
| free | -0.018* | 0.714* | -0.026 | 0.973 | -0.452 | 0.635 |
| Dwelling age | | | | | | |
| before 1974 | base | base | base | base | base | base |
| 1974-1989 | 0.361*** | 1.434*** | -1.66*** | 0.190*** | 1.213** | 3.363** |
| 1990-1998 | 0.278*** | 1.320*** | -0.495*** | 0.609*** | 0.625 | 1.869 |
| after 1998 | -0.018 | 0.981 | -1.657*** | 0.190*** | -0.645 | 0.524 |
| Urban density | | | | | | |
| rural | base | base | base | base | base | base |
| urban | 0.064 | 1.067 | 0.371** | 1.449** | 0.216 | 1.241 |
| Paris area | -0.591*** | 0.553*** | 0.372* | 1.451* | 1.61 | 5.036 |
| Pseudo ρ^2 | 0.3352 | | | | | |
| Adjusted Pseudo $\bar{\rho}^2$ | 0.33 | | | | | |
| Estrella ϕ_0 | 0.58 | | | | | |
| Count R^2 | 68.3 % | | | | | |
| Log-likelihood | -10704 | | | | | |
| Observations | 14861 | | | | | |
| Base category : Direct Electric Heating | | | | | | |

Relative Risk Ratio of one preference over other
 * Coefficient significant at 90 confidence level
 ** Coefficient significant at 95 confidence level
 *** Coefficient significant at 99 confidence level

à quelques exceptions près (0,7 %), de même que la chaudière collective dans les maisons individuelles (0,3 %). Ce manque d'observations conduira forcément à des estimations biaisées pour l'ensemble des paramètres associés à ces deux alternatives de choix ¹⁵. Pour éviter cela nous choisissons d'estimer un modèle pour les habitants des maisons individuelles sans l'alternative « chaudière collective » et un deuxième modèle pour les appartements sans l'alternative « chauffage au bois ». Il aurait fallu faire la même distinction pour 2013. Mais d'une part, nous n'avons pas assez d'observations pour réaliser deux modèles séparés, et d'autre part, le nombre d'appartements ayant le chauffage au bois et les maisons avec un chauffage collectif est plus important que dans l'ENL. Les modèles utilisent les mêmes types de contraintes comme déterminant de choix à une exception près : les prix des énergies. Dans la base des données SOFRES 2013, nous n'avons pas l'information sur l'année d'arrivée du ménage dans le logement et par conséquent nous ne pouvons pas introduire les prix des énergies dans le modèle.

15. Ces variables seront presque parfaitement colinéaires au type du logement.

TABLEAU 2.6: Résultat d'estimation pour les logements en 2013

| Choice alternatives (Frequency of alternatives) | Individual boiler (45%) | | Collective boiler (11%) | | Heat pump (7%) | | Wood (7.5%) | |
|--|----------------------------|----------|----------------------------|----------|-------------------|----------|----------------|----------|
| | Coefficient | RRR# | Coefficient | RRR# | Coefficient | RRR# | Coefficient | RRR# |
| Constant | -2.5*** | NA | -6.82*** | NA | -2.53* | NA | -0.34 | NA |
| Size of dwelling | 0.01*** | 1.011*** | 0 | 1.002 | 0.02*** | 1.015*** | 0.01*** | 1.011*** |
| Household size | 0.15* | 1.162* | 0.3** | 1.346** | 0.34*** | 1.397*** | 0.31*** | 1.365*** |
| Age of RP | 0.02*** | 1.016*** | 0.02*** | 1.018*** | 0 | 0.997 | -0.01 | 0.991 |
| No access to gas grid | -0.41 | 0.663 | 0.62 | 1.851 | 0.18 | 1.196 | 0.36 | 1.431 |
| No double-glazing | -0.09 | 0.918 | -0.51 | 0.599 | 0.27 | 1.131 | -0.09 | 0.917 |
| No roof insulation | -0.13 | 0.879 | 0.12 | 1.124 | 0.13 | 1.142 | -0.18 | 0.839 |
| Climate zone | | | | | | | | |
| Mediterranean | base | base | base | base | base | base | base | base |
| middle oceanic | -0.26 | 0.774 | 0.11 | 1.117 | -0.83** | 0.435** | -0.36 | 0.697 |
| oceanic | 0.11 | 1.118 | 1.03** | 2.788** | -1.1** | 0.333** | -0.75 | 0.470 |
| fresh oceanic | 0.8*** | 2.233*** | 1.72*** | 5.589*** | -1.46*** | 0.233*** | -0.27 | 0.766 |
| modified oceanic | 0.66*** | 1.933*** | 1.27*** | 3.564*** | -1.24*** | 0.289*** | -0.72* | 0.485* |
| semi-continental | 1.03*** | 2.807*** | 1.97*** | 7.188*** | -0.09 | 0.914 | 0.1 | 1.105 |
| mountain | 0.65** | 1.922** | 1.42*** | 4.149*** | -0.74* | 0.479* | -0.58 | 0.559 |
| Income per month (euro) | | | | | | | | |
| < 1200 | base | base | base | base | base | base | base | base |
| 1201-1900 | 0.23 | 1.261 | 0.65* | 1.913* | -0.08 | 0.919 | -0.28 | 0.754 |
| 1901-2700 | 0.22 | 1.248 | 0.26 | 1.298 | -0.37 | 0.688 | -0.42 | 0.657 |
| 2701-3800 | 0.16 | 1.174 | -0.06 | 0.945 | -0.46 | 0.628 | -1.41*** | 0.245*** |
| > 3800 | 0.18 | 1.201 | -0.93 | 0.395 | -0.63 | 0.532 | -0.95* | 0.386* |
| Dwelling occupancy status | | | | | | | | |
| free | base | base | base | base | base | base | base | base |
| owner | 0.73 | 2.081 | 0.27 | 1.304 | -0.03 | 0.970 | -0.09 | 0.912 |
| tenant of HLM | 1.39*** | 4.009** | 0.83 | 2.283 | -1.24 | 0.288 | -0.67 | 0.510 |
| other tenant | 0.28 | 1.323 | -1 | 0.367 | -1.04 | 0.354 | -1.01 | 0.362 |
| Dwelling age | | | | | | | | |
| before 1974 | base | base | base | base | base | base | base | base |
| 1974-1989 | -1.25 | 0.286 | -1.23*** | 0.291*** | -0.75** | 0.470** | -0.71** | 0.493** |
| 1990-1998 | -1.45*** | 0.234*** | -2.68*** | 0.068*** | -0.88* | 0.416* | -1.17** | 0.309** |
| after 1998 | -1.14*** | 0.319*** | -2.23*** | 0.098*** | 0.38 | 1.465 | -0.42 | 0.655 |
| Dwelling type | | | | | | | | |
| individual house | base | base | base | base | base | base | base | base |
| apartment | -0.1 | 0.906 | 3.95*** | 51.8*** | -0.16 | 0.852 | -1.04*** | 0.352*** |
| Urban density | | | | | | | | |
| rural | base | base | base | base | base | base | base | base |
| urban | 0.39 | 1.473 | 0.77 | 2.167 | 0.16 | 1.177 | -0.47 | 0.627 |
| Paris area | 0.01 | 1.006 | 1.3* | 3.675* | 0.33 | 1.386 | -0.79 | 0.451 |
| Pseudo ρ^2 | 0.20 | | | | | | | |
| Adjusted Pseudo ρ^2 | 0.142 | | | | | | | |
| Estrella ϕ_0 | 0.448 | | | | | | | |
| Count R^2_0 | 55.3 % | | | | | | | |
| Log-likelihood | -1441.5 | | | | | | | |
| Observations | 1350 | | | | | | | |
| Base category : Direct Electric Heating | | | | | | | | |

Relative Risk Ratio of one preference over other
 * Coefficient significant at 90 confidence level
 ** Coefficient significant at 95 confidence level
 *** Coefficient significant at 99 confidence level

2.3.1 Résultats globaux pour les années 2006 et 2013

Les résultats d'estimation sont donnés dans les Tableaux 2.4, 2.5 et 2.6. La qualité d'ajustement des trois modèles aux données est bonne. Les pseudos ρ^2 sont 0,32-0,33 pour 2006 et 0,2 pour 2013, ce qui est équivalent à un R^2 pour des modèles linéaires compris entre 0,4-0,6 (Section 1.4.1). L'indicateur d'Estrella ϕ_0 , qui tient compte de la taille de l'échantillon, est également élevé : entre 0,448 et 0,58. Le taux de bonnes réponses est de 78,5 % pour les maisons individuelles en 2006, 68,3 % pour les appartements en 2006 et 55,3 % pour les logements en 2013. Afin de tenir compte du critère de parcimonie on regarde le pseudo $\bar{\rho}^2$ ajusté. Il est proche de ρ^2 pour l'année 2006 parce qu'on a beaucoup de données, par contre il est de 0,17 pour l'année 2013.

En 2006, le moyen de chauffage le plus probable dépend du type de logement : les habitants des maisons individuelles ont le plus souvent une chaudière individuelle, tandis que les habitants des appartements ont plus fréquemment une chaudière individuelle ou un CED, suivis par une chaudière collective et une PAC. Nous observons pour 2013 un léger changement : les ménages ont le plus souvent un CED, suivi par le bois, une chaudière individuelle et une PAC, tandis que la probabilité d'avoir une chaudière collective est en moyenne plus faible. Par ailleurs, la constante associée à l'alternative « chauffage au bois »

n'est significative ni pour 2006, ni pour 2013. Comme il faut comparer les résultats à l'alternative de référence « CED »¹⁶, on peut en déduire que le ménage a autant de chance d'avoir le CED que le chauffage au bois.

Les prix du fioul ne sont pas significatifs en 2006. La taille du ménage, l'âge de la personne de référence et le prix du gaz ne sont pas significatifs dans le modèle 2006 concernant les habitants des appartements. En 2013, nous observons que l'accès au gaz de réseau de la commune, l'isolation du toit et le double vitrage n'impactent pas les probabilités d'avoir l'un des moyens de chauffage considéré.

2.3.2 Chauffage dans les maisons individuelles en 2006

L'absence d'accès au gaz de réseau est le critère qui influence le plus les probabilités de choix en faveur du CED. Le RRR est de 0,029 pour les chaudières individuelles. Cela signifie que si le ménage est raccordé au gaz de réseau, alors la probabilité d'avoir une chaudière individuelle est 33 (1/0,029) fois plus élevée que d'avoir le CED. L'accès au gaz influence aussi les autres alternatives de choix. La probabilité d'avoir une PAC ou un chauffage au bois est respectivement 1,65 ou 1,46 plus importante que d'avoir un CED si la maison a accès au gaz de réseau.

Les paramètres associés aux prix des énergies (électricité et gaz) ont le signe attendu. Si le prix de l'électricité augmente, la probabilité d'avoir un CED ou une PAC diminue tandis que les chances d'avoir une chaudière individuelle ou de recourir au bois augmentent. De même, l'augmentation du prix du gaz est favorable au développement du CED, des PAC et du chauffage au bois. Ainsi, si le prix de l'électricité augmente d'1 € pour 100 kWh, alors la chance d'avoir une chaudière individuelle augmente de 4 %, celle d'avoir une PAC diminue de 12 % et celle d'avoir un chauffage au bois augmente de 7 % par rapport à la probabilité d'avoir un CED. De même, pour le prix du gaz, l'augmentation d'1 € pour 100 kWh PCI diminue la probabilité d'avoir une chaudière de 24 % et d'utiliser le bois de 5 % plutôt que le CED. Mais l'augmentation du prix de gaz d'1 € augmente les chances d'avoir une PAC plutôt qu'un CED de 27,5 %. C'est-à-dire que l'impact de la hausse du prix du gaz est plus important pour la PAC. Cela peut être expliqué par le fait que le ménage qui a déjà une chaudière, a un réseau de radiateurs à eau et sera plus enclin à installer une PAC air/eau qu'un CED.

Chaque m^2 ajouté au logement augmente la probabilité d'avoir une chaudière individuelle ou une PAC de 1-1,5 %. Un habitant supplémentaire augmente les chances d'utiliser le bois de 30 %, et d'avoir une chaudière individuelle et une PAC de 10 à 13 %. L'isolation

16. C'est-à-dire la constante associée au CED est fixée à 0.

du logement est favorable au CED et à la PAC et très défavorable au chauffage au bois avec un RRR de 1,981 si le toit n'est pas isolé.

Les habitants du climat méditerranéen ont plus de chance d'avoir une PAC ou un chauffage au bois, tandis que les ménages habitant dans le climat semi-continental utiliseront plutôt une chaudière individuelle ou le bois. Les ménages à hauts revenus ont souvent facilement des PAC et rarement un chauffage au bois. Le fait d'être locataire augmente les chances d'avoir plutôt un CED. Les chaudières individuelles sont plus utilisées dans les logements construits avant la première réglementation thermique, contrairement aux PAC qui sont plus répandues dans les logements construits après 1998. En milieu rural, les ménages utilisent plus le bois et les chaudières individuelles.

2.3.3 Chauffage dans les appartements en 2006

Nous pouvons observer dans ce modèle quelques différences notables par rapport au modèle précédent. Tout d'abord, seul le prix de l'électricité influence les probabilités et de façon faible. Le paramètre associé au prix de l'électricité est significatif pour les chaudières collectives et peu significatif pour les chaudières individuelles. La taille du logement augmente la probabilité d'avoir une chaudière ou une PAC, tandis que le double vitrage la diminue en faveur du CED. Les chaudières sont plus utilisées dans le climat semi-continental : la probabilité d'avoir une chaudière individuelle ou collective est respectivement multipliée par 4,239 et 6,374 si le ménage habite dans cette zone. Le revenu du ménage n'a d'effet que sur la probabilité d'avoir une chaudière collective. Les chaudières ont plus de chance d'être installées dans les logements HLM avec un RRR entre 2,049 (chaudière individuelle) et 5,456 (chaudière collective). Plus le logement est récent, moins les chaudières collectives sont utilisées. Les chaudières individuelles, quant à elles, sont surtout présentes dans les logements construits entre 1974 et 1998. Tandis que le CED et les PAC sont plus présents dans les logements récents. Enfin, en milieu rural les ménages utilisent des chaudières individuelles ou le CED.

2.3.4 Chauffage dans les logements en 2013

La taille du logement, le nombre des personnes dans le ménage, ainsi que l'âge de la personne de référence sont significatifs et ont un effet positif sur la probabilité de choisir une chaudière, une PAC ou le chauffage au bois. Une personne supplémentaire par ménage augmente la probabilité d'avoir une chaudière individuelle de 16 % et d'environ 30 % la probabilité d'avoir d'autres moyens de chauffage que le CED. Tout comme en 2006, la probabilité que la PAC ou le chauffage au bois soient installés est plus forte en Méditerranée, tandis que les chaudières sont plus souvent utilisées en climat montagneux et

semi-continental. Le revenu n'est significatif que pour la chaudière collective et le bois. Les ménages aux revenus modestes auront plus de chance d'avoir une chaudière collective ou un chauffage au bois. Les ménages aux revenus élevés auront 65 à 75 % moins de chance d'avoir un chauffage au bois que d'avoir un CED dans leur logement. Le statut d'occupation en 2013 n'a d'influence que sur la présence d'une chaudière individuelle dans le logement. En effet, si le ménage est un locataire HLM, la probabilité d'avoir une chaudière individuelle est 4 fois plus importante que d'avoir le CED. Comme en 2006, les chaudières individuelles et collectives sont plus présentes dans les logements construits avant la première réglementation thermique de 1974. En revanche, nous pouvons observer le changement pour les PAC qui sont installées dans les logements construits après 1998, mais aussi dans les logements construits avant 1974. Cela veut dire qu'une partie des PAC est installée lors de la rénovation du logement. Le chauffage au bois est maintenant installé dans les logements anciens ou dans les logements neufs, tandis qu'en 2006 il était surtout présent dans les logements construits avant 1974. La densité urbaine n'est significative que pour la chaudière collective : si le ménage habite en Ile-de-France, ses chances d'avoir une chaudière collective augmente de 30 %.

2.4 Quels ménages ont les choix les plus contraints ?

Dans cette section nous proposons d'analyser l'environnement du ménage qui entrave ses choix pour son système de chauffage. Les modèles économétriques ont montré que la situation du ménage et de son logement prédisent correctement le moyen de chauffage dont dispose le ménage avec un taux de bonnes prédictions allant jusqu'à 78,5 %, un pseudo ρ^2 entre 0,2 et 0,335 et un indicateur d'Estrella entre 0,47-0,58.

Il semble que les contraintes soient fortes pour les ménages, mais est-ce que le degré est le même pour tous les ménages ? Les modèles économétriques nous permettent d'estimer pour chaque ménage les probabilités qu'il se retrouve avec tel ou tel chauffage. Si tous les moyens de chauffage considérés sont équiprobables, alors on pourra dire que la situation du ménage influence peu les choix. Par contre si pour un ménage l'une des alternatives domine clairement les autres, nous pourrions conclure que le choix de ce ménage sera forcé par sa situation et que, par exemple, les incitations pour améliorer l'efficacité thermique du logement seront limitées. Notre but est donc de trouver les groupes des ménages pour lesquels la probabilité moyenne d'avoir l'un des moyens de chauffage est la plus forte (ou la plus faible).

Les Figures 2.3, 2.4 et 2.5 montrent la distribution des probabilités en 2006 et 2013. Nous observons que la probabilité d'avoir une PAC ou un chauffage à bois en 2006 est très faible. La probabilité d'avoir une PAC dans une maison est au maximum de 0,43 et pour 90 % des

FIGURE 2.3: Distribution des probabilités estimées pour les maisons individuelles en 2006

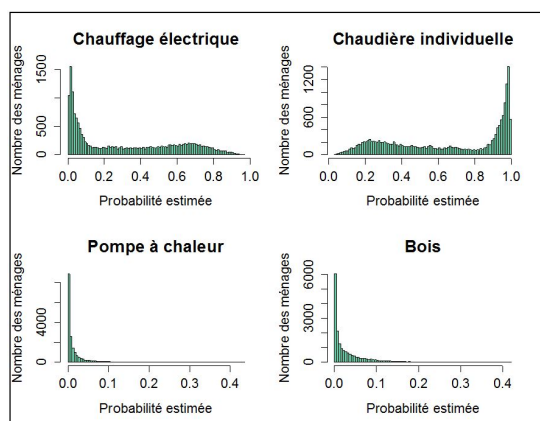
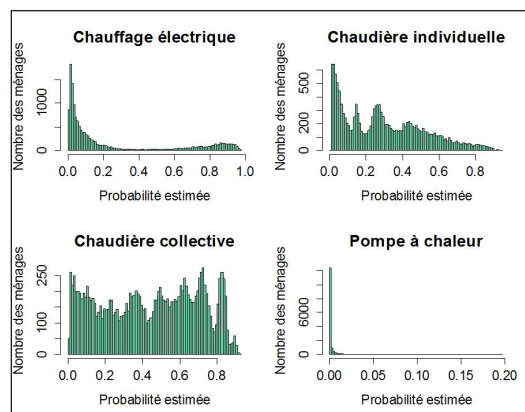


FIGURE 2.4: Distribution des probabilités estimées pour les appartements en 2006



ménages la probabilité est inférieure à 0,042. Quant au chauffage au bois, 90 % des ménages ont une probabilité inférieure à 0,085 et la probabilité maximale est de 0,42. En revanche, les probabilités d'avoir un CED, une chaudière individuelle ou une chaudière collective est proche de 1. Par exemple, si nous prenons les maisons individuelles en 2006, la probabilité d'avoir une chaudière individuelle est supérieure à 0,70 pour 41 % des ménages considérés.

La Figure 2.6 présente les boîtes à moustaches des probabilités individuelles pour les trois modèles estimés. Elle permet de comparer visuellement :

- La dispersion des probabilités individuelles par alternative et année.
- Les moyennes (trait du milieu de la boîte).
- Les quartiles (la boîte représente les ménages du second et troisième quartile).
- Les probabilités avec des valeurs extrêmes représentées par les points en dehors des « moustaches ».

Par exemple, pour la chaudière individuelle (Cind) les probabilités moyennes sont élevées en 2006 : 25 % des ménages qui habitaient dans les maisons individuelles, avait une probabilité estimée d'avoir une chaudière individuelle entre 0,95 et 1.

En regardant l'année 2013, nous observons un changement significatif dans les probabilités. Il y a encore beaucoup de ménages avec de fortes probabilités d'avoir une chaudière individuelle : pour la moitié des ménages la probabilité est supérieure à 0,43. La probabilité maximale d'avoir une PAC est de 0,58, celle du chauffage au bois est de 0,53.

Sur les graphiques représentant les distributions des probabilités estimées, nous pouvons remarquer que les distributions sont un mélange de plusieurs groupes de ménages. Par exemple, pour les appartements en 2006, nous distinguons visuellement au moins 8 groupes de ménages pour la chaudière collective et au moins 4 dans le cas de la chaudière individuelle. Quant au chauffage électrique, il semble y avoir deux groupes distincts : celui qui a de forte chance d'avoir un CED et celui qui a de faibles chances. Les distributions pour

FIGURE 2.5: Distribution des probabilités estimées pour les logements en 2013

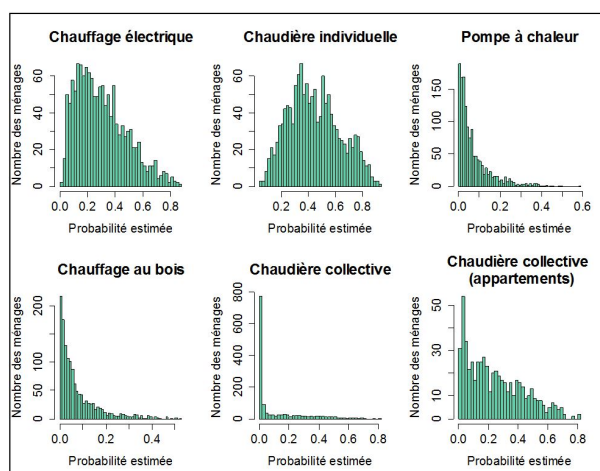
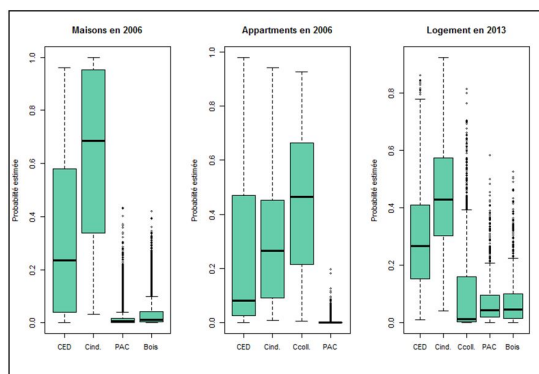


FIGURE 2.6: Boîtes à moustaches des probabilités estimées en 2006 et 2013



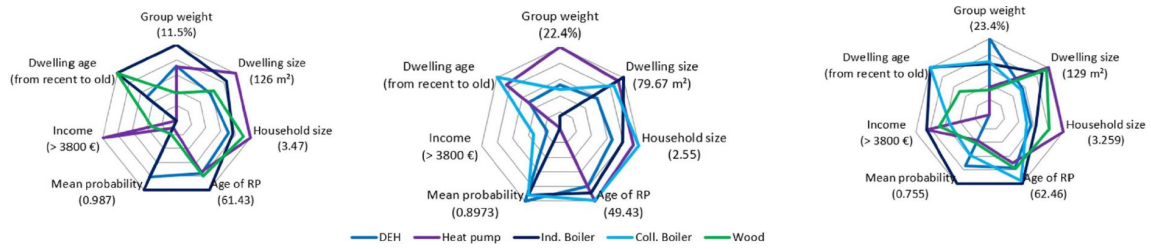
2013 sont difficilement séparables à l'œil nu. Afin de répondre à la question « quels sont les ménages qui ont peu de choix », nous aimerions trouver les groupes de ménages pour lesquels la probabilité d'avoir le CED, une chaudière individuelle ou collective est proche de 1. En prenant comme hypothèse que la distribution des probabilités individuelles est un mélange gaussien, nous effectuons une classification non supervisée **EM** présentée dans la section qui suit.

2.5 Résultats de classification en groupes par l'algorithme Espérance-Maximisation

Ce paragraphe présente les résultats généraux de la classification. Le lecteur intéressé pourra consulter les détails dans l'Annexe 3.1 : choix du nombre de groupes dans le mélange, description détaillée des groupes. Les diagrammes radars (Figure 2.7) montrent les

valeurs moyennes des caractéristiques quantitatives pour chaque groupe cible¹⁷ avec la probabilité moyenne la plus forte. Le Tableau 2.7 propose une synthèse des caractéristiques qui distinguent les groupes des ménages. Le Tableau 2.8 donne la probabilité moyenne pour chaque alternative de choix dans chaque groupe cible.

FIGURE 2.7: Comparaisons des caractéristiques moyennes pour chaque moyen de chauffage dans les maisons individuelles en 2006 (à gauche), dans les appartements en 2006 (centre) et dans l'ensemble des logements en 2013 (à droite)



En 2006, la probabilité moyenne pour le groupe cible « CED » a été de 0,809 (0,897) et 0,987 (0,823) pour le groupe « Chaudière individuelle » dans les maisons individuelles (dans les appartements). La probabilité était également élevée pour le groupe « Chaudière collective » : 0,828. Les résultats de la classification des probabilités en 2013 montrent que la situation de choix s'est améliorée pour les ménages français. En effet, le groupe cible le plus contraint est celui de la chaudière individuelle. La probabilité moyenne d'avoir une chaudière individuelle dans ce groupe est de 0,755.

17. Groupe cible CED - voudrait dire que la distribution de la probabilité d'avoir un CED a été utilisée pour la classification **EM** et nous avons pris le groupe avec la probabilité d'avoir un CED la plus haute.

TABLEAU 2.7: La description des groupes cibles obtenus grâce à la classification EM

| RSHS | Database | Class characteristics | | | | | | | | | | | | |
|-------------|------------|-----------------------|---------------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|------------------|---------------------------|----------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|
| | | Class size | Climate zone ¹ | Mean dwelling size | Mean household size | Age of Reference Person | Access to gas grid | Income per month | Dwelling occupancy status | Dwelling age | Dwelling type | Urban density | Double glazing | Roof insulation |
| DEH | House 2006 | 8.3% | 1,5 | 85 m ² | 2.45 | 47 | no | – | Owner/Tenant | 1974–1989 | – | – | yes | yes |
| | Apt. 2006 | 12% | 1,5 | 47 m ² | 1.82 | 39 | no | < 1200 | Tenant | After 1998 | – | Urban | yes | – |
| | 2013 | 23.4% | 1,2,3 | 73 m ² | 1.82 | 49 | – | – | Tenant | – | – | – | yes | – |
| Ind. boiler | House 2006 | 11.5% | 3,4,5 | 127 m ² | 2.65 | 61 | yes | – | Owner | Before 1974 | – | Urban | – | yes |
| | Apt. 2006 | 3.4% | 2,3,6 | 80 m ² | 2.17 | 44 | yes | – | – | After 1998 | – | Urban | yes | – |
| | 2013 | 15.9% | 4,5,6 | 116 m ² | 2.05 | 62 | yes | 2701–3800 | Owner | Before 1974 | House | – | yes | yes |
| Col. boiler | Apt. 2006 | 10.7% | 3,4,5,6,7 | 67 m ² | 2.74 | 49 | yes | <1900 | HLM | Before 1974 | – | Paris | yes | – |
| | 2013 | 16.4% | 3,4,5,6,7 | 69 m ² | 1.65 | 60 | yes | 1201–1900 | HLM | Before 1974 | Apartment | Urban | yes | no |
| Heat Pump | House 2006 | 8.2% | 1,2 | 150 m ² | 3.48 | 46 | no | > 2701 | Owner | After 1998 | – | Urban | yes | yes |
| | Apt. 2006 | 22.4% | 1,5 | 74 m ² | 2.55 | 49 | – | – | Owner/HLM | Before 1989 | – | Paris | – | – |
| | 2013 | 8.6% | 1 | 130 m ² | 3.26 | 44 | – | 2701–3800 | Owner | After 1998 | House | Urban | yes | yes |
| Wood | House 2006 | 4.2% | 1,2,3 | 95 m ² | 3.14 | 50 | no | < 1900 | Owner | Before 1974 | – | Rural | – | – |
| | 2013 | 7.7% | 2 | 125 m ² | 2.65 | 49 | no | < 2700 | Owner | <1974 or >1998 | House | Rural | yes | yes |

1 Mediterranean (1), middle oceanic (2), oceanic (3), fresh oceanic (4), modified oceanic (5), semi-continental (6), mountain (7).

¹ Mediterranean (1), middle oceanic (2), oceanic (3), fresh oceanic (4), modified oceanic (5), semi-continental (6), mountain (7).

TABLEAU 2.8: Les probabilités moyennes pour chaque alternative de choix et pour chaque groupe cible

| Moyen de chauffage | | Moyenne de la probabilité estimée par groupe contraint et par moyen de chauffage | | | | |
|--------------------|-------------|--|------------------------|----------------------|-------|--------------|
| Base des données | | CED | Chaudière individuelle | Chaudière collective | PAC | Poêle à bois |
| CED | Maison 2006 | 0.809 | 0.151 | – | 0.013 | 0.024 |
| | Apt. 2006 | 0.597 | 0.042 | 0.06 | 0 | 0 |
| | 2013 | 0.56 | 0.273 | 0.04 | 0.06 | 0.056 |
| Chaudière ind. | Maison 2006 | 0.01 | 0.987 | – | 0 | 0.002 |
| | Apt. 2006 | 0.067 | 0.823 | 0.109 | 0 | – |
| | 2013 | 0.138 | 0.755 | 0.017 | 0.04 | 0.05 |
| Chaudière col. | Apt. 2006 | 0.025 | 0.144 | 0.828 | 0.001 | – |
| | 2013 | 0.015 | 0.373 | 0.446 | 0.013 | 0.011 |
| PAC | Maison 2006 | 0.533 | 0.346 | – | 0.095 | 0.02 |
| | Apt. 2006 | 0.319 | 0.234 | 0.437 | 0.008 | – |
| | 2013 | 0.247 | 0.3 | 0.009 | 0.28 | 0.163 |
| Bois | Maison 2006 | 0.364 | 0.452 | – | 0.006 | 0.176 |
| | 2013 | 0.24 | 0.287 | 0.005 | 0.133 | 0.312 |

Si on regarde quelle est le statut d'occupation du logement pour les groupes cibles, on remarque que les groupes « PAC », « Chaudière individuelle » et « Chauffage au bois » sont composés principalement des propriétaires de leur logement pour les deux années considérées. A l'inverse, les groupes cibles « Chaudière individuelle » et « CED » sont composés principalement de ménages locataires (HLM ou à loyer libre).

La surface habitable moyenne dans les maisons en 2006 est plus faible pour le CED : 85 m^2 contre 95 m^2 pour le bois, 127 m^2 pour la chaudière individuelle et 150 m^2 pour la PAC. Nous observons la même chose pour les appartements en 2006 : 47 m^2 contre $67\text{-}80\text{ m}^2$ pour les autres moyens de chauffage. En 2013, les petits logements ont toujours tendance à avoir un CED, mais aussi une chaudière collective. Le changement le plus remarquable est observé pour le groupe cible « Bois » : la surface moyenne était de 95 m^2 en 2006 et passe à 125 m^2 en 2013.

Le groupe cible « PAC » est marqué par la taille du ménage qui est la plus grande comparée aux autres groupes. Ainsi le groupe cible « PAC » comptait en moyenne 3,48 personnes en 2006 et 3,26 en 2013. Le ménage du groupe cible « Chaudière collective » ne compte que 1,65 personne en moyenne en 2013, contre 2,74 en 2006 et est le groupe avec la taille du ménage la plus grande dans les appartements en 2006. Par ailleurs, le groupe cible « Chaudière collective » est l'un des plus vieux, l'âge moyen de la personne de référence étant de 60 ans en 2006. Nous observons la même chose pour le groupe cible « Chaudière individuelle » dont l'âge moyen de la personne de référence est de 62 ans.

En 2006, les groupes cibles sont composés principalement de ménages à bas revenus : CED et chaudières (collectives et individuelles) dans les appartements, ainsi que le bois. En 2013, on retrouve les ménages à hauts revenus dans le groupe cible « Chaudière individuelle » : environ 50 % des ménages de ce groupe ont au moins 2700 € /mois sachant qu'ils ne sont que 37 % si on considère l'ensemble de l'échantillon en 2013. Par ailleurs, la probabilité d'avoir une chaudière individuelle dans ce groupe augmente avec le revenu. Nous observons donc que plus les ménages sont riches, plus ils sont contraints, alors même que ce sont des ménages qui disposent de moyens pour investir dans des technologies efficaces mais chères comme la PAC.

Chauffage électrique direct

La probabilité d'avoir le CED dans le groupe cible « CED » est de 0,809 dans les maisons individuelles en 2006, de 0,897 dans les appartements en 2006 et de 0,56 en 2013. Les probabilités d'avoir autre chose que le CED dans les groupes cibles en 2006 se situent entre 0 (PAC dans un appartement) et 0,15 (chaudière individuelle en maison). La prédominance de l'alternative CED en 2006 nous amène à conclure que les choix en 2006 pour les ménages de ces groupes ont été contraints. Par contre en 2013 cela semble ne plus être le cas. En effet,

les ménages du groupe cible « CED » en 2013 se retrouvent toujours le plus souvent avec le CED, mais avec une probabilité moyenne faible de 0,53 qui est suivie par la chaudière individuelle (0,275), la PAC (0,06), le chauffage au bois (0,056) et la chaudière collective (0,04).

En 2006, les ménages du groupe cible CED vivent en Méditerranée (31 %) ou dans le climat océanique dégradé (27 %), et peu en climat semi-continental ou en montagne (2 %). La surface moyenne et l'âge de la personne de référence changent peu entre 2006 et 2013. Cependant, la taille moyenne du ménage diminue : 2,45 (maisons) et 1,82 (appartements) en 2006 contre 1,82 en 2013. Tous les ménages du groupe cible en 2006 n'ont pas accès au gaz de réseau. Ces ménages pourraient installer une chaudière qui utilise une autre énergie, mais certains combustibles sont chers (GPL ou fioul). Rappelons, que le prix de fioul est hautement volatile comparé au prix du gaz naturel et de l'électricité. Les groupes cibles « CED » ne sont pas caractérisés ni par le revenu du ménage, ni par la densité urbaine, à l'exception des appartements en 2006. L'année de construction du logement ne détermine pas la composition du groupe cible CED en 2013 parce que le groupe est grand (23,4 % de l'échantillon) avec une probabilité moyenne d'avoir un CED de 0,53.

Chaudière individuelle

Les ménages du groupe cible « Chaudière individuelle » habitent dans toutes les zones climatiques à l'exception du climat méditerranéen. Le climat méditerranéen est une zone qui est bien desservi par le réseau de gaz¹⁸, mais où le chauffage au gaz se révèle être cher pour les petits logements. La base de données Pégase donne le prix de 100 kWh PCI pour les 4 tarifs existants en fonction de la consommation annuelle : Base (moins de 1 MWh/an), B0 (1-6 MWh/an), B1 (6-30 MWh/an) et B2I (plus que 30 MWh/an) (SOeS, 2014). En principe, les tarifs B1 et B2I sont faits pour les logements chauffés au gaz et sont 2 fois moins chers que les tarifs Base et B0. Toutefois, dans le climat méditerranéen les besoins en chauffage sont plus faibles et il se peut qu'une partie des logements choisissent de ne pas souscrire au tarif B1 parce que ce n'est pas rentable pour de faibles consommations. Dans ce cas, ils peuvent être obligés de ne pas choisir la chaudière individuelle.

Les probabilités moyennes dans les groupes cibles d'avoir une chaudière individuelle sont comprises entre 0,755 et 0,987. La probabilité d'avoir une chaudière individuelle dans les groupes cible « CED », « Bois » et « Chaudière collective » est en deuxième position. Les ménages du groupe cible « Chaudière individuelle » en 2006 ont tendance à être propriétaire et à habiter dans un logement construit avant 1974 (maisons individuelles) ou après 1998 (appartements en 2006), à avoir l'accès au gaz de réseau et à ne pas vivre en milieu rural. Le groupe cible pour les maisons individuelles en 2006 et le groupe cible pour 2013 semblent

18. <http://www.ouest.cerema.fr/>

avoir les même caractéristiques à l'exception du nombre moyen de personnes qui compose le ménage qui passe de 2,65 en 2006 à 2,05 en 2013.

Chaudière collective

L'âge moyen de la personne de référence augmente de 11 ans entre le groupe cible de 2006 et le groupe cible de 2013. La chaudière collective est plus répandue en 2006 (20 % de notre échantillon) contre 11 % en 2013. Cette perte de part de marché a un impact sur les probabilités d'avoir une chaudière collective dans le groupe cible : 0,446 en 2013 contre 0,828 en 2006. Cependant, la probabilité d'avoir une chaudière individuelle en 2013 dans le groupe cible est de 0,375, donc la probabilité d'avoir une chaudière indépendamment de son type est de 0,821 ($0,375+0,446$). Le ménage type des groupes cibles est un locataire HLM gagnant moins de 1900 € /mois et habitant un appartement construit avant 1974. On remarque aussi que le nombre moyen de personnes par ménage passe de 2,74 en 2006 à 1,65 en 2013.

Pompe à chaleur

Nous n'observons pas de différence notable des caractéristiques des groupes cibles « PAC » entre 2006 et 2013. Pour les deux années, le ménage du groupe cible est un grand ménage, plutôt jeune, habitant un logement plus grand que la moyenne, construit après 1998 avec un bon niveau d'isolation et qui se trouve plutôt en climat méditerranéen. En 2006, nous avons du mal à identifier le groupe de ménages qui a de fortes probabilités d'avoir une PAC. Pour les deux groupes cibles en 2006, la probabilité moyenne d'avoir une PAC est de 0,095 et 0,008 respectivement dans les maisons et dans les appartements, alors que les probabilités d'avoir un moyen de chauffage traditionnel (CED ou chaudière) est de 0,873 dans les maisons et de 0,99 dans les appartements dans ce même groupe. La part de marché des PAC dans l'ENL est très faible en 2006 : il est possible que le modèle économétrique n'ait pas réussi à bien estimer l'influence de la situation du ménage sur le choix de la PAC en 2006. A l'inverse des résultats de classification pour 2006, les données 2013 permettent de déterminer un groupe cible « PAC » avec des probabilités d'avoir une PAC suffisamment élevées (0,28). Par ailleurs, dans ce groupe cible il n'y a pas de moyen de chauffage dominant et les probabilités ne sont pas loin de l'équiprobable : 0,3 pour la chaudière individuelle, 0,247 pour le CED et 0,163 pour le chauffage au bois.

Cheminées et poêles à bois

Les groupes cibles en 2006 et en 2013 sont caractérisés par des ménages habitant plutôt en milieu rural et dans les zones climatiques méditerranéenne ou océanique doux. La surface moyenne habitable augmente de 95 m^2 en 2006 à 125 m^2 en 2013, mais le nombre de personnes par ménage décroît de 3,14 en 2006 à 2,65 en 2013. En 2006, le groupe cible est caractérisé par des ménages aux faibles revenus (inférieurs à 1900 € /mois), tandis que

dans le groupe cible 2013 nous trouvons aussi des ménages moyens avec un revenu allant jusqu'à 2700 € /mois¹⁹. Le logement en 2013 est plutôt bien isolé. Si on regarde l'année de construction, on remarque qu'en 2006 il s'agissait de maisons construites avant 1974, tandis qu'en 2013 nous avons à la fois des logements datant d'avant 1974 et après 1998. Il semble qu'une partie des ménages, qui ont acheté un logement neuf entre 2006 et 2013, ait opté pour le chauffage au bois. La probabilité moyenne du chauffage au bois dans les groupes cibles passe de 0,176 en 2006 à 0,312 en 2013. La probabilité d'utiliser le bois est la plus forte, suivie par la chaudière individuelle (0,287), le CED (0,23) et la PAC (0,155). Comme dans le cas du groupe cible « PAC », les probabilités moyennes sont proches de l'équiprobable.

2.6 Degré des contraintes et implications pour les politiques énergétiques

Dans le paragraphe précédent nous avons présenté pour chaque moyen de chauffage la description du groupe de ménages dont la probabilité d'avoir ce moyen est la plus forte. Les résultats montrent qu'en 2006 nous avons des groupes de ménages avec des probabilités proches de 1 pour le CED et les chaudières, individuelles ou collectives. Tandis qu'en 2013, il n'y a plus qu'un groupe des ménages avec une probabilité moyenne d'avoir une chaudière individuelle de 0,75 (voir Tableau A.4 dans l'Annexe).

Le but ici est de compter le nombre de ménages contraints par sa condition qui se retrouvent « forcés » d'avoir un CED ou une chaudière plutôt que d'autres alternatives. Nous considérons que le ménage est contraint s'il appartient au groupe de ménages avec une probabilité moyenne plus élevée que 0,7²⁰. Le Tableau A.4 montre pour le CED, la chaudière individuelle et la chaudière collective, l'effectif de chaque groupe et la probabilité moyenne.

Si on regarde les ménages habitant dans des maisons individuelles en 2006, nous constatons qu'il y a 5 groupes de ménages avec des probabilités moyennes supérieures à 0,7 : 8 % des ménages ont un CED qui est « imposé » et 41 % des ménages se retrouvent avec une chaudière individuelle (probabilité moyenne entre 0,88 et 0,987). Au total, il semble qu'en 2006, 49 % des habitants des maisons individuelles ne choisissaient pas le moyen de chauffage utilisé dans leur logement. En ce qui concerne les appartements, en 2006 il y avait 49 % des ménages contraints : 23 % des ménages étaient contraints d'avoir un CED,

19. Entre 2006 et 2013 le revenu disponible des ménages varie peu (+/- 2% en fonction des déciles de revenu) : <http://www.insee.fr/>

20. Nous avons choisi arbitrairement 0,7 pour tenir compte du groupe cible « Chaudière Individuelle » en 2013.

23 % avaient une chaudière collective et 3,4 % se voyaient contraints d'avoir une chaudière individuelle.

En 2013, le nombre de ménages contraints baisse. En effet, nous ne trouvons que 15,9 % des ménages contraints (« chaudière individuelle ») et 16,3 % de ménages non contraints avec une chance presque équiprobable d'avoir l'un des moyens de chauffage (groupes cibles « PAC » et « chauffage au bois »). Tandis qu'en 2006 aucun des groupes des ménages n'avait de chances équiprobables d'avoir tous les moyens de chauffage considérés. Il semble donc que les nombreuses incitations financières, accordées par le gouvernement entre 2006 et 2013 et l'évolution du contexte (prix des énergies, sensibilité environnementale, etc.), aient permis à beaucoup de ménages de diminuer les contraintes qui les empêchaient de choisir librement.

Ces groupes nous ont aussi permis d'identifier les obstacles potentiels qui sont encore présents en 2013. Tout d'abord, si nous regardons plus en détail le groupe contraint en 2013 (« chaudière individuelle »), il est constitué de ménages aux revenus hauts, propriétaires de maisons individuelles et âgés de 62 ans en moyenne. Ils ont donc des moyens financiers pour investir dans les énergies renouvelables et la rénovation thermique. Sont-ils vraiment contraints ? La question se pose car nous savons que les chaudières à condensation et à micro-cogénération bénéficient de CITE et l'éco prêt à taux zéro ([ADEME, 2015a](#)). Dans l'enquête SOFRES, 86 chaudières sont des chaudières à condensation, dont uniquement 6 appartiennent au groupe cible à fortes contraintes. Les ménages avec des chaudières à condensation ne sont donc pas définis dans nos modèles comme des ménages contraints. Alors pourquoi ces ménages sont définis comme contraints ? Un autre obstacle possible aurait pu être l'âge de la personne de référence qui est en moyenne de 62 ans. Cependant, [Daussin-Benichou et Mauroux \(2014\)](#) ont publié une étude portant sur la sensibilité des ménages au crédit d'impôt développement durable en se basant sur les données réelles de 2005 à 2008. Ils trouvent que les ménages âgés de 60 à 74 ans étaient ceux qui utilisaient le plus le crédit d'impôt développement durable. Encore une fois nous ne pouvons donc pas dire que les personnes âgées ont tendance à ne pas investir dans la rénovation. Les données que nous utilisons pour le moment laissent à penser que 16 % des ménages sont vraiment contraints et que c'est un ensemble de caractéristiques qui réduit le choix. Outre les caractéristiques de ce groupe déjà cité, nous trouvons que plus de 75 % des ménages dans ce groupe sont composés au plus de 2 personnes. Ces ménages ont accès au gaz de réseau et habitent dans des maisons construites avant 1974.

Le deuxième obstacle qui reste toujours en place en 2013, c'est le statut d'habitation « locataire ». Les groupes cibles « CED » et « Chaudière collective » en 2013 ont des probabilités très faibles d'avoir une PAC (0,013-0,06) ou un chauffage au bois (0,011-0,056).

Les ménages de ces groupes ont de faibles revenus, habitent dans les HLM construits avant 1974 et ne voient pas la diffusion de nouveaux moyens de chauffage (bois ou PAC).

2.7 Conclusion

Nous nous sommes attachés dans ce chapitre à analyser avec un modèle Logit Multinomial la situation sociodémographique du ménage et les caractéristiques techniques de son logement et à définir à quel point ils entraver le choix du moyen de chauffage en 2006 et en 2013. Nous avons trouvé qu'en 2006 la situation du ménage et les caractéristiques de son logement permettaient, à eux seul, d'expliquer quel moyen de chauffage était installé dans le logement. Cette dépendance est nettement plus faible en 2013. L'accès au gaz de réseau en 2006 avait l'impact le plus important sur les probabilités de choix en termes de RRR en favorisant la probabilité d'avoir une chaudière plutôt que d'autres moyens de chauffage. La deuxième variable avec l'impact élevée est la zone climatique. Les prix des énergies, quant à eux, sont des déterminants de choix du moyen de chauffage dans les maisons individuelles, mais ont un impact très limité dans les appartements. En effet, il semble que les occupants des maisons individuelles comparent les prix des énergies au moment de choisir leur logement et ont tendance à choisir une maison avec un chauffage à énergie peu couteuse. Nous avons mis en avant le fait que plusieurs autres facteurs influencent les probabilités. Les ménages à faibles revenus ont plutôt tendance à avoir un chauffage au bois, tandis que les ménages aisés ont des moyens pour investir dans des PAC. L'âge du logement traduit l'importance de la réglementation thermique en 2006 et 2013, tandis que l'isolation du toit et le double vitrage n'influencent plus les probabilités de choix en 2013. Le statut d'occupation, le type de logement, la taille du logement et la densité urbaine, ainsi que l'âge de la personne de référence et la taille du ménage, soulignent les différences entre les situations des ménages.

Une fois les contraintes quantifiées, nous avons effectué la classification des ménages pour chaque moyen de chauffage en fonction du degré des contraintes : choix limité (une des alternatives dominant les autres) ou choix libre (les alternatives de choix sont équiprobables). Nous avons trouvé qu'en 2006, 49 % des ménages n'avaient pas de choix. La probabilité d'avoir le CED ou une chaudière était proche de l'unité pour eux. En revanche, en 2013 seulement 15,9 % des ménages restent sans choix, tandis que 16 % des ménages avaient des chances équiprobables de choisir le CED, une chaudière, une PAC ou le chauffage au bois. Cette diminution des contraintes peut avoir plusieurs sources : l'efficacité des politiques menées par le gouvernement et les progrès techniques qui ont améliorés les conditions d'utilisation et d'installation des PAC et des poêles à bois. Il s'agit notamment des PAC

air/eau qui peuvent maintenant chauffer l'eau à 50-60°C comme le font les chaudières²¹. En conséquence, il est dorénavant possible d'utiliser le même réseau de radiateurs à eau pour les chaudières et pour les PAC. Même si nous observons une amélioration de la situation, une partie des ménages reste contrainte. Il s'agit des ménages propriétaires de maisons individuelles raccordées au gaz de réseau et construites avant la première réglementation thermique, ainsi que les ménages pauvres, locataires de leur appartement.

L'étude menée dans ce chapitre nous a permis de constater un relâchement des contraintes entre 2006 et 2013 avec la diffusion des PAC et du chauffage au bois. Toutefois les données de l'ADEME montrent que le taux de ménages réalisant des travaux d'efficacité énergétique baisse : passant de 15 % en 2009 à 12 % en 2012. Par ailleurs parmi les travaux faits en 2012, seuls 16 % avait pour but l'amélioration du chauffage. Cela signifie que chaque année moins de 2 % des ménages entreprend des travaux de rénovation pour améliorer le chauffage (ADEME, 2014b). D'où vient cette inertie dans le choix du chauffage ? Est-ce que ce sont les préférences des ménages qui freinent le développement des PAC et du chauffage au bois ? Est-ce que l'environnement du ménage reflète bien les contraintes et non les préférences ? Les données utilisées dans ce chapitre ne nous permettent pas de répondre à ces questions, ni d'étudier les préférences des ménages. C'est pourquoi nous avons décidé de mener une enquête expérimentale, qui sera présentée dans le chapitre suivant. Cette enquête nous permettra non seulement d'utiliser pleinement les modèles de choix discrets (évaluer les préférences des ménages, avoir des mesures monétaires tels que le CAP ou le CAR), mais aussi d'améliorer la compréhension des contraintes subies par les ménages et enfin connaître les caractéristiques qui reflètent les préférences desdits ménages.

21. 96 % des PAC air/eau installées dans les logements l'ont été entre 2006 et 2013, tandis que ce taux est de 87 % pour les PAC air/air (voir <https://www.ademe.fr/>)

Chapitre 3

Conception et mise en œuvre de l'enquête expérimentale

Après avoir étudié dans le chapitre précédent les contraintes qui peuvent limiter le choix du mode de chauffage, nous aimerions nous consacrer pleinement à l'étude empirique des préférences énergétiques des ménages. Le plus naturel aurait été de continuer à utiliser les données du chapitre précédent, dites de préférences révélées. Tout d'abord, elles reflètent la situation réelle des ménages, puis elles sont très détaillées, tout particulièrement l'ENL 2006. Mais comme ces données ne donnent pas d'information sur les alternatives non-choisies, il est nécessaire de reconstruire la situation initiale des choix du ménage. Dans certains secteurs il est possible de le faire : soit parce que les alternatives ne sont pas nombreuses et sont les mêmes pour tous les consommateurs, comme dans le cas du choix de tarif pour le téléphone mobile ; soit parce qu'il y a assez de données disponibles et que les alternatives sont plus au moins facilement reconstruites. Par exemple, [Maurel \(2011\)](#) étudie les préférences des ménages français lors du choix d'un véhicule particulier. Six bases de données ont été utilisées au total pour reconstruire les différentes alternatives.

Aussi, nous avons envisagé de reconstruire les alternatives de choix pour les données ENL 2006 et SOFRES 2013, ainsi que les coûts à l'installation et les dépenses annuelles de chauffage. Mais cela n'aurait pas été réalisable de façon suffisamment fiable. Nous avons donc proposé de mener notre propre enquête qui a été réalisée en deux parties. La première partie a permis de récolter les informations les plus importantes sur la situation du ménage et de son logement. La seconde partie était un questionnaire expérimental dans lequel le ménage devait choisir le chauffage et une offre de rénovation parmi des offres hypothétiques. L'exploitation de ce questionnaire conduit à l'élaboration de données dites de préférences déclarées ou plus couramment appelées en anglais *Stated Preferences Data* qui permettent d'utiliser au mieux les modèles de choix discrets afin d'analyser les préférences des ménages.

Le but de ce chapitre est de présenter la méthodologie de conception de notre enquête et de donner une description des données obtenues dans la première partie de l'enquête. Une première section présente une revue des différentes méthodologies de conception d'enquête expérimentale et l'état de l'art en matière de choix du chauffage et de rénovation énergétique du logement. Dans la section suivante, nous décrivons comment nous avons conçu notre enquête. Le chapitre se termine par l'analyse descriptive des principaux résultats de l'enquête.

3.1 Méthodologie

Les enquêtes des préférences déclarées ont pris leur essor dans les années 1960-1970 suite à la révision de la théorie du consommateur. D'une part, le nouveau concept de l'utilité aléatoire a été introduit par [Luce \(1959\)](#), [Thurstone \(1927\)](#) et adapté à l'économie par [McFadden \(1974\)](#). D'autre part, [Lancaster \(1966\)](#) a présenté une nouvelle théorie qui considère que l'utilité de chaque bien est fonction d'un certain nombre de services que ce bien procure au consommateur. Ces services ou propriétés, appelés des attributs, ne sont pas les mêmes pour tous les produits et ont des niveaux différents. L'individu compare les valeurs des attributs entre les différents biens et choisit le bien dont les attributs lui apportent le plus d'utilité. Nous allons dans ce qui suit expliciter la méthodologie qui est à la base des enquêtes de préférences déclarées.

3.1.1 Plan du travail

La mise en place d'une enquête de préférences déclarées peut être décrite en 5 étapes (voir plus en détails : [Adamowicz *et al.* \(1998\)](#), [Hensher \(1994\)](#), [Louviere *et al.* \(2010\)](#)) :

1. Définir l'objet de l'étude, la problématique et le périmètre.

Cette première étape s'appuie en général sur une étude bibliographique afin de déterminer quelles situations de choix ont déjà été abordées et de quelle manière. La bibliographie est complétée par les connaissances techniques, interviews collectées auprès des professionnels du secteur. Il est aussi important de choisir le type d'enquête à utiliser. En plus de choisir parmi des offres proposées, il est possible de ([Ben-Akiva et Lerman, 1985](#)) :

- Proposer au décideur (la personne répondant à l'enquête), lors du choix réel, une offre supplémentaire et lui demander laquelle des deux aurait été choisie si cette offre avait existé.
- Le décideur peut classer les alternatives de choix qui lui ont été proposées en fonction de ses préférences.
- Choisir la meilleure alternative et la pire.

- Grouper les alternatives de choix en deux groupes : acceptables et non-acceptables.
- Donner une note à chaque alternative.
- Les alternatives appariées : certaines alternatives comportent toutes les valeurs des attributs, tandis que pour d'autres, certaines valeurs ne sont pas renseignées. Le décideur doit lui-même compléter les valeurs manquantes.

A la fin de cette étape, le modélisateur a défini la cible de l'étude, les différences existantes entre les décideurs, la formulation de la situation de choix et la liste des attributs à utiliser.

2. Définir les niveaux des attributs

Pour chaque attribut de la liste, il est nécessaire de définir l'unité de mesure et les valeurs. A ce stade, il est important de trouver un juste milieu pour le domaine de variation des valeurs. Si les valeurs sont proches, l'enquête n'arrivera pas à capter les préférences des décideurs. A l'inverse, avec des valeurs déraisonnablement éparpillées l'individu aura du mal à choisir. Il est conseillé pour les attributs quantitatifs de proposer au moins une valeur bien observable dans la vie réelle et bien connue à chaque répondant de l'enquête (Louviere *et al.*, 2010). Dans la mesure du possible, il faut aussi inclure l'attribut du prix ou du coût des alternatives de choix. Ceci est d'autant plus important, lorsque le modélisateur cherche à estimer les Consentements à Payer (CAP). Hanley *et al.* (2005) ont analysé dans quelle mesure la définition du vecteur de prix affecte les modèles de choix discrets. Deux situations de choix en tout point similaire ont été créées, à l'exception du prix des alternatives. Dans la première situation le prix varie entre £2 et £25, dans la deuxième entre £0,67 et £8. Les auteurs observent que dans la situation de faibles valeurs des prix, les valeurs de CAP sont tirées vers le bas, sans que soit affectées les préférences des répondants. Dans le cas du questionnaire avec l'option « ne rien choisir », le répondant refuse le plus souvent d'effectuer le choix avec des prix élevés.

Une fois les niveaux des attributs définis, ils sont testés sur un petit échantillon de répondants, une étape incontournable lors de l'enquête expérimentale. Le but est d'écarter les attributs et les niveaux d'attributs qui n'influencent pas les choix, qui ne sont pas réalistes, qui sont mal exprimés, etc. Le nombre d'attributs par situation de choix ne doit pas être trop grand. Pearmain et Swanson (1991) propose de les limiter à 6-7 par situation de choix. Goett *et al.* (2000), quant à eux, utilisent environ 40 attributs repartis en 5 groupes avec un attribut prix commun à tous les groupes. Pour chaque groupe une situation de choix est créée et testée.

3. Conception de l'enquête expérimentale

Le but est de générer une combinaison des niveaux d'attributs afin de créer les situations de choix qui seront présentées aux répondants. Ces situations sont aussi appelées les « *profiles* » ou les « *Trade-Offs* ». Nous pouvons répertorier les méthodes les plus courantes (Ben-Akiva et Lerman, 1985) :

- La plus simple et la moins efficace est la conception aléatoire des offres. Les niveaux de chaque attribut sont distribués selon une loi de probabilité définie par le modélisateur. Les offres sont créées par tirage aléatoire des niveaux de chaque attribut.
- La deuxième méthode consiste à utiliser les plans d'expérience factoriels complets. Il s'agit de prendre en considération toutes les combinaisons des niveaux des attributs. Dans ce cas, le modélisateur est obligé de restreindre le nombre et les niveaux des attributs afin que le nombre total des combinaisons soit raisonnable. Par exemple, le plan factoriel complet de 5 attributs à 2 niveaux chacun représente 32 combinaisons ou offres. Si un *Trade-Off* est composé de 4 offres, le répondant devra répondre au plus à 8 *Trade-Off*, alors que le plan factoriel complet de 5 attributs à 3 niveaux représente 243 combinaisons possibles.
- Les plans factoriels fractionnaires viennent en réponse aux contraintes du plan factoriel complet. Cette méthode s'appuie sur l'idée qu'il n'est pas nécessaire de tester toutes les combinaisons du plan. C'est la méthode que nous utilisons dans notre recherche et que nous présenterons en détail dans la section suivante. Le point faible de cette méthode est qu'elle utilise des plans orthogonaux, dans lesquels les niveaux des attributs varient indépendamment les uns des autres. Or, dans la vie réelle nous pouvons observer une corrélation entre certains attributs. Par ailleurs, certaines combinaisons des niveaux d'attribut peuvent s'avérer être complètement irréalistes.
- La méthode de conception « optimale » ou « efficiente », *efficient design* en anglais, permet de générer des attributs suivant un paradigme d'optimalité. Elle utilise les valeurs des paramètres issus des études antérieures ou d'une pré-enquête conduite dans le but d'obtenir ces paramètres. La conception efficiente minimise le déterminant de la matrice variance-covariance des paramètres. Cette méthode est implémentée dans SAS¹ et bien décrite dans Kuhfeld *et al.* (2010). Nous n'avons pas pu l'utiliser faute de moyens financiers suffisants pour mener une pré-enquête sachant qu'il n'existe pas d'étude antérieure pour la France.

4. Préparation et mise en place du questionnaire

Une fois l'enquête expérimentale créée, elle est intégrée dans l'ensemble du questionnaire. La partie expérimentale doit être complétée a minima par des informations annexes sur le

1. www.sas.com

répondant, ses préférences ou habitudes qui peuvent se révéler utiles pour comprendre ses choix. Durant cette étape, le modélisateur décide également sous quelle forme l'enquête sera présentée aux répondants et de quelle façon. Les enquêtes Internet présentent un certain avantage, tout en étant les moins coûteuses. Le modélisateur peut contrôler plus au moins les réponses des individus, utiliser leurs réponses pour personnaliser la partie expérimentale, etc. Cependant l'enquête Internet ne permet pas toujours de questionner toute la population ciblée. Le taux de pénétration d'Internet et son usage dépend de l'âge du répondant. La part des internautes âgés a bien progressé en France ces dernières années, mais reste loin de 100 %. Environ 52 % des personnes entre 60 et 74 ans utilisent Internet et seulement 16 % des personnes qui ont plus de 74 ans, contre 80-97 % pour les personnes ayant moins de 60 ans ([Gombault, 2013](#)). Ainsi, le modélisateur doit développer des stratégies qui lui permettront de cibler toutes les personnes ou justifier pourquoi les préférences des personnes les plus âgées peuvent être ignorées.

En préparant ce type d'enquête il faut tenir compte du fait que plus l'enquête est longue et complexe, plus le répondant aura du mal à rester concentré pour bien répondre aux questions et expériences de choix. Le plan factoriel fractionnaire ou l'*efficient design* permettent de réduire le nombre d'offres à tester. Toutefois, ce nombre peut rester quand même élevé pour un seul répondant. Dans ce cas les offres créées peuvent être réparties en blocs et chaque bloc n'est présenté qu'à un sous échantillon des répondants. Ou bien ils peuvent être alloués aléatoirement à un nombre limité de répondants à condition qu'ils soient assez nombreux.

5. *Echantillonnage et collecte des données*

A cette dernière étape le modélisateur prépare sa stratégie d'échantillonnage et la collecte des données. La taille de l'échantillon dépend des besoins de modélisation. Par exemple, dans le cas des études prévues sur les sous-échantillons, il faut s'assurer que chaque sous-échantillon contient assez d'observations après la collecte et le nettoyage des données. [Ben-Akiva et Lerman \(1985\)](#) dans leur livre expliquent plus en détail les méthodes d'échantillonnage des enquêtes expérimentales.

3.1.2 Méthode des plans factoriels

Dans la méthode des plans factoriels les attributs sont des facteurs dont les niveaux sont quantitatifs, par exemple le prix, ou qualitatifs, comme le type de chauffage. Notons A le nombre d'attributs et L le nombre de niveaux par attribut, alors le plan factoriel complet représente toutes les combinaisons possibles des niveaux d'attribut : L^A . Nous appellerons par la suite ces combinaisons – offres. Par exemple, s'il y a 4 attributs à 2 niveaux, le plan

complet compte $2^4 = 16$ offres. Avec 5 attributs à 3 niveaux, 2 à 4 niveaux et 2 à 2 niveaux, le plan factoriel complet comptera $3^5 \times 4^2 \times 2^2 = 15552$ offres possibles.

Le nombre de niveaux par attributs qualitatifs dans la vie réelle peut être assez grand. Par exemple, dans l'enquête SOFRES 2013 nous distinguons 22 systèmes de chauffage différents dont 5 types de PAC (air/air, air/eau, couplé à la chaudière, etc.). Si nous déclarons le système de chauffage comme un attribut de l'offre, alors il n'est pas forcément nécessaire de détailler autant les moyens de chauffage. Quant aux attributs quantitatifs, le nombre de niveaux doit être suffisant pour capter la forme de l'impact, linéaire ou non, qu'a cet attribut sur le choix. Si le prix est un facteur à deux niveaux, alors nous ne pourrions capter qu'un impact linéaire de cet attribut sur les choix. Afin de pouvoir tester des impacts non linéaires, il faut prendre un attribut quantitatif à trois niveaux ou plus.

Les niveaux d'attributs ont deux types d'effets sur les choix : les effets principaux et les interactions. L'effet principal, *main effect* en anglais, est l'impact qu'a un niveau de l'attribut sur le choix de l'individu, *ceteris paribus*. Les interactions sont les impacts d'une combinaison des niveaux des différents attributs sur l'utilité de l'individu. Par exemple, nous avons un attribut « mode de chauffage » avec deux niveaux « chauffage traditionnel » et « chauffage non traditionnel » et un attribut « montant d'aide (en % de l'investissement) » qui a deux niveaux : 20 % et 40 %. L'existence d'une interaction entre ces deux attributs signifie que la réaction à l'attribut « montant d'aide » dépend du « mode de chauffage ». D'après Louviere *et al.* (2010, p. 94) les effets principaux expliquent 70 % à 90 % de la variance du choix, à cela s'ajoute 5 % à 15 % de variance expliquée par les interactions d'ordre deux (c'est-à-dire entre 2 attributs), les interactions d'ordre 3 et plus ont un impact très minoritaire sur le choix.

Le plan factoriel complet permet de tenir compte de tous les effets possibles. Comme il n'est pas toujours possible de le mettre en place faute d'un grand nombre d'offres à tester, la solution la plus commune est d'utiliser un plan fractionnaire factoriel pour mesurer uniquement les effets principaux en supposant que les interactions ne sont pas significatives. Afin de tenir compte de tous les effets principaux, il faut avoir au moins autant d'offres qu'il y a d'effets. Pour chaque attribut il y a $L - 1$ effets principaux avec L le nombre de niveaux, c'est-à-dire pour A attributs à L niveaux chacun il y a $A \times (L - 1)$ effets principaux. S'il y a 3 attributs à 4 niveaux et 2 attributs à 2 niveaux, il y aura $3 \times (4 - 1) + 2 \times (2 - 1) = 11$ effets principaux tandis que le plan factoriel complet contient $4^3 \times 2^2 = 256$ offres possibles. Il nous faut donc choisir au moins 11 offres parmi les 256 possibles.

En général il faut plus d'offres que d'effet principaux afin de s'assurer que :

- Le nombre total des offres est un multiple du nombre d'effets principaux dans chaque *Trade-Off*. Si le modélisateur veut présenter 10 *Trade-Off* avec 3 offres chacun, il faut choisir 30 offres dans le plan factoriel complet.

- Les offres sont équilibrées, c'est-à-dire que tous les niveaux de chaque attribut apparaissent le même nombre de fois. Prenons comme exemple une expérience de choix avec des attributs : X à 4 niveaux, Y à 3 niveaux et Z à 2 niveaux. Il est alors nécessaire d'avoir au moins 12 offres pour construire la fraction équilibrée du plan factoriel. Chaque niveau d'attribut X apparaîtra 3 fois, chaque niveau d'attribut Y , 4 fois, chaque niveau d'attribut Z , 6 fois.
- Les attributs sont orthogonaux un à un. Cela signifie que le modélisateur force les attributs des offres à être non corrélés.

Trouver la fraction du plan factoriel qui réponde à l'ensemble de ces trois critères n'est pas aisé et n'est pas toujours possible. Nous utilisons le package *DoE.base* du logiciel *R* qui contient une bibliothèque de plans fractionnaires à la fois orthogonaux et balancés ([Grömping, 2015](#)).

Pour le cas du choix labellisé, quand le répondant attache de l'importance à chaque intitulé de l'offre, il existe la méthode $L - M - A$ pour la conception du questionnaire expérimental, orthogonal et équilibré si nécessaire (Louviere et al. 2010). Dans cette méthode L signifie le nombre de niveaux par attribut, M – le nombre d'alternatives de choix et A – le nombre d'attributs. Le nombre total de combinaisons possibles pour le plan factoriel complet est $L^{M \times A}$. Le but ici est de créer directement les *Trade-Off* au lieu de créer les offres personnalisées par alternative de choix. Le choix labellisé se distingue du choix non labellisé en deux points dont le modélisateur doit tenir compte lors de la conception des *Trade-Off*. Tout d'abord même si les offres sont identiques, les labels des alternatives peuvent influencer le choix. Puis les attributs peuvent être non-génériques, c'est-à-dire prendre différentes valeurs en fonction des alternatives de choix. Par exemple, le déplacement en voiture ou en transport public a un certain coût pour l'utilisateur, mais ce coût n'est pas toujours comparable directement entre les deux modes de transport. Dans ce cas même si l'encodage des offres est le même, les valeurs ne le sont pas.

Il existe d'autres méthodes qui permettent de réduire le nombre d'offres à présenter à chaque répondant (voir pour plus de détail [Louviere et al. \(2010\)](#)). Par exemple, la conception en bloc permet d'utiliser le plan factoriel complet que le modélisateur sépare en bloc. Chaque bloc sera présenté à un groupe d'individus qui répondra uniquement aux offres de ce bloc. Une autre méthode consiste à définir les attributs en termes de différence entre les alternatives (p.ex. « 0 minutes de plus qu'en voiture »), mais cela implique que tous les attributs soient quantitatifs ou qualitatifs avec des états comparables (p.ex. confortable ou inconfortable). Il est également possible de réduire le nombre d'offres en enlevant les offres triviales, irréalistes ou dominantes².

2. Il peut être utile de laisser les offres dominantes pour relever les répondants qui répondent au hasard.

3.1.3 Quels attributs pour quels choix énergétiques ?

Il existe très peu de travaux en France qui reposent sur des enquêtes expérimentales pour analyser les préférences énergétiques des ménages ou en lien avec le secteur résidentiel. Nous n'avons trouvé que deux études françaises qui ont été menées pour le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. Et à notre connaissance il n'existe pas d'enquête expérimentale dont l'objet est l'étude des préférences pour les travaux de rénovation en France. Compte tenu de ces constats nous avons que très peu d'information sur les préférences possibles en France. Nous avons décidé de nous tourner vers les études étrangères qui ont déjà traité ce sujet. Cette section présente les travaux qui ont permis de constituer la première liste des attributs potentiels à utiliser dans notre enquête.

Tout d'abord [Terra et Fleuret \(2009\)](#) examinent l'acceptabilité sociale des éoliennes. L'enquête expérimentale consiste à proposer aux riverains de choisir le site éolien qui leur paraît le plus acceptable au regard de 5 critères (attributs) : localisation, taille du site, hauteur des éoliennes, distance entre le site et le domicile, augmentation de la facture annuelle d'électricité. En dehors de la France, [Aravena et al. \(2014\)](#) étudient un exemple empirique de l'acceptabilité des éoliennes au Chili et utilisent en tant qu'attributs : la localisation des éoliennes, la taille du site, l'augmentation (ou la diminution) de la facture d'électricité et le pourcentage d'oiseaux tués par les éoliennes. Outre les attributs cités précédemment, [Bergmann et al. \(2008\)](#) regardent l'impact des éoliennes sur le vent, sur les émissions de GES (Gaz à Effet de Serre) et l'emploi de la région ; [Ek et Persson \(2014\)](#) ajoutent en tant qu'attribut le type du propriétaire des éoliennes (privé, public, local).

La seconde étude française menée par [Bonnet \(2013\)](#) s'intéresse au choix du logement. Les attributs des offres sont au nombre de 9, dont la source d'énergie de chauffage (gaz de réseau, électricité ou fioul) et l'isolation thermique du logement proposé (mieux isolé que le logement actuel, moins bien isolé ou pas de changement). L'auteur trouve que le ménage est prêt à payer en moyenne 9 % de plus pour son logement s'il est mieux isolé. Par contre, son CAP diminue de 38 % si on lui propose un logement moins bien isolé qu'avant. En regardant la réaction des répondants face à la source d'énergie, il relève que les répondants préfèrent en moyenne avoir plutôt un chauffage au gaz naturel. Pour des logements chauffés à l'électricité (au fioul), ils ne sont prêts à payer que 10 % (19 %) en moins du prix payé pour les logements chauffés au gaz. Par ailleurs, les répondants préfèrent ne pas changer d'énergie de chauffage et l'aversion au changement augmente avec l'âge du répondant.

Etant donné que ces deux études françaises ne s'intéressent pas à la rénovation énergétique du logement, nous nous sommes tournés vers les études étrangères afin d'établir une liste d'attributs potentiels. Nous ne regardons en détails que les études internationales dont l'objet concerne les équipements de chauffage ou les travaux de rénovation énergétiques.

Mais ce ne sont pas les seules études qui ont pour but d'analyser les préférences énergétiques dans le logement. Nous pouvons aussi citer le choix des équipements qui consomment de l'énergie ([Sammer et Wüstenhagen, 2006](#)), le choix du fournisseur d'énergie ([Goett et al., 2000](#)) ou encore l'amélioration des services énergétiques ([Abdullah et Mariel, 2010](#)).

[Achtnicht \(2011\)](#), [Achtnicht et Madlener \(2014\)](#), [Daziano et Achtnicht \(2014\)](#) étudient les préférences des ménages **allemands** pour le choix des travaux de rénovation (chauffage et isolation). Les trois études se basent sur une enquête de préférences déclarées menée en 2009 auprès de 400 propriétaires de maisons individuelles. Les attributs utilisés sont : le montant de l'investissement, le potentiel annuel d'économie d'énergie fait grâce à la rénovation, le temps de retour sur investissement, la réduction des émissions de CO₂, l'avis du conseiller indépendant en énergie, l'aide financière et la période de garantie. Les auteurs remarquent que le choix n'est pas homogène entre différents répondants et qu'il faut inclure les caractéristiques sociodémographiques (l'âge, le temps d'occupation du logement, l'état des équipements énergétiques, etc.).

Nous pouvons aussi citer une étude menée aux Pays-Bas par [Bogerd et al. \(2009\)](#) dont le but était d'étudier les préférences des ménages **néerlandais** pour la rénovation énergétique. L'enquête expérimentale a été faite au format graphique, c'est-à-dire les caractéristiques des offres ont été présentées sous forme d'image, avec les attributs suivants : niveau d'isolation des murs, mesures techniques pour baisser la consommation, temps de retour sur investissement, augmentation de la surface habitable, durée des travaux, changement du comportement des habitants. C'est la seule enquête, parmi celles que nous avons trouvées, qui n'a pas d'attribut monétaire.

[Scarpa et Willis \(2010\)](#) s'intéressent au CAP pour les technologies de la microgénération en **Angleterre** (panneaux solaire, micro-éolien, PAC, biomasse, etc.). Deux situations de choix ont été proposées aux enquêtés. Tout d'abord ils devaient choisir un nouveau chauffage afin de remplacer l'ancien qui était tombé en panne. Les attributs utilisés sont : le montant de l'investissement, la facture d'énergie annuelle ou mensuelle, le coût de maintenance annuelle, si l'offre a été conseillée par quelqu'un, la durée du contrat et les inconvénients du nouveau chauffage. La deuxième situation de choix propose d'améliorer le système de chauffage existant en ajoutant un équipement complémentaire. Cette situation utilise 5 attributs : le type d'équipement supplémentaire (panneaux photovoltaïques, eau-chaude solaire ou micro-éolien), le montant de l'investissement, le coût de la maintenance, la recommandation pour l'offre et le montant des dépenses économisées par an. Le seul attribut non significatif dans les deux situations de choix est la recommandation pour une offre donnée.

En **Finlande**, [Rouvinen et Matero \(2013\)](#) ont réalisé une enquête expérimentale de choix labellisé pour étudier les préférences des propriétaires pour les différents systèmes de chauffage. Comme dans les études précédentes, ils utilisent en tant qu'attributs le montant de l'investissement, les dépenses annuelles de chauffage avec les coûts de maintenance, les émissions de CO₂, les émissions des particules fines et le temps nécessaire pour la maintenance mensuelle du chauffage (ajout du combustible, nettoyage, etc.).

[Banfi et al. \(2008\)](#) ont mené une enquête expérimentale en **Suisse** afin d'étudier les préférences des locataires pour différentes mesures d'économie d'énergie en 2003. Ils proposent aux enquêtés de choisir entre leur logement actuel et un nouveau logement au regard de 4 critères (attributs) : isolation thermique, fenêtres et ventilation, auxquels s'ajoute le supplément à payer ou à recevoir sur le loyer ou le prix de vente du nouveau logement. [Farsi \(2010\)](#) utilise la même enquête que [Banfi et al. \(2008\)](#) pour analyser l'aversion au risque et estimer le CAP du ménage suisse pour les équipements énergétiquement efficaces. Nous retrouvons le même genre d'expérience de choix pour la **Corée du Sud** dans l'article de [Kwak et al. \(2010\)](#) avec comme attributs : le type de fenêtre, le niveau d'isolation des murs, la présence ou l'absence de la ventilation et le CAP pour un système amélioré par 3,3 m². On notera également [Phillips \(2012\)](#), qui utilise les mêmes attributs pour étudier les préférences des ménages **néo-zélandais** et qui compare les CAP des propriétaires occupants et des propriétaires bailleurs.

[Jaccard et Dennis \(2006\)](#) proposent d'utiliser les modèles de choix discrets afin d'améliorer le modèle CIMS (*Canadian Integrated Modelling System*) en y ajoutant les comportements et les préférences des ménages canadiens. Ces auteurs ont mené une enquête expérimentale au Canada afin de capter les préférences pour la rénovation énergétique et pour le chauffage (panne ou équipement en fin de vie). Ils utilisent en tant qu'attributs le montant de l'investissement, l'aide financière, la dépense annuelle de chauffage, la qualité de l'air, la maintenance hebdomadaire du chauffage. Une autre étude canadienne fait par [Islam et Meade \(2013\)](#), explore la décision des ménages à investir dans des panneaux photovoltaïques. Nous retrouvons les mêmes attributs que précédemment (investissement, réduction de la facture énergie, temps de retour sur investissement, aides financières), auxquels s'ajoutent la croissance des prix des énergies fossiles, le tarif de rachat de l'électricité, la diffusion de la technologie dans le voisinage proche et l'instabilité des politiques gouvernementales pour les énergies renouvelables.

Ces études nous ont permis de réaliser une liste des attributs les plus répandus dans le cas du choix d'un équipement de chauffage ou de travaux de rénovation énergétique :

- Coût de l'offre – montant d'investissement, prix de vente du logement ou loyer.
- Bénéfice monétaire – réduction des dépenses d'énergie grâce à l'économie d'énergie.
- Temps de retour sur investissement.

- Aides financières ou subventions – montant, origine ou types d'aide.
- Type de travaux réalisés – équipement de chauffage, isolation, ventilation, double vitrage, autres équipements énergétiques ou encore la source d'énergie utilisée.
- Performance énergétique du logement ou de l'équipement.
- Travail effectué lors de l'installation ; qualité, garantie et durée de la vie de l'équipement.
- Impact sur les émissions de CO₂, GES et pollution atmosphérique.
- Changement ou perturbation de l'espace habitable – occupation d'un espace supplémentaire pour les nouvelles installations, lieu de stockage (p.ex. pour le bois dans le cas de poêles à bois), maintenance hebdomadaire de l'équipement, effort de réglage, dérangement et gêne lors des travaux de rénovation.

Cette liste a été par la suite affinée grâce à l'enquête pilote³ auprès d'une trentaine de répondants.

3.1.4 Les limites de l'enquête expérimentale

L'enquête expérimentale présente plusieurs sources de biais dû à sa nature et que le modélisateur doit prendre en compte. Nous énonçons ici les principales sources et les solutions possibles ([Ben-Akiva et Lerman, 1985](#)).

L'individu peut ne pas prendre au sérieux l'enquête et répondre au hasard aux questions. Ou encore il peut choisir l'alternative de choix en fonction d'un seul attribut et ne pas tenir compte des autres. Afin d'éliminer les répondants de ce type nous pouvons, par exemple, regarder le temps total consacré à l'enquête et la cohérence des réponses aux questions liées. Si l'enquête le permet, il est possible d'introduire dans l'expérience de choix une offre dominante que le répondant n'a aucune raison de refuser (ou d'accepter). Cette offre permettra de retrouver les répondants avec un comportement suspect.

Le répondant peut également ignorer les contraintes réelles telles que son niveau de revenu. Dans la mesure où les choix sont hypothétiques et ne coûtent rien aux enquêtés, certains répondants pourront être tentés par les offres qui leur sont financièrement inaccessibles dans la vie réelle.

Une partie des répondants peut être influencée par l'opinion publique ou par la politique en vigueur et, de ce fait, choisir une alternative de choix qui est politiquement correcte ou une offre qu'il croit que l'enquêteur a envie d'entendre. Les répondants peuvent aussi choisir une offre qui justifie leurs choix passés. Le modélisateur peut tenir compte de ces comportements lors de l'analyse des résultats ou bien il peut introduire des questions annexes pour identifier les attitudes des répondants.

3. La Pré-enquête sur un petit échantillon des répondants.

Un autre biais important peut venir de la structure de l'expérience de choix. Tout d'abord le modélisateur peut inclure un nombre limité d'attributs, il se peut que ces attributs ne suffisent pas à expliquer les choix. Ou encore la perception de l'attribut peut varier d'un répondant à l'autre. Ceci pourra conduire le répondant à rattacher aux attributs existants des caractéristiques non mentionnées qui lui semblent importantes. Par exemple pour le choix expérimental des travaux de rénovation, l'individu pourra chercher à s'assurer de leur qualité. S'il lie la qualité du travail au prix de celui-ci, alors il pourra considérer les offres avec un faible montant d'investissement comme suspectes. Etant donné que le modélisateur ne peut prévoir toutes les réactions des répondants à son enquête, il est obligatoire de mener au préalable une enquête pilote qui permettra de vérifier la réaction des répondants et la bonne compréhension du questionnaire.

3.2 Conception du questionnaire

Dans cette section nous présentons en détails le questionnaire et sa conception. Le but est d'expliquer et de justifier certaines décisions prises lors de cette conception, et de préciser l'incidence potentiellement induite sur le résultat. La préparation de l'enquête a duré 3 mois, entre août et octobre 2014, y compris une première enquête pilote pour tester les différentes versions du questionnaire. Cette enquête a été réalisée par la société [IPSOS](#) (mise en ligne de l'enquête, recherche des répondants⁴ et passation du questionnaire) pour le compte d'EDF. La programmation du questionnaire et sa mise en ligne ont été faites en décembre 2014, suivie par une seconde enquête pilote pour tester la version finale du questionnaire et son bon fonctionnement technique. La phase active du questionnaire, envoi du lien Internet et collecte des réponses, s'est déroulée en janvier 2015. La liste des questions et les énoncés des expériences de choix se trouvent dans l'Annexe [B](#)⁵.

Nous pouvons résumer l'enquête comme suit :

- Enquête CAWI (*Computer-Assisted Web Interviewing*).
- 2000 enquêtes.
- Cible : propriétaire occupant ou locataire à loyer libre.
- Echantillon : représentatif de la population en termes d'âge, sexe, région et type de logement (méthode des quotas).
- Questionnaire en deux parties :
 - Préférences révélées (logement, consommation d'énergie, chauffage, cuisson, situation du ménage, attitudes et préférences, transport et déplacement⁶).

4. IPSOS a un panel recruté d'environ 500 000 personnes grâce auquel nous avons réussi à questionner toutes les personnes ciblées, y compris les personnes âgées.

5. Pour simplifier la lecture du questionnaire, nous avons supprimé les commandes de programmation.

6. Les questions concernant les transports et déplacements ne font pas l'objet de la thèse.

- Enquête expérimentale avec 5 situations de choix : remplacement du chauffage en cas de panne (2 situations), remplacement du chauffage électrique par un chauffage électrique en cas de panne, choix de travaux de rénovation, covoiturage (non exploité dans cette thèse).
- Taux de participation : sur 12600 invitations envoyées 44 % n'ont pas répondu, 33 % ont été déclarés hors quotas, 3 % ne faisaient pas partie de la cible et 4 % ont abandonné l'enquête en cours de réalisation.

3.2.1 Contexte, objectif et structure du questionnaire

A notre connaissance, il n'existe pas d'enquête expérimentale pour évaluer les préférences des français pour le chauffage et les travaux de rénovation énergétique. Aussi, nous avons décidé de mener l'étude la plus générale possible, tant au niveau de la cible du questionnaire, qu'au niveau des expériences de choix à évaluer.

Cible et format de l'enquête

Il est en général conseillé de questionner les gens qui viennent d'effectuer un choix semblable dans la vie réelle, ou bien qui s'appêtent à le faire (Louviere *et al.*, 2010). En effet, les personnes peu expérimentées pourront se tromper lors du choix expérimental et choisir dans la vie réelle une autre offre, une fois comparées les offres réelles. Sammer et Wüstenhagen (2006), qui analysent l'impact de labels énergétiques lors de l'achat de lave-linge, questionnent les gens directement dans les rayons de magasins où les lave-linges sont vendus. Dans le cas de notre étude, nous aurions pu chercher les endroits où la probabilité de rencontrer une personne avec une expérience sur le sujet était grande. Toutefois nous pensons que dans le cas de travaux de rénovation, l'idée de rénovation étant quelque part antinomique de l'expérience de la rénovation, il est pertinent d'interroger l'ensemble des ménages, y compris s'ils ont peu d'expérience du sujet. Ceci est d'autant plus important, que comprendre les préférences des ménages qui ne comptent pas investir dans les travaux, permettra d'élaborer des solutions pour augmenter ce taux de rénovation et pour les orienter vers les produits énergétiquement efficaces.

Nous nous sommes également intéressés aux préférences des locataires. Certes, ils ne pourront pas faire les travaux sans l'avis du propriétaire et ils ont peu de raisons d'investir dans un logement qui ne leur appartient pas. Mais ils peuvent influencer la décision et le choix du propriétaire. Par ailleurs une partie des locataires achètera à un moment ou un autre son propre logement. Les locataires sociaux du secteur HLM sont un cas particulier. En effet, nous ne pensons pas que ces locataires peuvent influencer le choix des travaux de

rénovation à mener⁷. Par ailleurs, ce sont les personnes avec les revenus les plus faibles et ils ont moins de chance de devenir propriétaire⁸.

Situations de choix et méthodologie utilisée

L'utilisation du plan factoriel fractionnaire, dans notre cas, implique souvent que toutes les offres du plan fractionnaire soient présentées à chaque répondant. Si la fraction du plan contient 48 offres et si un *Trade-Off* propose de comparer 4 offres, alors chaque répondant doit répéter 12 fois la même expérience de choix. Ainsi, un petit échantillon est suffisant pour les estimations économétriques : par exemple pour 400 répondants nous aurons donc $400 \times 12 = 4800$ d'observations. Le répondant peut faire 12 choix répétés dans la même situation de choix (Islam et Meade, 2013), mais il ne pourrait pas répondre à plusieurs situations de choix dont chacune comporte 12 *Trade-Off*.

Nous avons décidé de tester plusieurs expériences de choix, ce qui implique plusieurs dizaines de *Trade-Off*. La solution est d'utiliser un grand échantillon de répondants et de proposer juste quelques *Trade-Off* à chacun en s'assurant que chaque offre est testée auprès d'un nombre important d'individus (Garrow et al., 2007). Cette approche repose sur l'hypothèse que les préférences des individus se ressemblent ou bien qu'il peut y avoir des groupes d'individus à l'intérieur desquels les préférences sont plus au moins homogènes. Le point délicat est que nous pourrions avoir du mal à détecter l'hétérogénéité des préférences.

Structure du questionnaire

Afin de comprendre l'environnement du ménage, ses motivations, préférences et attitudes, nous avons ajouté plusieurs questions regroupées comme suit :

1. Caractéristiques sociodémographique du ménage (revenu, âge, etc.).
2. Caractéristiques techniques du logement, qui permettent entre autre de calculer de façon simplifiée le DPE.
3. Energies utilisées et dépenses énergétiques.
4. Chauffage, y compris le confort thermique.
5. Eau chaude sanitaire et cuisson.
6. Attitudes et préférences des ménages.

Le questionnaire est présenté en Annexe B. Nous avons toutes les informations pour répliquer si besoin l'analyse des contraintes présentée dans le chapitre précédent (2).

7. Pour plus d'information voir la fiche explicative : <http://www.territoires.gouv.fr>

8. <http://www.insee.fr>

3.2.2 Situations expérimentales

Les 4 situations expérimentales suivantes ont été utilisées pour évaluer les préférences. Le Tableau 3.1 présente les attributs utilisés pour chaque situation de choix :

1. La situation 1 utilise 5 attributs avec un plan factoriel complet de $4^4 \times 3$ offres possibles ;
2. La situation 2 : $4^5 \times 2^2 \times 3$ offres ;
3. La situation 3 : $4^5 \times 3$ offres ;
4. et finalement la situation 4 avec $L - M - A$ design : $4^{8 \times 3} \times 2^3$.

Pour les situations 1 à 3 nous avons une fraction du plan avec 48 offres, pour la situation 4, nous avons 128 *Trade-Off* de 3 offres chacun. Les situations 1 à 4 ont respectivement 14, 19, 17 et 66 effets principaux. Compte tenu du nombre de répondant dans les situations 1 à 3, chaque offre est testée auprès de 125 répondants, dans la situation 4, chaque *Trade-Off* est testé auprès de 15 personnes.

Le revenu est un critère important pour expliquer les choix. Toutefois il est possible que le revenu soit inutilisable dans les situations 1 à 3 de choix forcé parce que le répondant ne teste que 3 offres par situation, ces offres étant choisies aléatoirement. Ainsi, il peut arriver qu'un répondant au revenu élevé choisisse parmi les offres les moins chères, tandis que le ménage modeste devra choisir parmi les offres chères.

Le chauffage est tombé en panne (S1) : Le chauffage est tombé en panne et le répondant doit choisir une offre parmi 3. Il n'y a pas d'option « ne rien choisir » parce que cela signifierait que le ménage reste sans chauffage. Comme nous interrogeons aussi bien les locataires que les propriétaires, dont certains n'ont pas encore fini de rembourser leur prêt logement, nous précisons que le ménage est hypothétiquement propriétaire de son logement et n'a pas de prêt logement à rembourser.

Le chauffage est tombé en panne avec un focus sur le financement des travaux (S2) : La même situation que précédemment à l'exception des attributs des offres qui changent.

Remplacer le chauffage électrique défectueux par un nouveau chauffage électrique (S3) : Le répondant se retrouve dans la même situation de panne de chauffage que précédemment, mais cette fois nous lui demandons d'imaginer qu'il est équipé d'un chauffage électrique et qu'il veut le remplacer par un nouveau chauffage électrique. Afin de faciliter son choix, nous indiquons au répondant à combien s'élevait sa facture d'électricité l'année dernière. Le montant de la facture ne tient pas compte des montants déclarés par le ménage précédemment parce que les réponses peuvent être erronées. Pour chaque ménage un montant est estimé compte tenu du type de logement, de l'année de construction et de

la surface habitable. Puis ce montant est multiplié par une valeur aléatoire comprise entre 0,5 et 1,5. Le but de cette situation est de savoir de quelle façon le ménage choisit son équipement électrique au regard du tarif d'électricité proposé.

Choix des travaux de rénovation (S4) : Dans cette situation le chauffage fonctionne correctement. Nous proposons au répondant des offres de rénovation énergétique : améliorer l'isolation du logement, remplacer le chauffage par un nouvel équipement plus performant, faire les deux à la fois ou refuser toutes les offres. Le ménage est toujours propriétaire de son logement et n'a pas de prêt à rembourser.

TABLEAU 3.1: La description des attributs utilisés dans les expériences de choix

| Situation | Attribut | Description | Niveaux |
|-----------|---------------------------------------|---|---|
| 1, 2, 3 | Investissement | Coût d'installation dans une maison (€) | 5 000, 10 000, 15 000, 20 000 |
| 4 | Investissement chauffage | Coût d'installation dans un appartement (€) | 3 000, 8 000, 12 000, 15 000 |
| 4 | Investissement isolation | Coût d'installation dans une maison (€) | 8 000, 10 000, 12 000, 14 000 |
| 4 | Investissement isolation | Coût d'installation dans un appartement (€) | 5 000, 7 000, 9 000, 12 000 |
| 4 | Investissement isolation et chauffage | Coût d'installation dans une maison (€) | 7 000, 10 000, 13 000, 16 000 |
| 4 | Investissement isolation et chauffage | Coût d'installation dans un appartement (€) | 4 000, 7 000, 10 000, 13 000 |
| 1, 2, 3 | Réduction | Potentiel d'économie du montant de la facture | 10%, 25%, 40%, 55% |
| 1 | | Potentiel d'économie pour CED | 5%, 10%, 15%, 20% |
| 4 | | Potentiel d'économie du montant de la facture | 20%, 35%, 50%, 65% |
| 4 | | Potentiel d'économie pour CED | 20% |
| 1, 4 | Chauffage | Moyen de chauffage | Chaudière à gaz, PAC Poêle à bois, CED |
| 1 | Garantie | Période de garantie contre la panne (ans) | 0, 2, 4 |
| 1, 3, 4 | Régler du chauffage | Equipement de gestion de la température intérieure | Aucun, Programmable Piloté à distance, Intelligent |
| 2 | Energie | Source d'énergie pour le chauffage | Electricité, Gaz, Bois, ENR |
| 2, 4 | Origine de l'aide | Origine de l'aide pour la rénovation | Réduction fiscale, ANAH, Collectivité locale, Fournisseur d'énergie |
| 2, 4 | Montant d'aide | Montant d'aide en % de l'investissement (€) | 10 %, 20 %, 30 %, 40 % |
| 2, 4 | Disponibilité d'aide | Quand l'aide est disponible | Immédiatement, dans 1 an |
| 2, 4 | Prêt bancaire | Le taux du prêt bancaire pour accompagner les travaux | Aucun, 0 %, 2 % ¹ , 4 % |
| 2 | DPE | Diagnostic du Performance Énergétique | Oui, Non |
| 3 | Tarif d'électricité ² | Type du tarif d'électricité | Base, HP/HC, Saisonnier, Tempo |
| 3 | Abonnement (tarif) | Montant d'abonnement en € / (maison) Montant d'abonnement en € / (appartement) | 150, 200, 250, 300 150, 200, 250, 300 |
| 3 | Durée d'engagement | Prix d'électricité inchangé pendant le contrat (ans) | 1, 2, 4 |
| 4 | Gêne due aux travaux | Indisponibilité ou encombrement du logement | 2 s. en désordre, 3 s. en désordre 2 s. dehors, 3 s. dehors |

¹ Prêt à 2% disponible uniquement dans la situation 4

² Les tarifs d'électricité ont été présentés sous forme d'image

3.2.3 Description des attributs

Nous présentons ici la description des attributs retenus. La liste des attributs avec les niveaux associés est donnée dans le Tableau 3.1. La description de chaque situation de choix est donnée dans l'Annexe B. Dans cette section nous expliquons en détail pour chaque attribut comment il a été construit et comment les niveaux ont été choisis. Par ailleurs, au moment de l'enquête pilote nous avons écarté deux attributs parce que tous les participants ont déclaré ne pas en tenir compte. Il s'agit tout d'abord du conseil pour une offre donnée afin de savoir si un avis positif des connaissances ou du professionnel du secteur influence le choix. Les participants de l'enquête pilote ont expliqué que les amis ou les proches ne sont pas les professionnels du secteur et ne pourront pas prodiguer de conseils avisés. Les répondants sont aussi méfiants face aux professionnels du secteur qui peuvent conseiller une offre qui leur soit favorable plutôt que l'offre la plus adaptée au besoin du ménage.

Puis nous avons voulu savoir si l'importance des travaux d'installation peut décourager le ménage de choisir l'offre qui demande de laisser libre pour quelques jours le logement ou entraîne un important désordre dans le logement pendant un certain temps. Les répondants ont déclaré être insensibles à un ou quelques jours de dérangement (ils s'arrangeront pour prévoir les travaux durant leur absence). A contrario, un logement en désordre ou inaccessible pendant plusieurs semaines pose problème. Comme l'installation du chauffage dure entre un et quelques jours, nous avons supprimé cet attribut pour les situations 1 à 3. Dans le cas de la situation 4, « choix des travaux de rénovation », cet attribut n'est disponible que pour les offres qui améliorent l'isolation du logement.

Montant d'investissement

Le coût des travaux comprend les dépenses liées à l'achat de l'équipement, le coût de la main-d'œuvre et les taxes. Nous les avons définis en nous basant sur la dispersion des montants d'investissement observés sur le marché par Batiprix⁹. Les données publiques proposent en général les montants moyens par type de travaux. Par exemple, Laurent *et al.* (2007) indiquent que le montant moyen des travaux hors taxes¹⁰ est compris, selon les sources, entre 4884 - 6289 € pour l'isolation des murs, entre 5310 - 8810 € pour une chaudière individuelle à condensation et entre 9000 - 13154 € pour une PAC. L'ANAH (2014) donne des chiffres moyens pour les travaux qui ont bénéficié du crédit d'impôt pour le développement durable : 3 996 € pour la chaudière à condensation, 2 683 € pour la chaudière à micro-cogénération gaz, 5 737 € pour l'isolation des murs, 12 063 € pour la PAC géothermique. Ces chiffres ne tiennent pas compte du coût de la main d'œuvre. D'après les données publiées par UFE (2012) une chaudière à condensation coûterait 4 300 €, une

9. <http://www.batiprix.com/>

10. C'est-à-dire sans la Taxe sur la Valeur Ajoutée.

PAC air/air 8 400 €, une PAC air/eau 13 500 € et l'isolation entre 4 000 et 16 000 € par logement en fonction du type d'isolation utilisée et du type de surface isolée (murs, toit, plancher).

L'ENL 2006 peut être utilisée en tant qu'indicateur de la dispersion des montants investis. 22 228 travaux faits dans 11 132 logements en 2006 sont répertoriés dans le volet « travaux ». Le coût total¹¹ est donné pour l'ensemble des travaux faits dans le logement sans aucune précision sur la part de chaque type de travaux dans le montant total. Par ailleurs, la nature des travaux n'est pas précisée. Il peut s'agir de la réparation mineure du chauffage ou de l'installation d'un nouveau chauffage. Nous ne considérons que les ménages ayant déclaré avoir fait un seul type de travaux, fait par une personne tierce et dont le montant est supérieur à 2 000 €. La dispersion du montant investi en 2006 est de 2 010 € à 22 000 € pour le chauffage individuel, 2 300 € à 18 000 € pour le chauffage électrique, 2 150 € à 13 300 € pour le chauffage au bois et 2 591 € à 13 000 € pour l'isolation.

Nous proposons d'utiliser dans l'enquête expérimentale quatre niveaux de montants investis. Dans les situations 1 à 3 les montants varient entre 5000 € et 20000 € pour l'installation du chauffage dans la maison individuelle, entre 3000 € et 15000 € pour les appartements.

La situation 4 est particulière, car outre le chauffage nous avons les travaux d'isolation et le bouquet de travaux (nouveau chauffage et amélioration de l'isolation). Nous avons décidé de différencier les montants d'investissement par offre et par type de logement. Par ailleurs, nous avons réduit la variabilité des montants investis parce que :

- Les travaux de rénovation énergétique prévoient une économie minimale sur la facture que nous avons fixée à 20 % de la réduction de la facture dans les situations 1 à 3. Ceci implique que les montants d'investissement les plus faibles doivent être plus élevés que ceux des situations 1 à 3.
- Les montants les plus élevés ont été diminués par rapport aux situations 1 à 3 afin d'éviter un taux d'abandon trop important des travaux de rénovation ou de certaines offres. Au départ nous voulions mettre un niveau maximal de 20 k€ pour un nouveau chauffage, de 30 k€ pour l'isolation et de 50 k€ (puis 40 k€) pour le bouquet de travaux en créant ainsi une très grande dispersion des montants entre les offres proposées. Par exemple, dans un seul *Trade-Off* nous aurions pu voir une offre de chauffage à 5 k€ contre une offre avec un bouquet de travaux de 40 à 50 k€. Cependant, les personnes qui ont participé à l'enquête pilote ont fait savoir qu'ils avaient du mal à choisir une offre dans ce cas.

Les nouveaux montants varient entre 8 – 14 k€ (5 – 12 k€) pour le chauffage dans les maisons (appartements) ; 7 – 16 k€ (4 – 13 k€) pour l'isolation d'une maison (dans un

11. L'ENL précise le montant qu'a le ménage à sa charge et le coût global des travaux, nous prenons le deuxième indicateur.

appartement) ; 10 – 22 k€ (7 – 16 k€) pour le bouquet de travaux dans une maison (dans un appartement). La moyenne des niveaux de coût pour le chauffage est légèrement plus faible dans la situation 4 que dans les situations 1 à 3. Il est possible que cela impacte les niveaux de CAP.

Réduction de la facture d'énergie

Le potentiel d'économie sur le montant réel de la facture est présenté aux répondants sous forme de pourcentage. Nous avons demandé avant la partie expérimentale les montants que le ménage dépense en énergie. Il est techniquement possible d'utiliser cette information pour présenter la réduction en euros à condition que le montant soit renseigné par tous les répondants et sans erreur, ce dont nous n'avons pas la certitude.

Dans les situations 1 à 3 la réduction est comprise entre 10 % et 55 %, à une exception près : lorsque le ménage met en place un CED (p.ex. des convecteurs), réduire la facture de 55 % devient techniquement difficilement réalisable. En effet, le coefficient de performance du CED étant égal à 1 le remplacement d'un CED par un autre CED permettra d'économiser de l'énergie si et seulement si celui-ci a une meilleure gestion du chauffage ou fonctionne correctement en comparaison avec l'ancien chauffage. Dans le cas du remplacement d'une chaudière, il peut y avoir un gain important si l'ancien chaudière était très inefficace et (ou) utilisait des énergies coûteuses telles que le fioul ou le GPL - ce qui n'est plus d'actualité avec la baisse récente des prix de pétrole. Pour tous les autres modes de chauffage, nous pouvons justifier une réduction de la facture atteignant jusqu'à 55 % : ainsi il en va de la chaudière à gaz qui est une chaudière à micro-cogénération très performante ; dans le cas des PAC les potentiels d'économie dépendront du type de PAC ; dans le cas d'un poêle à bois la facture dépendra fortement du prix payé pour le bois.

Dans la situation 1 nous avons donc établi que lorsque l'offre est un CED (p.ex. convecteurs), le potentiel de réduction sur la facture restera très faible – entre 5 % et 20 %. Pour l'ensemble des offres dans les situations 1 à 3 nous supposons qu'un nouveau chauffage est au moins 10 % plus efficace que l'ancien parce que certaines technologies peu efficaces ne sont plus sur le marché.

Dans la situation 4, le choix des travaux de rénovation énergétique, le potentiel d'économie est au minimum de 20 % et peut aller jusqu'à 65 %. Comme dans la situation 1, le potentiel d'économie pour le CED est faible et fixé à 20 %.

A ce stade, remarquons que nous n'utilisons pas le temps de retour sur l'investissement en tant qu'attribut pour deux raisons. Tout d'abord certaines combinaisons du temps de retour sur investissement, du montant investi et de la réduction de facture donneraient une valeur hautement irréaliste. Par exemple, supposons que l'on ait un temps de retour de 10 ans, un montant investi de 20 000 € et une réduction de la facture de 25 %. Alors, la

combinaison de ces trois valeurs impliquerait que la facture d'énergie, payée par le ménage avant les travaux, s'élève à 8 000 € alors qu'en 2013 le montant moyen des dépenses annuelles en énergie dans le logement s'élevait à 1500 € ([ADEME, 2014a](#)) et que dans l'ENL 2006, seulement 39 ménages sur 36 653 dépensaient en énergie plus de 8 000 €. Par ailleurs le ménage peut ne pas tenir compte du temps de retour sur investissement lors du choix réel de son chauffage. Si nous incluons ce temps de retour dans le choix expérimental, le ménage pourrait tenir compte de cet attribut, alors qu'il ne l'aurait pas fait lors du choix réel.

Moyen de chauffage

Quatre types de chauffage sont considérés. Tout d'abord nous incluons le CED et la chaudière à gaz qui sont les moyens de chauffage les plus répandus en France : 33 % des ménages utilisent un CED et 48 % utilisent le gaz de réseau avec une chaudière individuelle ou collective ([ADEME, 2014b](#)). Nous utilisons les PAC et les poêles à bois en tant que moyens de chauffage énergétiquement efficaces. Les PAC représentent un grand potentiel d'économie d'énergie, mais sont actuellement très coûteuses. Les poêles à bois constituent le segment le plus dynamique du marché de chauffage au bois ([ADEME, 2014b](#)). En effet, le nombre des logements utilisant les poêles en tant que moyen de chauffage principal est passé de 1 % en 2006 ([INSEE, 2006](#)) à 4 % en 2013 ([ADEME, 2014b](#)).

Les poêles à bois sont proposés non seulement aux ménages habitants dans les maisons individuelles, mais aussi aux habitants des appartements, ce qui peut être surprenant au premier regard. Néanmoins, il est techniquement possible de l'installer dans un appartement et il existe des exemples de telles utilisations ¹².

Nous avons décidé de ne pas spécifier le type exact d'équipements pour le chauffage (p.ex. chaudière à condensation, PAC géothermique, etc.), pour tenir compte du fait que la population cible de l'enquête est large et inclut à la fois des ménages qui ont déjà fait les travaux de rénovation, comptent en faire ou au contraire n'y ont pas encore pensé. Aussi, si les ménages qui ont déjà remplacé le chauffage ou ont le projet de le faire sont familiers du vocabulaire technique, cela ne sera pas forcément le cas des autres. Plus les offres sont précises, plus complexe est le vocabulaire, plus le répondant aura tendance à choisir une offre au hasard ou à ne pas considérer un attribut lors du choix expérimental. Dans la version finale du questionnaire nous faisons le choix d'expliquer uniquement le fonctionnement de la PAC et des poêles à bois.

12. 154 000 ménages habitants dans un appartement déclarent d'utiliser le bois pour le chauffage de l'appartement ([CEREN, 2014](#)).

Source d'énergie

L'attribut précédent, le moyen de chauffage, est étroitement lié à l'énergie utilisée : la chaudière à gaz utilise le gaz de réseau, le CED et la PAC – l'électricité, les poêles – le bois. De ce fait le moyen de chauffage est presque parfaitement corrélé à la source d'énergie qu'il utilise. Afin de savoir s'il y a une différence entre les préférences pour les moyens de chauffage et les préférences pour les énergies, nous distinguons l'attribut « moyen de chauffage » dans la situation 1 et l'attribut « source d'énergie pour le chauffage » dans la situation 2. Quatre sources d'énergie sont proposées : le gaz naturel, l'électricité, le bois et les énergies renouvelables. Le bois est considéré en France comme une énergie renouvelable parce qu'il se reconstitue plus rapidement que ce qu'il est consommé¹³. Mais est-ce que les ménages ont la même perception ? A dessein nous n'expliquons pas ce qu'est une source d'énergie renouvelable. Le but est de connaître quelle valeur monétaire le ménage attache au concept « énergie renouvelable ».

Réglage du chauffage

La température intérieure du logement peut être réglée de différentes façons afin d'obtenir une température de confort et (ou) réduire la consommation d'énergie (p.ex. quand il n'y a personne dans le logement). Nos offres incluent quatre réglages possibles (lors de l'enquête le répondant pouvait consulter la notice explicative) :

Manuel : le ménage règle de façon manuelle le chauffage chaque fois qu'il veut réduire ou augmenter la température intérieure.

Programmable : thermostat programmable qui permet de baisser et augmenter le chauffage aux heures précisées par le ménage.

Piloté à distance : le ménage n'a pas besoin d'être présent dans le logement pour changer la température de consigne. La température peut être contrôlée à distance par le ménage ou une personne tierce.

Intelligent : le thermostat intelligent règle la température en fonction de la température extérieure, détecte les présences ou absences, apprend et anticipe les habitudes des occupants pour s'adapter mieux aux besoins du ménage.

Les réglages pilotés à distance et intelligents sont relativement nouveaux sur le marché français. Il s'agit par exemple du thermostat Nest de Google, Green Momi de l'entreprise espagnole du même nom, le bridge Cozytouch d'Atlantic ou encore de nouveaux radiateurs électriques du groupe français Atlantic spécialisé dans le confort thermique : Maradja pour le chauffage intelligent et Calissia qui sont pilotés à distance.

13. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-ressource.html>

Garantie

Certaines offres dans la situation 1 proposent une garantie qui couvre le ménage contre une éventuelle panne pendant 2 ou 4 ans. Nous avons estimé qu'une période de garantie plus longue, par exemple 10 ans, est peu réaliste et très coûteuse pour l'artisan chauffagiste sachant que l'équipement est en général couvert par le producteur contre les défauts de fabrication.

Aides financières et subvention

L'impact d'une aide financière, décrite par une combinaison de trois attributs, est étudié dans les situations 2 et 4. Dans ces situations nous supposons que chaque offre proposée est éligible à une aide financière. La description de l'aide est établie comme suit :

1. Origine de l'aide : cette rubrique permet de savoir si le ménage est sensible à l'origine de l'aide. Quatre options sont envisagées. Tout d'abord, la réduction fiscale (crédit d'impôt, TVA réduite, etc.). En 2008, le crédit d'impôt développement durable était le format d'aide le plus apprécié des ménages, mais sa popularité a baissé ces dernières années suite à la mise en œuvre de critères d'attribution plus restrictifs ([Daussin-Benichou et Mauroux, 2014](#)). Ainsi, en 2008, 45 % des ménages ayant fait des travaux ont déclaré que le crédit d'impôt avait été un facteur décisif, mais ils n'étaient plus que 12,4 % en 2013 ([ADEME, 2014a](#)). Nous proposons aussi dans l'expérience de choix, les aides suivantes : celles apportées par la collectivité locale, par le fournisseur d'énergie (EDF, GDF-Suez, etc.) ou encore l'aide de l'ANAH, ces aides étant accessibles à tous les ménages sans condition de ressources ou autres conditions restrictives.
2. Montant de l'aide : il varie de 10 % à 40 % du montant de l'investissement. Le montant de l'aide est présenté au ménage en euros et non en pourcentage.
3. Disponibilité d l'aide : disponible immédiatement ou avec un délai d'un an (par exemple le crédit d'impôt).

Prêt bancaire

Dans les situations 2 et 4 pour certaines offres il est possible de contracter un prêt dont le taux d'intérêt peut être de 0 %, 2 % (situation 4 uniquement) ou 4 %. Ceci permet de savoir si les ménages sont prêts à s'endetter pour faire des travaux de rénovation et dans quelle mesure.

Diagnostic de Performance Energétique

Les offres de la situation 2 peuvent prévoir un diagnostic énergétique gratuit. Nous restons volontairement vagues dans l'enquête sur la définition de cet attribut. Cela peut être un DPE ou autre chose. Le diagnostic de performance énergétique du bâtiment peut aider le ménage à bien choisir les travaux à faire, à connaître le potentiel de réduction des dépenses

d'énergie, et à se rendre compte des problèmes existants qui font augmenter les besoins de chauffage. Il est aussi intéressant de voir si le diagnostic peut inciter les ménages à choisir les offres les plus intéressantes en terme d'efficacité énergétique. En particulier, le diagnostic peut conforter le ménage sur son choix pour une offre, et que les réductions annoncées dans l'offre sont réalistes.

Tarif d'électricité

Comme dans le cas de l'aide financière, le tarif d'électricité est présenté par trois attributs : la forme du tarif, le montant de l'abonnement annuel et la durée de l'engagement. Les détails sur les tarifs d'électricité sont présentés sous un format image. La forme des tarifs a été proposée par le département ICAME¹⁴ d'EDF R&D. Elle se décompose ainsi (Figure 3.1) :

1. Tarif actuel de base avec un seul prix d'électricité.
2. Heures Pleines / Heures Creuses dont les prix sont proches du tarif actuel et les heures creuses durent 8 heures pendant la nuit.
3. Tarif saisonnier : En été, un seul prix bas. Par contre en hiver le tarif est double avec les heures pleines qui durent 4 heures et qui coûtent presque 3 fois plus cher que le tarif de base actuel. L'hiver (ou encore la saison de chauffage) dure 5 mois.
4. Tarif Tempo simplifié : tarif plat toute l'année sauf 22 jours en hiver quand le prix de l'électricité est élevé. Il n'y a pas d'heures creuses / heures pleines.

Les prix sont élaborés de sorte que le tarif saisonnier et le tarif tempo modifié soient les plus avantageux. L'abonnement au tarif est différencié selon le type du logement et varie entre 150 et 300 euros (90-200 euros) pour une maison individuelle (appartement). La durée de l'engagement assure au ménage que les prix d'électricité seront stables pendant la durée du contrat (1 an, 2 ans ou 4 ans).

Gêne due aux travaux

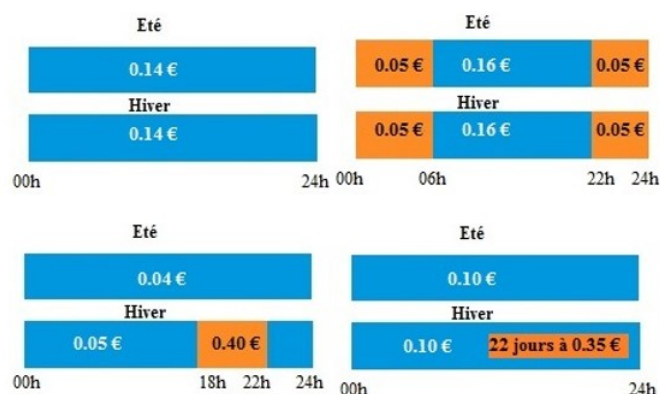
Cet attribut est utilisé pour les offres qui proposent d'améliorer l'isolation dans la situation 4 et selon quatre niveaux possibles de perturbation : pendant 2 ou 4 semaines le logement est en désordre ou le logement est inhabitable pendant 2 à 4 semaines.

3.3 Résultats de l'enquête et statistiques descriptives

Au total 2000 personnes ont répondu à notre enquête. Nous avons supprimé 207 personnes dont les réponses sont incomplètes (impossibles à reconstruire), incohérentes dans leur ensemble ou encore lorsque la personne indique dans le commentaire qu'elle a choisi les offres

14. Innovation Commerciale, Analyse des Marchés et de leur Environnement.

FIGURE 3.1: La présentation des tarifs d'électricité utilisés dans la situation 3



source forme de tarif : ICAME, source image : l'auteur

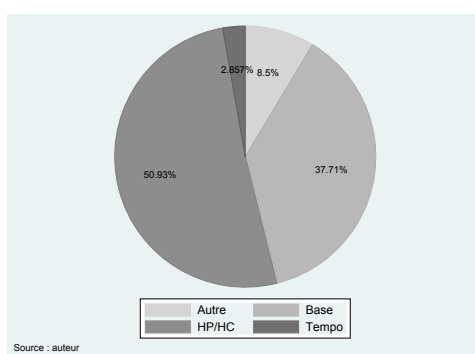
au hasard. Nous avons corrigé ou reconstruit une partie des variables pour les observations restantes. Si l'âge du logement était inconnu, nous avons utilisé la date d'entrée dans le logement de la première personne du ménage et la présence de ventilation mécanique contrôlée (devenue obligatoire à partir de 1983). Ainsi nous avons pu déterminer les logements construits avant 1983 ou avant 1974. Si le logement a été construit en 2005 ou après, nous avons vérifié que le répondant a renseigné la présence de double vitrage. Nous avons posé plusieurs questions concernant l'utilisation des énergies dans le logement pour pouvoir corriger les incohérences entre les réponses. Certaines consommations énergétiques ont été corrigées parce que les personnes précisaient dans le commentaire les consommations ou les corrigeaient. Nous avons aussi corrigé le nombre d'enfants dans le logement parce qu'une partie des répondants a inclus les parents ou les personnes adultes dans la catégorie « enfant âgé de plus de 14 ans ».

Les statistiques descriptives des caractéristiques principales des logements et des ménages peuvent être consultées dans l'Annexe C.4 et C.5. Ces statistiques ne sont pas directement comparables aux statistiques issues de l'enquête SOFRES 2013 et de l'ENL 2006 (Tableaux 2.2 et 2.3). Notre enquête ne tient pas compte des ménages habitants dans les HLM. Ces ménages ont généralement un faible niveau de revenu, habitent plutôt dans les appartements et le taux d'accès au gaz de réseau est plus important (Chapitre 2). En les ignorant pendant notre enquête nous augmentons le taux des logements non connectés au gaz de réseau et diminuons le taux des ménages aux faibles revenus. Par contre les autres statistiques, tout particulièrement les parts des modes de chauffage, sont proches des données SOFRES 2013. Dans cette section nous ne nous intéresserons qu'aux statistiques descriptives des expériences de choix et nous présenterons les apports de notre enquête concernant certains aspects énergétiques qui n'étaient pas ou peu étudiés auparavant chez les ménages.

3.3.1 Consommation d'électricité et utilisation d'énergie

Environ 40 % des ménages disent ne pas connaître leur tarif d'électricité. Parmi les répondants qui connaissent leur tarif ou qui ont consulté les factures d'électricité pendant l'enquête : 38 % ont l'option Base et, 51 % ont l'option HP/HC (Figure 3.2). La part du tarif HP/HC est plus importante si le ménage utilise l'électricité pour tous les usages (84 %), pour le chauffage et l'ECS (80 %) ou pour l'ECS sans chauffage (72 %). Il est à noter aussi que 14 % des ménages utilisent une PAC pour le chauffage avec un tarif plat (option « Base »), tandis qu'ils ne sont que 9 % dans le cas de l'utilisation d'un CED.

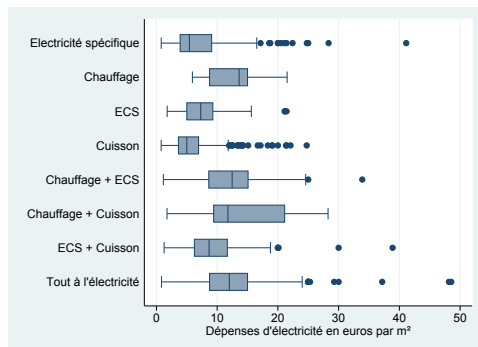
FIGURE 3.2: Quelle est l'option de votre tarif d'électricité ?



Nous avons demandé aux répondants de donner leur consommation d'électricité et leurs dépenses en électricité. Si le répondant ne connaissait pas sa consommation exacte d'électricité, il pouvait renseigner un montant approximatif des dépenses. Nous avons aussi demandé les dépenses en gaz naturel. L'étude des consommations énergétiques n'est pas l'objet de la thèse. Nous n'avons corrigé que les consommations d'électricité dont le montant est complètement irréaliste (p. ex. le montant annuel est plus faible que l'abonnement le moins cher sur le marché français). La facture moyenne d'électricité est de 853 €. C'est 14 % de plus que le montant indiqué dans le Baromètre 10 000 ménages pour 2013 ([ADEME, 2014a](#)). Cependant dans notre enquête nous n'avons pas de logement HLM et donc la part des maisons individuelles est plus importante que la moyenne nationale.

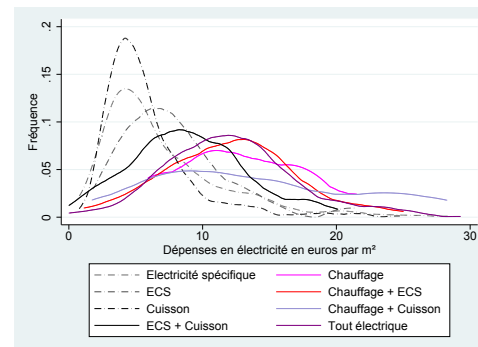
La Figure 3.3 donne les boîtes à moustaches des consommations en €/m² et en fonction de l'utilisation de l'électricité dans le logement. La Figure 3.4 donne l'estimation par noyau de la distribution des dépenses d'électricité par m². En moyenne les répondants dépensent 5 €/m² pour l'électricité spécifique seule ou avec la cuisson. Les deux boîtes à moustaches présentent beaucoup d'observations extrêmes qui peuvent être expliquées par le fait que ces ménages utilisent l'électricité comme source secondaire de chauffage ou présentent des taux d'équipements très élevés. Si le ménage utilise l'électricité pour tous les usages à l'exception du chauffage, la moyenne est proche de 10 €/m². Elle est d'environ 15 €/m² si le ménage

FIGURE 3.3: Boîtes à moustaches des dépenses d'électricité par m^2



source : auteur

FIGURE 3.4: Estimation par noyau de la distribution des dépenses par m^2



source : auteur

utilise l'électricité pour le chauffage. Ces moyennes correspondent aux moyennes données par le [CEREN \(2014\)](#).

Environ 39 % des ménages sont raccordés au gaz de réseau, 2 % ne l'utilisant pas. Le fioul est utilisé dans 10 % des logements et le bois dans 24 % des logements. Le GPL est utilisé dans 321 logements (7 %), 308 ménages ne l'utilisant que pour la cuisson.

3.3.2 Chauffage et son utilisation

La chaudière individuelle est le moyen de chauffage le plus utilisé (37 %) suivie par le CED (30 %), la chaudière collective (12 %), la PAC (7 %), la cheminée ou l'insert (5 %), le poêle à bois (4 %) et les autres moyens de chauffage (4 %). Ce qui correspond aux données SOFRES 2013 utilisées dans le Chapitre 2 bien que nous ne tiendrons pas compte ici des logements HLM.

Il n'y a que 11 % des ménages qui ne connaissent pas l'âge de leur système de chauffage. Il s'agit surtout des ménages qui ont une chaudière collective (40 %), une chaudière individuelle (20 %) ou un CED (30 %). Un quart des logements est équipé d'un chauffage récent installé depuis moins de 5 ans, un autre quart a un chauffage âgé de 5 à 9 ans, 16 % - entre 10 et 14 ans, 10 % - entre 15 et 20 ans et 11 % ont un chauffage âgé de plus de 20 ans. Environ 43 % des PAC et 56 % des poêles à bois ont été installés après 2010.

Le thermostat programmable est utilisé dans 44 % des logements. Les modèles les plus performants, thermostat piloté à distance ou intelligent, sont présents respectivement chez 2 % et 3 % des ménages. La plupart de ces systèmes ont été installés dans les logements construits avant 1999. Mais environ la moitié des ménages (44 %) règle encore le chauffage manuellement. Ce taux est plus élevé pour les logements équipés d'un CED (64 %) ou d'un chauffage au bois (60 %) et moins élevé pour les logements qui utilisent une chaudière

individuelle ou collective (32 %). Nous n'avons pas trouvé de corrélation entre le réglage manuel du chauffage et l'âge du système de chauffage installé. Pourtant il aurait été logique d'avoir un réglage manuel moins fréquent dans les logements équipés d'un chauffage récent. Parce que d'une part, le réglage automatique est plus efficace que le réglage manuel ([Liang et al., 2012](#)) et en conséquence permet de réduire les consommations d'énergie. D'autre part, les réglages récents sont plus performants, plus nombreux et moins coûteux qu'il y a 15-20 ans. En toute logique les ménages qui ont un chauffage récent auraient gagné en installant un système de réglage du chauffage.

Comme dans le Baromètre 10 000 ménages de l'ADEME ([2014a](#)), 57 % des répondants déclarent qu'ils n'ont pas choisi le chauffage installé dans leur logement, 13 % ont choisi le chauffage lors de la construction du logement, 7 % ont tenu compte du chauffage installé lors du choix de logement et 23 % disent avoir remplacé le chauffage. La part des répondants qui n'ont pas eu le choix est de : 85 % parmi les habitants des appartements, 93 % parmi les locataires, 93 % si le chauffage est une chaudière collective, 70 % si le logement se trouve dans la région Parisienne, 73 % chez les célibataires. Par contre le taux des répondants qui n'ont pas le choix est seulement de 10 % si le chauffage actuel est une PAC. Sans surprise, nous remarquons aussi que plus les revenus du ménage sont faibles, plus grande est la part des ménages qui n'ont pas choisi le chauffage.

Les 23 % des ménages qui ont changé le chauffage dans le logement, l'ont fait parce que le chauffage est tombé en panne (18 %), pour avoir un chauffage plus puissant (13 %), pour diminuer les dépenses liées au chauffage (50 %), pour changer le type de chauffage (15 %), environ 15 % pour diminuer leur consommation d'énergie sans aucune motivation financière (p.ex. pour préserver l'environnement) et 9 % pour d'autres raisons. Environ 34 % des répondants ont déclaré plusieurs raisons qui les ont poussé à installer un nouveau chauffage.

Même si 15 % déclarent avoir fait les travaux parce qu'ils voulaient changer le type de chauffage, ils sont plus nombreux à l'avoir fait : 50 %. Les autres raisons qui ont finalement abouti au changement du type de chauffage sont : ancien chauffage est tombé en panne (5 %), pour avoir un chauffage plus puissant (12 %), pour diminuer les dépenses d'énergie (60 %), pour diminuer la consommation d'énergie sans but financier (24 %), pour d'autres raisons (10 %). Le Tableau [3.2](#) indique par quel type le chauffage le chauffage a été remplacé. Parmi les ménages qui n'ont pas changé de type de chauffage, ceux équipés d'une chaudière individuelle représentent la part la plus importante (68 %). Nous remarquons aussi que pour 41 % des ménages la chaudière a été remplacée par une autre chaudière suite à une panne. Nous remarquons aussi une certaine inertie des préférences pour le CED : 43 % des ménages ont gardé un CED.

TABLEAU 3.2: Le nombre de ménages (%) qui ont changé de type de chauffage lors de l'installation du nouveau chauffage

| Pour chaque ménage qui a remplacé le chauffage : | CED | Chaudière individuelle | Poêle à bois | Autre bois | Autre |
|--|------|------------------------|--------------|------------|-------|
| ont gardé le même type de chauffage | 43 % | 68 % | 19 % | 28 % | 5 % |
| Remplacé par CED | – | 3 % | 25 % | 5 % | 26 % |
| Remplacé par PAC | 20 % | 22 % | 12 % | 14 % | 8 % |
| Remplacé par chaudière individuelle | 10 % | – | 25 % | 19 % | 34 % |
| Remplacé par poêle à bois | 13 % | 3 % | – | 29 % | 11 % |
| Remplacé par autre chauffage à bois | 8 % | 2 % | 19 % | – | 16 % |
| Remplacé par autre chauffage | 6% | 2 % | – | 5 % | – |

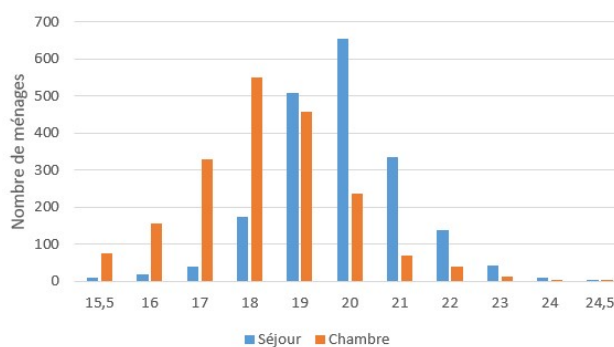
Au total 220 ménages sur 442 ont changé de type de chauffage en installant : une PAC (37 %), une chaudière individuelle (17 %), un poêle à bois (15 %), un autre chauffage au bois (12 %), un CED (10 %) ou un autre type de chauffage (9 %). La raison principale du changement de type de chauffage est de diminuer les dépenses annuelles associées. Cette raison est d'autant plus prépondérante dans le cas de l'installation d'une PAC (63 %) ou d'un poêle à bois (74 %).

3.3.3 Confort thermique

La température moyenne du chauffage dans le séjour est de 19,85°C et la température dans les chambres à coucher est de 18,33°C (voir la distribution des températures sur la Figure 3.5). Ces données correspondent aux observations précédentes (Dujin et Maresca, 2010, Raynaud, 2014). Environ 20 % des ménages déclarent avoir la même température dans la chambre à coucher et le salon. Dans ces logements la température moyenne est de 19°C au lieu de 20°C dans le séjour pour les autres logements. Ce comportement ne dépend pas du type de logement, ni du nombre d'habitants, ni de l'absence ou la présence d'un système de gestion du chauffage. Par contre, les répondants, qui ne différencient pas la température, sont plus jeunes que la moyenne (voir la cartographie des températures sur la Figure 3.6). Il est à noter aussi, que la température du confort ne dépend pas de l'âge. Ce qui est conforme aux observations du CEREN sur l'évolution des températures préférées entre 1990 et 2007 (CEREN, 2008). Ils constatent qu'avant 2000 la température chez les personnes âgées de plus de 65 ans était de 0,5°C de plus que chez les autres ménages. A partir de 2000, les personnes âgées ont renoncé à mieux se chauffer.

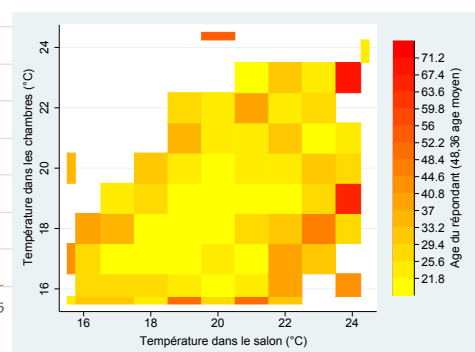
Il y a approximativement 14 % des ménages qui déclarent être en inconfort thermique¹⁵ parce que le logement est mal isolé (6 %), le chauffage est trop cher (6 %) ou les deux à la fois (2 %). Tandis que 52 % des ménages atteignent toujours la température de confort et 34 % presque toujours sauf pendant les vagues de grand froid.

FIGURE 3.5: Distributions des températures intérieures en fonction de la pièce chauffée



source : auteur

FIGURE 3.6: Cartographie des températures intérieures en fonction de l'âge du répondant



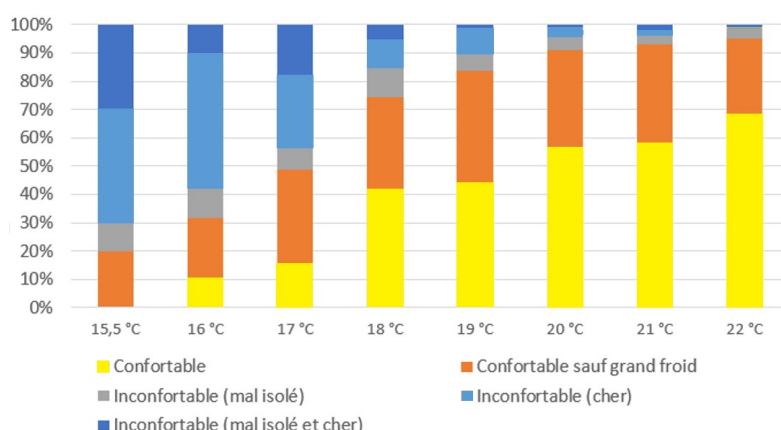
source : auteur

Parmi ceux qui chauffent le séjour à 18°C, 25 % disent être en inconfort, tandis qu'ils ne sont que 10 % si la température de séjour est de 20°C (Figure 3.7). La température moyenne du séjour est de 19°C pour les répondants en inconfort thermique, alors qu'ils aimeraient avoir une température de 20°C. La température moyenne des chambres est aussi plus faible pour les personnes en inconfort thermique : 17,9°C contre 18,4°C. Nous remarquons aussi que si le répondant utilise la même température dans le séjour et la chambre à coucher, il a plus de chance de se retrouver en inconfort. La part des personnes qui sont en inconfort est environ de 20 % si la personne habite dans un appartement, loue son logement ou que le ménage a un revenu inférieur à 1900 € /mois. Par ailleurs, parmi les 231 répondants en inconfort, 75 % disent qu'ils n'ont pas choisi leur chauffage. Une PAC ou un poêle à bois sont les chauffages avec lesquels la part des ménages en inconfort est la plus faible (respectivement 4 % et 5 %).

A la fin du questionnaire expérimental nous avons demandé si le ménage interrogé préfère avoir chaud dans son logement pour éviter de se vêtir plus : 13% des ménages étaient d'accord avec cette affirmation, 44 % plutôt d'accord, 36 % plutôt pas d'accord et 6 % pas du tout d'accord. La température de confort pour ces répondants était respectivement de 20,85°C ; 20,25°C ; 19,68°C et 19,21°C. Nous avons également demandé si les répondants

15. Les répondants en inconfort thermique ont donné la température de confort et la température actuelle dans le salon. Nous pouvons en déduire s'il y a des ménages en surchauffe. L'échantillon utilisé ne contient pas de ménage qui ont trop chaud. De façon générale ils sont peu nombreux. Dans l'ENL 2006, nous avons trouvé que 3 % de ménages en surchauffe qui habitaient dans les HLM et/ou les appartements.

FIGURE 3.7: Le sentiment d'inconfort thermique en fonction de la température déclarée dans le séjour



source : auteur

étaient prêts à avoir au maximum 19°C comme température intérieure en hiver¹⁶. Le pourcentage d'acceptation de cette mesure pour les ménages qui préfèrent 20°C ou plus en fonction de la température de confort est de : 63 %, 34 %, 28 %, 21 % des ménages avec une température de confort respectivement de 20°C, 21°C, 22°C ou 23°C.

3.3.4 Expériences de choix

Les Tableaux C.1, C.2 et C.3 dans l'Annexe proposent la description des deux offres les plus et les moins choisies dans les situations 1 à 3. Chacune des 48 offres a été présentée à environ 112 individus. Les offres les plus populaires ont été choisies par 70-80 individus, tandis que les moins populaires par moins de 10 individus. Nous avons précisé précédemment que suite à la construction des expériences de choix il serait difficile de voir l'effet du revenu sur les choix dans les trois premières expériences. Le Tableau 3.3 donne la moyenne du montant d'investissement des offres choisies par tranche de revenu du ménage. Nous remarquons que la moyenne du montant investi dans la situation 2 est de 8 % plus importante que dans les situations 1 et 3. Ce 8 % est dû probablement au fait que nous avons proposé une aide financière pour toutes les offres.

Si nous regardons les tranches du revenu, nous remarquons que la moyenne du montant investi augmente entre les tranches « 1201-1500 €/mois » et « 3801-5300 €/mois ». Par contre elle est plus faible pour les revenus supérieurs à 5300 €/mois et plus grande pour les revenus inférieurs à 1200 €/mois. Pour ces tranches nous observons une faible fréquence (5,86 % et 4,63 %) de l'effectif de l'échantillon. Après avoir vérifié les offres qui ont été

16. Le niveau de la température préconisé par la loi : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-limitation-de-la-temperature-de.html>

TABLEAU 3.3: Moyenne de l'investissement de l'offre choisie par le répondant en fonction de sa tranche de revenu

| Revenu du ménage | Fréquence (%) | Situation 1 | Situation 2 | Situation 3 | Situation 4 |
|---------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Moins de 600 €/mois | 0,56 | 10900 | 10900 | 9400 | 10400 |
| 600 - 900 €/mois | 1 | 8555 | 8944 | 6500 | 8000 |
| 901 - 1200 €/mois | 3,07 | 9163 | 10345 | 9018 | 9509 |
| 1201 - 1500 €/mois | 6,58 | 8940 | 8898 | 8694 | 8844 |
| 1501 - 1900 €/mois | 11,66 | 9497 | 9904 | 8966 | 9456 |
| 1901 - 2700 €/mois | 19,85 | 9702 | 10356 | 9794 | 9951 |
| 2701 - 3800 €/mois | 24,82 | 9874 | 10921 | 9543 | 10113 |
| 3801 - 5300 €/mois | 15,00 | 10364 | 11379 | 10449 | 10731 |
| 5300 - 6900 €/mois | 3,85 | 10608 | 10942 | 9971 | 10507 |
| Plus de 6900 €/mois | 2,01 | 7388 | 9250 | 10555 | 9064 |
| Confidentiel | 11,60 | 9649 | 10485 | 10312 | 10149 |
| Total | 100,00 | 9731 | 10505 | 9684 | 9973 |

proposées¹⁷ à ces individus, nous remarquons que dans le cas des tranches « moins de 600 €/mois » et « 1201–1500 €/mois » il y avait peu d'offres avec des montants d'investissement faibles. Par contre rien d'anormal n'a été observé pour les revenus plus grands que 5 300 €/mois. Il est possible que les ménages à haut revenu soient prêts à investir moins dans le chauffage que les autres ménages. Par exemple, parce que la part de la facture énergétique dans le budget de ces ménages est moins importante.

L'expérience de la situation 4 est un choix non contraint, c'est-à-dire que les répondants pouvaient refuser toutes les offres proposées. Nous constatons un faible taux de refus : 21 %.

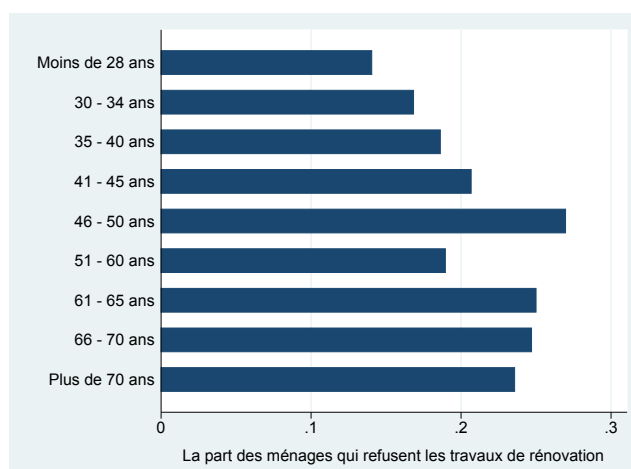
Certaines personnes dans les commentaires écrivaient qu'elles avaient déjà un logement bien isolé ou qu'elles étaient trop âgées pour faire des travaux (ou pour prendre un crédit pour les travaux). Nous avons donc décidé de vérifier la réaction des individus ayant un logement bien isolé, qui occupent le logement depuis peu de temps, qui vivent en région Méditerranéenne et sont âgées de 60 ans à 75 ans pour savoir s'ils ont refusé la rénovation ou si ils ont « joué le jeu ». Nous avons vérifié si une personne qui dit avoir fait récemment des travaux de rénovation, refuse la rénovation dans l'expérience de choix ou si elle fait son choix comme si son logement n'avait pas encore été rénové. Cela valide le fait que la personne s'est bien mise dans la situation hypothétique qui lui a été présentée.

Jusqu'à présent nous avons étudié les préférences des ménages français pour le chauffage dans un contexte de panne. La situation 4 se distingue des autres en deux points. Tout d'abord le répondant peut choisir de refuser la situation de rénovation. Puis, outre le chauffage, nous proposons aussi d'isoler le logement. Les choix sont labellisés ainsi : changer le chauffage, améliorer l'isolation thermique, changer le chauffage et améliorer l'isolation ou ne rien faire.

17. Pour chaque individu 3 offres ont été tiré sans remise parmi 48 disponibles.

Parmi 1793 ménages, 21 % refusent les travaux de rénovation. Le taux de refus est très faible (Figure 3.8), il augmente avec l'âge du répondant ce qui est contraire à la situation réelle du marché : plus les ménages sont âgés¹⁸, plus ils sont nombreux à faire des travaux de rénovation (Daussin-Benichou et Mauroux, 2014). D'un point de vue du temps nécessaire pour rentabiliser l'investissement, cela semble logique car la personne âgée peut considérer qu'elle ne vivra pas assez de temps pour profiter du résultat des travaux de rénovation. En effet, certaines personnes âgées ont mis dans le commentaire à la fin de l'enquête qu'elles pensaient être trop âgées pour faire des travaux¹⁹.

FIGURE 3.8: La part des ménages qui refusent les travaux de rénovation en fonction de la tranche d'âge



source : auteur

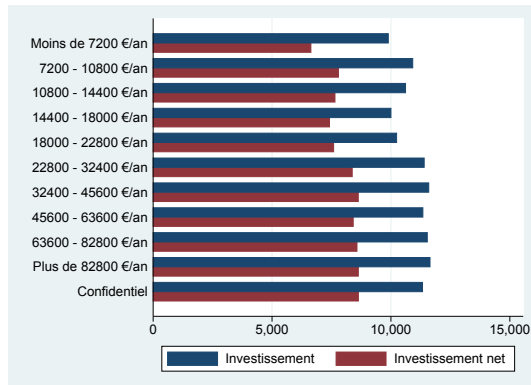
Les Figures 3.9 et 3.10 montrent respectivement le montant moyen de l'investissement de l'offre choisie et le taux de refus des travaux de rénovation par tranches de revenu. Encore une fois, les statistiques descriptives ne permettent pas de conclure si l'investissement influence les choix ou non, et dans quelle mesure. Néanmoins, le taux de refus le plus grand est celui des ménages ayant moins de 900 €/mois de revenu. Le montant moyen d'investissement net, qui tient compte de l'aide financière, augmente légèrement avec la tranche de revenu.

Les Figures 3.11 et 3.13 montrent le choix du ménage en fonction du chauffage installé dans le logement et le sentiment d'inconfort thermique. Les ménages avec un CED ou un chauffage au bois autre qu'un poêle préfèrent améliorer leur chauffage. Par ailleurs, c'est dans les logements avec le chauffage au bois autre que le poêle que le taux de refus est le plus faible. La Figure 3.12 montre l'âge moyen du répondant en fonction du chauffage déclaré.

18. Dans l'étude Daussin-Benichou et Mauroux (2014) la part des ménages qui font les travaux baisse si le ménage est âgé de plus de 75 ans. Mais ces ménages sont hors population cible de notre enquête.

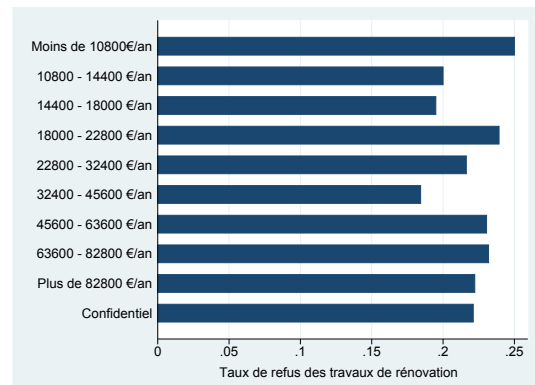
19. Pour rappel : l'âge maximal de l'enquête était 75 ans.

FIGURE 3.9: Le montant moyen investi par tranche de revenu



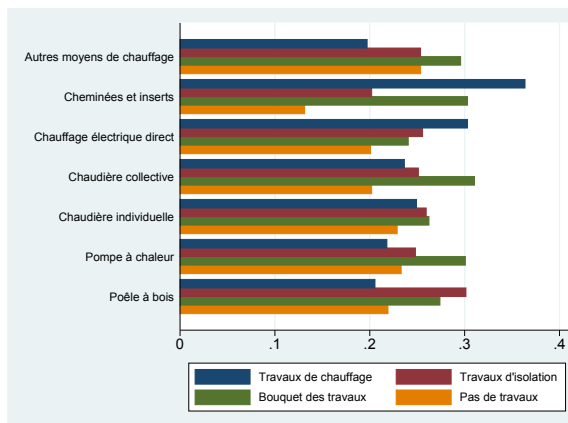
source : auteur

FIGURE 3.10: Le taux de refus des travaux de rénovation par tranche de revenu



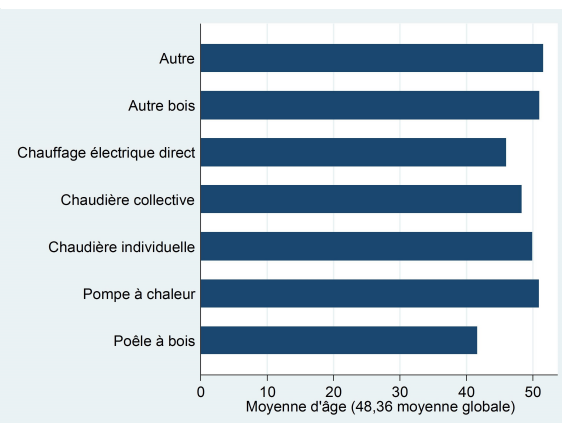
source : auteur

FIGURE 3.11: Les parts de marché de chaque alternative de choix par système de chauffage installé



source : auteur

FIGURE 3.12: L'âge moyen du répondant selon le système de chauffage installé



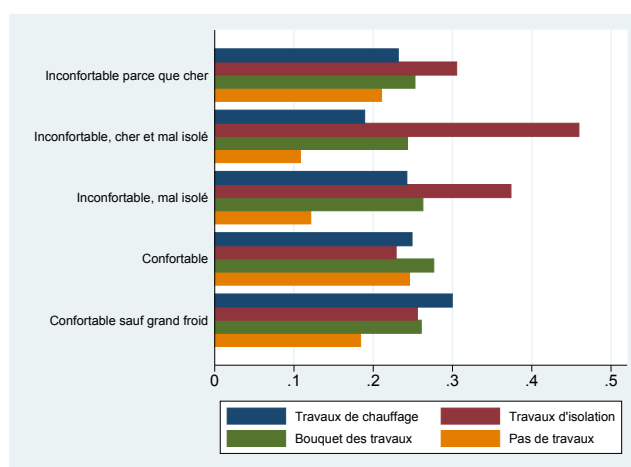
source : auteur

Quant au confort thermique, nous remarquons que les ménages en inconfort thermique choisissent plus souvent de faire des travaux d'isolation.

3.4 Conclusion

L'enquête que nous avons développée et qui a été présentée dans ce chapitre a pour l'objet principal d'étudier les choix du chauffage et des travaux de rénovation dans le logement. Elle est plus riche en information en comparaison aux enquêtes menées à l'étranger tant par le nombre d'attributs utilisés (15) que par les situations de choix testées (4). En particulier, nous avons introduit en tant qu'attributs la gestion du chauffage, l'aide financière détaillée et les tarifs d'électricité, ce qui n'avait pas encore été fait auparavant. Par ailleurs, dans le

FIGURE 3.13: Les parts de marchés de chaque alternative de choix en fonction de l'inconfort thermique ressenti



source : auteur

pré-questionnaire que nous avons élaboré, nous avons obtenu un ensemble d'informations cohérentes et détaillées sur le confort et le choix réel du chauffage, allant au-delà des travaux existants qui se concentrent sur un facteur : par exemple l'inconfort thermique (ENL 2006), la température de confort (Dujin et Maresca, 2010), ou encore dans le baromètre 10 000 ménages de l'ADEME (2014a) où nous savons si le chauffage a été choisi, mais nous ne savons pas dans quelles conditions.

L'enquête montre qu'environ 40 % des répondants ne connaissent pas leur tarif d'électricité. Nous observons également que dans le cas du chauffage et de l'ECS électrique environ 9 à 30 % des ménages continuent d'utiliser l'option base du tarif de l'électricité. Les dépenses associées à l'utilisation de l'électricité par m^2 sont multipliées en moyenne par un facteur deux si le ménage utilise un chauffage électrique.

Comme dans le Baromètre 10 000 ménages de l'ADEME (2014a), nous observons que la moitié des systèmes de chauffage sont âgés de moins de 10 ans et que le taux de personnes déclarant qu'ils n'ont pas choisi le chauffage est de plus de 50 %. Il s'agit surtout des locataires vivant en appartement, des logements dotés de chauffage collectif, qui se trouvent en région Parisienne ou qui sont habités par des célibataires.

Un quart des personnes déclarent avoir choisi leur chauffage pour remplacer l'ancien système. La moitié de ces personnes l'a fait pour réduire sa facture d'énergie. Le chauffage est le plus souvent remplacé par une PAC (37 %). D'ailleurs 62 % des PAC déjà installées, l'ont été lors du remplacement du chauffage. Un autre fait marquant est la raison du remplacement d'une chaudière individuelle par le même type d'équipement : dans 41 % c'est parce qu'elle est tombée en panne.

Finalement les questions concernant le confort thermique montrent que beaucoup de ménages réduisent la température de chauffage dans les chambres à coucher. Il s'agit surtout de ménages âgés, tandis que les ménages jeunes ont la même température dans toutes les pièces. L'inconfort thermique est récent chez 14 % des répondants. Il est à noter aussi que parmi les personnes en inconfort thermique 75 % n'ont pas choisi leur chauffage.

L'analyse des choix expérimentaux et l'étude des préférences à l'aide des modèles de choix discrets seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Quelles sont les préférences des ménages pour les travaux de rénovation ?

Ce chapitre est consacré à l'étude économétrique des préférences des ménages dans le choix d'un système de chauffage ou de travaux de rénovation énergétique (e.g. isolation, changement de système). Cette analyse s'appuie sur l'enquête expérimentale réalisée par nos soins et présentée dans le chapitre précédent. Nous commençons dans ce chapitre par la présentation de la spécification des modèles économétriques de choix, y compris de quelle façon les nouvelles variables ont été créées et dans quel but. Dans la Section 4.2 nous présenterons les modèles pour lesquels les paramètres sont constants, c'est-à-dire ceux où les préférences des individus sont homogènes. Puis dans la Section 4.3 nous étudierons l'hétérogénéité des préférences des ménages. Une fois les modèles estimés, nous présenterons dans la Section 4.4 l'analyse économique des résultats : le taux d'actualisation implicite, les consentements à payer et les différents effets étudiés tels que l'inertie des préférences et le signal de qualité. Un nombre important de modèles ont été testés et estimés, aussi nous ne pourrions pas les présenter tous dans ce chapitre, cependant nous proposons dans l'Annexe D quelques modèles intermédiaires pour comprendre et justifier les choix de spécification de nos modèles finaux.

4.1 Spécification globale des modèles

Cette section est consacrée à la spécification des modèles économétriques pour chaque situation expérimentale de choix. La spécification détaillée avec les intitulés de l'ensemble des variables sera présentée dans les sections consacrées résultats.

Il est possible d’automatiser le choix de modèle en utilisant la procédure « pas à pas » plus connue en anglais comme *stepwise regression* (Greene, 2012). Dans ce cas, le but est de minimiser le nombre des variables en maximisant la qualité de la régression. Soit le modélisateur commence à estimer le modèle avec toutes les variables et le réduit en retirant une à une les variables (*backward elimination*), soit il commence par le modèle avec une seule variable et ajoute les autres une à une (*forward selection*). L’utilisation d’une telle méthode n’a pas de sens dans le cas des modèles de choix discrets élaborés à partir d’enquête expérimentale puisqu’une enquête expérimentale réussie est celle où les attributs des alternatives de choix ont été bien choisis avant de lancer l’enquête. Dans ce cas nous savons à l’avance que tous les attributs seront significatifs dans le modèle estimé. Mais le modèle peut être amélioré en croisant les attributs avec les caractéristiques individuelles des décideurs pour voir si la situation réelle du décideur influence les choix. Ou encore nous pouvons tenir compte de l’hétérogénéité des préférences.

Nous avons sélectionné les modèles finaux de la façon suivante. Nous commençons par estimer les modèles MNL sans aucune hétérogénéité des préférences et en n’utilisant que les attributs des offres expérimentales. Les modèles sont estimés pour l’ensemble de l’échantillon et pour les sous-échantillons en fonction de l’une des caractéristiques individuelles (p.ex. les habitants des maisons individuelles et les habitants des appartements). Comme nous ne pouvons pas comparer directement les paramètres estimés entre les modèles (voir Chapitre 1, nous calculons les consentements à payer (CAP) pour les attributs en les comparant entre modèles. Si les CAP sont sensiblement différents pour le même attribut dans les différents sous-échantillons, alors il s’agit d’une hétérogénéité des préférences. Si les CAP ont les mêmes valeurs que les CAP du modèle pour l’ensemble de l’échantillon, alors les préférences ne dépendent pas de la caractéristique individuelle testée.

Après avoir défini de quelle manière les caractéristiques individuelles influencent les choix, nous intégrons l’hétérogénéité des préférences dans les modèles MNL et Logit Mixte, puis nous intégrons une à une les autres variables qui peuvent influencer le choix. Nous finissons par tester les modèles de Classes Latentes pour savoir si les préférences des ménages sont hétérogènes de façon discrète.

Dans les sous-sections suivantes nous présentons d’abord la spécification générale de l’utilité aléatoire, puis les différents effets que nous aimerions évaluer.

4.1.1 Utilité aléatoire

L’utilité aléatoire d’un ménage $n \in N$ pour l’offre $j = 1, \dots, J$ dans chaque situation expérimentale est donnée par :

$$U_{nj} = \gamma Inv_{nj} + \beta^T X_{nj} + \xi_{nj} \quad (4.1)$$

où γ est le paramètre associé au montant d'investissement Inv_{nj} , β^T est le vecteur des paramètres associés au reste des attributs X_{nj} et ξ_{nj} est la part non observable de l'utilité. Si les préférences sont homogènes, alors les paramètres γ et β^T sont des constantes et le modèle peut être estimé en utilisant le Logit Multinomial (si l'hypothèse IIA est vérifiée) ou le Logit emboîté (si l'hypothèse IIA est rejetée).

Dans le cas de préférences continues, nous gardons les paramètres γ associés à l'investissement constant pour faciliter les calculs (Goett *et al.*, 2000). Tandis que les paramètres β_n sont individuels et leur distribution suit la loi normale multivariée $N(\beta, \Omega)$ (Greene, 2012) :

$$\beta_n = \beta + \pi Z_n + L\eta_n \quad (4.2)$$

Avec β – la moyenne, Ω – la matrice de variance-covariance, $\eta_n \rightsquigarrow N(0, 1)$ et L est la matrice triangulaire inférieure de Cholesky qui vérifie $\Omega = LL^T$. Les caractéristiques individuelles Z_n permettent d'ajuster la moyenne en tenant compte de l'hétérogénéité de la population. Le modèle utilisé est le Logit Mixte (aux paramètres aléatoires). Ce modèle permet également d'obtenir les estimateurs des paramètres individuels. Leur distribution montre si la loi retenue pour approximer la distribution des préférences est correcte.

Nous pouvons aussi supposer que la distribution des paramètres est discrète, c'est-à-dire que les individus peuvent être regroupés en classes avec des préférences homogènes. Une telle utilité est estimée en utilisant le Modèle des Classes Latentes avec Q le nombre des classes. Les paramètres estimés pour chaque groupe sont constants.

La liste des attributs X_{nj} pour chaque situation est donnée dans le Tableau 3.1 du chapitre précédent. Les attributs quantitatifs, par exemple le montant de l'investissement, sont intégrés directement dans les modèles. Par contre pour les attributs qualitatifs, le type de gestion du chauffage (réglage) ou l'énergie de chauffage, nous devons choisir une catégorie de référence et créer les variables indicatrices pour les autres catégories. Prenons par exemple l'attribut « L'énergie de chauffage » qui comporte quatre modalités : le gaz de réseau, l'électricité, les ENR et le bois. Le gaz de réseau est la catégorie de référence. Pour les trois autres catégories nous créons 3 variables indicatrices : $Elec_{nj}$, ENR_{nj} et $Bois_{nj}$ pour $\forall n = 1, \dots, N$ et $j = 1, \dots, J$:

$$ENR_{nj} = \begin{cases} 1 & \text{si ENR,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.3)$$

Il n'est pas nécessaire d'utiliser les poids d'échantillonnage afin d'obtenir les résultats pour l'échantillon représentatif du moment que les données ne sont pas groupées et que les répondants ont été tirés de façon aléatoire ([Ben-Akiva et Lerman, 1985](#)).

Cette formulation générale d'utilité aléatoire peut être complétée et améliorée en utilisant des informations issues de la première partie de l'enquête. Tout d'abord nous pouvons tenir compte des caractéristiques du répondant et de son logement. Par exemple les habitants des appartements peuvent refuser les offres comportant un chauffage au bois en estimant qu'ils n'ont pas assez de place pour le stocker. Outre le type du logement nous aimerions savoir si les préférences changent en fonction du revenu et du confort thermique des ménages. Nous pouvons également créer de nouveaux attributs en croisant les informations concernant le ménage et les attributs déjà existants.

4.1.2 Spécification des effets

Nous proposons d'améliorer la compréhension du choix des ménages en intégrant dans les modèles économétriques les informations les concernant : le revenu, les équipements déjà installés chez eux, les dépenses d'énergie ou encore les préférences pour le confort thermique. Les sous-sections qui suivent, expliquent comment nous avons intégré ces informations et ce que nous cherchons à démontrer.

4.1.2.1 Effet revenu

Nous avons vu dans le Chapitre 2 que le niveau de revenu augmente la probabilité d'avoir chez soi des technologies plus coûteuses à l'installation telle qu'une PAC. Ou encore dans le chapitre précédent, les statistiques descriptives montrent que le montant moyen investi dans les situations expérimentales augmente légèrement avec le revenu. Pour tester l'effet revenu, nous posons :

$$U_{nj} = \sum_{t=1}^T \gamma_t Inv_{nj|t} + \beta^\top X_{nj} + \xi_{nj} \quad (4.4)$$

où t est le numéro de la tranche du revenu avec $t = 1$ pour les revenus les plus faibles et $t = T$ pour les revenus les plus élevés. Si le revenu n'a pas d'impact sur le comportement

d'investissement, alors les γ_t ne seront pas significativement différents les uns des autres. Nous testons l'hypothèse d'égalité des coefficients avec le test de Wald :

$$\begin{aligned} H_0 : \gamma_1 = \dots = \gamma_t = \dots = \gamma_T \\ H_1 : \gamma_t - \gamma_{t'} \neq 0 \forall t \neq t' \end{aligned} \quad (4.5)$$

Sous l'hypothèse H_0 la statistique du test suit une loi de χ^2 de $T - 1$ degré de liberté. Pour la situation de rénovation énergétique (S4), le choix est labellisé proposant des types de travaux. Nous pouvons tester l'influence du revenu sur les différentes alternatives de choix ou sur le fait d'accepter ou non les travaux de rénovation. Dans ce cas la formulation du modèle est la même que dans le Chapitre 2.

4.1.2.2 Inertie des préférences

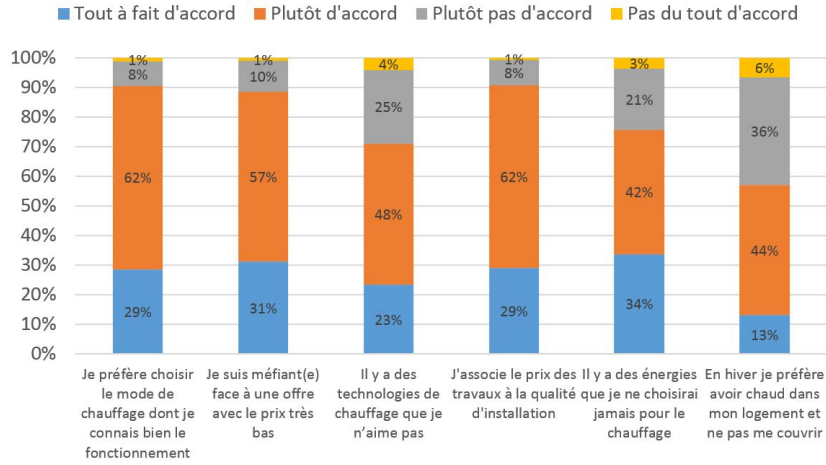
Grâce à la première partie de l'enquête nous savons qu'environ 91 % des ménages préfèrent choisir un moyen de chauffage qu'ils connaissent bien (Figure 4.1). Nous avons aussi l'information concernant le moyen de chauffage installé chez le ménage, l'énergie utilisée pour ce chauffage, le mode de gestion de la température intérieure (réglage) par le ménage et son tarif électrique. Notons I_{nj} – la variable indicatrice qui est égale à 1 si l'offre propose au ménage le même type d'équipement, le même tarif ou la même source d'énergie que celle qu'il utilise déjà et 0 sinon. Alors l'utilité aléatoire s'écrit comme :

$$U_{nj} = \gamma Inv_{nj} + \phi_{ch} I_{nj}^{ch} + \phi_{th} I_{nj}^{th} + \phi_{tf} I_{nj}^{tf} + \beta^T X_{nj} + \xi_{nj} \quad (4.6)$$

où I_{nj}^{ch} est l'inertie des préférences pour le chauffage (pour l'énergie de chauffage dans la situation 2), I_{nj}^{th} est l'inertie des préférences pour la gestion du chauffage et I_{nj}^{tf} – l'inertie des préférences pour le tarif électrique. Si les paramètres ϕ associés à l'inertie sont significatifs et supérieurs à 0, alors le ménage préfère choisir une offre identique à sa situation initiale. Le ménage est prêt à renoncer à sa situation initiale (« ses habitudes ») si le prix des équipements auxquels les ménages sont fidèles, est plus élevé que le montant du $CAP_{inertie}$ pour rester conforme à sa situation initiale (voir Section 1.6.1) :

$$CAP_{inertie} = -\frac{\phi}{\gamma} \quad (4.7)$$

FIGURE 4.1: Voici une série d'affirmations. Pourriez-vous dire pour chacune d'elles, si elles vous correspondent ?



source : auteur, enquête IPSOS

Il est aussi possible que l'inertie des préférences varie avec l'âge du répondant. Si le lien entre l'inertie et l'âge est linéaire, alors l'utilité aléatoire s'écrit comme :

$$u_{nj} = \gamma Inv_{nj} + (\phi_{ch} I_{nj}^{ch} + \phi_{th} I_{nj}^{th} + \phi_{tf} I_{nj}^{tf}) \times Age_n + \beta^T X_{nj} + \xi_{nj} \quad (4.8)$$

Afin de savoir si l'âge influence l'inertie ou non, nous comparons les critères d'information et le ρ^2 des modèles (4.6) et (4.8).

Nous avons précisé dans la description des situations expérimentales que le ménage n'a pas de contrainte technique. Mais il est quand même possible que le ménage refuse certaines offres qui lui semblent techniquement irréalistes ou non adaptées à son logement. Par exemple si le logement n'est pas raccordé au gaz de réseau, le ménage peut refuser les offres de chauffage au gaz. Dans ce cas l'indicateur d'inertie sera confondu avec les contraintes.

4.1.2.3 Montant d'investissement et signal de qualité

Le ménage qui s'adresse à une entreprise ou à un artisan pour commander des travaux, n'a pas d'information parfaite sur les compétences des installateurs et la qualité du travail effectué. Même si l'artisan ou l'entreprise a toutes les compétences requises et l'expérience, le travail effectué peut être quand même de qualité médiocre si l'installateur fait peu d'efforts. En conséquence le ménage risque de se retrouver avec des travaux qui ont été mal réalisés et ne pas bénéficier des économies d'énergie espérées. Il s'agit de l'asymétrie d'information. Pour se prémunir contre ce risque le ménage peut refuser les offres dont

le montant d'investissement est faible en supposant qu'elles correspondent à un risque plus élevé de ne pas obtenir la qualité désirée. Les résultats de notre enquête, corroborent cette remarque : 88 % des répondants de notre enquête sont méfiants face aux prix faibles et 91 % associent le prix des travaux à la qualité d'installation (voir Figure 4.1). Sans information sur les entreprises et les artisans, nous ne pouvons statuer sur le lien entre le montant d'investissement et la qualité des travaux. Par contre nous pouvons observer la réaction des répondants aux faibles montants d'investissement. Si le ménage a le choix entre les offres d'un coût moindre d'un facteur 2 à 5, que choisira-t-il ? Une telle disparité des montants d'investissement peut surprendre, néanmoins comme nous l'avons dit dans le chapitre précédent les montants d'investissement pour les travaux de rénovation varient beaucoup en France (INSEE (2006), <http://www.batiprix.com/>).

Nous proposons d'observer comment les répondants réagissent aux *Trade-Off* lorsque la disparité des montants d'investissement est la plus élevée (et en tenant compte des remarques précédentes quant à la méfiance face aux prix faibles). L'attribut « Montant d'investissement » varie entre 3 000 € et 15 000 € pour un appartement, et entre 5 000 € et 20 000 € pour une maison : nous envisageons donc les *Trade-Off* avec une offre de 3 000 € contre deux offres de 15 000 € pour les ménages en appartements et une offre de 5 000 € contre deux offres de 20 000 € pour les ménages en maisons individuelles. Au total environ 4 % des *Trade-Off* sont concernés dans le cas de choix de chauffage suite à une panne. Notons $S_{nj} = -4, -2, 0, 2, 4$ la variable qui mesure la perception du signal qualité que le ménage pense obtenir pour une offre donnée et qui prend 5 niveaux en fonction de la réponse à l'affirmation « Je suis méfiant(e) face à une offre avec le prix très bas » :

1. 0 si le *Trade-Off* n'a pas de grand écart entre les offres.
2. -4 si « Pas du tout d'accord » avec l'affirmation, le Trade-Off présente un grand écart de prix et le montant d'investissement est 3 000 € ou 5 000 €.
3. -2 si « Plutôt pas d'accord ».
4. 2 si « Plutôt d'accord ».
5. 4 si « Tout à fait d'accord ».

L'utilité aléatoire U_{nj} s'écrit comme :

$$U_{nj} = \gamma Inv_{nj} + \nu S_{nj} + \beta^T X_{nj} + \xi_{nj} \quad (4.9)$$

Si le paramètre ν associé au signal qualité S_{nj} est significativement inférieur à 0, alors nous pourrions dire que la probabilité de choisir une offre à bas prix diminue pour les personnes qui lient le prix à la qualité et augmente pour les personnes qui ne le font pas.

Nous n'avons pas évalué l'effet de la dispersion des montants d'investissement dans la situation de rénovation (S4). Tout d'abord parce que l'écart entre les niveaux de l'attribut « montant d'investissement » est plus faible. Puis l'investissement pour le bouquet des travaux est par définition plus élevé que le montant d'investissement pour l'amélioration du chauffage ou de l'isolation thermique. Le signal de qualité sera corrélé à la constante spécifique de l'alternative « Améliorer le chauffage et l'isolation thermique ».

4.1.2.4 Confort thermique

Gossay *et al.* (2010) montrent qu'en moyenne chaque degré de température de chauffage supplémentaire augmente d'environ 7 % la facture d'énergie. C'est-à-dire plus le ménage est sensible au froid (« frileux »), plus il présente une température de consigne de chauffage élevée et plus il consomme de l'énergie *ceteris paribus*. Nous faisons alors l'hypothèse que plus sa facture énergétique est élevée, plus le ménage essayera de la contrôler et de réduire ses dépenses de chauffage. Il peut le faire en achetant un chauffage permettant une bonne gestion de la température intérieure ou être intéressé par des énergies renouvelables ou moins coûteuses. Nous pouvons appuyer cette hypothèse par les études de Belaid et Garcia (2015) et Allibe (2012) : plus le logement est énergivore, plus les ménages français adaptent un comportement d'économie d'énergie et présentent une restriction de leur service énergétique.

Nous proposons ici d'estimer l'effet de chaque degré de la température de confort sur les préférences pour les moyens de chauffage (énergie) et le moyen de gérer son chauffage (réglage). Pour évaluer cet impact nous utilisons deux informations issues de notre enquête : la température de confort de ménage dans le séjour et le fait d'accepter ou non de limiter la température du chauffage à 19°C. Les ménages qui sont prêts à limiter la température de chauffage peuvent avoir des préférences proches des ménages « non frileux »¹. Afin de savoir si c'est le cas, nous créons une nouvelle variable « confort modifié » qui est égale à :

- Température du confort déclarée si le ménage ne veut pas limiter le chauffage ou préfère déjà chauffer à 19°C ou moins.
- 19°C si le ménage est prêt à limiter la température du chauffage et déclare actuellement préférer 20°C ou plus.

1. Nous ne définissons pas à partir de quelle température désirée la personne est considérée comme « frileuse ». Nous comparons 2 personnes avec les différentes températures désirées. La personne frileuse est celle dont la température intérieure désirée est la plus élevée.

Posons C_{nj} les attributs pour lesquels les préférences varient entre les personnes « frileuses » et « non frileuses », T_n – la température du confort, alors l'utilité aléatoire s'écrit comme :

$$U_{nj} = \gamma Inv_{nj} + \theta^T(C_{nj} \times T_n) + \beta^T X_{nj} + \xi_{nj} \quad (4.10)$$

Avec θ – le vecteur des paramètres associés aux attributs croisés avec le confort (modifié) (T_n). Le confort a de l'importance dans le choix du chauffage si θ est significatif et le modèle est plus performant au regard des critères d'information *AIC* et *BIC*.

4.2 Homogénéité des préférences

Nous commençons notre analyse économétrique par les estimations des modèles simples (MNL ou Logit Emboité si besoin) où les préférences sont considérées comme étant homogènes. Les répondants ont fait face aux quatre situations expérimentales. Nous présentons séparément pour chaque situation expérimentale le modèle dédié ainsi que les résultats obtenus.

4.2.1 Situation 1 : choix du chauffage suite à une panne

Spécification du modèle

Dans la première situation expérimentale le chauffage est tombé en panne et il est irréparable, en conséquence le ménage doit choisir un nouvel équipement. Nous lui proposons 3 offres de chauffage parmi lesquelles il est obligé d'en choisir une. L'utilité aléatoire du répondant n pour l'offre de chauffage j dans situation 1 est donnée par :

$$\begin{aligned} U_{nj} = & \gamma_M Inv_{nj}^M + \gamma_A Inv_{nj}^A + \beta_1 Reduc_{nj} + \beta_2 Garantie_{nj} \\ & + \beta_3 CED_{nj} + \beta_{4M}(PAC_{nj}^M \times T_n) + \beta_{4A} PAC_{nj}^A + \beta_{5M} Poele_{nj}^M + \beta_{5A} Poele_{nj}^A \\ & + \beta_6(Progn_{nj} \times T_n) + \beta_7(Pilote_{nj} \times T_n) + \beta_8(Intello_{nj} \times T_n) \\ & + \nu S_{nj} + \phi_{ch}(I_{nj}^{ch} \times Age_n) + \phi_{th}(I_{nj}^{th} \times Age_n) + \xi_{nj} \end{aligned} \quad (4.11)$$

où les préférences pour l'investissement, la PAC et le poêle à bois sont fonction du type de logement : la maison individuelle (M) ou l'appartement (A). Le confort thermique modifié T_n est supposé refléter les préférences pour la PAC dans une maison individuelle et le réglage du chauffage (e.g. la température intérieure). Le modèle tient compte aussi du

TABEAU 4.1: Résultat d'estimation du modèle MNL pour la situation 1

| Attributs | Paramètres | z statistique |
|---|------------|-----------------|
| M -Investissement (1000 €) | -0.112*** | (-13.64) |
| A -Investissement (1000 €) | -0.172*** | (-12.57) |
| Réduction (%) | 0.03571*** | (14.33) |
| Garantie (nombre d'années) | 0.193*** | (9.14) |
| CED [†] | 0.00256 | (0.02) |
| M -PAC [†] \times Température de confort | 0.0470*** | (7.87) |
| A -PAC [†] | 0.507*** | (3.50) |
| M -Poêle [†] | 0.425*** | (3.68) |
| A -Poêle [†] | -0.675*** | (-4.09) |
| Programmable [#] \times Température de confort | 0.0276*** | (5.53) |
| Intelligent [#] \times Température de confort | 0.0290*** | (5.39) |
| Piloté [#] \times Température de confort | 0.0170*** | (3.19) |
| Signal-qualité | -0.295*** | (-3.04) |
| Inertie chauffage \times Age | 0.0259*** | (13.92) |
| Inertie réglage \times Age | 0.00469*** | (2.68) |
| Observations | 5379 | |
| Log-vraisemblance | -1474.6 | |
| Pseudo ρ^2 | 0.251 | |
| Pseudo $\bar{\rho}^2$ ajusté | 0.244 | |
| Nombre de bonnes prédictions | 63.5% | |
| AIC | 2979.2 | |
| BIC | 3078.1 | |

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

[†] par rapport à la chaudière à gaz (catégorie de référence)

[#] par rapport au réglage manuel (catégorie de référence)

M – maisons individuelles, A – appartements

signal qualité S_{nj} et de l'inertie des préférences pour le moyen de chauffage et sa gestion : I_{nj}^{ch} et I_{nj}^{th}).

Résultats

Les résultats du modèle MNL sont donnés dans le Tableau 4.1. Les estimations des modèles intermédiaires sont données dans l'Annexe D. La qualité d'ajustement est bonne avec un pseudo $\bar{\rho}^2$ ajusté de 0,244 et un taux de bonnes prédictions de 63,5 %. L'ensemble des attributs sont significatifs, ce qui indique que la situation de choix est bien construite. Tous les paramètres estimés ont le signe attendu. La probabilité pour que le système de chauffage soit choisi décroît avec la croissance du montant de l'investissement, d'autant plus si le ménage habite dans un appartement. La réduction de la facture de chauffage et la garantie de l'équipement influencent positivement les probabilités de choix du système de chauffage.

Les habitants des maisons individuelles préfèrent la PAC parmi les quatre moyens de chauffage proposés. Plus ils sont « frileux », plus ils sont intéressés par l'investissement

dans une PAC ($0,047^{***} \times T_n$). Le poêle à bois ($0,425^{**}$) vient en deuxième position², mais les préférences ne dépendent pas de la température de confort. Les habitants des maisons sont indifférents entre une chaudière gaz et un CED.

Nous remarquons un changement des préférences pour les ménages en appartement. Les répondants préfèrent toujours les PAC, mais le paramètre estimé est plus faible³. Le répondant est toujours indifférent entre une chaudière gaz et un CED, qui arrivent après la PAC dans l'ordre des préférences. Le paramètre estimé pour le poêle à bois est fortement négatif ($-0,675^{***}$). Cela semble être logique car les habitants en appartement ont moins de place pour le stockage du bois (ou pellet/granulés), voire pas du tout. Ils peuvent aussi penser qu'il est techniquement difficile ou impossible à installer dans un appartement.

Les répondants préfèrent avoir un réglage du chauffage plutôt qu'un ajustement manuel de la température intérieure. Comme dans le cas des PAC, plus la température intérieure souhaitée est élevée, plus les ménages sont intéressés par la gestion automatisée. Les valeurs des paramètres pour le thermostat programmable et la gestion « intelligente » sont proches. Le test Wald d'égalité de ces deux paramètres donne la p-value de $0,7837$ ⁴, c'est-à-dire que les répondants sont plutôt indifférents entre un thermostat programmable ou « intelligent ». Par contre ils sont moins intéressés par la fonction de pilotage à distance. Certains peuvent considérer que le pilotage à distance est intrusif parce qu'il peut notamment transmettre les données confidentielles du comportement des occupants à une personne tierce. D'autres peuvent considérer que le thermostat piloté à distance n'est pas très différent du réglage manuel et que cette fonction seule⁵ n'a pas de grand intérêt.

4.2.2 Situation 2 : choix du chauffage et focus sur le financement des travaux

Spécification du modèle

Comme dans la situation précédente, le répondant se trouve dans une situation expérimentale où le chauffage est tombé en panne et il faut choisir un nouveau chauffage parmi les trois offres proposées. L'utilité aléatoire est donnée par :

2. $0,047^{***} \times T_n > 0,507^{***} \forall T_n > 9$

3. $0,047^{***} \times T_n > 0,507^{***} \forall T_n > 11$

4. La p-value de 0,78 signifie que la statistique de test se trouve dans l'intervalle de confiance à 22 % ou moins, et non dans l'intervalle habituel de confiance à 95 %.

5. Dans la vie réelle le gestionnaire de la température peut intégrer plusieurs fonctions à la fois : être programmable, piloté à distance et intelligent. Néanmoins dans la situation expérimentale nous considérons que le gestionnaire a une seule fonction : programmable, ou piloté à distance, ou intelligent. Ceci est fait pour pouvoir évaluer l'effet de chaque option sur le choix.

$$\begin{aligned}
 U_{nj} = & \gamma_M Inv_{nj}^M + \gamma_A Inv_{nj}^A + \beta_1 Reduc_{nj} + \beta_{2M} DPE_{nj}^M + \beta_{2A} DPE_{nj}^A \\
 & + \beta_3 (ELEC_{nj} \times T_n) + \beta_4 (ENR_{nj} \times T_n) + \beta_{5M} (Bois_{nj}^M \times T_n) + \beta_{5A} (Bois_{nj}^A \times T_n) \\
 & + \beta_{6ok} Fisc_{nj}^{ok} + \beta_{6non} Fisc_{nj}^{non} + \beta_{7ok} FE_{nj}^{ok} + \beta_{7non} FE_{nj}^{non} \\
 & + \beta_{8ok} ANAH_{nj}^{ok} + \beta_{8non} ANAH_{nj}^{non} \\
 & + \beta_9 MontAide_{nj} + \beta_{10} DispoAide_{nj} + \beta_{11} Pret0_{nj} + \beta_{12} Pret4_{nj} \\
 & + \nu S_{nj} + \phi_{ch} (I_{nj}^{ch} \times Age_n) + \xi_{nj}
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

Les préférences pour l'investissement, le bois, le diagnostic énergétique du logement (DPE) dépendent du type de logement. Le confort thermique modifié T_n influence les préférences pour l'énergie de chauffage. Nous avons aussi trouvé que le type d'aide dépend de l'attitude du ménage envers l'environnement : s'il est prêt à limiter la température à 19°C (ok) ou non. Comme dans la situation précédente, nous incluons ici l'inertie des préférences pour l'énergie de chauffage I_{nj}^{ch} et le signal qualité S_{nj} .

Résultats

Les résultats d'estimation pour les modèles intermédiaires sont donnés dans l'Annexe D. Le Tableau 4.2 donne les résultats d'estimation. Les attributs utilisés dans l'expérience de choix sont tous significatifs et ont le signe attendu. La probabilité que l'offre soit choisie diminue avec le montant d'investissement. La réduction de la facture d'énergie, le montant d'aide, sa disponibilité immédiate, le DPE et le prêt à taux 0 % ont un impact positif sur les probabilités des choix. La qualité de prédiction est toujours bonne, mais plus faible : le pseudo $\bar{\rho}^2$ ajusté est plus faible que dans la situation 1.

Lorsque nous nous intéressons aux énergies de chauffage et non aux systèmes de chauffage, nous observons que le ménage est toujours indifférent entre le gaz naturel et l'électricité. Les préférences pour l'ENR ne dépendent pas du type de logement occupé contrairement à la situation précédente où les préférences pour la PAC sont plus élevées chez les habitants vivant en maisons individuelles. Le bois, pour les ménages en appartement, est la source d'énergie la moins prisée, ce qui correspond aux résultats obtenus pour les poêles à bois. Par contre nous trouvons que les habitants des maisons individuelles sont indifférents entre le gaz naturel, l'électricité et le bois. En tenant compte des préférences observées dans la situation précédente, nous pouvons dire que les habitants des maisons préfèrent le bois uniquement lorsqu'il s'agit de poêles à bois. Si le ménage connaît le fonctionnement des poêles à bois, cela peut être lié au fait que les poêles à bois présentent un nombre d'avantages par rapport aux cheminées et inserts : réglage de la température de chauffage, auto remplissage, programmation, etc. Nous remarquons aussi que la température du confort

TABEAU 4.2: Résultat d'estimation du modèle MNL pour la situation 2

| Attributs | Paramètres | z statistique |
|--|------------|-----------------|
| M-Investissement (1000 €) | -0.0964*** | (-9.59) |
| A-Investissement (1000 €) | -0.152*** | (-10.61) |
| Réduction (%) | 0.03161*** | (15.47) |
| Électricité [†] × Température de confort | 0.00125 | (0.27) |
| ENR [†] × Température de confort | 0.0377*** | (7.93) |
| M-Bois [†] × Température de confort | -0.00663 | (-1.19) |
| A-Bois [†] × Température de confort | -0.0286*** | (-3.67) |
| Aide du fournisseur d'énergie [#] ($\leq 19^\circ\text{C}$) | -0.0689 | (-0.61) |
| Aide du fournisseur d'énergie [#] ($> 19^\circ\text{C}$) | 0.346** | (2.23) |
| Aide fiscale [#] ($\leq 19^\circ\text{C}$) | 0.209* | (1.87) |
| Aide fiscale [#] ($> 19^\circ\text{C}$) | 0.437*** | (2.81) |
| Aide ANAH [#] ($\leq 19^\circ\text{C}$) | -0.0635 | (-0.55) |
| Aide ANAH [#] ($> 19^\circ\text{C}$) | 0.420*** | (2.68) |
| Aide disponible de suite | 0.262*** | (4.04) |
| Montant d'aide (1000 €) | 0.167*** | (6.78) |
| Prêt à taux 0% | 0.473*** | (5.99) |
| Prêt à taux 4% | 0.0315 | (0.39) |
| M-DPE | 0.0614 | (0.77) |
| A-DPE | 0.536*** | (4.77) |
| Inertie énergie × Age | 0.0193*** | (10.76) |
| Signal-qualité | -0.193* | (-1.89) |
| Observations | 5379 | |
| Log-vraisemblance | -1609.7 | |
| Pseudo ρ^2 | 0.183 | |
| Pseudo $\bar{\rho}^2$ ajusté | 0.172 | |
| Nombre de bonnes prédictions | 58.5 % | |
| AIC | 3261.4 | |
| BIC | 3399.8 | |

* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$

[†] par rapport au gaz naturel (catégorie de référence)

[#] par rapport à l'aide des collectivités locales (catégorie de référence)

M - maisons individuelles, A - appartements

influence les préférences pour la source d'énergie de chauffage. Les préférences pour les ENR et l'électricité (le bois) augmente (diminue) avec la température de confort souhaité.

Dans cette situation nous avons supposé que chaque offre proposée est éligible à une subvention à l'investissement. L'origine de cette aide n'a pas d'importance pour les ménages qui sont prêts à limiter la température de chauffage à 19°C . Les paramètres associés ne sont pas significativement différents de 0, à l'exception du paramètre associé à l'aide fiscale qui est significatif au risque de 10 %. Par contre les ménages sensibles au froid préfèrent, par ordre d'importance : l'aide fiscale, l'aide de l'ANAH et l'aide du fournisseur d'énergie à l'aide des collectivités locales. Le montant de l'aide et sa disponibilité immédiate

augmentent la probabilité que l'offre soit retenue. Par ailleurs nous remarquons que le paramètre associé au montant d'aide, 0,167***, est plus élevé que les paramètres γ associés au montant d'investissement. Ainsi, l'aide compense l'augmentation de l'investissement et crée un effet multiplicateur supérieur à 1 : 1 € d'aide incitera le ménage à augmenter l'investissement de plus de 1 €. Outre les aides, nous avons proposé pour certaines offres la possibilité d'un prêt à taux 0 % ou à 4 %. Les résultats montrent que le ménage est prêt à s'endetter uniquement si le prêt est à taux 0 %.

Nous constatons que le diagnostic énergétique du logement intéresse plutôt les habitants des appartements. Cela signifie que ces ménages pensent mal connaître les besoins énergétiques ou la qualité thermique de leur logement. Pour les nouvelles variables que sont l'inertie des préférences pour l'énergie et le signal qualité, les paramètres estimés sont significatifs.

4.2.3 Situation 3 : choix d'un chauffage électrique suite à une panne

Spécification du modèle

Toujours dans le cas où le ménage est face à une panne de chauffage, nous lui demandons d'imaginer qu'il s'agit d'une panne du chauffage électrique. Nous lui proposons de le remplacer par un autre chauffage électrique. L'utilité aléatoire est donnée par :

$$\begin{aligned}
 U_{nj} = & \gamma_M Inv_{nj}^M + \gamma_A Inv_{nj}^A + \beta_1 Reduc_{nj} + \beta_{2M} Abon_{nj}^M + \beta_{2A} Abon_{nj}^A + \beta_3 Duree C_{nj} \\
 & + \beta_4 (Prog_{nj} \times T_n) + \beta_5 (Pilote_{nj} \times T_n) + \beta_6 (Intello_{nj} \times T_n) \\
 & + \beta_7 (HPHC_{nj} \times T_n) + \beta_8 (Saisons_{nj} \times T_n) + \beta_9 (Tempo_{nj} \times T_n) \\
 & + \nu S_{nj} + \phi_{ch}(I_{nj}^{ch} \times Age_n) + \phi_{th}(I_{nj}^{th} \times Age_n) + \phi_{tf}(I_{nj}^{tf} \times Age_n) + \xi_{nj}
 \end{aligned}
 \tag{4.13}$$

Outre l'investissement, la réduction sur la facture et le réglage du chauffage, nous observons ici la réaction du ménage face aux tarifs de l'électricité. Ce tarif est décrit par trois attributs : la forme du tarif (part variable), le montant annuel de l'abonnement (part fixe) et la durée du contrat. Concernant les préférences pour les montants d'investissement et de l'abonnement, ils sont liés au type de logement occupé. Dans cette situation nous incluons également l'inertie des préférences pour le réglage du chauffage et pour le tarif de l'électricité, ainsi que le signal qualité. Dans ce cas, l'inertie des préférences ne dépend que de l'âge. Ce n'est plus le cas pour ce qui concerne le réglage du chauffage. Au contraire, lorsque l'on croise la variable d'inertie des préférences pour le tarif et le réglage du chauffage avec l'âge, cela détériore la qualité du modèle.

Résultats

TABLEAU 4.3: Résultat d'estimation du modèle MNL pour la situation 3

| Attributs | Paramètres | z statistique |
|--|-------------|-----------------|
| M-Investissement (1000 €) | -0.0922*** | (-12.16) |
| A-Investissement (1000 €) | -0.17*** | (-12.7) |
| M-Abonnement (€) | -0.00424*** | (-5.93) |
| A-Abonnement (€) | -0.00717*** | (-5.04) |
| Réduction (%) | 0.0305*** | (15.06) |
| Programmable [†] × Température de confort | 0.0063 | (1.35) |
| Intelligent [†] × Température de confort | 0.0167*** | (3.74) |
| Piloté [†] × Température de confort | 0.00855* | (1.71) |
| Tarif HP/HC [‡] × Température de confort | -0.000107 | (-0.23) |
| Tarif saisonnier [‡] × Température de confort | 0.018*** | (3.76) |
| Tarif Tempo [‡] × Température de confort | -0.002 | (-0.41) |
| Durée du contrat (nombre d'années) | -0.0103 | (-0.40) |
| Inertie réglage | 0.2** | (2.27) |
| Inertie tarif d'électricité | 0.178* | (1.73) |
| Signal-qualité | -0.0406 | (-0.46) |
| Observations | 5379 | |
| Log-Vraisemblance | -1626.3 | |
| Pseudo ρ^2 | 0.174 | |
| Pseudo $\bar{\rho}^2$ ajusté | 0.167 | |
| Nombre de bonnes prédiction | 58.3 % | |
| AIC | 3282.7 | |
| BIC | 3381.5 | |

* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$

M – maisons individuelles, A – appartements

[†] par rapport au réglage manuel (catégorie de référence)

[‡] par rapport à l'option Base, tarif unique pour l'électricité, (catégorie de référence)

Les résultats d'estimation du modèle MNL sont donnés dans le Tableau 4.3. Le pseudo $\bar{\rho}^2$ ajusté est égal à 0,17, ce qui est proche du $\bar{\rho}^2$ de la situation 2. Le taux des bonnes prédictions est d'environ 58 %. Un seul attribut n'est pas significatif : la durée de contrat du tarif de l'électricité qui garantit la non-augmentation des prix pour la durée d'engagement. A l'interrogation : les ménages préfèrent-ils s'assurer contre le risque d'augmentation des prix, l'estimation répond que ce n'est pas le cas : le paramètre est légèrement négatif (-0,011). Soit les répondants considèrent qu'il n'y aura pas d'importante augmentation des prix, soit ils ne veulent pas s'engager pour pouvoir profiter de tarifs bas si l'occasion se présente (et ne pas prendre une option « irréversible »). Les paramètres associés à l'investissement et à l'abonnement évoluent conformément aux attentes : la probabilité que l'offre soit choisie diminue avec l'augmentation de l'investissement et de l'abonnement du tarif.

Comme dans la situation 1, les répondants préfèrent disposer d'une gestion pour leur chauffage avec une nette préférence pour la gestion « intelligente ». Plus ils sont « frileux », plus

grande est la préférence pour le réglage non-manuel. Le paramètre associé à la gestion « intelligente » est deux fois plus important que le paramètre associé à la gestion programmable, alors que ces deux paramètres étaient proches dans la situation 1 : les préférences pour la gestion du chauffage peuvent donc dépendre du moyen de chauffage utilisé.

Les ménages préfèrent les offres de chauffage électrique avec un tarif saisonnier : c'est-à-dire un tarif bas en été et pendant les heures creuses en hiver (voir Figure 3.1). Le répondant est indifférent entre les options Base, HP/HC et Tempo. Est-ce contraire à la logique ? Grâce à notre enquête nous savons que 40 % des ménages ne connaissent pas leur tarif d'électricité et que 50 % des ménages qui le connaissent utilisent un autre tarif que le tarif HP/HC. Il est donc possible que ces ménages ignorent que l'utilisation du tarif HP/HC permet de réduire sa facture d'électricité. Nous avons alors estimé un sous modèle avec uniquement des ménages ayant opté pour le tarif HP/HC et équipés d'un CED ou d'une PAC. Les résultats montrent que ces ménages sont également indifférents aux différentes options : Base, HP/HC et Tempo. Certes l'option HP/HC a un tarif très avantageux en HC. Mais en contrepartie, pour limiter sa facture le ménage doit pendant les heures HP - quand le tarif est plus élevé que l'option Base - réduire sa température de chauffage, ses appels à l'éclairage et aux appareils électriques. C'est également le cas pour le tarif Tempo. Comparés à l'option Base, ces tarifs nécessitent de la part du ménage un effort d'ajustement supplémentaire qu'il peut ne pas être prêt à faire.

4.2.4 Situation 4 : choix des travaux de rénovation

Spécification du modèle

Contrairement aux situations précédentes, nous nous intéressons dans la situation 4 au choix des travaux de rénovation. Ce choix n'est pas forcé, car le ménage peut refuser de faire la rénovation. L'utilité dans cette situation est donnée par :

$$\begin{aligned}
 U_{nj} = & \sum_{i=1}^{J-1} ASC_i + \gamma_M Inv_{nj}^M + \gamma_A Inv_{nj}^A + \beta_1 Reduc_{nj} \\
 & + \beta_{2M} MontAide_{nj}^M + \beta_{2A} MontAide_{nj}^A \\
 & + \beta_3 CED_{nj} + \beta_4 PAC_{nj} + \beta_{5M} Poele_{nj}^M + \beta_{5A} Poele_{nj}^A \\
 & + \beta_6 Progn_{nj} + \beta_7 Intello_{nj} + \beta_8 Pilote_{nj} \\
 & + \beta_9 Fisc_{nj} + \beta_{10} FE_{nj} + \beta_{11} ANAH_{nj} \\
 & + \beta_{12} DispoAide_{nj} + \beta_{13} Pret0_{nj} + \beta_{14} Pret2_{nj} + \beta_{15} Pret4_{nj} \\
 & + \beta_{16} Desord2_{nj} + \beta_{17} Hors2_{nj} + \beta_{18} Hors4_{nj} \\
 & + \phi_{ch}(I_{nj}^{ch} \times Age_n) + \phi_{th}(I_{nj}^{th} \times Age_n) + Z_n \alpha_j + \xi_{nj}
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

Cette fois le choix est labellisé : l'intitulé de l'alternative en elle-même explique le choix. Les trois constantes ASC_i capturent les préférences des répondants pour le label du choix i . L'amélioration du chauffage est l'alternative de référence à laquelle il faut comparer les résultats. Les préférences pour le montant d'investissement, l'aide financière et le poêle à bois sont différenciés en fonction du type de logement. Nous ne tenons compte ici ni de la température du confort, ni du fait que le ménage accepte de limiter sa température de chauffage à 19°C parce que ces variables n'influencent pas les choix des ménages comme dans les situations précédentes. Deux effets sont ajoutés au modèle : l'inertie des préférences pour le moyen de chauffage et l'inertie des préférences pour le mode de gestion. Les effets d'inerties sont croisés avec l'âge du répondant, car nous supposons que le degré d'inertie augmente avec l'âge. Comme le choix est labellisé, nous pouvons utiliser ici les caractéristiques individuelles Z_n comme dans le Chapitre 2 avec α_j – le vecteur des paramètres associé à Z_n pour chaque alternative j .

Nous commençons par estimer deux modèles MNL avec des préférences homogènes en supposant que l'hypothèse IIA est vérifiée (voir Section 1.4.3) et sans tenir compte des caractéristiques individuelles. Le premier modèle est estimé pour l'ensemble des ménages avec 4 alternatives de choix dont le refus de faire les travaux. Le deuxième modèle est estimé uniquement pour les ménages qui ont choisi de faire les travaux. Les résultats des deux modèles MNL sont donnés dans le Tableau D.7 en Annexe. Nous remarquons que le pseudo ρ^2 du modèle avec l'alternative « Refus de faire les travaux » est presque deux fois plus faible que le ρ^2 du modèle restreint aux personnes qui ont choisi de faire les travaux. Cela veut dire que les attributs des offres expliquent peu le choix de faire les travaux ou non.

Nous avons aussi testé l'hypothèse IIA afin de savoir si le modèle MNL est appropriée. Les résultats du test Hausman & McFadden (Section 1.4.3) sont donnés dans le Tableau 4.4 et

TABLEAU 4.4: Résultat du test IIA d'Hausman & McFadden pour le modèle complet avec l'ensemble des observation et le modèle restreint aux ménages qui ont choisi de faire les travaux

| Alternative retirée : | Avec refus | | Sans refus | |
|-----------------------|--------------------|---------|--------------------|---------|
| | Valeur de χ^2 | P-value | Valeur de χ^2 | P-value |
| Chauffage | 26,87 | 0,2162 | 13,19 | 0,92 |
| Isolation | 13,97 | 0,902 | 13,39 | 0,92 |
| Chauffage & Isolation | 22,32 | 0,501 | 19,5 | 0,61 |
| Ne rien faire | 19,71 | 0,603 | — | — |

montrent que le fait de retirer une des alternatives de choix ne change pas le rapport des probabilités pour les autres alternatives de choix, c'est-à-dire il n'y a pas de corrélation entre les alternatives.

Dans le modèle final nous ajoutons les caractéristiques individuelles Z_n qui permettent d'améliorer le modèle, mais le ρ reste toujours faible comparé aux situations précédentes. Les résultats du modèle final sont présentés dans deux tableaux : paramètres associés aux attributs des offres (Tableau 4.5) et paramètres associés aux caractéristiques individuelles par alternative de choix (Tableau 4.6).

4.2.4.1 Influence des attributs sur le choix de la rénovation

Le bouquet de travaux est l'alternative la plus appréciée des répondants (0,787**) comparée à l'alternative « Améliorer uniquement le chauffage ». Pour les autres alternatives le ménage est indifférent entre améliorer le chauffage, améliorer l'isolation du logement ou ne pas faire les travaux. Seule l'inertie des préférences pour le système de chauffage est significative.

Les paramètres associés à l'investissement, la réduction de la facture et le montant d'aide ont le signe attendu. La probabilité de choisir l'offre diminue si l'investissement augmente et augmente si la réduction de la facture et le montant d'aide augmentent. Le paramètre associé au montant d'aide pour les maisons individuelles est presque 5 fois plus faible que le montant d'aide pour les appartements. Cela veut dire que les habitants des appartements sont très sensibles à l'aide, tandis que les habitants des maisons individuelles sont presque insensibles avec le paramètre significatif seulement au risque de 10 %. C'est un signe d'un effet d'aubaine : en l'absence d'aide financière ces ménages auraient quand même choisi de faire les travaux. L'ampleur de l'effet d'aubaine peut être importante, entre 40 et 90 % des travaux qui ont bénéficié d'une aide financière (Nauleau, 2014, Risch, 2013). Plus l'effet d'aubaine est grand, plus la politique d'incitation financière est inefficace et coûteuse.

Parmi les aides proposées, les répondants préfèrent les aides fiscales ou celles proposées par les collectivités locales. La disponibilité de l'aide, immédiate ou retardée un an, n'influence

TABEAU 4.5: Résultats du modèle MNL pour la situation 4 (début)

| | Paramètre | z statistique |
|---|------------|-----------------|
| ASC_j : Isolation | 0.383 | (1.08) |
| ASC_j : Chauffage & Isolation | 0.787*** | (2.31) |
| ASC_j : Ne rien faire | -0.357 | (-0.91) |
| M-Investissement (1000 €) | -0.0646*** | (-5.43) |
| A-Investissement (1000 €) | -0.151*** | (-7.59) |
| Réduction (%) | 0.0217*** | (11.06) |
| M-Montant d'aide (1000 €) | 0.0486* | (1.78) |
| A-Montant d'aide (1000 €) | 0.236*** | (4.54) |
| CED [†] | -0.0341 | (-0.29) |
| PAC [†] | 0.609*** | (5.44) |
| M-Poêle à bois [†] | 0.0673 | (0.49) |
| A-Poêle à bois [†] | -0.127 | (-0.74) |
| Aide : ANAH [§] | -0.328*** | (-3.48) |
| Aide : Fiscale [§] | -0.0700 | (-0.77) |
| Aide : Fournisseur d'énergie [§] | -0.172* | (-1.87) |
| Aide : immédiat [§] | -0.0249 | (-0.38) |
| Prêt à taux 0% | 0.343*** | (3.75) |
| Prêt à taux 2% | 0.0861 | (0.91) |
| Prêt à taux 4% | -0.0198 | (-0.21) |
| En désordre (3 semaines) [£] | 0.0262 | (0.24) |
| Hors logement (2 semaines) [£] | -0.319*** | (-2.82) |
| Hors logement (3 semaines) [£] | -0.390*** | (-3.41) |
| Programmable [#] | 0.188 | (1.62) |
| Piloté à distance [#] | 0.215* | (1.70) |
| Intelligent [#] | 0.357*** | (2.94) |
| Inertie chauffage \times Age | 0.0129*** | (5.87) |
| Inertie réglage \times Age | 0.00206 | (0.98) |
| Observations | 7172 | |
| Log-Vraisemblance | -2265.8 | |
| Pseudo ρ^2 | 0.0884 | |
| AIC | 4675.6 | |
| BIC | 5170.8 | |

* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$

[†] par rapport à la chaudière à gaz (catégorie de référence)

[#] par rapport au réglage manuel (catégorie de référence)

[§] par rapport à l'aide de la collectivité locale (catégorie de référence)

[£] par rapport au logement en désordre pendant 2 semaines (catégorie de référence)

M – maisons individuelles, A – appartements

plus les choix. Dans le cas du choix forcé (S2), le ménage devait investir immédiatement dans le nouveau chauffage, alors qu'ici nous n'explicitons pas le délai suivant lequel les travaux de rénovation sont à réaliser. Le ménage dispose de plus de flexibilité et il peut commencer les travaux au moment opportun. Nous proposons aussi pour certaines offres de prendre un prêt à taux 0 %, 2 % ou 4 %. Le ménage n'est intéressé que par le prêt bancaire à taux 0 %.

Les répondants sont indifférents entre une chaudière gaz et un CED. Ils sont aussi indifférents entre une chaudière gaz et un poêle à bois contrairement à la situation 1. Les ménages préfèrent en priorité les PAC, mais ces préférences ne dépendent pas du type de logement occupé. Les résultats pour la gestion du chauffage diffèrent également des résultats obtenus dans la situation 1 : le répondant place la gestion « intelligente » en première place de ses préférences et est indifférent entre la gestion manuelle et programmable. Le ménage peut penser que s'il fait les travaux dans le but de d'améliorer la performance énergétique du logement, autant faire un effort et installer le matériel le plus performant. De plus le confort thermique et le fait d'accepter de limiter le chauffage à 19°C n'influencent pas les préférences.

Le dérangement lors des travaux a un impact significativement négatif si le ménage est obligé de passer plusieurs semaines hors de son logement. La probabilité, que l'offre soit choisie, diminue ainsi avec le nombre de semaines passées hors logement. Par contre, le fait que le logement soit en désordre pendant plusieurs semaines n'influence pas le choix des ménages.

4.2.4.2 Influence des caractéristiques individuelles sur les alternatives de choix

Nous constatons que plus le répondant est âgé, plus grande sera la probabilité qu'il refuse les travaux. L'âge du logement influence les choix de deux façons. Si le logement est construit avant la première RT de 1974, alors le ménage choisira plutôt d'isoler le logement ou refusera les travaux de rénovation. La probabilité que les travaux de rénovation soient choisis est plus faible si le logement est construit après 2005. Enfin, lorsque le ménage n'atteint pas le confort thermique, alors il préfère améliorer l'isolation thermique du logement (0,598***).

Nous avons intégré dans le modèle le fait que le ménage puisse ne pas vouloir limiter le chauffage à 19°C et que le système de chauffage n'ait pas été choisi. Ces deux variables ne sont pas significatives dans le modèle présenté, mais ont des P-value proches de 0,1 : nous ne pouvons rejeter l'hypothèse d'influence de ces variables sur le choix au risque de 11 %.

Les habitants des logements avec un CED comme système de chauffage choisissent moins fréquemment le bouquet de travaux. Les habitants utilisant une PAC préfèrent améliorer

l'isolation du logement ou réaliser le bouquet de travaux. Par conséquent, les utilisateurs des PAC sont en moyenne satisfaits de leur système de chauffage, comme les utilisateurs de poêles à bois, qui préfèrent améliorer l'isolation de leur logement.

Finalement, lorsque le système de chauffage est âgé de plus de 20 ans, le ménage choisit plus souvent de faire les travaux de rénovation. Les résultats montrent également que si le système de chauffage est âgé de 5 à 9 ans, il y a moins de chance que le ménage choisisse uniquement l'amélioration de l'isolation de son logement.

Certaines variables testées se sont révélées être non significatives. Tout d'abord le revenu des ménages, exprimé par tranches, ne semble pas influencer les choix. Le niveau d'isolation initial du logement n'a pas d'impact sur les alternatives de choix : il est possible que certains ménages considèrent que le niveau d'isolation peut toujours être amélioré.

TABEAU 4.6: Résultats du modèle MNL pour la situation 4 (fin)

| | Isolation | Chauffage & Isolation | Ne rien faire |
|---|----------------------|------------------------|---------------------|
| Constante ASC_j | 0.383 (1.08) | 0.787** (2.31) | -0.357 (-0.91) |
| Age du répondant | -0.000967 (-0.21) | -0.00769* (-1.67) | 0.0123** (2.56) |
| Habite depuis < 10 ans | -0.256 (-1.04) | 0.0671 (0.29) | 0.419* (1.79) |
| Logement construit avant 1974 | 0.280* (1.83) | 0.182 (1.19) | 0.355** (2.24) |
| Ne veut pas limiter le chauffage à 19°C | 0.0293 (0.20) | -0.0468 (-0.32) | 0.240 (1.63) |
| En inconfort thermique | 0.589*** (2.85) | 0.126 (0.58) | -0.0687 (-0.29) |
| Chauffage non choisi | 0.257 (1.59) | 0.171 (1.08) | -0.227 (-1.36) |
| Autre chauffage installé | | Catégorie de référence | |
| Chaudière à gaz | 0.275 (1.44) | 0.0741 (0.40) | 0.305 (1.56) |
| CED | 0.0638 (0.35) | -0.320* (-1.78) | 0.00211 (0.01) |
| PAC | 0.807** (2.51) | 0.539* (1.75) | 0.492 (1.53) |
| Poêle à bois | 0.725* (1.86) | 0.231 (0.58) | 0.428 (1.05) |
| Age du chauffage < 5 ans | | Catégorie de référence | |
| Age du chauffage entre 5 et 9 ans | -0.508** (-2.49) | -0.227 (-1.14) | -0.106 (-0.53) |
| Age du chauffage entre 10 et 14 ans | -0.292 (-1.28) | -0.192 (-0.84) | -0.117 (-0.50) |
| Age du chauffage entre 15 et 20 ans | -0.500* (-1.85) | -0.230 (-0.86) | -0.115 (-0.42) |
| Age du chauffage plus de 20 ans | -0.368 (-1.44) | -0.398 (-1.51) | -0.563** (-2.00) |
| Age du chauffage inconnu | -0.374 (-1.29) | -0.496 (-1.64) | -0.118 (-0.38) |
| Observations | | 7172 | |
| Log-Vraisemblance | | -2265.8 | |
| Pseudo ρ^2 | | 0.0884 | |
| AIC | | 4675.6 | |
| BIC | | 5170.8 | |

z statistiques entre parenthèses

* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$

Alternative de référence : améliorer uniquement le chauffage

4.3 Hétérogénéité des préférences

Intéressons nous maintenant à l'hétérogénéité des préférences, c'est-à-dire à la distribution des paramètres individuels des modèles de choix discrets. Deux cas se présentent ici. D'une part, lorsque les préférences sont hétérogènes de façon continue, la distribution des paramètres individuels peut être rapprochée de l'une des lois usuelles de probabilité (normal, uniforme, etc.) en utilisant le modèle Logit Mixte. D'autre part, dans le cas où l'hétérogénéité des préférences est discrète, nous pouvons classer les ménages en groupes à l'intérieur desquels les préférences sont homogènes : le modèle utilisé est alors le Modèle des Classes Latentes. Dans cette section nous mettons en œuvre ces deux approches.

4.3.1 Modèle Logit Mixte ou à paramètres aléatoires

4.3.1.1 Situation 1 : choix du chauffage suite à une panne

Spécification du modèle

L'utilité aléatoire avec des préférences continues est semblable à une utilité avec des préférences homogènes dont les paramètres sont individuels et les variables ne sont pas différenciées en fonction des caractéristiques individuelles, à l'exception du montant d'investissement :

$$\begin{aligned}
 U_{nj} = & \gamma_M Inv_{nj}^M + \gamma_A Inv_{nj}^A + \beta_{1n} Reduc_{nj} + \beta_{2n} Garantie_{nj} \\
 & + \beta_{3n} CED_{nj} + \beta_{4n} PAC_{nj} + \beta_{5n} Poele_{nj} \\
 & + \beta_{6n} Prog_{nj} + \beta_{7n} Pilote_{nj} + \beta_{8n} Intello_{nj} \\
 & + \nu_n S_{nj} + \phi_{ch,n} I_{nj}^{ch} + \phi_{th,n} I_{nj}^{th} + \xi_{nj}
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

Les variables Z_n permettent d'ajuster la moyenne en fonction des caractéristiques individuelles. Nous prenons ici pour Z_n le type du logement (1 si le logement est une maison, 0 sinon) et si la personne accepte ou pas de limiter le chauffage à 19°C (1 si oui, 0 sinon). A chaque attribut, pour lequel nous considérons que les préférences suivent une loi normale, sont associés 4 paramètres estimés :

1. Estimateur de la moyenne générale $\hat{\mu}$ des préférences.
2. Correcteur de la moyenne pour les habitants des maisons individuelles.
3. Correcteur de la moyenne pour les ménages qui sont prêts à limiter le chauffage.
4. Estimateur de l'écart-type $\hat{\sigma}$ de la distribution des préférences.

Résultats

Le tableau 4.7 montre les résultats d'estimation avec 500 tirages⁶ et la Figure 4.2 les distributions des paramètres individuels. Le modèle à paramètres aléatoires est meilleur que le modèle avec des préférences homogènes au regard du pseudo ρ^2 , pseudo $\bar{\rho}^2$ ajusté et AIC . Mais la valeur du BIC est plus petite pour le modèle aux paramètres homogènes.

Toutes les constantes et moyennes sont significatives à l'exception de l'inertie concernant la gestion du chauffage. En moyenne, l'investissement, le CED, le poêle à bois réduisent la probabilité que l'offre de chauffage soit choisie. Par contre si l'offre est une PAC, avec une garantie et une gestion non manuelle du chauffage, alors la probabilité que cette offre soit choisie augmente.

Il y a une variation significative des préférences pour la réduction de la facture énergétique, le CED, la PAC, le poêle à bois, le thermostat programmable et la gestion « intelligente ». Les variables Z_n , type de logement et confort thermique, sont significatives pour une partie des attributs. Si le ménage habite dans une maison individuelle, la moyenne des préférences augmente de 1,16*** pour la PAC et de 3,87*** pour le poêle à bois. De même si le ménage accepte de limiter sa température de chauffage à 19°C, la moyenne des préférences diminue de -1,55** pour la gestion « intelligente » et de -1,43** pour le chauffage pilotable à distance.

Grâce au Logit Mixte nous obtenons les paramètres individuels. La Figure 4.2 montre les densités des paramètres individuels pour chaque attribut, estimée par noyau (Parzen, 1962). Nous remarquons que la quasi-totalité des ménages préfèrent avoir une gestion programmable ou « intelligente » parce que les paramètres sont positifs (zone colorée en bleu). Ils sont aussi très nombreux à préférer la gestion du chauffage pilotable à distance plutôt que manuelle, bien que les valeurs des paramètres individuels soient faibles. Le paramètre individuel pour la réduction varie entre 0,05 et 0,25, alors que le Logit mixte estime la moyenne à 0,0198 avec un écart type de 0,742. C'est le signe que les préférences pour la réduction de la facture ne sont pas distribuées selon la loi normale. Seules les préférences pour la garantie et le pilotage à distance suivent la loi normale, tandis que les préférences pour les autres attributs sont beaucoup plus complexes. Si nous prenons par exemple le CED, nous remarquons que la moyenne estimée est 0 comme dans le cas du modèle MNL. Mais une partie des ménages préfère avoir un CED plutôt qu'une chaudière gaz.

6. Pour les premiers modèles nous avons utilisé 5000 tirages aléatoires pour estimer le Logit Mixte. Mais après plusieurs essais nous nous sommes rendu compte que 500 tirages suffisaient dans notre cas. Et le temps de calcul a été réduit de 12-24 heures à 2-7 heures.

TABLEAU 4.7: Résultat d'estimation du modèle Logit Mixte pour la situation 1

| Attributs | Moyenne | Ecart-type | × Maison | × ≤ 19°C |
|------------------------------|-----------|------------|----------|----------|
| M : Investissement (1000 €) | -0.284*** | | | |
| A : Investissement (1000 €) | -0.46*** | | | |
| Réduction (%) | 0.0198*** | 0.742*** | 0.12 | 0.10 |
| Garantie (nombre d'années) | 0.56*** | 0.31 | -0.09 | 0.03 |
| CED [†] | -0.79 | 3.58*** | 0.06 | 0.69 |
| PAC [†] | 1.34** | 2.89*** | 1.16*** | -0.21 |
| Poêle [†] | -3.45*** | 6.22*** | 3.87*** | -0.23 |
| Programmable [‡] | 1.94** | 1.7* | -0.06 | -0.52 |
| Intelligent [‡] | 2.26*** | 0.54 | 0.8 | -1.55** |
| Piloté [‡] | 1.57** | 1.63* | 0.15 | -1.43** |
| Signal-qualité | -1.52** | 0.13 | 0.41 | 0.89 |
| Inertie chauffage | 2.73*** | 0.2 | 1.06 | -0.04 |
| Inertie réglage | 0.81 | 0.003 | 0.31 | -0.6 |
| Observations | | 5379 | | |
| Log-vraisemblance | | -1436.9 | | |
| Pseudo ρ^2 | | 0.27 | | |
| Pseudo $\bar{\rho}^2$ ajusté | | 0.237 | | |
| AIC | | 3000.5 | | |
| BIC | | 3440.8 | | |

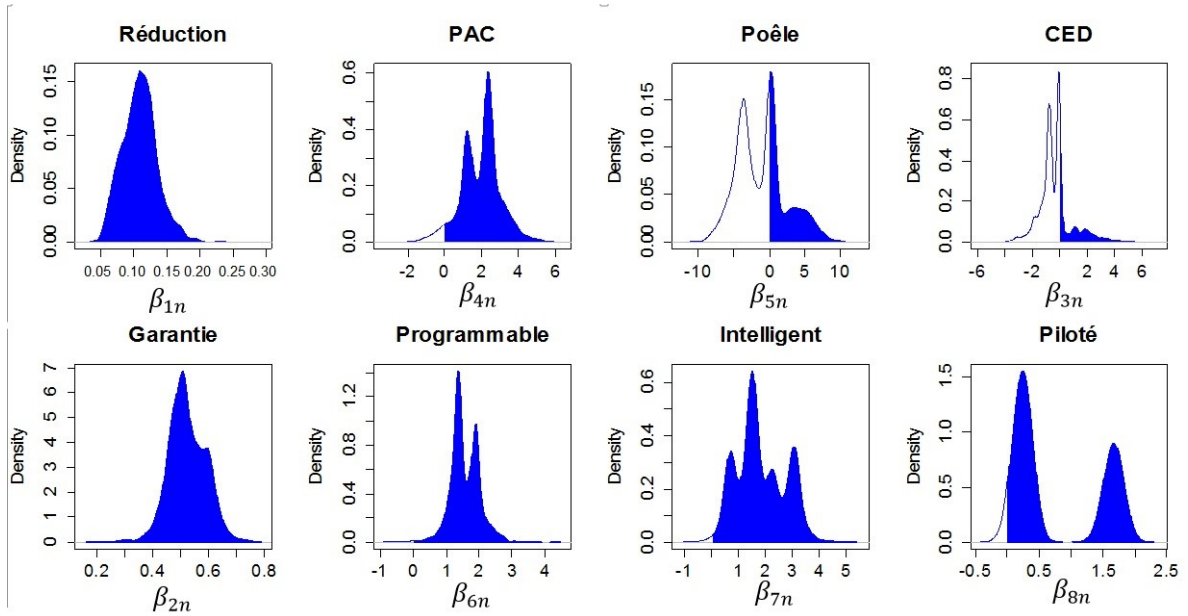
* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$

[†] par rapport à la chaudière à gaz (catégorie de référence)

[‡] par rapport au réglage manuel (catégorie de référence)

M – maisons individuelles, A – appartements

FIGURE 4.2: Estimation par noyau des distributions des paramètres individuels (S1)



4.3.1.2 Situation 2 : choix du chauffage et focus sur le financement des travaux

Spécification du modèle

L'utilité aléatoire aux préférences continues est donnée par :

$$\begin{aligned}
 U_{nj} = & \gamma_M Inv_{nj}^M + \gamma_A Inv_{nj}^A + \beta_{1n} Reduc_{nj} + \beta_{2n} DPE_{nj} \\
 & + \beta_{3n} ELEC_{nj} + \beta_{4n} ENR_{nj} + \beta_{5n} Bois_{nj} \\
 & + \beta_{6n} Fisc_{nj} + \beta_{7n} FE_{nj} + \beta_{8n} ANAH_{nj} \\
 & + \beta_{9n} MontAide_{nj} + \beta_{10n} DispoAide_{nj} + \beta_{11n} Pret0_{nj} + \beta_{12n} Pret4_{nj} \\
 & + \nu_n S_{nj} + \phi_{ch,n} I_{nj}^{ch} + \xi_{nj}
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

Les préférences selon le montant d'investissement sont constantes comme dans la situation 1. Après plusieurs estimations nous avons décidé de laisser constants les paramètres associés à l'aide de la part des fournisseurs d'énergie et de l'ANAH pour des raisons de convergence du modèle. Pour les mêmes raisons, les préférences pour la réduction de la facture sont hétérogènes, mais ne dépendent pas des caractéristiques individuelles. Les attributs qui restent ont des préférences hétérogènes avec une moyenne qui dépend du type de logement et du fait que la personne accepte ou pas de limiter son chauffage à 19°C. Pour chaque attribut avec les préférences aléatoires au moins deux paramètres sont estimés : la moyenne et l'écart-type de la distribution qui est supposée être normale, ainsi que les paramètres correcteurs de la moyenne si le ménage habite en maison et (ou) est prêt à limiter son chauffage à 19°C.

Résultats

Les résultats d'estimation sont donnés dans le Tableau 4.8. Le modèle aux préférences hétérogènes est globalement moins bon que celui aux préférences homogènes au regard du pseudo $\bar{\rho}^2$ ajusté et du critère d'information BIC . Dans ce cas, le fait que le répondant accepte de limiter le chauffage n'explique pas ses choix⁷. Pour rappel : nous avons trouvé avec le modèle MNL que les préférences pour les énergies autres que le gaz de réseau augmentaient ou diminuaient avec la température de confort. Les deux modèles donnent des conclusions contradictoires. Il semble que le modèle MNL est plus exact, parce que le modèle Logit Mixte est sensible à la loi de distribution des paramètres aléatoires : plus la distribution réelle des paramètres s'éloignent de la distribution théorique du modèle, moins le modèle estimé est exact.

Désormais nous avons plusieurs attributs qui semblent ne pas être significatifs. L'ENR, la disponibilité de l'aide, le prêt à taux 0 % et le signal de qualité ne sont pas significatifs, alors

7. Nous avons aussi testé la température du confort modifiée T_n , telle qu'elle est défini dans la section 4.1.2.4. Les conclusions sont les mêmes – les préférences pour le confort n'influencent pas les choix dans la situation 2.

qu'ils le sont dans le modèle aux préférences homogènes. Il est possible que les préférences pour ces attributs soient hétérogènes, mais aient une forme beaucoup plus complexe que la loi normale. Il existe une variation significative des préférences pour l'électricité, le bois, l'aide fiscale, le prêt à taux 4 % et l'inertie des préférences pour la source d'énergie. Le type du logement est significatif pour le DPE, le bois et l'inertie des préférences pour l'énergie. Si le ménage habite dans une maison individuelle, alors il accordera moins d'attention au diagnostic énergétique du logement que les habitants des appartements. Cette observation rejoint les conclusions du modèle aux préférences homogènes. L'inertie des préférences pour une énergie donnée est plus importante pour les habitants des maisons individuelles. Par ailleurs une partie de ces ménages préfèrent se chauffer au bois plutôt qu'au gaz naturel.

TABLEAU 4.8: Résultat d'estimation du modèle Logit Mixte pour la situation 2

| Attributs | Moyenne | Ecart-type | × Maison | × ≤ 19°C |
|-------------------------------------|-----------|------------|----------|----------|
| Maison-Investissement (1000 €) | −0.191*** | | | |
| Appartement-Investissement (1000 €) | −0.32*** | | | |
| Montant d'aide | 0.34*** | | | |
| Fournisseur d'énergie [#] | 0.19 | | | |
| ANAH [#] | 0.27 | | | |
| Réduction (%) | 0.046*** | 15.02*** | | |
| DPE | 1.24*** | 0.01 | −0.99** | 0.02 |
| Électricité [†] | −2.63 | 1.73* | 0.31 | 0.11 |
| ENR [†] | −3.68 | 1.27 | 0.61 | 0.237 |
| Bois [†] | −0.72 | 2.77*** | 1.38** | −0.05 |
| Aide fiscale [#] | −1.95 | 1.77** | −0.235 | 0.136 |
| Aide disponible de suite | 0.18 | 0.82 | −0.42 | 0.03 |
| Prêt à taux 0% | −1.28 | 0.95 | −0.1674 | 0.12 |
| Prêt à taux 4% | 4.23 | 1.82** | −0.04 | −0.21 |
| Signal-qualité | −1.31 | 1.93 | 0.86 | 0.01 |
| Inertie énergie | −0.08 | 2.06** | 1.09* | 0.08 |
| Observations | | 5379 | | |
| Log-vraisemblance | | −1586.8 | | |
| Pseudo ρ^2 | | 0.19 | | |
| Pseudo $\bar{\rho}^2$ ajusté | | 0.17 | | |
| AIC | | 3267.6 | | |
| BIC | | 3577.3 | | |

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

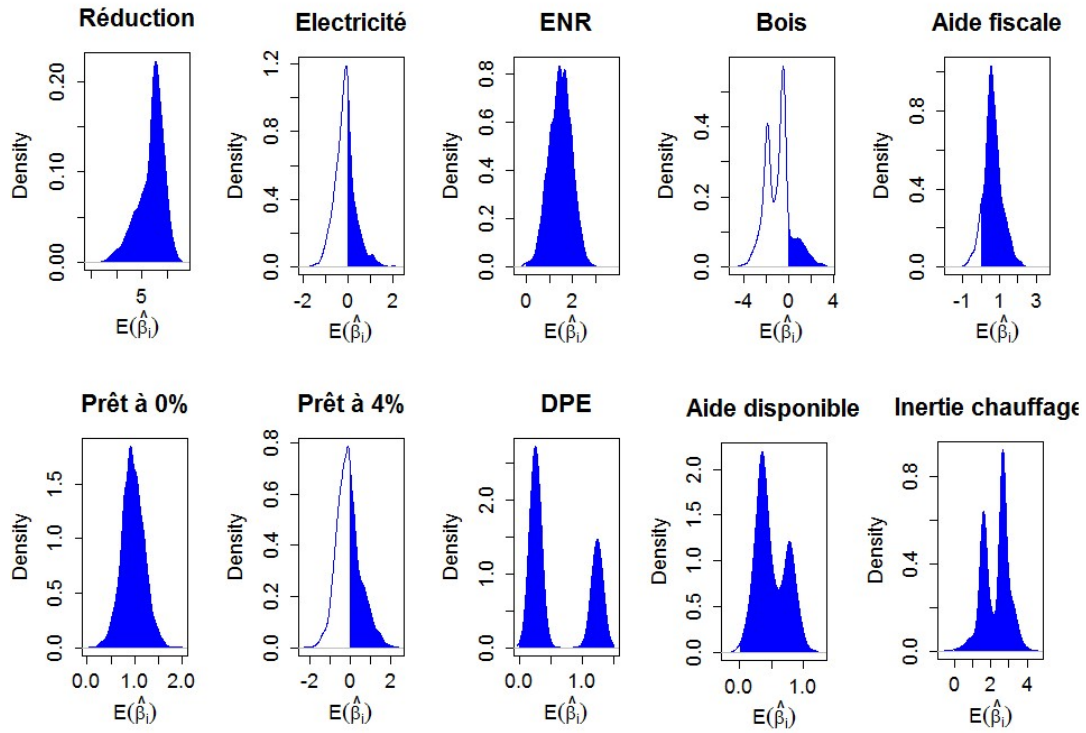
[†] par rapport au gaz naturel (catégorie de référence)

[#] par rapport à l'aide des collectivités locales (catégorie de référence)

La Figure 4.3 présente les distributions des paramètres individuels pour chaque attribut. Bien que les paramètres associés à l'ENR ne soient pas significatifs, nous remarquons que les paramètres individuels sont distribués de façon normale et globalement positifs, c'est-à-dire que les répondants préfèrent les ENR au gaz naturel. La même observation est faite pour le prêt à taux 0 % et la disponibilité immédiate de l'aide. La distribution des préférences pour le bois ressemble à la distribution concernant les poêles à bois (Figure 4.2), mais la variance

semble être plus faible. Environ la moitié des ménages préfèrent l'électricité au gaz naturel (paramètres individuels supérieurs à 0). Le prêt à taux 4 % intéresse environ la moitié des ménages, mais une autre moitié préfère au contraire ne pas y recourir. Nous avons deux distributions distinctes des préférences pour le bois et le DPE ce qui est déjà observé dans le modèle aux préférences homogènes (paramètres constants). Une autre remarque importante : l'ensemble des répondants présentent une inertie des préférences pour la source d'énergie puisque les paramètres individuels sont positifs.

FIGURE 4.3: Estimation par noyau des distributions des paramètres individuels (S2)



note : en bleu paramètres positifs

4.3.1.3 Situation 3 : choix d'un chauffage électrique suite à une panne

Spécification du modèle

L'utilité avec les préférences continues est donnée par :

$$\begin{aligned}
 U_{nj} = & \gamma_M Inv_{nj}^M + \gamma_A Inv_{nj}^A + \beta_{1n} Reduc_{nj} + \beta_{2M} Abon_{nj}^M + \beta_{2A} Abon_{nj}^A + \beta_{3n} DureeC_{nj} \\
 & + \beta_{4n} Progn_{nj} + \beta_{5n} Pilote_{nj} + \beta_{6n} Intello_{nj} \\
 & + \beta_{7n} HPHC_{nj} + \beta_{8n} Saisons_{nj} + \beta_{9n} Tempo_{nj} \\
 & + \nu_n S_{nj} + \phi_{ch,n} I_{nj}^{ch} + \phi_{th,n} I_{nj}^{th} + \phi_{tf,n} I_{nj}^{tf} + \xi_{nj}
 \end{aligned}
 \tag{4.17}$$

Seules les préférences pour le montant d'investissement et l'abonnement sont homogènes et spécifiques au type de logement occupé.

Résultats

Le Tableau 4.9 donne les résultats d'estimations du Logit Mixte pour la situation 3. Le modèle à paramètres aléatoires s'ajuste mieux aux données que le modèle MNL. Comme dans les situations précédentes, la distribution continue des paramètres dépend du type de logement et du fait que l'individu accepte ou non de limiter le chauffage à 19°C. Les paramètres associés à la durée du contrat et au signal de qualité ne sont pas significatifs comme dans le modèle MNL (préférences homogènes). Nous trouvons aussi que le pilotage à distance et la gestion « intelligente » du chauffage ne sont pas significativement différents du réglage manuel. La moyenne de la loi normale des préférences pour la gestion programmable et les tarifs HP/HC et saisonnier est nulle, mais l'écart-type est significativement différent de 0. Ainsi les préférences sont hétérogènes même si elles sont centrées autour de 0. Dans le cas de la réduction de la facture, la moyenne générale est nulle, mais l'écart-type et le correcteur de la moyenne pour les ménages en maisons individuelles sont significatifs. Le fait d'accepter de limiter ou non le chauffage à 19°C n'influence pas les résultats puisque tous les paramètres sont non significatifs. Par contre le type de logement influence la distribution des préférences pour la réduction de la facture et l'inertie des préférences pour la gestion du chauffage.

La Figure 4.4 montre l'estimation par noyaux des distributions des paramètres individuels issus du modèle Logit Mixte. Les préférences pour la réduction de la facture énergétique sont positives. Les paramètres associés à la durée du contrat sur la fourniture d'électricité sont globalement négatifs, c'est-à-dire qu'environ les trois quarts des répondants préfèrent ne pas s'engager. Les préférences individuelles pour le tarif Tempo et HP/HC montrent que beaucoup de répondants préfèrent avoir l'option de base du tarif. La distribution des paramètres individuels pour le tarif HP/HC ressemble à la distribution des préférences pour le CED dans la situation 1 (voir Figure 4.2). Il y a plus de personnes qui s'intéressent au tarif saisonnier, mais les préférences sont concentrées autour de la moyenne, et la variance est faible. Quant à la gestion du chauffage nous remarquons qu'il y a toujours des ménages qui préfèrent avoir une gestion manuelle de chauffage plutôt que programmable ou pilotée à distance. Si nous comparons ces distributions aux distributions obtenues dans la situation 1 (Figure 4.2), nous remarquons que la préférence pour le réglage manuel est spécifique aux choix du chauffage électrique car dans la situation 1 les préférences pour la gestion autre que manuelle ont été positives pour presque tous les répondants.

TABEAU 4.9: Résultat d'estimation du modèle Logit Mixte pour la situation 3

| Attributs | Moyenne | Ecart-type | × Maison | × ≤ 19°C |
|-------------------------------|-----------|------------|-----------|----------|
| M-Investissement (1000 €) | −0.12*** | | | |
| A-Investissement (1000 €) | −0.22*** | | | |
| M-Abonnement (€) | −0.006*** | | | |
| A-Abonnement (€) | −0.009*** | | | |
| Réduction (%) | 0.034 | 0.032** | 0.0104*** | 0.017 |
| Durée du contrat (ans) | −0.24 | 0.012 | 0.052 | 0.009 |
| Programmable [†] | 0.46 | 1.13* | −0.36 | −0.005 |
| Intelligent [†] | 2.53 | 0.79 | 0.212 | −0.087 |
| Piloté [†] | 2.04 | 0.001 | −0.31 | −0.106 |
| Tarif HP/HC [‡] | 0.36 | 1.39** | −0.076 | −0.0211 |
| Tarif saisonnier [‡] | 0.23 | 1.34** | −0.022 | 0.007 |
| Tarif Tempo [‡] | 0.26 | 0.10 | −0.19 | −0.012 |
| Inertie réglage | 2.13 | 0.11 | 0.69* | −0.012 |
| Signal-qualité | −3.62 | 0.55 | 0.45 | 0.16 |
| Observations | | 5379 | | |
| Log-vraisemblance | | −1608 | | |
| Pseudo ρ^2 | | 18.3 | | |
| Pseudo $\bar{\rho}^2$ ajusté | | 16.1 | | |
| AIC | | 3260 | | |
| BIC | | 3336 | | |

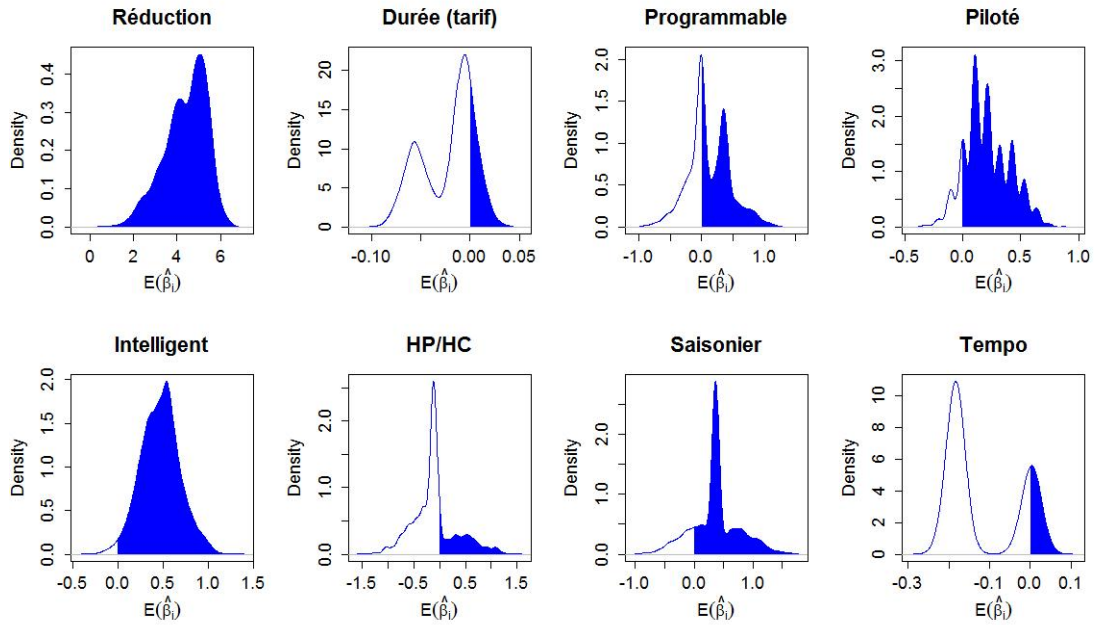
* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

M – maisons individuelles, A – appartements

[†] par rapport au réglage manuel (catégorie de référence)

[‡] par rapport à l'option Base, tarif unique pour l'électricité, (catégorie de référence)

FIGURE 4.4: Estimation par noyau des distributions des paramètres individuels (S3)



note : en bleu paramètres positifs

4.3.1.4 Situation 4 : choix des travaux de rénovation

Spécification du modèle

L'utilité avec les préférences continues est donnée par :

$$\begin{aligned}
 U_{nj} = & \sum_{i=1}^{J-1} ASC_{in} + \gamma_M Inv_{nj}^M + \gamma_A Inv_{nj}^A + \beta_{1n} Reduc_{nj} + \beta_{2M} MontAide_{nj}^M + \beta_{2A} MontAide_{nj}^A \\
 & + \beta_{3n} CED_{nj} + \beta_{4n} PAC_{nj} + \beta_{5n} Poele_{nj} \\
 & + \beta_6 Prog_{nj} + \beta_7 Intello_{nj} + \beta_8 Pilote_{nj} \\
 & + \beta_9 Fisc_{nj} + \beta_{10} FE_{nj} + \beta_{11} ANAH_{nj} \\
 & + \beta_{12n} DispoAide_{nj} + \beta_{13n} Pret0_{nj} + \beta_{14n} Pret2_{nj} + \beta_{15n} Pret4_{nj} \\
 & + \beta_{16} Desord2_{nj} + \beta_{17} Hors2_{nj} + \beta_{18n} Hors4_{nj} \\
 & + \phi_{ch,n} I_{nj}^{ch} + \phi_{th,n} I_{nj}^{th} + \xi_{nj}
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

Ici le modèle est estimé uniquement pour les ménages qui ont choisi de faire des travaux de rénovation. Nous avons donc 3 alternatives de choix : améliorer le chauffage (alternative de référence), améliorer l'isolation ou réaliser les deux. Une fois encore les préférences concernant l'investissement et le montant des aides sont homogènes et les paramètres associés sont constants. Cette fois nous n'avons utilisé que le type de logement pour expliquer les variations des préférences parce que le fait d'intégrer le confort ne permet pas au modèle de converger. Par ailleurs dans le modèle MNL à paramètres constants nous avons aussi trouvé que le confort n'influence pas le choix des travaux de rénovation.

Résultats

Les résultats d'estimation sont donnés dans le Tableau 4.10. Le pseudo ρ^2 est toujours plus faible que dans les situations 1 à 3. Le type de logement n'influence pas la moyenne de la distribution des préférences. La variation des préférences n'est pas significative pour l'ensemble des attributs à l'exception de la disponibilité des aides avec un écart-type estimé à 1,44**. Les résultats dans l'ensemble ressemblent au résultat du modèle MNL obtenu dans la Section 4.2.4. Concentrons-nous sur les distributions des paramètres individuels.

L'estimation par noyaux des distributions des préférences est présentée sur la Figure 4.5. Presque tous les répondants préfèrent améliorer l'isolation ou réaliser un bouquet de travaux plutôt qu'améliorer uniquement le chauffage. Les préférences pour la PAC sont concentrées autour de la moyenne estimée. La forme de la distribution des préférences pour le poêle à bois ressemble à la distribution des préférences pour le poêle ou le bois dans les situations 1 et 2. Nous remarquons que les préférences pour la disponibilité des aides varient

TABEAU 4.10: Résultat d'estimation du modèle Logit Mixte pour la situation 4

| Attributs | Moyenne | Ecart-type | × Maison |
|---|------------|------------|----------|
| ASC_j : Chauffage | | Référence | |
| ASC_j : Isolation | 0.99* | 0.64 | −0.331 |
| ASC_j : Chauffage & Isolation | 0.93** | 1.47 | −0.285 |
| Maison-Investissement (1000 €) | −0.1689*** | | |
| Appartement-Investissement (1000 €) | −0.2536*** | | |
| Réduction (%) | 0.0416*** | 0.015 | 0.0586 |
| Montant d'aide (1000 €) | 0.183** | | |
| CED | −0.012 | 0.241 | 0.137 |
| PAC | 1.02* | 1.36 | 0.0185 |
| Poêle à bois | −0.631 | 1.461 | 0.45 |
| Aide : ANAH [§] | −0.636 | | |
| Aide : Fiscale [§] | −0.132 | | |
| Aide : Fournisseur d'énergie [§] | −0.39* | | |
| Aide : immédiat [§] | −0.039 | 1.44* | |
| Prêt à taux 0% | 0.693* | 1.89 | −0.155 |
| Prêt à taux 2% | 0.083 | 0.0007 | 0.268 |
| Prêt à taux 4% | −0.111 | 0.057 | 0.0082 |
| En désordre (3 semaines) ^ℓ | 0.078 | | |
| Hors logement (2 semaines) ^ℓ | −0.67** | | |
| Hors logement (3 semaines) ^ℓ | −0.891* | 1.25 | 0.0223 |
| Programmable [#] | 0.137 | 1.23 | 0.201 |
| Piloté à distance [#] | 0.642 | 1.58 | −0.706 |
| Intelligent [#] | 0.621* | 0.765 | 0.35 |
| Inertie chauffage | 0.0229* | 0.036 | 0.01 |
| Observations | | 4233 | |
| Log-vraisemblance | | −1364.8 | |
| Pseudo ρ^2 | | 0.119 | |
| Pseudo $\bar{\rho}^2$ ajusté | | 0.086 | |
| AIC | | 2831.6 | |
| BIC | | 3155.0 | |

* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$

[†] par rapport à la chaudière à gaz (catégorie de référence)

[#] par rapport au réglage manuel (catégorie de référence)

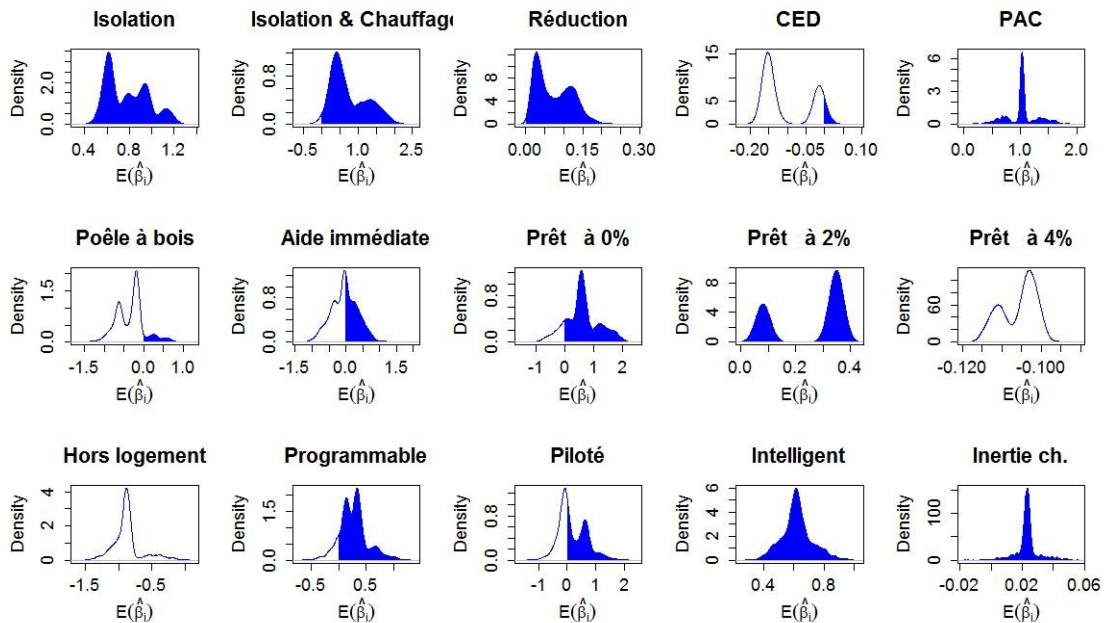
[§] par rapport à l'aide de la collectivité locale (catégorie de référence)

^ℓ par rapport au logement en désordre pendant 2 semaines (catégorie de référence)

autour de 0 et se rapprochent le plus d'une forme gaussienne que le reste des attributs (à l'exception de la gestion intelligente). Environ 50 % des ménages préfèrent obtenir rapidement l'aide, tandis que les autres au contraire préfèrent l'obtenir dans 1 an. Cela peut être dû au fait que nous n'avons pas précisé quand les travaux sont à réaliser, tandis que dans les offres proposées, l'aide est donnée immédiatement ou dans un délai d'un an. Les paramètres négatifs peuvent refléter le désir d'investir dans les travaux de rénovation, quelque soit leur échéance.

Dans la situation 2 tous les répondants sont intéressés par un prêt à taux 0 %, tandis que dans le cas des travaux de rénovation une partie des ménages ne veut pas s'endetter. La distribution des préférences pour le prêt à taux 2 % est globalement positive, tandis que les préférences pour le prêt à 4 % sont totalement négatives. Le fait que le logement est inhabitable pendant plusieurs semaines diminue la probabilité que l'offre soit choisie car les paramètres individuels sont tous négatifs. Une partie des répondants préfère avoir un réglage manuel plutôt qu'une gestion programmable mais sont surtout opposés à un pilotage à distance. Cependant, les préférences pour la gestion « intelligente » sont globalement positives.

FIGURE 4.5: Estimation par noyau des distributions des paramètres individuels (S4)



note : en bleu paramètres positifs

4.3.2 Hétérogénéité discrète des préférences

Dans la Section 4.3.1 nous avons présenté les résultats des modèles où les préférences sont distribuées de façon continue et les paramètres individuels suivent la loi normale. Or en observant la distribution des paramètres individuels issus du modèle Logit Mixte (Figures 4.2–4.5), nous identifions rarement une distribution normale des préférences ou une distribution qui s’approche d’une autre loi paramétrique (triangulaire, uniforme, etc.). Si l’on considère par exemple, le poêle à bois dans la situation de choix des travaux de rénovation (Figure 4.5), on constate qu’il semble y avoir 3 types de réponses. Il y a ceux qui préfèrent le poêle à la chaudière à gaz avec les paramètres individuels positifs compris entre 0 et 1. Le reste des ménages préfèrent la chaudière à gaz plutôt que le poêle à bois et semble être partagé en deux groupes avec des moyennes autour de -0,25 et -0,75.

Nous avons voulu savoir si le fait de classer les individus en groupes apporte de meilleurs résultats, et si les Modèles de Classes Latentes sont adaptés à nos situations expérimentales. Mais les résultats de nos estimations montrent que ce n’est pas le cas. Néanmoins il nous semble important de les mentionner et de comparer les Modèles des Classes Latentes aux résultats des modèles MNL et Logit Mixte. Nous ne considérons ici que les trois premières situations correspondant au choix du chauffage suite à une panne.

Dans les modèles des Classes Latentes les préférences sont hétérogènes suivant une distribution discrète. Cela revient à grouper les individus en classes avec des préférences homogènes. L’utilité aléatoire est donnée par :

$$U_{nj} = \sum_{q=1}^{Q-1} \zeta_q + \sum_{q=1}^Q \gamma_q Inv_{nj} + \sum_{q=1}^Q \beta_q X_{nj} + \xi_{nj} \quad (4.19)$$

Avec $q \in Q$ le nombre des classes latentes et ζ_q – les constantes spécifiques associées à chaque classe dont l’une est fixe (classe de référence).

Pour la situation 1 quatre modèles de 2 à 5 classes ont été estimés. Les modèles à 6 classes ou plus ne sont pas convergents et ne permettent pas d’obtenir les estimateurs des paramètres. Le Tableau 4.11 montre les critères d’information *BIC* associés. Pour rendre la comparaison plus facile, nous ajoutons les critères d’information pour les modèles aux préférences homogènes de la section 4.2 et pour le modèle avec des préférences continues 4.3.1. Nous remarquons que les modèles des classes latentes sont moins bons que les modèles présentés dans les deux sections précédentes⁸. Et le fait de classer les individus en groupes n’améliore pas le modèle, mais bien au contraire : le critère BIC augmente avec le nombre des classes passant de 3141,3 dans le cas du modèle à 1 groupe (c’est-à-dire le modèle

8. Nous cherchons le modèle qui minimise les critères d’information.

TABEAU 4.11: Capacité d'estimation du Modèle des Classes Latentes (S1)

| Nombre de classes | Log-Vraisemblance | <i>BIC</i> |
|-----------------------|-------------------|------------|
| Préférences homogènes | -1474.6 | 3078.1 |
| Préférences continues | -1436.9 | 3440.8 |
| $Q = 1$ | -1523.4 | 3141.3 |
| $Q = 2$ | -1488 | 3148.3 |
| $Q = 3$ | -1468.3 | 3198.7 |
| $Q = 4$ | -1446.1 | 3244.2 |
| $Q = 5$ | -1423.3 | 3288.7 |

TABEAU 4.12: Capacité d'estimation du Modèle des Classes Latentes (S2)

| Nombre de classes | Log-Vraisemblance | <i>BIC</i> |
|-----------------------|-------------------|------------|
| Préférences homogènes | -1609.7 | 3399.8 |
| Préférences continues | -1586.8 | 3577.3 |
| $Q = 1$ | -1613.1 | 3406.7 |
| $Q = 2$ | -1612.2 | 3447.6 |
| $Q = 3$ | -1645.4 | 3598.0 |
| $Q = 4$ | -1623.7 | 3659.5 |
| $Q = 5$ | -1599.8 | 3716.6 |
| $Q = 6$ | -1590.6 | 3803.1 |
| $Q = 7$ | -1560.3 | 3847.2 |

TABEAU 4.13: Capacité d'estimation du Modèle des Classes Latentes (S3)

| Nombre de classes | Log-Vraisemblance | <i>BIC</i> |
|-----------------------|-------------------|------------|
| Préférences homogènes | -1626 | 3382 |
| Préférences continues | -1608 | 3336 |
| $Q = 1$ | -1645 | 3376 |
| $Q = 2$ | -1621 | 3399 |
| $Q = 3$ | -1615 | 3470 |
| $Q = 4$ | -1585 | 3491 |

MNL) à 3288,7 dans le modèle à 5 classes. Cependant le modèle des Classes Latentes est meilleur que les résultats du modèle aux préférences continues Logit Mixte.

Le Tableau 4.12 montre les critères d'informations des modèles des Classes Latentes (de 2 à 7 classes) pour la situation 2, avec les critères pour les modèles MNL et Logit Mixte exposés dans les sections précédentes. Encore une fois la valeur du *BIC* le plus faible est donnée pour le modèle avec des préférences homogènes de la Section 4.2.2. Le critère BIC, qui tient compte de la parcimonie du modèle, augmente avec le nombre des classes et il dépasse la valeur du BIC du modèle Logit Mixte s'il y a 3 classes ou plus.

Et finalement le Table 4.13 présente les critères d'information des Modèles des Classes Latentes pour la situation 3. Cette fois c'est le modèle Logit Mixte qui donne les meilleurs résultats, tandis que le Modèle des classes Latentes est moins bon que les modèles MNL et Logit Mixte.

4.4 Interprétations économiques des résultats

Au-delà de l'analyse détaillée des résultats que nous venons de présenter, l'interprétation économique va nous permettre de mettre en exergue les éléments d'arbitrage associés au choix des ménages : les taux d'actualisation implicites, les consentements à payer ou à recevoir. Nous profitons aussi de cette section pour présenter plus en détails la problématique de l'inertie des préférences et du signal-qualité.

4.4.1 Taux d'actualisation implicite

Afin de calculer le taux d'actualisation implicite, nous ne pouvons pas utiliser les résultats des modèles estimés précédemment puisque nous utilisons comme attribut le pourcentage de la réduction, et non les dépenses annuelles liées au chauffage. Par contre nous disposons de l'information sur la facture annuelle d'électricité et de gaz d'une partie des répondants - les ménages avec une chaudière individuelle gaz, un CED ou une PAC, c'est-à-dire environ 70 % de l'échantillon initial. Nous pouvons donc calculer pour chaque alternative de choix le nouveau montant de la facture :

$$F_{nj} = \text{Facture}_n \times \text{Reduction}_{nj} \quad (4.20)$$

Par ailleurs dans la description de la situation 3 nous avons proposé au répondant une estimation du montant de la facture d'électricité pour le chauffage avant la panne du matériel (voir Annexe B). Le montant de la facture affiché ne dépend que de la surface du logement multiplié par un paramètre aléatoire compris entre 0,5 et 1,5 afin d'avoir des situations de surfacturation (par exemple un logement très mal isolé dans le nord de la France) et sous-facturation (un logement bien isolé en climat méditerranéen). Nous pouvons donc calculer le montant de la nouvelle facture F_{nj} pour chaque ménage n et l'offre de chauffage électrique j .

Les résultats d'estimation dans les sections antérieures ont montrés que le modèle MNL donne de meilleurs résultats à condition que certains attributs soient croisés avec les caractéristiques individuelles. Si nous reprenons les modèles (4.11) – (4.14) en y remplaçant $\beta \times \text{Reduction}_{nj}$ par $\beta_f \times F_{nj}$, alors le taux implicite est égal au rapport entre le paramètre γ associé à l'investissement et le paramètre β_f associé au montant la facture, tous les deux étant négatifs (voir pour plus de détails Section 1.6.2) :

$$\tau_{im} = \frac{\gamma}{\beta_f} \quad (4.21)$$

Les résultats d'estimation et le taux implicite sont à prendre avec précaution. Il est fort possible que le répondant ait choisi une autre offre si nous lui avions proposé les dépenses associées au chauffage non pas en pourcentage de réduction de sa facture mais en euros. Par ailleurs nous ne savons pas exactement quelle est la part des dépenses de chauffage dans les dépenses d'électricité et de gaz naturel déclarées par le répondant. Il est possible de les estimer, mais les données de notre enquête ne le permettent pas. Il nous aurait fallu avoir l'information sur les présences et les absences dans le logement, la réduction éventuelle de chauffage lors des absences, la part du logement chauffée, etc.

Nous calculons F_{nj} pour les situations de panne de chauffage S1 et S2 en utilisant la totalité des montants déclarés. Tandis que pour la situation 3, le choix du chauffage électrique, nous utilisons la facture qui a été proposée dans la situation expérimentale. Quant à la situation 4, nous calculons les taux d'actualisation implicites pour l'ensemble des observations (avec refus) et uniquement pour les répondants qui ont choisi de faire la rénovation (sans refus).

Les Tableaux 4.14 et 4.15 montrent les taux d'actualisation implicites en fonction du type de logement et la tranche de revenu du ménage pour chaque situation de choix.

Le taux d'actualisation implicite moyen est compris entre 5,7 % et 10,2 %. Si nous estimons les modèles séparés en fonction du type de logement occupé, alors nous remarquons que le taux d'actualisation implicite est plus élevé pour les ménages habitant en appartements (6,9 % - 13,7 %) que pour les ménages en maisons individuelles (5,1 % - 6,6 %). Nous observons aussi des taux élevés pour les ménages aux revenus modestes : 8,9 % - 19 % (moins de 1500 €/mois) et 7,9 % - 13,4 % pour la tranche de 1501 à 1900 €/mois. Ce taux élevé pour les ménages les plus pauvres est conforme aux études précédentes ([Hausman, 1979](#), [Train, 1985](#)). Dans la situation 4, choix des travaux de rénovation, nous observons de plus faibles taux d'actualisation pour les ménages qui ont refusé de déclarer leur revenu. C'est environ 10 % des répondants. Mais le modèle est globalement non significatif. Dans ce cas, ces faibles taux observés sont juste un artefact d'attribution aléatoire des *Trade-Off*, d'autant plus que dans les situations 1 à 3 les taux d'actualisation implicites sont de 6,8 % à 7,1 % pour les ménages qui refusent de communiquer leur revenu (rubrique « confidentiel »).

Nos taux moyens sont comparables aux taux obtenus dans d'autres travaux de recherche. Ainsi pour [Train \(1985\)](#) le taux d'actualisation implicite évolue entre 5 % et 35 % pour le chauffage. [Jaccard et Dennis \(2006\)](#) étudient le choix des travaux de rénovation (isolation) et le choix du chauffage au Canada pour lesquels ils obtiennent des taux implicites de 20 % et 8,7 % respectivement. Si nous regardons maintenant du côté de la France, [Cayla \(2011\)](#)

a mené une enquête des préférences révélées grâce à laquelle il obtient un taux de retour sur investissement ⁹ de 11,6 % pour le chauffage.

En conclusion nous pouvons dire que les taux d'actualisation implicites sont de 12,7 % pour les faibles revenus (moins de 1500 €/mois), de 9,1 % pour les revenus compris entre 1501 et 1900 € et d'environ 6 % pour les ménages qui gagnent plus de 1900 €/mois. Par ailleurs contrairement à [Jaccard et Dennis \(2006\)](#), nous trouvons que les taux n'augmentent pas dans le cas des travaux de rénovation. Il est possible que cela soit du à la différence des préférences entre les ménages canadiens et français. Ou encore parce que les préférences des ménages ont évalué depuis 2003 quand l'enquête expérimentale de Jaccard et Denis a été réalisée.

9. C'est-à-dire le taux à partir duquel l'investissement devient rentable pour une durée de vie de chauffage de 20 ans.

TABEAU 4.14: Taux d'actualisation implicites dans chaque situation expérimentale en fonction du logement occupé

| | Choix du chauffage suite à une panne (S1) | Choix du chauffage suite à une panne (S2) | Choix du chauffage électrique suite à une panne (S3) | Choix de rénovation | | |
|------------------|---|---|--|---------------------|------------|---------|
| | | | | Avec refus | Sans Refus | Moyenne |
| Tous les ménages | 10,2 % | 5,7 % | 7,4 % | 7,8 % | 6,5 % | 7,8 % |
| Maisons | 6,4 % | 5,1 % | 6,6 % | 6,5 % | 5,5 % | 6,2 % |
| Appartements | 11,5 % | 6,9 % | 8,5 % | 13,7 % | 11,7 % | 10,2 % |

TABEAU 4.15: Taux d'actualisation implicites dans chaque situation expérimentale en fonction du revenu du ménage

| | Choix du chauffage suite à une panne (S1) | Choix du chauffage suite à une panne (S2) | Choix du chauffage électrique suite à une panne (S3) | Choix de rénovation | | |
|----------------------|---|---|--|---------------------|------------|--------------------|
| | | | | Avec refus | Sans Refus | Moyenne |
| Moins de 1500 €/mois | 11,6 % | 19 % | 10,4 % | 9,8 % | 8,9 % | 12,7 % |
| 1501 – 1900 €/mois | 4,9 % | 10,3 % | 7,9 % | 13,4 % | 10,3 % | 9,1 % |
| 1901 – 2700 €/mois | 6,3 % | 5,2 % | 6,8 % | 5 % | 3,5 % | 5,8 % |
| 2701 – 3800 €/mois | 7,4 % | 5,6 % | 8,3 % | 4,3 % | 5,3 % | 6,4 % |
| Plus de 3800 €/mois | 7 % | 3 % | 6,3 % | 9,4 % | 8 % | 6,4 % |
| Confidentiel | 6,8 % | 6,8 % | 7,1 % | 3 % | 1,4 % | 6,9 % ¹ |

¹ Sans situation 4 (choix des travaux de rénovation).

4.4.2 Consentements à payer

L'un des très grands avantages des modèles à l'utilité aléatoire est qu'ils permettent d'obtenir directement une estimation des consentements à payer (CAP) ou prix de réservation. Par ailleurs les CAP permettent de comparer les résultats des différents modèles entre eux, alors que les valeurs des paramètres estimés ne sont pas comparables directement entre les modèles (voir pour plus de détails Section 1.6.1).

Dans cette section nous présentons les CAP obtenus grâce aux estimations des modèles MNL des sections 4.2.1–4.2.4. La valeur moyenne de CAP pour un attribut k est calculée en utilisant la formule :

$$CAP_k = -\frac{\hat{\beta}_k}{\hat{\gamma}} \quad (4.22)$$

où $\hat{\beta}_k$ est l'estimateur du paramètre associé à l'attribut k et $\hat{\gamma}$ – le paramètre associé à l'investissement. Si la variable est continue, il s'agit du CAP marginal pour une amélioration de l'attribut d'un point. Dans le cas des variables qualitatives, il s'agit du montant que le ménage est prêt à payer en plus pour avoir la modalité k plutôt que la modalité de référence. Dans la situation de rénovation (S4) les CAP pour les alternatives de choix de rénovation sont équivalents aux prix de réservation (voir Section 1.6.1). Nous avons également vu dans la Section 4.3.1 que les préférences varient entre les individus, par conséquent les CAPs varient aussi.

Pour chaque valeur de CAP calculée nous donnons l'intervalle de confiance à 95 % en utilisant la méthode delta et la commande *wtp* de Stata (Hole, 2007a). Les valeurs exactes des CAP et de l'intervalle de confiance sont données en Annexe E. Le CAP est un rapport entre deux paramètres estimés dont chacun a son intervalle de confiance et la variance estimée $\hat{\sigma}^2$ issu du modèle MNL. La méthode delta suppose que les CAP individuels suivent une loi normale et qu'ils sont par conséquent symétriques par rapport à leurs moyenne (4.22). Sa variance est égale à (Hole, 2007a) :

$$\begin{aligned} VAR(CAP_k) = & \left[\left(\frac{\delta CAP_k(\beta_k, \gamma)}{\delta \beta_k} \right)^2 VAR(\beta_k) + \left(\frac{\delta CAP_k(\beta_k, \gamma)}{\delta \gamma} \right)^2 VAR(\gamma) \right. \\ & \left. + 2 \left(\frac{\delta CAP_k(\beta_k, \gamma)}{\delta \beta_k} \right) \left(\frac{\delta CAP_k(\beta_k, \gamma)}{\delta \gamma} \right) COV(\beta_k, \gamma) \right] \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$VAR(CAP_k) = \left[\left(-\frac{1}{\beta_k} \right)^2 VAR(\beta_k) + \left(\frac{\beta_k}{\gamma^2} \right)^2 VAR(\gamma) + 2 \left(-\frac{1}{\beta_k} \right) \left(\frac{\beta_k}{\gamma^2} \right) COV(\beta_k, \gamma) \right] \quad (4.24)$$

L'intervalle de confiance autour de la moyenne, c'est-à-dire CAP_k est donné par (Hole, 2007a) :

$$CAP_k \pm z_{\alpha/2} \sqrt{VAR(CAP_k)} \quad (4.25)$$

$$z_{\alpha/2} = \Phi^{-1}[1 - \alpha/2] \quad (4.26)$$

où Φ^{-1} est l'inverse de la répartition de la loi normale avec l'intervalle de confiance $100 \times [1 - \alpha/2]\%$.

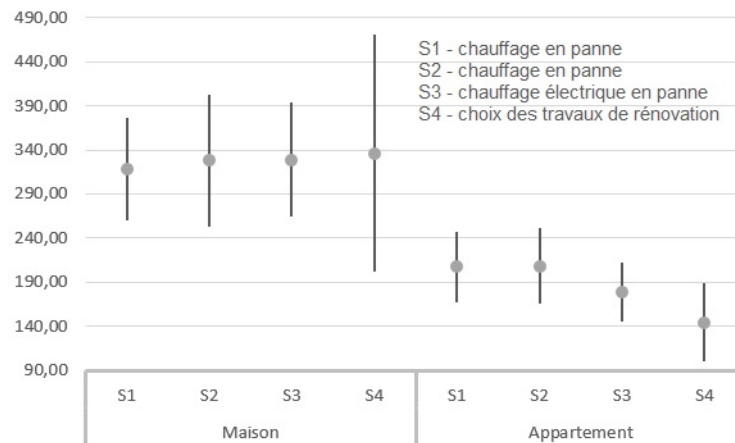
4.4.2.1 Réduction de la facture de chauffage

Nous commençons par comparer les CAP pour la réduction de la facture de chauffage parce que l'attribut « Réduction de la facture » a été présent dans toutes les situations de choix. La Figure 4.6 et le Tableau E.1 de l'Annexe E donnent les CAP et son intervalle de confiance en € pour économiser 1 % de la facture d'énergie. Nous remarquons que pour les habitants des maisons individuelles les valeurs des CAP tournent autour de 327 € pour 1 % de réduction. Le fait que les montants estimés sont proches signifie que les situations sont comparables entre elles. Dans les trois premières situations les intervalles de confiance se ressemblent, tandis que dans la situation 4 l'intervalle de confiance est deux fois plus grand. Les habitants des appartements, quant à eux, ont les mêmes CAP dans les situations 1 et 2 (208 € pour 1 % de réduction), mais les CAP des situations 3 et 4 sont plus faibles : 178 € et 144 € respectivement. L'intervalle de confiance dans la situation de rénovation (S4) est plus large que dans les situations de panne de chauffage (S1 à S3).

4.4.2.2 Équipements de Chauffage

Les CAP concernant le système de chauffage, en situation de panne du chauffage (S1) et en rénovation (S4), sont présentés sur la Figure 4.7 et dans le Tableau E.2 de l'Annexe E. Les CAP pour avoir un CED plutôt qu'une chaudière gaz sont autour de 0 €, ce qui est logique puisque les paramètres associés au CED n'étaient jamais significatifs. Les CAP pour avoir une PAC au lieu d'une chaudière gaz sont autour de 9 000 € pour les ménages en maison individuelle et de 3 500 € à 4 000 € pour ceux en appartement. Cela veut dire

FIGURE 4.6: CAP en € pour 1 % de réduction de la facture de chauffage dans les situations 1 à 4



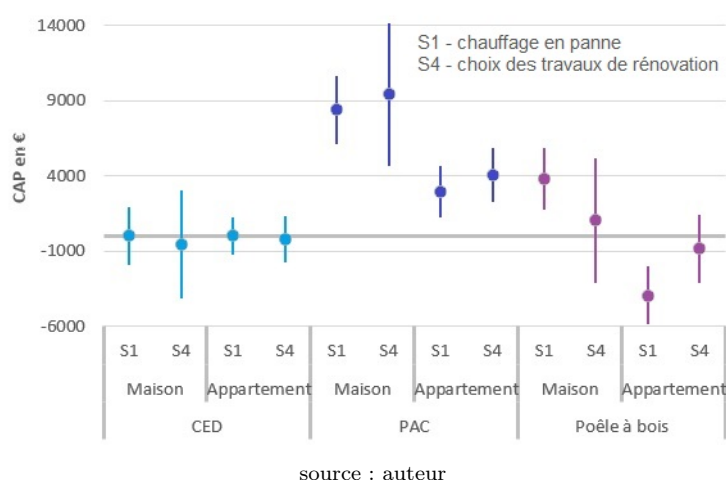
source : auteur

que si la différence de prix entre une PAC et une chaudière gaz est supérieure à 9 000 € (ou 4 000 € dans le cas des appartements), le ménage refusera d'installer une PAC. Nous savons qu'actuellement une PAC air/air coûte 8 400 € (5 000 €) dans une maison (appartement) et une PAC air/eau coûte 13 500 €, tandis qu'une chaudière condensation individuelle gaz coûte 4 300 € (UFE, 2012). La différence entre les deux moyens de chauffage varie de 700 € (appartement PAC air/air) à 9 200 € (PAC air/eau). Ainsi le CAP pour une PAC est suffisant s'il s'agit de PAC air/air, mais insuffisant pour l'installation de la PAC air/eau.

Les CAPs sont plus faibles pour les poêles à bois. Les habitants des maisons sont prêts à payer 4 000 € de plus pour avoir un poêle plutôt qu'une chaudière si le chauffage est tombé en panne (S1). L'intervalle de confiance est de [1733; 5854], tous les habitants des maisons préfèrent avoir un poêle plutôt qu'une chaudière puisque la borne inférieure de l'intervalle de confiance est positive. Mais s'il s'agit des travaux de rénovation (S4), alors le CAP est seulement de 1 000 € avec l'intervalle de confiance de [-3081; 5163]. La borne supérieure dans la situation 4 est proche de celle de la situation 1, une partie des ménages préfère les poêles à bois indépendamment de la situation de choix. Toutefois certains habitants en maisons individuelles ne veulent plus installer le poêle à bois lorsqu'il s'agit des travaux de rénovation énergétique. La situation s'inverse pour les habitants en appartements. Dans le cas d'une panne de chauffage (S1), le CAP pour le poêle à bois est négatif avec un intervalle de confiance lui aussi négatif. Si le chauffage tombe en panne, le ménage accepterait d'installer un poêle à bois plutôt qu'une chaudière gaz si on lui donnait 3 900 €. Par contre dans le cas des travaux de rénovation (S4), le CAP passe de - 3 900 € à - 841 € et la borne supérieure de l'intervalle de confiance est positive pour une partie des ménages qui

préfèrent le poêle à bois. Si nous regardons les Figure 4.2 et Figure 4.5 dans la Section 4.3, les distributions des préférences individuelles dans la situation de panne de chauffage (S1) et le choix de la rénovation (S4), alors nous remarquons qu'effectivement pour une partie des ménages les paramètres individuels sont positifs, c'est-à-dire qu'ils préfèrent les poêles à bois. Nous pouvons conclure que certains habitants des maisons individuelles sont intéressés par les poêles à bois, mais considèrent que ce n'est pas un geste de rénovation en tant que tel puisque que leur CAP passe d'une valeur positive dans la S1 à une valeur négative dans la S4. Les ménages peuvent considérer le poêle comme un élément de confort thermique, d'ambiance ou autre, mais non comme une rénovation énergétique directe.

FIGURE 4.7: CAP en € pour les moyens de chauffage comparés à une chaudière gaz

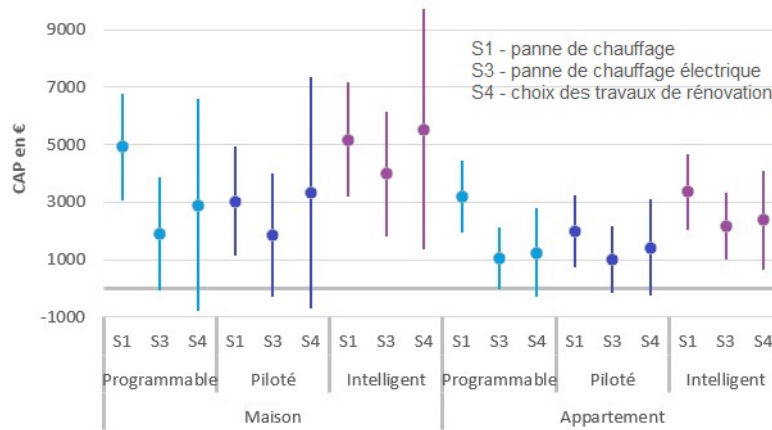


4.4.2.3 Réglage du chauffage

Si nous regardons maintenant la gestion du chauffage (Figure 4.8 et dans les Tableaux E.3–E.4 de l'Annexe E), les CAP pour avoir un réglage non manuel sont : 1 850 € - 5 530 € pour les ménages en maison individuelle et 1 000 € - 3 350 € pour les ménages en appartement. D'après l'ANAH (2014) les appareils de régulation du chauffage coûtent 1 000 € hors main d'œuvre. Il s'agit surtout des thermostats programmables puisque la part de marché des systèmes de pilotage à distance ou « intelligent » est faible (voir Section 3.3.2). Nous pouvons dire que les niveaux des CAP sont suffisants pour installer au moins un thermostat programmable. Dans les maisons individuelles les CAP les plus élevés sont observés pour la gestion « intelligente » en situation de rénovation (S4) : 5 530 € en moyenne contre 5 169 € et 3 983 € dans les autres situations. Mais l'intervalle de confiance est plus large. Certains ménages sont prêts à payer plus dans le cas de la rénovation que dans le cas du choix de chauffage suite à une panne. Les habitants des appartements sont prêts à payer plus pour la gestion « intelligente » dans le cas d'une panne du chauffage (S1) que dans

le cas de la rénovation (S4). Les CAP moyens sont plus faibles dans la situation 3, choix d'un chauffage électrique, indépendamment du type de logement.

FIGURE 4.8: CAP en € pour les différents réglages du chauffage comparés au réglage manuel



source : auteur

4.4.2.4 CAP pour les autres attributs

Finalement la Figure 4.9 et les Tableaux E.5–E.6 de l'Annexe E présentent les CAP pour le reste des attributs. Nous observons de faibles intervalles de confiance pour la garantie et le montant des aides. C'est le signe entre autre que les préférences sont homogènes pour ces attributs.

Le ménage est prêt à payer 1 000 € - 2 000 € de plus pour une année supplémentaire de garantie contre la panne. Les CAPs pour les ENR comme énergie de chauffage sont élevés (5 000 € – 8 000 €) et comparables aux CAP pour les PAC dans les situations de panne du chauffage (S1) et de rénovation (S4). Par contre les CAP pour le bois sont négatifs indépendamment du type de logement alors que dans la situation 1 et 4 pour une partie des ménages les CAP ont été positifs. Cela signifie que le ménage est prêt à payer plus pour un système bois que pour une chaudière gaz uniquement s'il s'agit des poêles à bois. Ces préférences sont confirmées par l'observation du marché. ADEME (2014b) indique que le nombre total des appareils de chauffage au bois vendus en 2012 était de 489 225 unités dont 60 % pour les poêles à bois, 3,3 % pour les chaudières à bois et 36,7 % pour les autres appareils.

Les CAPs, ou plus précisément l'effet levier, pour le montant des aides sont positifs : chaque € d'aide financière supplémentaire incite le ménage à investir en moyenne 1,73 € (1,10 €) pour remplacer le chauffage tombé en panne et 0,75 € (1,57 €) pour les travaux

de rénovation en maison (appartement). Les intervalles de confiance sont aussi globalement positifs variant allant de 0,05 € pour les travaux de rénovation (CAP minimal pour les maisons) à 2,1 € pour le changement de chauffage (S1, maison) et pour les travaux de rénovation (S4, appartement). L'effet levier est le plus faible et inférieur à 1 dans le cas où les ménages habitent en maison individuelle et s'apprêtent à faire des travaux de rénovation. Les préférences pour le montant d'aide dépendent du type de logement et de type des travaux. Les habitants des maisons individuelles sont plus sensibles à l'aide si le chauffage est tombé en panne, alors que les habitants des appartements présentent un effet levier plus important dans le cas des travaux de rénovation.

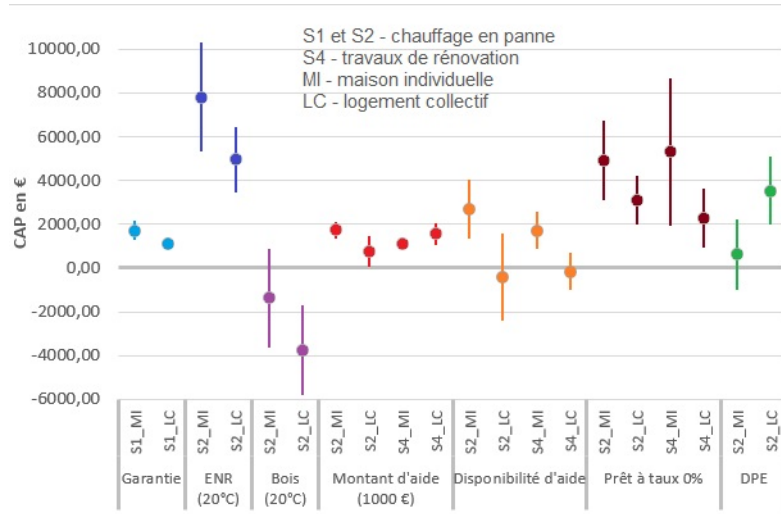
La disponibilité immédiate de l'aide augmente également le montant dépensé en travaux de 1 600 € à 4 000 € si le chauffage est tombé en panne (S2). Par contre dans le cas des travaux de rénovation les CAP varient autour de 0 €. La disponibilité d'aide immédiate n'est pas une incitation à investir dans les travaux pour un ménage moyen. Si un prêt à taux 0 % est accordé au ménage, il est prêt à investir entre 2 276 € (3 109 €) et 5 305 € (4 901 €) de plus dans les travaux de rénovation (remplacement du chauffage). Contrairement à la disponibilité d'aide, les prêts à taux 0 % intéressent les ménages dans le cas du choix forcé du chauffage, et dans le cas des travaux de rénovation. Finalement les habitants des appartements sont prêts à payer autour de 4 000 € pour une offre d'un système chauffage qui propose également de faire un diagnostic de performance énergétique du logement occupé, alors que faire un DPE dans un appartement coûte environ 100 €¹⁰. Ces ménages peuvent ne pas être conscients du prix réel du diagnostic de performance énergétique ou penser que le diagnostic est important pour eux afin de déterminer quel comportement il vaut mieux adopter et quels travaux sont les plus appropriés. Un CAP aussi élevé peut refléter une grande aversion au risque : si le chauffage est inadapté ou les travaux sont inutiles, le ménage court le risque de ne pas recevoir les bénéfices espérés de tels travaux.

4.4.2.5 Prix de réservation pour les travaux de rénovation

Dans la situation de travaux de rénovation (S4), nous avons intégré le refus de faire les travaux comme alternative de choix. Si l'alternative de référence du modèle est le refus de faire les travaux, alors les CAP pour les différents travaux de rénovation sont équivalents au montant que le ménage est prêt à payer au maximum, c'est-à-dire le prix de réservation. Les prix de réservations sont visualisés sur la Figure 4.10 et données dans le Tableau E.7 de l'Annexe E. Les habitants des maisons (appartements) sont prêts à payer au maximum 5 500 € *ceteris paribus* (2 300 €) pour améliorer le chauffage, 11 000 € (5 000 €) pour améliorer l'isolation du logement et 17 500 € (7 500 €) pour le bouquet des travaux *ceteris*

10. Par exemple : <http://www.viadiagnostic.fr/tarif-diagnostic-immobilier.html>

FIGURE 4.9: CAP en € pour d'autres attributs



source : auteur

paribus. Mais si nous regardons les intervalles de confiance, nous remarquons que la borne maximale atteint 17 215 € (7 444 €), 23 157 € (9 9985 €) ou 30 100 € (13 000 €) pour l'amélioration du chauffage, l'amélioration de l'isolation ou le bouquet des travaux en maison individuelle (appartement). Les prix de réservation sont inférieurs aux CAP moyens calculés pour les attributs des offres (p.ex. une PAC au lieu de la chaudière à gaz). Jusqu'à présent nous n'avons parlé que des CAP pour les attributs des offres. Mais les modèles tiennent compte aussi de l'inertie des préférences. Si l'inertie n'est pas intégrée dans le modèle, les valeurs des paramètres estimés pour les moyens de chauffage et l'énergie et les équipements pour la gestion de la température intérieure sont plus faibles. Nous revenons sur la question des prix de réservation dans la sous-section consacrée à l'analyse de l'inertie des préférences.

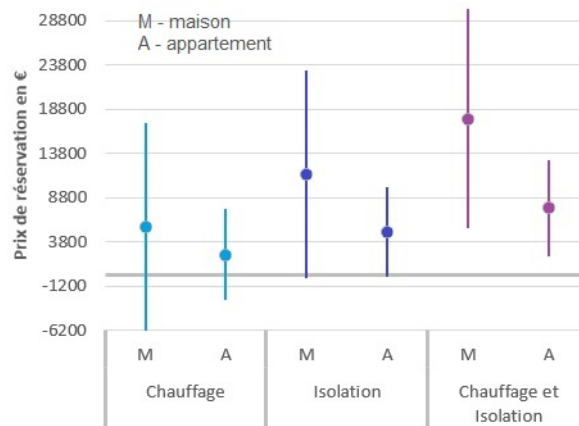
4.4.3 Mesure des effets

Nous avons intégrés dans les modèles économétriques les nouvelles variables qui tiennent compte de la situation du ménage pendant l'enquête : l'effet revenu, l'inertie des préférences et le signal qualité. Cette section a pour but d'exposer plus en détail les résultats économétriques et les implications économiques qui en résultent.

4.4.3.1 Effet revenu

Le revenu n'est pas inclus dans les modèles présentés finaux parce que les modèles incluant les effets revenu sont moins bons au regard des critères d'information *AIC* et *BIC*, ainsi

FIGURE 4.10: Les prix de réservations pour les différentes options de rénovation



source : auteur

que du ρ^2 . Les paramètres γ_t associés à l'investissement par tranche de revenu ne sont pas différents les uns des autres dans les quatre situations (voir p.ex. les résultats d'estimation pour les situations S1 dans D.3 et S2 dans D.6. Les p-values des tests d'égalité des paramètres γ_t pour les différents tranches t sont compris entre 0,2 et 1. Dans la situation de travaux de rénovation (S4), les tranches de revenu n'influencent ni les préférences pour le montant d'investissement, ni les préférences pour les différents type de travaux. Néanmoins quand nous calculons les taux d'actualisation implicites, nous trouvons que les ménages au revenu modeste ont un taux implicite presque deux fois plus élevé que les ménages qui gagnent plus de 1 900 €/mois.

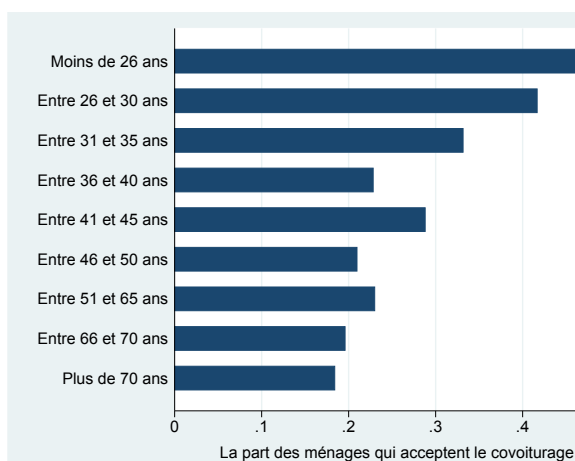
Pourquoi l'effet revenu est absent de nos choix expérimentaux ? Il est possible que cela soit du à la configuration des expériences de choix :

- Dans les situations 1 à 3 le choix est forcé (chauffage en panne). Même si le ménage n'a pas assez d'argent pour investir, il doit choisir au moins une offre.
- Environ 20 % des répondants ne veulent pas communiquer leur revenu, tandis que pour les autres nous ne connaissons que la tranche du revenu. Il est possible que le nombre d'observations par tranche de revenu ne soit pas suffisant.
- Nous demandons d'imaginer, si ce n'est pas le cas, que le logement appartient au ménage et que le ménage n'a pas de prêt à rembourser. Dans la situation 4 nous ne précisons pas quand les travaux sont à faire. Ces simplifications auront pu inciter le ménage à ne pas tenir compte de sa situation financière.
- Finalement l'ensemble du plan fractionnaire n'est pas présenté à chaque répondant. Dans les situations 1 à 3 nous avons 48 offres dans la fraction dont 3 seulement sont présentées au répondant. Nous ne pouvons comparer un ménage modeste au ménage plus riche que s'ils répondent au même *Trade-Off* ou aux mêmes offres. Dans la situation 4 c'est encore

pire : la fraction contient 128 *Trade-Off* alors qu'il n'y a que 1793 répondants. Chaque *Trade-Off* est présenté au maximum à 14-15 répondants.

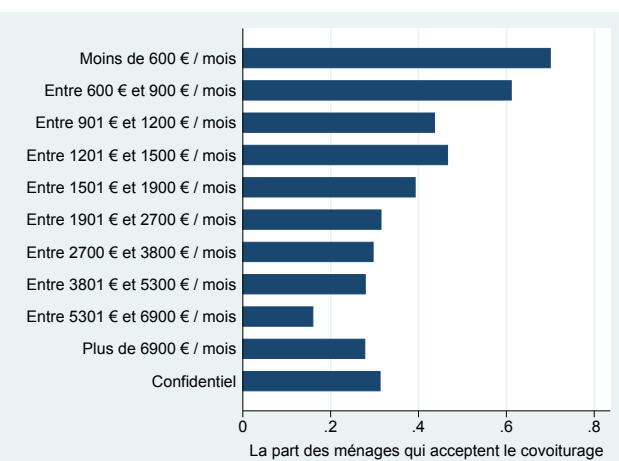
Il est également possible que le lien entre le choix et le revenu dans le cas des travaux de rénovation et de chauffage soit plus complexe. Par conséquent les tranches de revenus sont incapables de refléter ce lien. Tout d'abord nous pouvons détailler les travaux [Garrow et al. \(2007\)](#) dont nous nous sommes inspirés. Les auteurs étudient les préférences de choix d'un billet pour un vol interne aux Etats Unis. L'enquête expérimentale a été conçue de la même façon que la nôtre : avec 2730 répondants et une fraction du plan factoriel avec 256 *Trade-Off*, c'est-à-dire qu'environ 11 répondants ont testé chaque *Trade-Off*. L'enquête parvient à capter les disparités des préférences en fonction des caractéristiques individuelles. Par ailleurs dans notre enquête les répondants ont participé à 5 expériences de choix : situations 1 à 4 sont présentées dans cette thèse et une situation 5 - choix expérimental de covoiturage. Après avoir participé au choix des travaux de rénovation, les répondants ont bien participé au choix de covoiturage. En conséquence nous ne pouvons pas dire que l'absence de l'effet revenu est due à la fatigue des répondants. Pour le covoiturage les résultats montrent clairement que le choix dépend de l'âge du répondant et du revenu du ménage (voir Figures 4.11 et 4.12). Et le ρ^2 du modèle MNL est d'environ 0,35. La concentration du répondant n'a pas diminué entre les situations 1 et 5, et les effets revenus sont bien détectables s'ils sont présents et si la formulation est appropriée. En conclusion nous pouvons dire que dans le cas du choix des travaux de rénovation énergétique, l'effet revenu ne peut être détecté en n'utilisant que les tranches de revenu.

FIGURE 4.11: Le taux d'acceptabilité du covoiturage en fonction de l'âge



source : auteur

FIGURE 4.12: Le taux d'acceptabilité du covoiturage en fonction du revenu



source : auteur

4.4.3.2 Inertie des préférences

L'inertie des préférences est capturée à travers trois variables : l'inertie des préférences pour le chauffage (situation 1, 2 et 4), l'inertie des préférences pour la gestion (situation 1, 3 et 4) et l'inertie des préférences pour la forme du tarif électrique (situation 3).

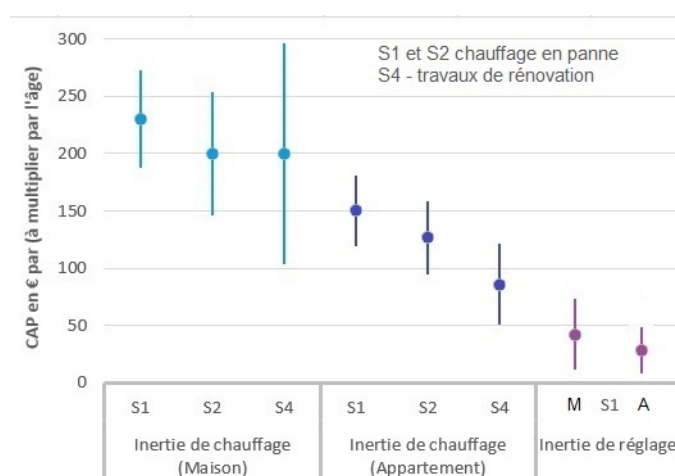
Dans la **Situation 1** (Section 4.2.1) l'inertie des préférences pour le chauffage $0,0259^{***}$ et l'inertie des préférences pour la gestion du chauffage $0,0046^{***}$ croisées avec l'âge du répondant apportent beaucoup d'information au modèle : le pseudo $\bar{\rho}^2$ ajusté passe de 0,194 sans ces variables à 0,234 (D.2). Par ailleurs si nous prenons l'âge moyen du répondant, 48,36 ans, la valeur du paramètre est de 1,25 – bien plus grand que les préférences pour la PAC des personnes sensibles au froid. Si nous n'intégrons pas les variables d'inertie, les paramètres associés aux moyens de chauffage et le réglage capturent à la fois les préférences pour ces attributs et le désir de ne pas changer de technologie de chauffage ou de mode de gestion de la température intérieure. De ce fait les paramètres estimés sont plus faibles (D.2). Par exemple le paramètre associé à la PAC dans une maison individuelle est de $0,453^{***}$ sans effet inertie et il est $0,88^{***}$ avec l'effet inertie, tandis que les paramètres associés à l'investissement et la réduction de la facture d'énergie sont à peu près les mêmes : $-0,09^{***}$ et $-0,111^{***}$ et $0,033^{***}$ et $0,035^{***}$ respectivement. Par ailleurs, certains paramètres ne sont pas significatifs et contraires aux observations du marché : les PAC dans les appartements et les poêles à bois dans les maisons individuelles. Alors que nous savons par exemple que le marché des poêles à bois est dynamique (ADEME, 2014b), et qu'il n'y a pas de contrainte technique contre l'installation des PACs air/air et air/eau en appartements.

Dans la **Situation 2** (Section 4.2.2) nous ne mesurons que l'inertie des préférences pour les énergies de chauffage qui se relève être significative ($0,0193^{***}$). Le fait de croiser l'inertie des préférences avec l'âge du répondant améliore le modèle. C'est le paramètre avec la valeur la plus élevée. Si l'inertie n'est pas prise en compte, les paramètres associés aux sources d'énergie sont sous-estimés. Le paramètre β_4 associé à $ENR_{nj} \times T_n$ passe de $0,0241^{***}$ dans le modèle sans inertie des préférences à $0,0378^{***}$ dans le modèle avec inertie.

Si nous regardons maintenant le choix du chauffage électrique, **Situation 3** (Section 4.2.3), les inerties des préférences pour le réglage et le tarif sont significativement positives au risque de 5 % et 10 % respectivement. Comme dans les situations précédentes la probabilité que l'offre soit choisie augmente si l'offre propose des services bien connus du ménage. Par contre cette inertie est moins importante que l'inertie des préférences pour le chauffage et elle ne dépend pas de l'âge de répondant.

Nous avons l'inertie des préférences pour garder le même chauffage et l'inertie des préférences pour la gestion du chauffage dans le modèle de choix de rénovation, **Situation 4** (Section 4.2.4). Le paramètre associé à l'inertie du moyen de chauffage est significativement positif (0,0129***). Le fait de croiser la variable d'inertie avec l'âge améliore le modèle au terme des critères d'information *AIC* et *BIC*. Sans l'âge, la valeur du paramètre est la même pour tout le monde et est égale à 0,37*** tandis que avec l'âge la valeur du paramètre est de 0,387 pour les personnes âgées de 30 ans et de 0,774 pour les sexagénaires. Quant à l'inertie des préférences pour la gestion du chauffage, elle n'est pas significative dans cette situation ce qui n'est pas étonnant, puisque les répondants préfèrent le système « intelligent » ou piloté à distance aux autres moyens de gestion.

FIGURE 4.13: CAP en € pour l'inertie du chauffage ou sa gestion (réglage)



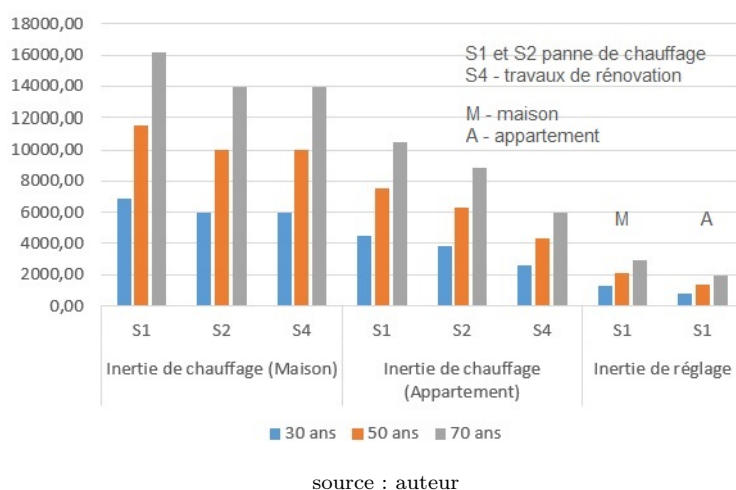
source : auteur

Afin de comparer les inerties des préférences entre les différentes situations et l'effet d'âge, nous regardons les CAP associés. Il s'agit de déterminer à partir de quel montant d'investissement le ménage renoncera à garder le même équipement. La Figure 4.13 montre les CAPs et les intervalles de confiance quand les paramètres sont significatifs, pour l'inertie du système chauffage ou de sa gestion (voir aussi le Tableau E.8 pour les valeurs exactes de CAP). Dans le cas des **maisons individuelles** l'inertie liée au système de chauffage est la plus élevée : 225 € × l'âge du répondant dans la situation 1 et d'environ 200 € dans la situation 2 et 4 (rénovation). Il y a un lien quasi direct entre le moyen de chauffage et l'énergie utilisée, mais l'inertie des préférences est plus forte pour le système de chauffage. Dans le cas du choix lors d'une rénovation l'inertie est aussi plus faible, mais l'intervalle de confiance est grand. Cela signifie que la distribution de l'inertie des préférences pour les moyens de chauffage est plus importante lors du choix en cas de rénovation.

Si nous regardons maintenant les CAP des inerties du chauffage pour les habitants en **appartement**, nous remarquons que le CAP est 1,7 fois plus faible pour les travaux de rénovation (S4) que pour le choix forcé du moyen de chauffage en cas de panne. De plus, les habitants des appartements sont plus enclins à renoncer aux habitudes que les habitants des maisons individuelles lors des travaux de rénovation.

L'inertie des préférences pour la gestion du chauffage est beaucoup plus faible : environ $42 \text{ €} \times \text{l'âge}$ pour les ménages en maisons individuelles et $27 \text{ €} \times \text{l'âge}$ pour ceux vivant en appartement.

FIGURE 4.14: Degré d'inertie en fonction de l'âge (CAP en €)



Pour être plus spécifique, nous pouvons comparer le montant du CAP pour différentes tranches d'âge : 30 ans, 50 ans proche de la moyenne et 70 ans (Figure 4.14). Nous pensons que même les plus âgés ont intérêt à s'investir dans les travaux de rénovation ou de chauffage : s'ils installent un nouveau matériel à l'âge de 70 ans, ils devront le remplacer dans 15 ans (à l'âge de 85). En effet, d'après notre enquête l'âge du système de chauffage est inférieur à 15 ans pour 76 % des répondants qui disposent de cette information. Et d'après le site INSEE l'espérance de l'âge en France est autour de 85 ans¹¹.

Les trentenaires dans les maisons individuelles renoncent à leur chauffage habituel s'il coûte plus de 6 000 € en valeur absolue, tandis que les septuagénaires sont prêts à payer jusqu'à 16 000 € pour ne pas changer leur type de chauffage ou l'énergie actuellement utilisée. Cette inertie des préférences des ménages en maisons individuelles représente un grand obstacle pour le déploiement de nouvelles technologies de chauffage, surtout s'il s'agit de ménages qui ont le plus de marge de manœuvre pour réaliser des travaux d'efficacité énergétique. Ils sont pour la plupart propriétaires de leur logement et ils sont les seuls à

11. <http://www.insee.fr>

l'occuper et à décider. Le CAP pour les personnes âgées est plus élevé que le prix moyen des équipements de chauffage les plus performants. Nous savons qu'actuellement une grande partie des ménages utilise soit le CED soit une chaudière gaz. Afin qu'un septuagénaire renonce au CED ou à la chaudière, ces derniers devraient coûter plus de 16 000 € à l'installation, ce qui n'est pas le cas. Bien au contraire, le CED et la chaudière individuelle ont des prix moyens plus faibles que la PAC. L'UFE (2012) estime à 4 300 € le prix moyen d'une chaudière à condensation et à 13 500 € le prix d'une PAC air/eau pour une maison individuelle.

Dans le cas des appartements, l'inertie des préférences est plus faible. S'il s'agit du choix contraint du système de chauffage, les ménages sont prêts à payer 4 000 € (30 ans) contre 10 000 € pour les ménages plus âgés (70 ans) pour garder un système identique. Par contre dans le cas des travaux de rénovation ils renoncent aux habitudes si le chauffage coûte 2 000 € (30 ans) - 6 000 € (70 ans).

Quant à la gestion du chauffage, les ménages sont prêts à payer jusqu'à 2 000 € en plus pour ne pas changer les habitudes de réglage.

Dans la section précédente nous avons parlé des CAPs pour les attributs et de prix de réservation pour les différents types de travaux lors de la rénovation. Nous avons trouvé que l'habitant d'une maison individuelle est prêt à dépenser au maximum 5 500 € pour le chauffage et 17 500 € pour le bouquet de travaux, alors que le CAP pour avoir une PAC plutôt qu'une chaudière à gaz est de 9 400 €. Ce montant de CAP est réduit à cause de l'inertie. Si le ménage est âgé de 70 ans, a une chaudière à gaz chez soi et habite dans une maison, il conservera la chaudière parce qu'il est prêt à payer 2 300 € (16 000 € - 9 400 € - 4 300 €)¹² de plus pour ne pas changer ses préférences, au lieu d'investir dans une PAC. Par contre pour une personne âgée de 30 ans, le montant que le ménage est prêt à investir pour une PAC (9 400 € + 4 300 €)¹³ est plus élevé que l'inertie des préférences (6 000 €). Comme le moyen de chauffage varie d'un logement à l'autre, ainsi que l'âge du répondant, les prix de réservation trouvés pour l'alternative de choix reflète un prix moyen qui tient compte à la fois de l'inertie et des préférences pour les attributs des offres.

4.4.3.3 Signal de qualité

Le signal de qualité a un impact significatif dans les situations où le chauffage tombe en panne (Section 4.2.1 et Section 4.2.2) : -0.301^{**} et -0.193^* respectivement. Le paramètre est multiplié par 4 (ou 2) si la personne se méfie beaucoup (ou peu) des prix faibles.

12. Le ménage change le type de chauffage si le prix de chauffage de référence plus le CAP est plus grand que l'inertie.

13. CAP pour avoir une PAC au lieu de la chaudière à gaz est de 9 400 €, alors que le prix d'une chaudière individuelle est 4 300 € (UFE, 2012). Au total le ménage est prêt à payer 13 700 €.

Par contre il est multiplié par -4 (ou -2) dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque la personne choisit de profiter de l'offre à bas prix. Si le ménage est méfiant face aux prix faibles, la probabilité diminue pour l'offre avec un prix avantageux. Nous avons une réaction inverse pour les ménages qui ne réagissent pas au signal de qualité pour les installations de chauffage. Nous ne savons pas ici quelles caractéristiques des ménages influencent le signal de qualité. Dans les situations expérimentales seulement 4 % des *Trade-Off* présentent une grande variation des prix à partir de laquelle nous avons déduit le signal de qualité. Cela n'est pas suffisant pour différencier l'effet selon les caractéristiques du ménage.

Dans la Situation 3, choix du chauffage électrique, le signal de qualité n'est pas significatif, mais le paramètre estimé est quand même négatif ce qui rejoint les observations faites dans les situations précédentes. Il est possible que la réponse au signal ait diminué parce que les répondants se sont habitués aux montants d'investissement proposés auparavant et ne considèrent plus que l'offre proposée puisse être de faible qualité. On peut également constater que dans le cas du chauffage électrique les répondants ne lient pas la qualité des travaux au montant de l'investissement. Nous n'avons pas assez d'information pour savoir quelle hypothèse est la plus probable.

Il est à noter que même si le ménage lie la qualité du travail au prix des travaux, il n'est pas certain que cette corrélation soit vérifiée du point de vue des entreprises. Le marché français de la rénovation énergétique est constitué d'oligopoles locaux avec une concurrence très limitée : ce sont de petites compagnies qui ne sont pas capables de répondre à une grande demande¹⁴. Dans ce cas les entreprises locales sont peu enclines à envoyer un signal de qualité aux ménages au travers du montant de l'investissement. Au contraire, ils peuvent envoyer un signal inverse en utilisant les prix élevés pour couvrir le risque d'augmentation des frais lors d'une installation mal maîtrisée ou en cas de carnet de commandes déjà bien rempli. Par exemple, un ménage demande au chauffagiste d'installer un moyen de chauffage innovant qui vient d'apparaître sur le marché, alors que le chauffagiste n'a jamais ou rarement effectué de tels travaux. Le chauffagiste peut tenir compte dans son devis de tous les aléas et de sa difficulté à estimer le temps nécessaire à l'installation. En augmentant le coût d'installation, il couvre ces risques. Dans ce cas, la qualité du travail peut diminuer avec le prix, ce qui est contraire aux attentes du ménage. À l'opposé l'installateur peut proposer des offres de faible montant en cas de carnet de commandes moins rempli, mais ce montant sera mal interprété par le ménage qui pourra considérer que la qualité des travaux réalisés ne serait alors pas optimale.

14. 327 000 entreprises avec moins de 10 employés par entreprise (FFB, 2010).

4.5 Conclusion

Ce chapitre avait pour ambition d'évaluer les préférences des ménages français lors du choix d'un système de chauffage ou de travaux de rénovations en utilisant l'enquête expérimentale présentée dans le Chapitre 3. Deux types de situation de choix ont été examinés : le choix forcé d'un chauffage en cas de panne et le choix non forcé de travaux de rénovation dont le but était d'améliorer la performance énergétique du logement.

Nous avons établi que les ménages ont une nette préférence pour les PAC ou les ENR, qu'ils sont indifférents entre une chaudière gaz et un CED (ou entre le gaz de réseau et l'électricité comme énergie de chauffage) et sont intéressés par le chauffage au bois lorsqu'il s'agit d'un poêle à bois en maison individuelle. La situation expérimentale de choix de rénovation a démontré que les répondants préfèrent améliorer l'isolation thermique du logement ou améliorer à la fois le chauffage et l'isolation plutôt qu'améliorer seulement le chauffage. Cette préférence pour les travaux d'isolation est d'autant plus importante que le ménage se sent en inconfort thermique dans son logement.

Les préférences des répondants pour la gestion du chauffage dépendent de la situation. S'il s'agit d'une panne du chauffage, les ménages préfèrent avoir un réglage programmable ou « intelligent » plutôt qu'une gestion manuelle ou pilotable à distance. Par contre dans le cas des travaux de rénovation dont le but est d'améliorer la performance énergétique du logement, les répondants préfèrent investir dans de nouvelles technologies : la gestion « intelligente » ou le pilotage à distance.

Les aides financières ont un effet multiplicatif sur le montant d'investissement : pour chaque € euro d'aide le ménage augmente son montant d'investissement de 1 € - 1,7 €, à l'exception des ménages habitant dans des maisons individuelles et qui s'apprêtent à faire des travaux de rénovation. La disponibilité immédiate de l'aide est un critère important lors du choix d'un nouveau chauffage suite à une panne. Les prêts se relèvent également être un critère important dans l'aide aux travaux du moment qu'il s'agit de prêt à taux 0 %.

Le plus grand obstacle au développement de nouvelles technologies de chauffage est la tendance des ménages à garder le même type d'équipement et refuser le changement. Nous appelons cette tendance – « l'inertie des préférences ». Nous avons étudié l'inertie des préférences pour les moyens de chauffage, pour l'énergie de chauffage, pour sa gestion et les tarifs d'électricité qui se sont relevées toutes être significatives. Cette inertie est d'autant plus importante, que le répondant est âgé. L'inertie des préférences est la plus grande pour les moyens de chauffage (énergie). Le montant que le ménage est prêt à dépenser pour ne pas changer de moyen de chauffage peut s'élever jusqu'à 16 000 € (personne âgée de 70 ans habitant dans une maison). Dans le cas où le ménage préfère une chaudière gaz ou le CED, il faudrait que ce chauffage coûte plus de 16 000 € pour que ce ménage décide

d'installer un autre équipement. Cette inertie des préférences est aussi reflétée au travers des prix de réservation pour les différents travaux de rénovation. Par exemple l'effet des CAP élevés pour une PAC ou la gestion « intelligente » de chauffage sont réduits suite à une inertie des préférences. Finalement, le ménage moyen est prêt à payer au maximum 5 500 € - 17 500 € (2 300 € - 7 500 €) pour les travaux de rénovation dans une maison individuelle (appartement).

Grâce aux modèles de choix discrets nous avons pu obtenir les taux d'actualisation implicites. Le taux ne dépend pas de la situation expérimentale (choix forcé ou non). Les habitants des maisons individuelles ont un taux d'actualisation de 6,2 %, tandis que les habitants des appartements un taux de 10,2 %. Conformément aux études précédentes nous avons trouvé que le taux d'actualisation implicite est le plus grand pour les ménages aux revenus faibles. Si le ménage gagne moins de 1 500 €/mois, alors le taux est en moyenne égal à 12,7 %.

Nos résultats démontrent que les préférences pour le confort thermique jouent un rôle dans le cas d'une panne de chauffage, mais pas lors du choix de travaux de rénovation. Nous avons établi que les ménages sensibles au froid, qui préfèrent les températures intérieures plus élevées que la moyenne, sont prêts à payer plus pour une gestion du chauffage avancée ou pour les énergies renouvelables.

Les résultats d'estimation ont finalement montré que du point de vue méthodologique les modèles les plus appropriés sont les modèles MNL, où les préférences sont homogènes, dès lors qu'une partie des attributs est croisée avec les informations sur la situation du ménage et de son logement. Les modèles Logit Mixte montrent bien que les préférences sont hétérogènes, mais cette hétérogénéité est très complexe pour être approchée par les densités de lois de probabilité usuelles telles que la loi normale, uniforme, triangulaire, etc. Quant au Logit Mixte, son utilité a été démontrée pour observer la distribution des paramètres individuels en ajustant par la suite le modèle MNL.

Conclusion générale

Le secteur résidentiel, et tout particulièrement celui des logements existants, représente un important gisement d'économie d'énergie qui ne peut être ignoré si la France veut atteindre ses objectifs d'efficacité énergétique et de réduction des émissions de GES. Or, le niveau de consommation d'énergie, la décision d'améliorer la performance énergétique du logement et le choix des travaux de rénovation énergétique dépendent des attitudes, des comportements et des préférences des ménages qui y habitent. Dans cette thèse, nous avons orienté notre recherche vers l'analyse des préférences des ménages lors du choix des travaux de rénovation et avons étudié les contraintes qu'ils rencontraient. Ce sujet de recherche a été motivé par le manque d'informations sur les préférences des ménages français, alors qu'ont été réalisées de nombreuses études sur les préférences des ménages américains, canadiens, allemands, suisses et bien d'autres. Dans la mesure où notre étude est une première pour la France, nous nous sommes efforcés de produire des résultats qui peuvent être utiles aux décideurs publics, chercheurs, ou encore aux entreprises du secteur énergétique et de les confronter à la réalité du marché lorsque les données étaient disponibles. Cette thèse est donc avant tout une étude empirique. Elle s'appuie en majeure partie sur une enquête expérimentale qui a été élaborée et réalisée par nos soins.

Résultats des travaux effectués

La première question de recherche s'intéressait aux **apports possibles des modèles de choix discrets pour comprendre les décisions d'investir dans des travaux de rénovation énergétique, ainsi que les applications économiques qui en résultent**. Au vu des travaux effectués, nous pouvons dire que l'utilité aléatoire et les modèles de choix discrets sont un excellent outil de modélisation qui permettent non seulement de comprendre la conséquence des préférences des ménages sur le choix des travaux, mais aussi de donner les indicateurs monétaires tels que les consentements à payer, le taux implicite d'actualisation, le surplus du consommateur, etc. Mais ceci est vrai à condition d'avoir une base de données qui retranscrive les alternatives de choix auxquelles font face les ménages. Par ailleurs, les travaux empiriques menés dans cette thèse, ont permis de comprendre que

le modèle le plus simple, Logit Multinomial (MNL), est le plus précis et le plus fiable pour étudier les choix des travaux de rénovation. Les modèles plus élaborés tels que Logit Mixte (ou à paramètres aléatoire) et Modèle des Classes Latentes permettent de tenir compte de la variance des préférences des consommateurs en supposant que la distribution des préférences suive une des lois paramétriques (continues ou discrètes). Cependant, dans le cas du choix des travaux de rénovation énergétique, ces modèles amènent à des conclusions erronées. Ceci est dû à la complexité des préférences individuelles pour les équipements du chauffage et les travaux d'isolation dont la distribution ne peut être représentée par une loi de probabilité paramétrique. Néanmoins, nous avons trouvé que les modèles Logit Mixte pouvaient être utiles pour générer les estimateurs des paramètres individuels et avoir, par conséquence, une vision de la distribution des préférences. Par ailleurs, même si le modèle MNL ne tient pas compte de l'hétérogénéité des préférences, il est possible d'en introduire, mais de façon supervisée. Par exemple, dans le Chapitre 4 nous avons différencié les préférences des ménages en fonction du type de logement et des préférences pour le confort thermique.

La deuxième question de recherche avait pour but de **comprendre et modéliser les contraintes qui empêchent le ménage de choisir librement les travaux de rénovation et les équipements énergétiques à installer dans le logement**. Pour y répondre nous avons proposé de considérer que le ménage était contraint, si son environnement, sa situation personnelle, les caractéristiques techniques de son logement déterminaient à eux seuls quels équipements ou quels travaux seraient faits. D'un point de vue mathématique, le ménage est fortement contraint si la probabilité de l'une des alternatives de choix est proche de 1 et la situation du ménage prédit bien le moyen de chauffage installé. Alors que pour le ménage non-contraint, sa situation n'influence pas le choix ou toutes les alternatives de choix ont la même probabilité d'être choisies. Ainsi défini, nous pouvons en déduire les ménages contraints en deux étapes :

1. La première étape consiste à estimer avec le modèle Logit Multinomial les probabilités de choix des différents types de travaux (ou équipements) avec pour seules variables explicatives la situation du ménage.
2. La deuxième étape utilise la distribution des probabilités estimées pour classer les ménages en groupes des moins contraints aux plus contraints pour chaque alternative de choix. La classification est faite de façon non supervisée à l'aide de l'algorithme Espérance-Maximisation. L'étude des groupes les plus contraints permet de définir le profil moyen du ménage contraint, ainsi que leurs nombre.

La méthodologie proposée est simple à mettre en place et utilise les données de préférences révélées qui sont faciles d'accès, comme l'ENL 2006.

Pour appuyer cette méthodologie, nous avons développé une application empirique sur l'exemple du choix de moyen de chauffage parmi les suivants : le CED, la chaudière individuelle, la chaudière collective, la PAC et le chauffage au bois. Les données ENL 2006 (INSEE) et TNS SOFRES 2013 (EDF) ont constitué nos échantillons d'étude. A la **première étape**, l'estimation du Logit Multinomial a montré que les contraintes étudiées (caractéristiques du logement, les prix d'énergie, le lieu d'habitation, ainsi que le revenu, l'âge et la taille du ménage) l'estimation du Logit Multinomial a montré que les contraintes étudiées (les caractéristiques du logement, les prix de l'énergie, le lieu d'habitation, ainsi que le revenu, l'âge et la taille du ménage) déterminaient à eux seuls le moyen de chauffage installé chez le ménage. C'était vrai en particulier pour les habitants des maisons individuelles en 2006 avec le taux des bonnes prédictions de 78,5 %. L'influence des contraintes sur le chauffage installé a baissé en 2013, mais reste importante avec des taux de bonnes prédictions de 55,3 %. Parmi les contraintes étudiées, l'accès au gaz de réseau est la plus forte tant en 2006, qu'en 2013, suivi par la zone climatique. La **deuxième étape**, classification en groupes des moins contraints aux plus contraints, a indiqué qu'en 2006 environ 49 % des ménages étaient contraints d'avoir soit une chaudière individuelle, soit une chaudière collective, soit le CED. Le plus remarquable est de voir que pour certains groupes contraints, la probabilité moyenne était proche de 1, les ménages de ce groupe n'avaient donc pour ainsi dire pas de choix. Par exemple, pour 11 % des ménages, parmi les habitants des maisons individuelles, la probabilité moyenne d'avoir chez eux une chaudière individuelle était égale à 0,987 ! La situation s'est améliorée en 2013. Le nombre de ménages contraints est passé de 49 % à 15,9 %. Il n'y avait qu'un seul groupe de ménages contraints avec une probabilité moyenne de 0,75 de se retrouver avec une chaudière individuelle.

Nous nous sommes aussi demandé si **est-ce que les contraintes reflètent les préférences** ? La réponse est apportée en partie dans le Chapitre 4 qui est consacré à l'étude empirique des préférences des ménages basée sur les résultats de l'enquête expérimentale. En effet, il apparaît que les ménages présentent une inertie de préférence qui augmente avec l'âge. Plus le ménage est âgé, plus il a envie de ne rien changer à ses habitudes. Cette inertie explique pourquoi dans le Chapitre 2 nous avons trouvé un groupe de ménages contraints qui n'a aucune raison de l'être. Ce groupe n'est pas réellement contraint, il est juste composé des ménages âgés à forte inertie de préférences. En revanche, les résultats du Chapitre 4 montrent que l'ensemble des contraintes utilisées dans le Chapitre 2 sont effectivement des contraintes. Seul le type de logement influence les préférences, mais reflète soit les contraintes, soit les particularités spécifiques au type du logement. Par exemple, les habitants des appartements sont plus intéressés par le diagnostic énergétique du logement avant les travaux, que les habitants des maisons individuelles. Ceci est dû au fait que les ménages en appartements sont moins renseignés sur la performance de leurs logement que les ménages en maisons individuelles notamment parce qu'ils sont plus nombreux à

être locataires sans accès à une information détaillée sur le logement même si le DPE est obligatoire à la location aujourd'hui.

Le Chapitre 4 nous permet de répondre aux deux autres questions de recherche posées dans l'introduction de ce manuscrit. Tout d'abord il s'agit de la question qui est au cœur de notre analyse : **quelles sont les préférences des ménages pour les travaux de rénovation énergétique ?** Le Tableau 4.16 montre les principales préférences des ménages dans les 4 situations de choix expérimentales. La décision de choisir une offre donnée ou non dépend du montant de l'investissement. Nous trouvons que les habitants des appartements sont plus sensibles au montant de l'investissement et sont moins enclins à entreprendre des travaux de rénovation sans y être forcé. Les ménages sont globalement favorables et intéressés par les PAC et les ENR, mais ils ne considèrent pas le bois comme une énergie renouvelable et aiment plus les autres moyens de chauffage ou énergies. La seule exception – les habitants des maisons individuelles qui sont intéressés par les poêles à bois. La gestion du chauffage entre aussi en ligne de compte et les préférences dépendent de la situation de choix. S'il s'agit du remplacement du chauffage en cas de panne, les ménages préfèrent la gestion « intelligente » ou programmable. En revanche, s'il s'agit de travaux de rénovation énergétique, les ménages préfèrent avant tout la gestion « intelligente » ou « piloté à distance ». Ces résultats nous conduisent à penser que si le ménage a décidé d'améliorer la performance énergétique de son logement sans y être contraint, il fera un effort pour adopter les technologies et les équipements les plus performants. Les aides ont un impact positif sur la décision d'investir dans les travaux de rénovation et ont un effet levier entre 1 et 2 € investi en plus pour chaque 1 € d'aide. Mais l'effet levier dépend de la situation. Dans le cas du choix de chauffage suite à une panne, ce sont les habitants des maisons individuelles pour lesquels l'effet levier est le plus important. En revanche, dans le cas des travaux de rénovation, les aides accordées pour les travaux dans les appartements sont plus efficaces. Notons que pour les habitants des maisons individuelles, l'effet levier est inférieur à 1 – signe de la présence de l'effet d'aubaine. Le type d'aide préféré dépend aussi de la situation. L'aide fiscale intéresse les ménages dans le cas d'une panne de chauffage, tandis que l'aide locale est préférée pour les travaux de rénovation. Les résultats de l'enquête montrent aussi que les ménages sont prêts à s'endetter pour faire des travaux, à condition qu'ils bénéficient d'un prêt à taux 0 %.

La dernière question de recherche posée concernait **les montants que le ménage est prêt à dépenser pour les travaux de rénovation**. Tout d'abord, nous avons vu que le taux implicite d'actualisation, qui reflète les préférences pour le présent, est en moyenne 7–8 % et monte jusqu'à 12,7 % pour les ménages à faibles revenus. Ensuite, dans le cas des travaux de rénovation, les prix de réservation ne sont pas élevés. Le ménage en maison (appartement) est prêt à payer au maximum 5 500 € (2 300 €) pour les travaux de chauffage, 11 000 € (5 000 €) pour améliorer l'isolation du logement et 17 500 € (7 500 €)

pour un bouquet des travaux. Cela ne permet pas de couvrir le coût d'installation de la PAC air/eau qui s'élève à 13 500 € ou encore l'isolation thermique par l'extérieur dont le coût moyen est 16 685 € (7 260 €) (UFE, 2012). Par contre, en regardant les CAP pour les différents attributs des offres, nous avons trouvé que les ménages sont prêts à payer jusqu'à 5 000 € (3 000 €) euros en plus pour une gestion performante et innovante du chauffage, alors que, par exemple, l'installation de la gestion programmable ne coûte que 1 000 € (UFE, 2012). La gestion du chauffage représente donc un potentiel intéressant en matière de maîtrise d'énergie. L'analyse monétaire des résultats d'estimation a également montré que le principal obstacle aux travaux de rénovation est l'inertie des préférences qui augmente avec l'âge. Les ménages ont tendance à choisir le même moyen de chauffage, la même gestion de chauffage et/ou le même tarif d'électricité si l'une des offres propose un équipement semblable à celui déjà installé précédemment. Cette inertie des préférences est plus importante dans le cas du moyen de chauffage.

En résumé, le travail de recherche nous a permis de répondre à l'ensemble des questions posées. Mais cela n'aurait été possible sans les données issues de l'enquête expérimentale. L'enquête a aussi montré que les ménages se prêtent bien au jeu, que les résultats sont réalistes et rejoignent les observations faites à l'étranger ou en France. Par ailleurs, elle donne une information plus fine sur les préférences. Nous ne pouvons, donc, qu'encourager l'utilisation de telles données dans le cadre d'étude des préférences des ménages dans le secteur résidentiel.

TABLEAU 4.16: Comparaison des préférences des ménages entre les situations expérimentales

| | Choix du chauffage suite à une panne (S1) | Choix du chauffage suite à une panne (S2) | Choix du chauffage électrique suite à une panne (S3) | Choix des travaux de rénovation énergétique (S4) |
|--|---|---|--|---|
| CAP en € pour 1 % de réduction | 318 € (207 €) ¹ | 327 € (208 €) | 328 € (178 €) | 336 € (144 €) |
| Chauffage | Ch. préféré : PAC, ENR, Poêle à bois Préférences dépendent de la température du confort thermique | | | Ch. Préféré : PAC Pas d'interaction avec le confort |
| Réglage du ch. | Préfère le plus : Programmable, Intelligent | | Préfère le plus Programmable, Intelligent | Préfère le plus : Intelligent et Piloté |
| Inertie des préférences (à 70 ans) | 16 000 € (10 500 €) | 14 000 € (8 800 €) | | 14 000 € (6 000 €) |
| Effet levier des aides fi. pour 1 € | | 1,7 (1,1) | | 0,8 (1,6) |
| Type d'aide préféré | Aide fiscale | | | Aide locale |
| Disponibilité d'aide | Immédiat | | | Indifférent |
| CAP en € pour le prêt à taux 0 % | 4 900 € (3 100 €) | | | 5 300 € (2 300 €) |

¹ : les valeurs entre parenthèses sont données pour les habitants en appartement

Pistes d'amélioration et perspectives pour de futurs travaux

Nous avons évoqué dans la section précédente, que dans le cadre de cette étude les modèles de Classes Latentes ou Logit Mixte se sont révélés inadaptés. Nous pouvons proposer d'améliorer le modèle en y intégrant des variables latentes sur les attitudes et les préférences générales des ménages. Comme point de départ, nous pouvons regarder l'étude de [Theis \(2011\)](#) qui dans sa thèse étudie le choix des vols aux Etats-Unis et s'intéresse à la problématique d'arbitrage entre la durée d'escale et le risque de rater la correspondance. En effet, une partie des personnes préfère minimiser au maximum la durée d'escale, tandis que l'autre partie préfère au contraire s'assurer que l'escale dure assez longtemps pour faire face aux imprévus des vols. L'auteur propose d'introduire 3 variables latentes dans l'utilité aléatoire qui capteront l'aversion au risque, la tolérance du risque et la confiance dans la fiabilité des compagnies aériennes. Nous pourrions introduire de la même façon les attitudes des ménages lors du choix des travaux de rénovation. Il peut s'agir du risque de qualité, des attitudes envers l'environnement ou encore des attitudes envers les nouvelles technologies.

Dans notre thèse, l'individu n'est contraint que par son environnement et sons expérience. Il n'interagit pas avec l'entreprise du bâtiment qui fait les travaux. Or, dans la réalité il est confronté non seulement au choix des travaux de rénovation, mais aussi au choix du prestataire. Dans nos analyses, nous avons intégré le signal de qualité et avons pu constater que le ménage est méfiant face à des montants d'investissement faibles qu'il soupçonne d'être le résultat d'un travail de mauvaise qualité. Il serait intéressant d'aller plus loin notamment via les travaux de [Giraudet et Houde \(2014\)](#) qui proposent une première analyse pour la France, de ce qu'ils appellent le double effet d'aléa moral, qui étudie la problématique de la qualité des travaux et l'effet rebond. Il serait également intéressant d'analyser le comportement des entreprises de bâtiments et de comprendre comment le ménage recherche le futur prestataire de ses travaux. Cette recherche est devenue plus facile aujourd'hui grâce à la mise en place d'un site internet¹⁵ dédié qui regroupe des informations sur les entreprises du bâtiment avec le label RGE. Le label RGE, accordé aux entreprises du bâtiment, garantit qu'il s'agit de professionnels du secteur avec l'expérience et les capacités d'entreprendre certains types de travaux. L'obtention du label n'est pas obligatoire du côté des professionnels. En revanche, le ménage doit faire faire les travaux par une entreprise ayant le label RGE pour bénéficier des aides financières tel que CITE.

Une autre piste, peu étudiée jusqu'à présent, nous semble intéressante, celle du confort thermique. Dans le Chapitre 4, nous avons déterminé que plus la température du confort est élevée, plus le ménage est prêt à payer pour la gestion performante de chauffage et pour les énergies renouvelables. Au vu des résultats, nous pensons à plusieurs éléments.

15. <http://renovation-info-service.gouv.fr/trouvez-un-professionnel>

Tout d'abord nous proposons d'intégrer les informations suivantes dans l'enquête :

- Demander à l'enquêté si après les travaux de rénovation il compte augmenter la température de consigne et de combien. Il est possible que pour certaines offres le ménage augmentera la consigne, pour d'autres non. Une offre qui permet de grandes économies d'énergie et qui coûte chère, peut inciter le ménage à optimiser son comportement pour avoir un retour sur investissement plus rapide.
- D'enregistrer les périodes de présence dans le logement pour chaque occupant. Si le ménage n'est pas présent dans le logement durant la journée, il a la possibilité de baisser le chauffage pendant des absences. Mais pour ce faire, il a besoin d'un réglage programmable ou « intelligent ».
- Savoir si le ménage ajuste souvent le chauffage, surtout lors des périodes de grand froid, et de quelle façon. [Liang et al. \(2012\)](#) montrent dans leurs études que les ménages ont tendance à augmenter fortement le chauffage ou la climatisation en rentrant chez eux pour atteindre rapidement le confort souhaité. Une telle gestion est énergivore. Les auteurs préconisent de préchauffer ou pré-climatiser le logement une heure avant le retour du ménage en utilisant par exemple la gestion « intelligente ».
- Demander le changement des comportements de gestion du chauffage qui peut résulter de l'effet rebond ou de l'adaptation du ménage au nouveau équipement.

Nous proposons ensuite d'utiliser le confort dans les modèles discrets-continus ([Dubin et McFadden, 1984](#)) pour mesurer la consommation finale d'énergie. Les DJU mesurent l'écart entre la température intérieure et la température extérieure en hiver. La formule de DJU utilise 18°C comme température intérieure ce qui correspond à la température préconisée par le gouvernement de 19°C (la différence d'1°C vient des apports internes)¹⁶. Nous proposons de remplacer cette température par la température de confort du ménage. Ainsi, les DJU permettront non seulement de tenir compte de la rigueur climatique, mais aussi d'avoir une estimation de la consommation d'énergie plus fiable.

Enfin, nous proposons une troisième piste en utilisant les résultats des modèles de choix discrets dans les modèles d'optimisation de la demande d'énergie à court ou moyen terme. [Papavasiliou et al. \(2010\)](#) et [Cadre et Mercier \(2013\)](#) proposent un modèle d'optimisation de la consommation d'électricité en temps réel pour un agrégateur (ou gestionnaire) de l'éco-quartier. Le but est de savoir si la demande des ménages peut être déplacée des heures de pointes vers les heures creuses et (ou) dans quelle mesure les ménages peuvent réduire leur consommation. Le confort intervient dans la fonction objective en tant que la température intérieure que le ménage aimerait avoir chez lui. La distribution de la température au sein de l'échantillon est considérée comme normale, ce qui semble être le cas si nous regardons les résultats de notre enquête (voir Figure 3.5). Néanmoins, certaines

16. <http://climatheque.meteo.fr>

préférences et comportements changent en fonction de la température de confort préférée affectant ainsi le niveau de la consommation finale d'énergie. A notre avis le meilleur moyen d'intégrer l'hétérogénéité des préférences dans les modèles de ce type, c'est de faire des groupes représentatifs des ménages à l'intérieur desquels les préférences et les comportements sont semblables. Soit le modèle d'optimisation est utilisé pour chaque groupe de ménage et les résultats sont à comparer entre les groupes, soit le modélisateur intègre dans le programme d'optimisation un « module comportemental » qui permettra de personnaliser la fonction de demande compte tenu du type de ménage et son poids dans la demande totale.

Annexe A

Résultats de la classification des ménages selon le degré des contraintes

TABLEAU A.1: Valeur du critère *BIC* pour la classification des habitants des maisons individuelles en 2006

| Nombre des groupes | CED | | Chaudière ind. | | PAC | | Bois | |
|--------------------|--------|---------------|----------------|---------------|--------|----------------|--------|---------------|
| | Type E | Type V | Type E | Type V | Type E | Type V | Type E | Type V |
| 2 | -2655 | -10937 | -4623 | -8699 | -73336 | -103064 | -68387 | -82401 |
| 3 | -5607 | -12857 | -4628 | -10882 | -83808 | -113808 | -68368 | -88344 |
| 4 | -5588 | -15049 | -4608 | -13152 | -83789 | -117838 | -68348 | -90698 |
| 5 | -7552 | -15325 | -6915 | -13358 | -83769 | -119632 | -68328 | -91966 |
| 6 | -9169 | -15580 | -8340 | -13708 | -83750 | -120358 | -72404 | -92689 |
| 7 | -9149 | -15621 | -8321 | -13715 | -83730 | -120344 | -72385 | -93122 |
| 8 | -10244 | -15780 | -9002 | -13867 | -83710 | -120289 | -72365 | -93262 |
| 9 | -10965 | -15764 | -9821 | -13854 | -83691 | -120284 | -72347 | -93377 |
| 10 | -11033 | -15713 | -10375 | -13838 | -90232 | -120769 | -72318 | -93323 |

TABLEAU A.2: Valeur du critère *BIC* pour la classification des habitants des appartements en 2006

| Nombre des groupes | CED | | Chaudière ind. | | Chaudière coll. | | PAC | |
|--------------------|--------|---------------|----------------|---------------|-----------------|--------------|---------|-----------------|
| | Type E | Type V | Type E | Type V | Type E | Type V | Type E | Type V |
| 2 | -10935 | -14867 | -4432 | -7734 | -922 | -1131 | -106116 | -155081 |
| 3 | -10916 | -20906 | -5302 | -9006 | -1823 | -2464 | -117705 | NA ¹ |
| 4 | -14427 | -22907 | -5283 | -9086 | -2376 | -3170 | -117686 | NA |
| 5 | -14407 | -23961 | -6676 | -9918 | -2537 | -3606 | -117667 | NA |
| 6 | -14388 | -24561 | -7629 | -9909 | -2962 | -3777 | -117648 | NA |
| 7 | -16590 | -24808 | -7709 | -10588 | -3255 | -3758 | -117629 | NA |
| 8 | -18197 | -24860 | -7693 | -10580 | -3476 | -3919 | -117609 | NA |
| 9 | -18178 | -25073 | -8354 | -10768 | -3544 | -3896 | -117590 | NA |
| 10 | -18159 | -25052 | -8797 | -10733 | -3687 | -3864 | -117571 | NA |

¹ NA signifie que l'algorithme n'a pas réussi à classer les données en nombre des groupes demandés.

TABLEAU A.3: Valeur du critère *BIC* pour la classification des logements en 2013

| Nombre des groupes | CED | | Chaudière ind. | | | Chaudière coll. | | | PAC | | Bois | |
|--------------------|--------|--------------|----------------|--------|--------|-----------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------|
| | Type E | Type V | Type E | Type V | Type E | Type E | Type V | Type E | Type V | Type E | Type E | Type V |
| 2 | -923 | -975 | -717 | -709 | -1812 | -4487 | -3533 | -3958 | -3350 | -3801 | | |
| 3 | -976 | -1005 | -727 | -724 | -1798 | -4888 | -3519 | -4182 | -3336 | -4074 | | |
| 4 | -961 | -1017 | -736 | -715 | -1783 | -5068 | -3504 | -4265 | -3321 | -4193 | | |
| 5 | -987 | -1003 | -721 | -698 | -2251 | -5125 | -3762 | -4305 | -3592 | -4231 | | |
| 6 | -982 | -992 | -707 | -672 | -2237 | -5189 | -3748 | -4340 | -3578 | -4228 | | |
| 7 | -967 | -971 | -694 | -670 | -2222 | -5197 | -3734 | -4333 | -3563 | -4233 | | |
| 8 | -952 | -950 | -679 | -652 | -2636 | -5199 | -3719 | -4315 | -3549 | -4214 | | |
| 9 | -939 | -935 | -679 | -630 | -2622 | -5195 | -3845 | -4302 | -3685 | -4195 | | |
| 10 | -945 | -923 | -664 | -618 | -2607 | -5175 | -3831 | -4285 | -3670 | -4179 | | |

TABLEAU A.4: Probabilité moyenne pour chaque groupe et par moyen de chauffage

| Probabilité moyenne par groupe | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | | 8 | | 9 | |
|---|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|------|--------------|-------|
| | \mathbb{P} | % | \mathbb{P} | % | \mathbb{P} | % | \mathbb{P} | % | \mathbb{P} | % | \mathbb{P} | % | \mathbb{P} | % | \mathbb{P} | % | \mathbb{P} | % |
| CED maison 2006 | 0,008 | 8 % | 0,02 | 13 % | 0,05 | 14 % | 0,1 | 8 % | 0,22 | 13 % | 0,45 | 18 % | 0,65 | 18 % | 0,809 | 8 % | - | - |
| CED appartement 2006 | 0,008 | 10 % | 0,02 | 13 % | 0,03 | 12 % | 0,05 | 13 % | 0,10 | 16 % | 0,20 | 9 % | 0,44 | 5 % | 0,74 | 11 % | 0,897 | 12 % |
| Chaudière individuelle maison 2006 | 0,167 | 13 % | 0,28 | 14 % | 0,45 | 17 % | 0,69 | 15 % | 0,88 | 6 % | 0,93 | 13 % | 0,97 | 11 % | 0,987 | 11 % | - | - |
| Chaudière individuelle appartement 2006 | 0,02 | 7 % | 0,04 | 11 % | 0,08 | 10 % | 0,15 | 10 % | 0,26 | 20 % | 0,33 | 6 % | 0,42 | 15 % | 0,60 | 18 % | 0,82 | 3,4 % |
| Chaudière individuelle 2013 | 0,20 | 20 % | 0,36 | 36 % | 0,54 | 28 % | 0,76 | 16 % | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Chaudière collective appartement 2006 | 0,03 | 6 % | 0,09 | 12 % | 0,22 | 15 % | 0,36 | 14 % | 0,49 | 15 % | 0,62 | 16 % | 0,72 | 12 % | 0,828 | 11 % | - | - |

Annexe B

Contenue du questionnaire internet, IPSOS 2015

QUESTIONNAIRE

Êtes-vous ?

- 1 Un homme
- 2 Une femme

Veuillez indiquer votre date de naissance.

Votre logement principal est-il... ?

- 1 Une maison
- 2 Un appartement
- 3 Autre (caravane, ferme, etc.)

Êtes-vous propriétaire ou locataire de votre logement actuel ?

- 1 Propriétaire
- 2 Locataire (non HLM)
- 3 Locataire HLM
- 4 Autre (logé à titre gratuit, autre locataire social, etc.)

En quelle année votre logement a-t-il été construit ?

- 1 Avant 1974
- 2 1974 – 1989
- 3 1990 – 1998
- 4 1999 – 2005
- 5 Après 2005
- 6 Je ne sais pas

En quelle année la première personne de votre foyer est-elle arrivée dans le logement ?

Quelle est la surface habitable de votre logement en m² (hors les pièces à usage professionnel) ?

Votre logement est-il équipé en double vitrage ?

- 1 Oui, totalement
- 2 Oui, en partie
- 3 Non
- 4 Je ne sais pas

Les murs donnant sur l'extérieur sont-ils isolés ?

- 1 Oui, totalement

- 2 Oui, en partie
- 3 Non
- 4 Je ne sais pas

La toiture de votre maison est-elle isolée ?

- 1 Oui
- 2 Non
- 3 Je ne sais pas

Quel est le degré de mitoyenneté de la maison ?

- 1. Indépendante
- 2. Mitoyenne sur un côté
- 3. Mitoyenne sur (au moins) deux côtés

Quelle est la forme de votre maison ?

- 1 Compacte (carré ou rectangle)
- 2 Forme en L ou rectangle allongé
- 3 Autre

Quelle est la configuration sous plancher de votre maison ?

- 1 Terre-plein ou extérieur
- 2 Vide sanitaire
- 3 Sous-sol, cave ou autre local non chauffé

Quel est le type de toiture de votre maison ?

- 1 Combles habitables
- 2 Combles perdus
- 3 Toiture terrasse

A quel étage habitez-vous ?

- 1 Au rez-de-chaussée
- 2 Au dernier étage
- 3 Entre deux étages

Votre logement est-il équipé d'une VMC (ventilation mécanique contrôlée) et quelle est son âge ?

- 1 Oui, moins de 10 ans
- 2 Oui, 10 ans ou plus
- 3 Oui, mais je ne connais pas l'âge
- 4 Non

Connaissez-vous le tarif d'électricité auquel vous avez souscrit ?

- 1 Oui
- 2 Non

Pour la suite de ce questionnaire, nous vous invitons à vous munir de votre dernière facture d'électricité. Les images ci-dessous vous montrent où se trouvent les informations qui vous seront demandées dans la suite de l'enquête.

- 1 Je viens de consulter mes factures d'électricité, je connais mon type de tarif électricité et ma consommation
- 2 Je ne peux pas consulter ma facture

Quelle est l'option de votre tarif d'électricité ?

- 1 Option Base
- 2 Option Heures Pleines/Heures Creuses avec heures creuses la nuit uniquement
- 3 Option Heures Plaines/Heures Creuses avec quelques heures creuses durant la journée
- 4 Option Tempo
- 5 Autre

Quelle est votre consommation annuelle d'électricité ?

Quel est le montant annuel en euros de votre facture d'électricité en 2013 ?

Vous diriez que le montant annuel en euros de votre facture d'électricité en 2013 se situe ... ?

- 1 Entre 0 € et 250 €
- 2 Entre 251 € et 500€
- 3 Entre 501 € et 1000 €
- 4 Entre 1001 € et 1500 €
- 5 Entre 1501 € et 2000 €
- 6 Entre 2001 € et 3000 €
- 7 Plus de 3000 €
- 8 Je ne sais pas

Votre logement est-il raccordé au réseau de GAZ ?

- 1 Oui
- 2 Non
- 3 Je ne sais pas

Parmi les énergies ci-dessous, lesquelles utilisez-vous dans votre logement ?

| <i>Code</i> | <i>Energie</i> | <i>Oui</i> | <i>Non</i> |
|-------------|--|--------------------------|--------------------------|
| 1 | Gaz de réseau | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2 | Fioul | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3 | Bois | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4 | Propane ou Butane (en bouteilles ou citerne) | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Quelle est votre consommation annuelle du gaz de réseau ?

Quel est le montant annuel en euros de votre facture de gaz en 2013 ?

Vous diriez que le montant annuel en euros de votre facture de gaz en 2013 se situe ... ?

- 1 Entre 0 € et 250 €
- 2 Entre 251 € et 500€
- 3 Entre 501 € et 1000 €
- 4 Entre 1001 € et 1500 €
- 5 Entre 1501 € et 2000 €
- 6 Entre 2001 € et 3000 €
- 7 Plus de 3000 €
- 8 Je ne sais pas

Quel mode de chauffage principal utilisez-vous dans votre logement ?

- 1 Chaudière collective
- 2 Chaudière individuelle
- 3 Chauffage électrique (convecteurs, panneaux radiants, ...)
- 4 Pompe à chaleur
- 5 Poêle à bois
- 6 Cheminée, insert et autre chauffage au bois
- 7 Autre

Quel est l'âge de votre système de chauffage ?

- 1 Moins de 5 ans
- 2 Entre 5 et 9 ans
- 3 Entre 10 et 14 ans
- 4 Entre 15 et 20 ans
- 5 Plus de 20 ans
- 6 Je ne sais pas

Avez-vous choisi ce système de chauffage ?

- 1 Non, ce système de chauffage a été installé avant mon arrivée
- 2 Oui, j'ai choisi ce logement notamment pour son système de chauffage
- 3 Oui, ce système de chauffage a été installé à ma demande lors de la construction du logement
- 4 Oui, j'ai remplacé l'ancien système de chauffage par l'actuel

Pour quelle(s) raison(s) avez-vous remplacé le chauffage ?

- 1 L'ancien chauffage est tombé en panne
- 2 Pour avoir un chauffage plus puissant
- 3 Pour diminuer les dépenses annuelles liées au chauffage
- 4 Pour diminuer la consommation d'énergie
- 5 Pour changer le type de chauffage (par exemple : remplacer la chaudière au fioul par les convecteurs électriques)
- 6 Pour d'autres raisons

Quel était l'ancien mode de chauffage ?

- 1 Chaudière collective
- 2 Chaudière individuelle
- 3 Chauffage électrique
- 4 Pompe à chaleur
- 5 Poêle à bois
- 6 Cheminée, insert et autre chauffage au bois
- 7 Autre
- 8 Je ne sais pas

Quel type d'énergie est principalement utilisé par votre chaudière ?

- 1 Gaz de réseau
- 2 Fioul
- 3 GPL (Propane et/ou Butane)
- 4 Bois
- 5 Electricité
- 6 Autre
- 7 Je ne sais pas

Utilisez-vous avec votre pompe à chaleur le(s) chauffage(s) d'appoint ?

- 1 Non
- 2 Oui, le chauffage électrique
- 3 Oui, une chaudière en relève de la pompe
- 4 Oui, le chauffage à bois
- 5 Oui, d'autres moyens de chauffage d'appoint

Comment réglez-vous la température du chauffage dans votre logement ?

- 1 Je change manuellement les réglages de mon chauffage pour avoir la température souhaitée
- 2 J'ai un programmateur de température
- 3 Je peux changer les réglages de mon chauffage à distance
- 4 J'ai un thermostat intelligent qui anticipe la météo et les périodes de présence dans le logement
- 5 La régulation se fait au niveau de l'immeuble
- 6 Je ne sais pas

Quelle est, en règle générale, la température de votre SEJOUR ou PIECE PRINCIPALE de vie en HIVER ?

- 1 Moins de 16 C°
- 2 16 C°
- 3 17 C°
- 4 18 C°
- 5 19 C°
- 6 20 C°
- 7 21 C°
- 8 22 C°
- 9 23 C°
- 10 24 C°
- 11 Plus de 24 C°
- 12 Je ne sais pas

Quelle est, en règle générale, la température de votre ou de vos CHAMBRE(S) en HIVER ?

- 1 Moins de 16 C°
- 2 16 C°
- 3 17 C°
- 4 18 C°
- 5 19 C°
- 6 20 C°
- 7 21 C°
- 8 22 C°
- 9 23 C°
- 10 24 C°
- 11 Plus de 24 C°
- 12 Je ne sais pas

En période hivernale, estimez-vous que vous atteignez la température de confort dans votre logement ?

- 1 Oui toujours
- 2 Oui, sauf en cas de vague de froid exceptionnelle
- 3 Non, car mon logement est mal isolé
- 4 Non, car cela me coûte trop cher
- 5 Non, car mon logement est mal isolé et cela me coûte trop cher

Quelle est votre température de confort ? (uniquement ceux qui sont en inconfort)

- 1 Moins de 16 C°
- 2 16 C°
- 3 17 C°
- 4 18 C°
- 5 19 C°
- 6 20 C°
- 7 21 C°
- 8 22 C°

- 9 23 C°
- 10 24 C°
- 11 Plus de 24 C°
- 12 Je ne sais pas

Quel moyen utilisez-vous pour produire l'eau chaude sanitaire ?

- 1 Un appareil indépendant (chauffe-eau, cumulus, ballon, accumulateur...)
- 2 Une chaudière individuelle
- 3 Une chaudière collective
- 4 Je ne sais pas

Quelle énergie utilisez-vous pour produire l'eau chaude sanitaire ?

- 1 L'électricité
- 2 Le gaz de réseau
- 3 Le Fioul
- 4 Une autre source d'énergie
- 5 Je ne sais pas

Quelle énergie utilisez-vous pour la cuisson (hors micro-onde) ?

- 1 Le Gaz de réseau seul
- 2 L'électricité seule
- 3 Le butane-propane en bouteille ou citerne seuls
- 4 L'électricité et gaz de réseau
- 5 L'électricité et butane-propane en bouteille ou en citerne

En général, à quelle fréquence les membres de votre foyer cuisinent-ils dans le logement (vous y compris) ?

- 1 Quotidiennement ou presque
- 2 Uniquement le week-end
- 3 2 à 3 fois par semaine
- 4 2 à 3 fois par mois
- 5 Très rarement ou jamais

Vous y compris, combien de personnes vivent dans votre logement ?

Indiquez tous les adultes, y compris vous-même et tous les enfants vivant ou habitant à cette adresse, et ce, depuis au moins deux mois - Veuillez choisir une réponse

- 1 1 seule personne (vous-même)
- 2 2
- 3 3
- 4 4
- 5 5
- 6 6
- 7 7
- 8 8
- 9 9
- 10 10
- 11 11
- 12 12 personnes et plus

Combien d'enfants vivent avec vous dans le logement?

| <i>Code</i> | <i>Tranche d'âge</i> | <i>Nombre d'enfants</i> |
|-------------|------------------------|-------------------------|
| 13 | Moins de 3 ans | / / |
| 14 | Entre 3 ans et 11 ans | / / |
| 15 | Entre 12 ans et 13 ans | / / |
| 16 | 14 ans et plus | / / |

Quelle est votre situation professionnelle actuelle ?

- 1 Salarié à plein temps
- 2 Salarié à temps partiel
- 3 Travaille à son compte (dont chef d'entreprise et profession libérale)
- 4 Ne travaille pas actuellement mais en recherche d'emploi
- 5 Ne travaille pas actuellement et ne recherche pas d'emploi / en incapacité de travail
- 6 Femme au foyer
- 7 Retraité(e)
- 8 Etudiant/élève / En enseignement à temps plein

Quelle est votre profession ?

Si vous ne travaillez pas actuellement quelle était votre précédente profession ?

Quelle est votre situation de famille ?

- 1 Célibataire
- 2 En union libre
- 3 Marié(e)
- 4 Divorcé(e)
- 5 Veuf/ve
- 6 Pacsé(e) (Pacte civil de solidarité).

Quel est le niveau de revenu MENSUEL NET de votre MENAGE (y compris les salaires net, allocations familiales, pensions et autres revenus) ?

- 7 Moins de 600 € par mois
- 8 601 à 900 € par mois
- 9 901 à 1200 € par mois
- 10 1201 à 1500 € par mois
- 11 1501 à 1900 € par mois
- 12 1901 à 2700 € par mois
- 13 2701 à 3800 € par mois
- 14 3801 à 5300 € par mois
- 15 5301 à 8900 € par mois
- 16 Plus de 8900 € par mois
- 17 Je ne souhaite pas répondre

SITUATION 1

Imaginez cette première situation ...
 Vous habitez dans votre logement actuel. Ce logement vous appartient et il est équipé du chauffage individuel dont vous êtes le seul bénéficiaire. Vous n'avez pas de crédit logement à rembourser.
En démarrant votre chauffage pour la nouvelle saison, vous remarquez que celui-ci ne fonctionne plus. L'avis du technicien est sans appel : il faut le remplacer.

On vous propose 3 offres de chauffage (A, B et C). Chaque offre a ses propres caractéristiques, toutes différentes les unes des autres. Certaines situations peuvent vous paraître peu réalistes, mais imaginez que vous avez UNIQUEMENT TROIS offres et vous devez en choisir UNE.

Remarque 1 : Votre logement a accès à toutes les sources d'énergie.

Remarque 2 : Vous avez suffisamment de temps pour choisir et faire les travaux avant que la saison de chauffage débute.

Parmi les trois offres ci-dessous, laquelle choisiriez-vous ?
Veillez choisir une réponse

| | Offre A | Offre B | Offre C |
|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Coût d'installation | | | |
| Réduction de la facture énergie | | | |
| Type de chauffage ⓘ | | | |
| Garantie contre panne | | | |
| Réglage du chauffage ⓘ | | | |
| CHOIX | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

SITUATION 2

Cette situation est identique à la précédente mais les offres proposées sont différentes.

Pour rappel : vous habitez dans votre **logement actuel**. Ce logement vous appartient et il est **équipé du chauffage individuel** dont vous êtes le seul bénéficiaire. Vous n'avez **pas de crédit logement à rembourser**.

En démarrant votre chauffage pour la nouvelle saison, vous remarquez que celui-ci ne fonctionne plus. L'avis du technicien est sans appel : il faut le remplacer.

On vous propose 3 offres de chauffage (A, B et C). Chaque offre a ses propres caractéristiques, toutes différentes les unes des autres. Certaines situations peuvent vous paraître peu réalistes, mais **imaginez que vous avez UNIQUEMENT TROIS offres et vous devez en choisir UNE.**

Remarque 1 : Votre logement a accès à toutes les sources d'énergie.

Remarque 2 : Vous avez suffisamment de temps pour choisir et faire les travaux avant que la saison de chauffage débute.

Parmi les trois offres ci-dessous, laquelle choisiriez-vous ?
Veuillez choisir une réponse

| | | Offre A | Offre B | Offre C |
|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Aide financière | Coût d'installation | | | |
| | Réduction de la facture énergie | | | |
| | Energie de chauffage | | | |
| | Type d'aide | | | |
| | Montant d'aide | | | |
| Diagnostic énergétique gratuit | Disponibilité d'aide | | | |
| | Prêt | | | |
| | CHOIX | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

SITUATION 3

Voici maintenant une nouvelle situation : vous habitez dans votre logement actuel. Ce logement vous appartient. Vous n'avez pas de crédit logement à rembourser.

Imaginer que vous avez un **CHAUFFAGE** qui fonctionne à l'**ELECTRICITE**. Ce chauffage est tombé en panne et doit être remplacé. Vous décidez d'**INSTALLER** un nouveau chauffage qui fonctionne à l'**ELECTRICITE**.

Nous vous proposons une estimation de votre facture d'électricité pour le logement avec le chauffage électrique. Ce montant s'élève **XXXX €** pour l'année 2013. Retenez ce chiffre comme votre niveau de facture d'électricité avec l'ancien système de chauffage.

Parmi les trois offres ci-dessous, laquelle choisiriez-vous ?
Veuillez choisir une réponse

| | Offre A | Offre B | Offre C |
|--|----------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Coût d'installation | | | |
| Réduction de la facture énergie * | | | |
| Réglage du chauffage ⓘ | | | |
| Tarif d'électricité ⓘ | PROG. : INSERT IMAGE | PROG. : INSERT IMAGE | PROG. : INSERT IMAGE |
| Montant de l'abonnement annuel d'électricité | | | |
| Durée du contrat** | | | |
| CHOIX | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

* Si la température intérieure est à 19 C°

** Le contrat vous assure que pendant la durée de ce contrat les prix d'électricité resteront les mêmes

SITUATION 4

Imaginez la **nouvelle situation suivante**

Vous habitez dans votre logement actuel. **Ce logement vous appartient et il est équipé du chauffage individuel dont vous êtes le seul bénéficiaire.** Vous n'avez pas de crédit logement à rembourser.

Votre chauffage fonctionne, toutefois vous estimez que la facture d'énergie que vous payez est trop élevée. Vous aimeriez améliorer les performances énergétiques de votre logement pour **payer moins et/ou pour préserver l'environnement.** Vous hésitez entre 4 choix :

- Remplacer uniquement votre chauffage par un chauffage plus performant.
- Isoler le logement pour abaisser les déperditions d'énergie et conserver le chauffage actuel.
- Isoler le logement ET changer le chauffage.
- Ne rien faire

Parmi les offres ci-dessous, laquelle choisiriez-vous ?

Veuillez choisir une réponse

| | Chauffage | Isolation | Chauffage Et Isolation | |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Montant des travaux | | | | |
| Réduction de la facture énergie*** | | | | |
| Type de chauffage ⓘ | | PROG. : empty | | |
| Aide financière ⓘ | Type d'aide | | | |
| | Montant d'aide | | | |
| | Disponibilité d'aide | | | |
| | Prêt | | | |
| Gêne due aux travaux | PROG. : empty | | | |
| Réglage du chauffage ⓘ | | PROG. : empty | | |
| CHOIX | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | | | | Ne rien faire |

Annexe C

Statistiques descriptives de l'enquête IPSOS 2015

TABLEAU C.1: Situation 1 – deux offres les plus et les moins choisies, IPSOS 2015

| Nb. de répondants ayant choisi l'offre | Montant d'investissement | Réduction de la facture | Moyen de chauffage | Garantie | Réglage du chauffage |
|--|--------------------------|-------------------------|--------------------|----------|----------------------|
| 84 | 5000 € | 40 % | PAC | 4ans | Manuel |
| 72 | 5000 € | 55 % | PAC | Aucune | Piloté à distance |
| 7 | 20000 € | 10 % | Poêle à bois | 2ans | Piloté à distance |
| 2 | 20000 € | 10 % | CED | Aucune | Piloté à distance |

TABLEAU C.2: Situation 2 – deux offres les plus et les moins choisies, IPSOS 2015

| Nb. de répondants ayant choisi l'offre | Montant d'investissement | Réduction de la facture | Energie de chauffage | Aide financière | Prêt | DPE |
|--|--------------------------|-------------------------|----------------------|--|----------|-----|
| 86 | 5000 € | 55% | ENR | ANAH 1500 € immédiat | Taux 0 % | Non |
| 71 | 10000 € | 25 % | ENR | Fournisseur d'énergie 4000 € immédiat | Taux 0 % | Oui |
| 9 | 15000 € | 10 % | Bois | Fournisseur d'énergie 3000 € Dans 1 an | Aucun | Oui |
| 5 | 20000 € | 10 % | Bois | ANAH 2000 € Dans 1 an | Taux 4 % | Oui |

TABLEAU C.3: Situation 3 – deux offres les plus et les moins choisies, IPSOS 2015

| Nb. de répondants ayant choisi l'offre | Montant d'investissement | Réduction de la facture | Réglage de chauffage | Tarif | Abonnement | Durée du contrat |
|--|--------------------------|-------------------------|----------------------|------------|------------|------------------|
| 80 | 50000 € | 55 % | Piloté à distance | Tempo | 200 €/an | 4 ans |
| 70 | 10000 € | 40 % | Intelligent | Saisonnier | 150 €/an | 4 ans |
| 10 | 15000 € | 10 % | Programmable | Saisonnier | 300 €/an | 1 an |
| 9 | 20000 € | 10 % | Programmable | Base | 250 €/an | 4 ans |

TABLEAU C.4: Statistiques descriptives pour les variables continues, IPSOS 2015

| Variable | Min | Mean | Max | Std. dev. |
|---|------|-------|------|-----------|
| Number of inhabitants (house) | 1 | 2.65 | 7 | 1.18 |
| Number of inhabitants (apartment) | 1 | 1.8 | 7 | 0.94 |
| Living area in m ² (house) | 38 | 123 | 450 | 55.9 |
| Living area in m ² (apartment) | 10 | 66.5 | 300 | 29.3 |
| Indoor temperature °C (living room) | 15.5 | 19.84 | 24.5 | 1.35 |
| Indoor temperature °C (bedroom) | 15.5 | 18.31 | 24.5 | 1.27 |
| Comfort temperature °C | 16.5 | 20.1 | 24.5 | 1.27 |
| Respondent age (house) | 18 | 49.9 | 75 | 16.1 |
| Respondent age (apartment) | 18 | 45.8 | 75 | 17.2 |

TABLEAU C.5: Statistiques descriptives pour les variables continues en %, IPSOS 2015

| | Dwelling type | | |
|----------------------------------|---------------|-------|-----------|
| | Total | House | Apartment |
| No access to gas grid | 61.7 | 64.8 | 55.6 |
| No double-glazing | 10.8 | 5.9 | 18.9 |
| Partial or total wall insulation | 69.7 | 79.7 | 53.1 |
| Thermal discomfort | 13.7 | 9.9 | 19.8 |
| Income per month in euro | | | |
| < 1200 | 5.6 | 3.1 | 9.7 |
| 1201–1900 | 19.1 | 13.7 | 28.1 |
| 1901–2700 | 19.9 | 20.9 | 18.1 |
| 2701–3800 | 24.0 | 27.4 | 18.5 |
| > 3800 | 19.7 | 22.6 | 14.9 |
| Confidential | 11.7 | 12.3 | 10.7 |
| Occupancy status | | | |
| Owners | 72.7 | 87.4 | 48.5 |
| Tenants (without social tenants) | 27.3 | 12.6 | 51.5 |
| Age of dwelling | | | |
| pre-1974 | 39.7 | 38.1 | 42.4 |
| 1974-1989 | 23.4 | 25.1 | 20.7 |
| 1990-1998 | 8.9 | 9.6 | 7.9 |
| post-1998 | 23.9 | 25.9 | 7.6 |
| unknown | 4.1 | 1.4 | 8.3 |
| Dwelling type | | | |
| Detached house | 62.3 | – | – |
| Apartment | 37.7 | – | – |
| Urban density | | | |
| Rural | 19.5 | 29.9 | 2.3 |
| Urban | 65.5 | 63.2 | 69.4 |
| Paris area | 15.0 | 6.9 | 28.3 |
| Climate zone | | | |
| Mediterranean | 13.6 | 12.5 | 15.4 |
| Middle oceanic | 10.4 | 12.7 | 6.7 |
| Oceanic | 10.6 | 13.1 | 6.5 |
| Fresh oceanic | 12.0 | 13.7 | 8.4 |
| Modified oceanic | 33.2 | 26.1 | 44.9 |
| Semi-continental | 11.5 | 13.1 | 9.5 |
| Mountain | 8.7 | 8.8 | 8.6 |
| Space heating system | | | |
| Individual boiler | 37.0 | 44.1 | 25.4 |
| Collective boiler | 12.2 | 0.7 | 31.1 |
| Heat pump | 7.0 | 10.8 | 0.8 |
| Direct electric heating | 30.7 | 26.6 | 37.3 |
| Chimney and wood stove | 9.2 | 14.5 | 0.4 |
| Other | 3.9 | 3.3 | 5 |
| Setting of indoor temperature | | | |
| None | 45.2 | 40.9 | 52.2 |
| Programmable | 41.9 | 51.9 | 25.5 |
| Remote control | 1.9 | 2.5 | 1.2 |
| SMART | 3.3 | 4.4 | 0.9 |
| Setting at the building level | 7.3 | 0.2 | 18.9 |

Annexe D

Résultats intermédiaires d'estimation des préférences, IPSOS 2015

TABLEAU D.1: Résultats d'estimation pour la situation 1 en fonction de type du logement

| | Tous les logements | Maisons individuelles | Appartements |
|--------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| Investissement | −0.112*** (−17.11) | −0.0961*** (−12.75) | −0.162*** (−11.99) |
| Réduction | 3.247*** (13.84) | 3.264*** (11.51) | 3.427*** (7.81) |
| Garantie | 0.169*** (8.46) | 0.164*** (6.52) | 0.192*** (5.57) |
| CED [†] | −0.0482 (−0.47) | −0.139 (−1.09) | 0.0760 (0.43) |
| PAC [†] | 0.335*** (3.85) | 0.419*** (3.89) | 0.200 (1.33) |
| Poêle à bois [†] | −0.354*** (−3.90) | −0.0775 (−0.71) | −1.020*** (−5.90) |
| Programmable [‡] | 0.485*** (5.23) | 0.504*** (4.46) | 0.512*** (3.07) |
| Piloté à distance [‡] | 0.203* (2.20) | 0.211 (1.86) | 0.156 (0.94) |
| Intelligent [‡] | 0.412*** (4.42) | 0.456*** (3.98) | 0.357* (2.15) |
| Observations | 5379 | 3501 | 1878 |
| Log-vraisemblance | −1618.79 | −1062.70 | −528.54 |
| Pseudo ρ^2 | 0.178 | 0.171 | 0.231 |
| Pseudo $\bar{\rho}^2$ ajusté | 0.174 | 0.164 | 0.218 |

z statistiques entre parenthèses

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

[†] par rapport à la chaudière à gaz (catégorie de référence)

[‡] par rapport au réglage manuel (catégorie de référence)

TABLEAU D.2: Résultats d'estimation pour la situation 1 en intégrant pas à pas les effets économiques

| | Modèle 1 | Modèle 2 | Modèle 3 | Modèle 4 |
|------------------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Investissement (M) | -0.0968*** (-12.91) | -0.0971*** (-12.93) | -0.106*** (-13.39) | -0.111*** (-13.63) |
| Investissement (A) | -0.161*** (-12.25) | -0.162*** (-12.30) | -0.166*** (-12.31) | -0.172*** (-12.53) |
| Réduction | 3.314*** (13.90) | 3.331*** (13.95) | 3.523*** (14.20) | 3.533*** (14.24) |
| CED [†] | -0.0726 (-0.70) | -0.0776 (-0.75) | -0.0386 (-0.36) | -0.0380 (-0.35) |
| PAC [†] (M) | 0.453*** (4.33) | 0.442*** (4.23) | 0.856*** (7.44) | 0.867*** (7.51) |
| PAC [†] (A) | 0.142 (1.03) | 0.141 (1.03) | 0.509*** (3.53) | 0.508*** (3.51) |
| Poêle [†] (M) | -0.0483 (-0.46) | -0.0651 (-0.62) | 0.361** (3.16) | 0.360** (3.14) |
| Poêle [†] (A) | -1.086*** (-6.83) | -1.082*** (-6.80) | -0.698*** (-4.23) | -0.694*** (-4.20) |
| Garantie | 0.172*** (8.47) | 0.172*** (8.48) | 0.186*** (8.86) | 0.186*** (8.85) |
| Programmable [‡] (19°C) | 0.386*** (3.41) | 0.391*** (3.45) | 0.456*** (3.87) | 0.452*** (3.83) |
| Programmable [‡] (> 19°C) | 0.737*** (4.68) | 0.717*** (4.53) | 0.715*** (4.36) | 0.705*** (4.30) |
| Intelligent [‡] (19°C) | 0.225 (1.94) | 0.318** (2.61) | 0.378** (2.97) | 0.367** (2.88) |
| Intelligent [‡] (> 19°C) | 0.790*** (5.03) | 0.868*** (5.40) | 0.919*** (5.52) | 0.886*** (5.29) |
| Piloté [‡] (19°C) | 0.0440 (0.38) | 0.144 (1.17) | 0.185 (1.44) | 0.192 (1.50) |
| Piloté [‡] (> 19°C) | 0.475** (3.03) | 0.557*** (3.47) | 0.598*** (3.60) | 0.577*** (3.48) |
| Inertie réglage | | 0.223* (2.53) | 0.253** (2.76) | 0.247** (2.70) |
| Inertie chauffage | | | 1.234*** (12.91) | 1.240*** (12.93) |
| Signal de qualité | | | | -0.289** (-3.00) |
| Observations | 5379 | 5379 | 5379 | 5379 |
| Log-vraisemblance | -1587.5 | -1584.3 | -1494.7 | -1490.1 |
| Pseudo ρ^2 | 0.194 | 0.196 | 0.241 | 0.244 |
| AIC | 3205.1 | 3200.7 | 3023.3 | 3016.3 |
| BIC | 3303.9 | 3306.1 | 3135.4 | 3134.9 |

z statistiques entre parenthèses

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ [†] par rapport à la chaudière à gaz (catégorie de référence)[‡] par rapport au réglage manuel (catégorie de référence)

M – maisons individuelles, A – appartements

TABLEAU D.3: Résultats d'estimation pour la situation 1 avec et sans effet revenu

| | Sans Effet Revenu | Avec Effet Revenu |
|--|-----------------------|-----------------------|
| Investissement (M) | -0.115*** (-13.11) | |
| Investissement (A) | -0.164*** (-11.42) | |
| Réduction | 3.459*** (13.16) | 3.465*** (13.13) |
| Garantie | 0.188*** (8.44) | 0.189*** (8.47) |
| CED† | -0.0673 (-0.59) | -0.0784 (-0.68) |
| PAC† (M) × Température confort (°C) | 0.0437*** (6.95) | 0.0434*** (6.89) |
| PAC† (A) × Température confort (°C) | 0.476** (3.12) | 0.473** (3.09) |
| Poêle† (M) | 0.341** (2.79) | 0.340** (2.78) |
| Poêle† (A) | -0.694*** (-3.97) | -0.691*** (-3.94) |
| Programmable‡ × Température confort (°C) | 0.0274*** (5.18) | 0.0278*** (5.24) |
| Intelligent‡ × Température confort (°C) | 0.0297*** (5.15) | 0.0302*** (5.23) |
| Piloté‡ × Température confort (°C) | 0.0171** (3.01) | 0.0175** (3.06) |
| Signal de qualité | -0.315*** (-3.06) | -0.326*** (-3.13) |
| Inertie chauffage | 1.269*** (12.38) | 1.274*** (12.40) |
| Inertie réglage | 0.211* (2.19) | 0.220* (2.27) |
| M : Investissement (< 1500€) | | -0.110*** (-3.87) |
| M : Investissement (1501€- 1900€) | | -0.127*** (-4.67) |
| M : Investissement (1901€- 2700€) | | -0.128*** (-7.19) |
| M : Investissement (2701€- 3800€) | | -0.129*** (-8.48) |
| M : Investissement (> 3800€) | | -0.0859*** (-5.49) |
| A : Investissement (< 1500€) | | -0.167*** (-4.98) |
| A : Investissement (1501€- 1900€) | | -0.143*** (-4.49) |
| A : Investissement (1901€- 2700€) | | -0.165*** (-5.47) |
| A : Investissement (2701€- 3800€) | | -0.149*** (-4.97) |
| A : Investissement (> 3800€) | | -0.194*** (-6.21) |
| Observations | 4755 | 4755 |
| Log-vraisemblance | -1317.7 | -1314.3 |
| Pseudo ρ^2 | 0.243 | 0.245 |
| AIC | 2665.4 | 2674.5 |
| BIC | 2762.4 | 2823.3 |

z statistiques entre parenthèses

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

† par rapport à la chaudière à gaz (catégorie de référence)

‡ par rapport au réglage manuel (catégorie de référence)

M – maisons individuelles, A – appartements

TABLEAU D.4: Résultats d'estimation pour la situation 2 selon le type du logement

| | Tous les logements | Maisons | Appartements |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| Investissement (1000 €) | -0.106*** (-11.78) | -0.0943*** (-9.06) | -0.136*** (-7.44) |
| Réduction (%) | 3.053*** (15.42) | 3.148*** (12.76) | 2.983*** (8.76) |
| Electricité [†] | 0.0842 (0.98) | 0.118 (1.10) | 0.0241 (0.16) |
| ENR [†] | 0.464*** (5.34) | 0.491*** (4.55) | 0.430** (2.88) |
| Bois [†] | -0.424*** (-4.63) | -0.241* (-2.17) | -0.802*** (-4.77) |
| Fournisseur d'énergie [‡] | 0.107 (1.20) | 0.159 (1.46) | -0.00241 (-0.02) |
| ANAH [‡] | 0.118 (1.30) | 0.115 (1.04) | 0.136 (0.85) |
| Aide fiscale [‡] | 0.274** (3.11) | 0.255* (2.36) | 0.311* (2.01) |
| Aide disponible immédiatement | 0.267*** (4.24) | 0.211** (2.70) | 0.364*** (3.30) |
| Montant d'aide (1000 €) | 0.164*** (6.84) | 0.173*** (6.31) | 0.130** (2.58) |
| Prêt à 0% | 0.469*** (6.14) | 0.483*** (5.15) | 0.466*** (3.44) |
| Prêt à 4% | -0.00808 (-0.10) | -0.00975 (-0.10) | -0.0143 (-0.10) |
| DPE | 0.199** (3.17) | 0.0554 (0.71) | 0.492*** (4.46) |
| Observations | 5379 | 3501 | 1878 |
| Log-Vraisemblance | -1693.9 | -1110.4 | -564.5 |
| Pseudo ρ^2 | 0.140 | 0.134 | 0.179 |
| Pseudo $\bar{\rho}^2$ ajusté | 0.133 | 0.124 | 0.16 |
| AIC | 3413.7 | 2246.8 | 1155.0 |
| BIC | 3499.4 | 2326.9 | 1227.0 |

z statistique entre parenthèses

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ [†] par rapport au gaz naturel (catégorie de référence)[‡] par rapport à l'aide des collectivités locales (catégorie de référence)

TABLEAU D.5: Résultats d'estimation pour la situation 2 en fonction d'acceptabilité de limiter le chauffage à 19°C

| | Acceptent d'avoir $\leq 19^\circ\text{C}$ | | N'acceptent pas 19°C | |
|------------------------------------|---|---------|------------------------------------|---------|
| M-Investissement (1000 €) | -0.0871*** | (-7.18) | -0.115*** | (-6.38) |
| A-Investissement (1000 €) | -0.156*** | (-8.66) | -0.150*** | (-6.28) |
| Réduction (%) | 3.110*** | (12.34) | 3.257*** | (9.26) |
| Électricité [†] | -0.0897 | (-0.79) | 0.188 | (1.24) |
| ENR [†] | 0.647*** | (5.53) | 0.908*** | (5.77) |
| M-bois [†] | -0.111 | (-0.82) | -0.164 | (-0.86) |
| A-bois [†] | -0.417* | (-2.13) | -0.758** | (-2.99) |
| Fournisseur d'énergie [‡] | -0.0601 | (-0.53) | 0.356* | (2.23) |
| ANAH [‡] | -0.0526 | (-0.46) | 0.413* | (2.56) |
| Aide fiscale [‡] | 0.214 | (1.92) | 0.453** | (2.85) |
| Aide disponible immédiatement | 0.262** | (3.22) | 0.280* | (2.56) |
| Montant d'aide (1000 €) | 0.166*** | (5.46) | 0.168*** | (3.94) |
| Prêt à 0% | 0.407*** | (4.13) | 0.605*** | (4.54) |
| Prêt à 4% | 0.0232 | (0.23) | 0.0328 | (0.24) |
| M-DPE | 0.121 | (1.24) | -0.0265 | (-0.19) |
| A-DPE | 0.625*** | (4.34) | 0.432* | (2.36) |
| Inertie énergie | 0.893*** | (7.57) | 1.226*** | (7.55) |
| Signal-qualité | -0.144 | (-1.20) | -0.381 | (-1.86) |
| Observations | 3384 | | 1995 | |
| Log-Vraisemblance | -1033.0 | | -571.6 | |
| Pseudo ρ^2 | 0.166 | | 0.218 | |
| AIC | 2102.1 | | 1179.2 | |
| BIC | 2212.4 | | 1280.0 | |

z statistiques entre parenthèses

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ [†] par rapport au gaz naturel (catégorie de référence)[‡] par rapport à l'aide des collectivités locales (catégorie de référence)

TABLEAU D.6: Résultats d'estimation pour la situation 2 avec et sans effet revenu

| | (1) | | (2) | |
|--------------|------------|----------|------------|---------|
| | choix | | choix | |
| choix | | | | |
| minv | -0.0958*** | (-9.53) | | |
| ainv | -0.152*** | (-10.59) | | |
| s2reduc_ | 3.153*** | (15.44) | 3.057*** | (15.14) |
| eelec | 0.0119 | (0.13) | 0.0125 | (0.14) |
| eenr | 0.739*** | (7.91) | 0.734*** | (7.91) |
| mebois | -0.137 | (-1.26) | -0.106 | (-0.97) |
| aebois | -0.551*** | (-3.58) | -0.505*** | (-3.31) |
| okedfgdf | -0.0743 | (-0.65) | -0.0558 | (-0.49) |
| nonedfgdf | 0.360* | (2.33) | 0.386* | (2.51) |
| okfisc | 0.215 | (1.92) | 0.203 | (1.83) |
| nonfisc | 0.448** | (2.89) | 0.460** | (2.98) |
| okanah | -0.0618 | (-0.53) | -0.0780 | (-0.67) |
| nonanah | 0.423** | (2.70) | 0.450** | (2.90) |
| daide | 0.258*** | (3.98) | 0.229*** | (3.57) |
| s2maide_ | 0.164*** | (6.67) | 0.110*** | (4.81) |
| pret0 | 0.479*** | (6.08) | 0.467*** | (5.97) |
| pret4 | 0.0298 | (0.37) | 0.0150 | (0.19) |
| mdpe | 0.0675 | (0.85) | 0.0753 | (0.95) |
| adpe | 0.538*** | (4.79) | 0.532*** | (4.75) |
| mmchau | 1.007*** | (10.61) | 0.997*** | (10.53) |
| signal | -0.200* | (-1.96) | -0.151 | (-1.46) |
| t1minv | | | -0.104*** | (-3.79) |
| t2minv | | | -0.0509* | (-2.09) |
| t3minv | | | -0.115*** | (-6.54) |
| t4minv | | | -0.0560*** | (-3.78) |
| t5minv | | | -0.0742*** | (-4.57) |
| t1ainv | | | -0.128*** | (-4.42) |
| t2ainv | | | -0.170*** | (-5.53) |
| t3ainv | | | -0.127*** | (-4.16) |
| t4ainv | | | -0.129*** | (-4.49) |
| t5ainv | | | -0.0934** | (-3.02) |
| Observations | 5379 | | 5379 | |
| Pseudo R^2 | 0.181 | | 0.172 | |
| AIC | 3268.3 | | 3318.9 | |
| BIC | 3406.7 | | 3510.0 | |
| ll | -1613.1 | | -1630.5 | |

t statistics in parentheses

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Test Wald avec l'hypothèse $H_0 : \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5$, avec $w = 10.07 \sim \chi^2(4)$ ($w = 3.26 \sim \chi^2(4)$)
et p-value= 0.0392 (0.516) pour les habitants des maisons individuelles (appartements)

TABLEAU D.7: Résultats intermédiaire d'estimation du modèle MNL (S4)

| | Avec refus | | Sans refus | |
|---|------------|---------|------------|---------|
| ASC_j : Chauffage | -0.372* | (-1.83) | -0.450*** | (-4.01) |
| ASC_j : Isolation | 0.0979 | (0.53) | 0.0621 | (0.43) |
| ASC_j : Chauffage & Isolation | -0.0197 | (-0.08) | Référence | |
| M-Investissement (1000 €) | -0.0673*** | (-5.79) | -0.0784*** | (-5.69) |
| A-Investissement (1000 €) | -0.141*** | (-7.33) | -0.166*** | (-7.17) |
| Réduction (%) | 0.02181*** | (11.22) | 0.02373*** | (11.18) |
| M-Montant d'aide (1000 €) | 0.0420 | (1.56) | 0.0469 | (1.61) |
| A-Montant d'aide (1000 €) | 0.237*** | (4.61) | 0.253*** | (4.56) |
| CED [†] | -0.0196 | (-0.17) | -0.0288 | (-0.23) |
| PAC [†] | 0.571*** | (5.18) | 0.584*** | (4.86) |
| M-Poêle à bois [†] | 0.0465 | (0.35) | 0.0341 | (0.24) |
| A-Poêle à bois [†] | -0.155 | (-0.92) | -0.227 | (-1.27) |
| Aide : ANAH [§] | -0.334*** | (-3.60) | -0.379*** | (-3.75) |
| Aide : Fiscale [§] | -0.0840 | (-0.93) | -0.118 | (-1.20) |
| Aide : Fournisseur d'énergie [§] | -0.181** | (-1.99) | -0.221** | (-2.24) |
| Aide : Immédiat | -0.0230 | (-0.36) | -0.0377 | (-0.54) |
| Prêt à taux 0% | 0.327*** | (3.62) | 0.374*** | (3.84) |
| Prêt à taux 2% | 0.100 | (1.07) | 0.118 | (1.16) |
| Prêt à taux 4% | -0.0152 | (-0.16) | -0.0132 | (-0.13) |
| En désordre (3 semaines) [£] | 0.00133 | (0.01) | 0.0270 | (0.23) |
| Hors logement (2 semaines) [£] | -0.336*** | (-3.02) | -0.369*** | (-3.05) |
| Hors logement (3 semaines) [£] | -0.395*** | (-3.49) | -0.444*** | (-3.62) |
| Programmable [#] | 0.176 | (1.55) | 0.142 | (1.16) |
| Piloté à distance [#] | 0.189 | (1.52) | 0.204 | (1.50) |
| Intelligent [#] | 0.325*** | (2.71) | 0.349*** | (2.67) |
| Inertie chauffage \times Age | 0.0105*** | (5.10) | 0.0128*** | (5.52) |
| Inertie réglage \times Age | 0.000847 | (0.42) | 0.000847 | (0.38) |
| Observations | 7172 | | 4233 | |
| Log - Vraisemblance | -2314.2 | | -1371.6 | |
| Pseudo ρ^2 | 0.069 | | 0.115 | |
| Pseudo $\bar{\rho}^2$ ajusté | 0.058 | | 0.098 | |
| Nombre de bonnes prédictions | 40.7% | | 52.9% | |
| AIC | 4682.4 | | 2795.1 | |
| BIC | 4868.1 | | 2960.2 | |

* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$ [†] par rapport à la chaudière à gaz (catégorie de référence)[#] par rapport au réglage manuel (catégorie de référence)[§] par rapport à l'aide de la collectivité locale (catégorie de référence)[£] par rapport au logement en désordre pendant 2 semaines (catégorie de référence) M – maisons individuelles, A – appartements

Annexe E

Intervalles de confiance pour les consentements à payer

TABLEAU E.1: Intervalles de confiance des CAP pour 1 % de réduction de la facture (€)

| | Maison | | | | Appartement | | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|--------|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S1 | S2 | S3 | S4 |
| Min | 260,69 | 253,47 | 264,45 | 202,29 | 167,56 | 164,89 | 145,28 | 99,65 |
| Max | 376,21 | 402,23 | 393,41 | 470,45 | 247,18 | 251,14 | 212,58 | 189,05 |
| CAP | 318,45 | 327,85 | 328,93 | 336,37 | 207,37 | 208,01 | 178,93 | 144,35 |

S1 – S4 : situation 1 à 4

TABLEAU E.2: Intervalles de confiance des CAP pour les moyens de chauffage (€)

| | CED | | | | PAC | | | | Poêle à bois | | | |
|-----------|--------------|--------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------|-------------------|-------------------|
| | Maison S1 | Maison S4 | Appartement S1 | Appartement S4 | Maison S1 | Maison S4 | Appartement S1 | Appartement S4 | Maison S1 | Maison S4 | Appartement S1 | Appartement S4 |
| Min | -1894,71 | -4117,33 | -1233,82 | -1766,08 | 6103,05 | 4696,28 | 1263,96 | 2270,90 | 1733,74 | -3081,35 | -5846,61 | -3071,65 |
| Max | 1940,29 | 3061,63 | 1263,50 | 1313,04 | 10656,27 | 14151,83 | 4623,01 | 5817,54 | 5854,78 | 5163,69 | -1989,26 | 1388,38 |
| CAP 22,79 | -527,85 | 14,84 | -226,52 | 8379,66 | 9424,05 | 2943,49 | 4044,22 | 3794,26 | 1041,17 | -3917,93 | -841,64 | |

S1 – S4 : situation 1 à 4

TABLEAU E.3: Intervalles de confiance des CAP pour les réglages du chauffage en maison (€)

| | Programmable | | | | Piloté | | | | Intelligent | | | |
|-----|--------------|---------|---------|--|---------|---------|---------|--|-------------|---------|---------|--|
| | S1 | S3 | S4 | | S1 | S3 | S4 | | S1 | S3 | S4 | |
| Min | 3080,03 | -60,39 | -780,22 | | 1138,77 | -296,04 | -700,35 | | 3177,52 | 1816,94 | 1345,52 | |
| Max | 6766,72 | 3884,76 | 6584,80 | | 4942,80 | 4008,47 | 7346,05 | | 7160,53 | 6150,25 | 9716,40 | |
| CAP | 4923,37 | 1912,19 | 2902,29 | | 3040,79 | 1856,22 | 3322,85 | | 5169,03 | 3983,59 | 5530,96 | |

S1 – S4 : situation 1 à 4

TABLEAU E.4: Intervalles de confiance des CAP pour les réglages du chauffage en appartement (€)

| | Programmable | | | Piloté | | | Intelligent | | |
|---------------------------|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|
| | S1 | S3 | S4 | S1 | S3 | S4 | S1 | S3 | S4 |
| Min | 1967,29 | -26,08 | -300,16 | 719,98 | -155,49 | -265,26 | 2053,04 | 993,46 | 665,40 |
| Max | 4444,83 | 2106,45 | 2791,12 | 3240,29 | 2174,97 | 3117,19 | 4679,02 | 3340,51 | 4081,70 |
| CAP | 3206,06 | 1040,19 | 1245,48 | 1980,14 | 1009,74 | 1425,96 | 3366,03 | 2166,99 | 2373,55 |
| S1 - S4 : situation 1 à 4 | | | | | | | | | |

S1 – S4 : situation 1 à 4

TABLEAU E.5: Intervalles de confiance des CAP pour la garantie, l'énergie de chauffage et le montant d'aide (€)

| | Garantie | | ENR×20°C | | Bois×20°C | | Montant d'aide | | | |
|-----|----------|---------|----------|---------|-----------|----------|----------------|---------|---------|---------|
| | S1M | S1A | S2M | S2A | S2M | S2A | S2M | S4M | S2A | S4A |
| Min | 1300,83 | 840,19 | 5346,18 | 3453,09 | -3632,03 | -5826,04 | 1355,81 | 48,43 | 809,05 | 1078,17 |
| Max | 2149,70 | 1406,77 | 10278,55 | 6460,51 | 881,96 | -1710,76 | 2101,61 | 1455,78 | 1384,63 | 2058,13 |
| CAP | 1725,27 | 1123,48 | 7812,36 | 4956,80 | -1375,04 | -3768,40 | 1728,71 | 752,11 | 1096,84 | 1568,15 |

S1 – S4 : situation 1 à 4

M pour maison individuelle, A pour appartement

TABLEAU E.6: Intervalles de confiance des CAP pour la disponibilité d'aide, le prêt à taux 0 % et le DPE (€)

| | Aide disponible de suite | | | | Prêt à taux 0 % | | | | DPE | |
|-----|--------------------------|----------|---------|----------|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | S2M | S4M | S2A | S4A | S2M | S4M | S2A | S4A | S2M | S2A |
| Min | 1368,83 | -2375,67 | 853,79 | -1018,71 | 3082,93 | 1923,12 | 1992,59 | 943,42 | -977,34 | 1975,66 |
| Max | 4061,10 | 1604,07 | 2591,40 | 687,59 | 6719,55 | 8688,35 | 4226,90 | 3610,37 | 2249,80 | 5083,25 |
| CAP | 2714,96 | -385,80 | 1722,59 | -165,56 | 4901,24 | 5305,74 | 3109,75 | 2276,89 | 636,23 | 3529,46 |

S1 – S4 : situation 1 à 4

M pour maison individuelle, A pour appartement

TABLEAU E.7: Intervalles de confiance des prix de réservation pour les travaux de rénovation (€)

| | Chauffage | | Isolation | | Chauffage & Isolation | |
|-----|-----------|----------|-----------|---------|-----------------------|----------|
| | M | A | M | A | M | A |
| Min | -6180,05 | -2708,71 | -270,88 | -164,09 | 5287,91 | 2185,65 |
| Max | 17215,66 | 7444,64 | 23157,71 | 9985,97 | 30100,84 | 13001,43 |
| CAP | 5517,80 | 2367,97 | 11443,41 | 4910,94 | 17694,37 | 7593,54 |

M pour maison individuelle, A pour appartement

TABLEAU E.8: Intervalles de confiance des CAP pour l'inertie de préférences (€/an)

| | Inertie de chauffage (maison) | | | Inertie de chauffage (appartement) | | | Inertie de réglage (S1) | |
|--|-------------------------------|--------|--------|------------------------------------|--------|--------|-------------------------|-------|
| | S1 | S2 | S4 | S1 | S2 | S4 | M | A |
| Min | 188,14 | 146,30 | 103,38 | 119,66 | 94,74 | 50,35 | 10,88 | 7,01 |
| Max | 273,02 | 253,26 | 296,46 | 180,64 | 158,77 | 121,23 | 72,72 | 47,43 |
| CAP | 230,58 | 199,78 | 199,92 | 150,15 | 126,76 | 85,79 | 41,80 | 27,22 |
| <i>M</i> pour maison individuelle, <i>A</i> pour appartement | | | | | | | | |
| <i>S1 – S4</i> : situation 1 à 4 | | | | | | | | |

Bibliographie

- ABDULLAH, S. et MARIEL, P. (2010). Choice experiment study on the willingness to pay to improve electricity services. *Energy Policy*, 38(8):4570–4581.
- ACHTNICHT, M. (2011). Do environmental benefits matter? Evidence from a choice experiment among house owners in Germany. *Ecological Economics*, 70(11):2191–2200.
- ACHTNICHT, M. et MADLENER, R. (2014). Factors influencing German house owners' preferences on energy retrofits. *Energy Policy*, 68:254–263.
- ADAMOWICZ, W., LOUVIERE, J. et SWAIT, J. (1998). Introduction to Attribute-Based Stated Choice Methods. Final Report to Resource Valuation Branch, Damage Assessment Center, NOAA, U.S. Department of Commerce.
- ADEME (2014a). Baromètre 10 000 ménages : Les ménages français face à l'efficacité énergétique de leur logement en 2013. Rapport technique.
- ADEME (2014b). Les chiffres clés du bâtiment 2013. Rapport technique.
- ADEME (2014c). Mener une rénovation énergétique en copropriété. L'habitat : Agir !
- ADEME (2015a). Aides financières 2015.
- ADEME (2015b). Installer une pompe à chaleur. L'habitat : Agir !
- AFSA ESSAFI, C. (2003). Les modèles logit polytomiques non ordonnés : théorie et applications. Série des documents de travail, méthodologie statistique 0301, INSEE.
- AKAIKE, H. (1973). Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In *Second International Symposium on Information Theory*, pages 267–281.
- AKSOY-PIERSON, M., ALLON, G. et FEDERGRUEN, A. (2013). Price Competition Under Mixed Multinomial Logit Demand Functions. *Management Science*, 59(8):1817–1835.
- ALLIBE, B. (2012). *Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel français à long terme*. Thèse, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales.

- AMELI, N. et BRANDT, N. (2014). Determinants of Households' Investment in Energy Efficiency and Renewables. OECD Economics Department Working Papers, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.
- ANAH (2014). Evaluation du programme Habiter Mieux : Synthèse de l'étude 3.
- ANDERSON, S. P. et DE PALMA, A. (2005). Price Dispersion and Consumer Reservation Prices. *Journal of Economics & Management Strategy*, 14(1):61–91.
- ARAVENA, C., MARTINSSON, P. et SCARPA, R. (2014). Does money talk? The effect of a monetary attribute on the marginal values in a choice experiment. *Energy Economics*, 44:483–491.
- ARROW, K. J. (1950). A Difficulty in the Concept of Social Welfare. *Journal of Political Economy*, 58(4):328–346.
- BANFI, S., FARSI, M., FILIPPINI, M. et JAKOB, M. (2008). Willingness to pay for energy-saving measures in residential buildings. *Energy Economics*, 30(2):503–516.
- BELAID, F. et GARCIA, T. (2015). Understanding the Spectrum of Residential Energy-Saving Behaviours : French Evidence Using Disaggregated Data. *GATE Working Paper*, (1536).
- BEN-AKIVA, M. et LERMAN, S. R. (1985). *Discrete Choice Analysis : Theory and Application to Travel Demand*. The MIT Press, Cambridge, Mass, 1 edition édition.
- BEN-AKIVA, M. E. (1973). *Structure of passenger travel demand models*. Thèse, Massachusetts Institute of Technology.
- BERGMANN, A., COLOMBO, S. et HANLEY, N. (2008). Rural versus urban preferences for renewable energy developments. *Ecological Economics*, 65(3):616–625.
- BERKSON, J. (1944). Application of the Logistic Function to Bio-Assay. *Journal of the American Statistical Association*, 39(227):357–365.
- BIERLAIRE, M. (2003). BIOGEME : A free package for the estimation of discrete choice models. In *3rd Swiss Transportation Research Conference*, Ascona, Switzerland.
- BLISS, C. I. (1934). The Method of Probits. *Science*, 79(2037):38–39.
- BOGERD, A., van OEL, C. et de HAAS, G. (2009). Occupant-owners preferences in deciding about innovative renovation concepts. In *Energy Efficiency and Behaviour Conference*.
- BONNET, X. (2013). Préférences des ménages en matière de logement : résultats d'une enquête par expérience de choix. *Logement & Construction*, (80).

- BOURDON, M.-B. (2003). *Analyse des substitutions entre énergies dans le secteur résidentiel*. Thèse, Université de Bourgogne, Dijon.
- BOUSQUET, A. et VIELLE, M. (2008). Analyse économétrique des déterminants du choix du mode de chauffage dans le secteur résidentiel français. Rapport technique, ORDECSYS.
- BOYD, J. H. et MELLMAN, R. E. (1980). The effect of fuel economy standards on the U.S. automotive market : An hedonic demand analysis. *Transportation Research Part A : General*, 14(5–6):367–378.
- BRAUN, F. G. (2010). Determinants of households’ space heating type : A discrete choice analysis for German households. *Energy Policy*, 38(10):5493–5503.
- BROYDEN, C. G. (1970). The Convergence of a Class of Double-rank Minimization Algorithms. *IMA Journal of Applied Mathematics*, 6(1):76–90.
- CADRE, H. et MERCIER, D. (2013). Is energy storage an economic opportunity for the eco-neighborhood ? *NETNOMICS : Economic Research and Electronic Networking*, 13(3):191–216.
- CAHUZAC, E. et BONTEMPS, C. (2008). *Stata par la pratique : statistiques, graphiques et éléments de programmation*. Stata Press.
- CARDELL, N. S. et DUNBAR, F. C. (1980). Measuring the societal impacts of automobile downsizing. *Transportation Research Part A : General*, 14(5–6):423–434.
- CAYLA, J.-M. (2011). *Les ménages sous la contrainte carbone : exercice de modélisation prospective des secteurs résidentiel et transports avec TIMES*. Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- CEREN (2008). Suivi annuel des comportements des ménages en matière du chauffage : résultats sur la période 1900 – 2007. Rapport technique, CEREN.
- CEREN (2014). Secteur résidentiel : suivi du parc et des consommations d’énergie et évolution 1973-2013. Rapport technique, CEREN.
- CHARLIER, D. (2012). *Les déterminants des investissements économeurs d’énergie dans le secteur résidentiel en France*. Thèse, Université de Grenoble.
- CHIAPPORI, P.-A. et SALANIE, B. (2000). Testing for Asymmetric Information in Insurance Markets. *Journal of Political Economy*, 108(1):56–78.
- COUTURE, S., GARCIA, S. et REYNAUD, A. (2012). Household energy choices and fuelwood consumption : An econometric approach using French data. *Energy Economics*, 34(6):1972–1981.

- DAUSSIN-BENICHO, J.-M. et MAUROUX, A. (2014). Turning the heat up. How sensitive are households to fiscal incentives on energy efficiency investments? *Document de travail INSEE*, G(06).
- DAZIANO, R. A. et ACHTNICHT, M. (2014). Accounting for uncertainty in willingness to pay for environmental benefits. *Energy Economics*, 44:166–177.
- de PALMA, A. et TISSE, J.-F. (1987). Les modèles de choix discrets. *Annales d'économie et de statistiques*, (9):153–190.
- DEBREU, G. (1960). Review of R.D. Luce, Individual choice behavior : A theoretical analysis. *American Economic Review*, 50:186–188.
- DEMPSTER, A. P., LAIRD, N. M. et RUBIN, D. B. (1977). Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society B*, 39(1): 1–38.
- DESJEUX, D. (1996). *Anthropologie de l'électricité : Les objets électriques dans la vie quotidienne en France*. Editions L'Harmattan, Paris.
- DOMENCICH, T. A. et MCFADDEN, D. (1975). *Urban travel demand : a behavioral analysis*. North-Holland.
- DUBIN, J. A. et MCFADDEN, D. L. (1984). An Econometric Analysis of Residential Electric Appliance Holdings and Consumption. *Econometrica*, 52(2):345.
- DUJIN, A. et MARESCA, B. (2010). La température du logement ne dépend pas de la sensibilité écologique. *CREDOC Consommation et modes de vie*, (227).
- EK, K. et PERSSON, L. (2014). Wind farms : Where and how to place them? A choice experiment approach to measure consumer preferences for characteristics of wind farm establishments in Sweden. *Ecological Economics*, 105:193–203.
- ESTRELLA, A. (1998). A New Measure of Fit for Equations With Dichotomous Dependent Variables. *Journal of Business & Economic Statistics*, 16(2):198–205.
- FARSI, M. (2010). Risk aversion and willingness to pay for energy efficient systems in rental apartments. *Energy Policy*, 38(6):3078–3088.
- FECHNER, G. T. (1948). Elements of psychophysics, 1860. In DENNIS, W., éditeur : *Readings in the history of psychology.*, pages 206–213. Appleton-Century-Crofts, East Norwalk.
- FFB (2010). Les chiffres clés de l'artisanat du bâtiment. Rapport technique, Fédération Française du Bâtiment.

- FLETCHER, R. (1970). A new approach to variable metric algorithms. *The Computer Journal*, 13(3):317–322.
- FRALEY, C., RAFTERY, A. E., MURPHY, T. B. et SCRUCICA, L. (2012). mclust Version 4 for R : Normal Mixture Modeling for Model-Based Clustering, Classification, and Density Estimation.
- GALVIN, R. et SUNIKKA-BLANK, M. (2016). Quantification of (p)rebound effects in retrofit policies : Why does it matter ? *Energy*, 95:415–424.
- GARROW, L. A., JONES, S. P. et PARKER, R. A. (2007). How much airline customers are willing to pay : An analysis of price sensitivity in online distribution channels. *Journal of Revenue & Pricing Management*, 5(4):271–290.
- GIRAUDET, L.-G. (2011). *Les instruments économiques de maîtrise de l’énergie : Une évaluation multidimensionnelle*. Thèse, Université Paris-Est.
- GIRAUDET, L.-G. et HOUDE, S. (2014). Double moral hazard and the energy efficiency gap. *CIREN Working Paper*.
- GOETT, A. A., HUDSON, K. et TRAIN, K. E. (2000). Customers’ Choice Among Retail Energy Suppliers : The Willingness-to-Pay for Service Attributes. *The Energy Journal*, 21(4).
- GOLDFARB, D. (1970). A family of variable-metric methods derived by variational means. *Mathematics of Computation*, 24(109):23–23.
- GOMBAULT, V. (2013). L’internet de plus en plus prisé, l’internaute de plus en plus mobile. *INSEE Première*, (1452).
- GOODMAN, L. A. (1974). Exploratory latent structure analysis using both identifiable and unidentifiable models. *Biometrika*, 61(2):215–231.
- GOSSAY, J., LAVASSIÈRE, D., TABARDIN, J.-F., LOB-FERRAGGIOLI, J., TRANAIN, C. et VAUJANY, F. (2010). Logements collectifs surchauffés : comment agir ? Rapport technique, Institut de l’écologie en milieu urbain.
- GREENE, D. L. et LIU, J.-T. (1988). Automotive fuel economy improvements and consumers’ surplus. *Transportation Research Part A : General*, 22(3):203–218.
- GREENE, W. H. (2012). *Econometric analysis*. Pearson series in economics. Pearson, Boston, Mass., 7 édition.
- GREENE, W. H. et HENSHER, D. A. (2003). A latent class model for discrete choice analysis : contrasts with mixed logit. *Transportation Research Part B : Methodological*, 37(8):681–698.

- GRÖMPING, U. (2015). Design of Experiments in R.
- GUMBEL, E. J. (1958). *Statistics of Extremes*. Columbia University Press, New York, NY.
- HANLEY, N., ADAMOWICZ, W. et WRIGHT, R. E. (2005). Price vector effects in choice experiments : an empirical test. *Resource and Energy Economics*, 27(3):227–234.
- HAUSMAN, J. et MCFADDEN, D. (1984). Specification Tests for the Multinomial Logit Model. *Econometrica*, 52(5):1219–1240.
- HAUSMAN, J. A. (1979). Individual Discount Rates and the Purchase and Utilization of Energy-Using Durables. *The Bell Journal of Economics*, 10(1):33–54.
- HENSHER, D., SHORE, N. et TRAIN, K. (2005). Households' Willingness to Pay for Water Service Attributes. *Environmental & Resource Economics*, 32(4):509–531.
- HENSHER, D. A. (1994). Stated preference analysis of travel choices : the state of practice. *Transportation*, 21(2):107–133.
- HENSHER, D. A. et GREENE, W. H. (2002). Specification and estimation of the nested logit model : alternative normalisations. *Transportation Research Part B : Methodological*, 36(1):1–17.
- HOLE, A. R. (2007a). A comparison of approaches to estimating confidence intervals for willingness to pay measures. *Health Economics*, 16(8):827–840.
- HOLE, A. R. (2007b). Fitting mixed logit models by using maximum simulated likelihood. *The Stata Journal*, 7(3):388–401.
- IEA (2015). Energy and Climate Change. Rapport technique, International Energy Agency.
- INSEE (2006). Enquête Logement.
- ISLAM, T. et MEADE, N. (2013). The impact of attribute preferences on adoption timing : The case of photo-voltaic (PV) solar cells for household electricity generation. *Energy Policy*, 55:521–530.
- JACCARD, M. et DENNIS, M. (2006). Estimating home energy decision parameters for a hybrid energy-economy policy model. *Environmental Modeling & Assessment*, 11(2):91–100.
- JAFFE, A. B. et STAVINS, R. N. (1994). The energy paradox and the diffusion of conservation technology. *Resource and Energy Economics*, 16(2):91–122.
- JEDIDI, K. et ZHANG, Z. J. (2002). Augmenting Conjoint Analysis to Estimate Consumer Reservation Price. *Management Science*, 48(10):1350–1368.

- KOHLI, R. et MAHAJAN, V. (1991). A Reservation-Price Model for Optimal Pricing of Multiattribute Products in Conjoint Analysis. *Journal of Marketing Research*, 28(3):347–354.
- KOTLER, P. et ZALTMAN, G. (1971). Social marketing : An approach to planned social change. *Journal of Marketing*, 35(3):3–12.
- KUHFELD, W. F., TOBIAS, R. D. et GARRATT, M. (2010). Efficient Experimental Design with Marketing Applications. In *Marketing Research Methods in SAS*, pages 243–265. SAS, Cary, NC, USA, 9.2 édition.
- KWAK, S.-Y., YOO, S.-H. et KWAK, S.-J. (2010). Valuing energy-saving measures in residential buildings : A choice experiment study. *Energy Policy*, 38(1):673–677.
- LANCASTER, K. J. (1966). A New Approach to Consumer Theory. *Journal of Political Economy*, 74.
- LAURENT, M.-H., ALLIBE, B. et OSSO, D. (2011). Energy efficiency for all! How an innovative conditional subsidy on refurbishment could lead to enhanced access to efficient technologies. In *ECEEE 2011 Summer Study*.
- LAURENT, M.-H., OSSO, D. et CAYRE, E. (2007). Energy savings and costs of energy efficiency measures : a gap from policy to reality ? In *ECEEE 2007 Summer Study*.
- LAZARSFELD, P. F., HENRY, N. W. et ANDERSON, T. W. (1968). *Latent structure analysis*. Houghton Mifflin Boston.
- LEGENDRE, B. et RICCI, O. (2015). Measuring fuel poverty in France : Which households are the most fuel vulnerable ? *Energy Economics*, 49:620–628.
- LIANG, Y., LEVINE, D. I. et (MAX) SHEN, Z.-J. (2012). Thermostats for the Smart Grid : Models, Benchmarks, and Insights. *The Energy Journal*, 33(4).
- LIAO, H.-C. et CHANG, T.-F. (2002). Space-heating and water-heating energy demands of the aged in the US. *Energy Economics*, 24(3):267–284.
- LOUVIERE, J. J., HENSHER, D. A. et SWAIT, J. D. (2010). *Stated Choice Methods : Analysis and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge, 7 édition.
- LUCE, R. D. (1959). *Individual choice behavior*, volume xii. John Wiley, Oxford, England.
- MANSUR, E. T., MENDELSON, R. et MORRISON, W. (2008). Climate change adaptation : A study of fuel choice and consumption in the US energy sector. *Journal of Environmental Economics and Management*, 55(2):175–193.

- MARSCHAK, J. (1960). Binary-Choice Constraints and Random Utility Indicators. *In Economic Information, Decision, and Prediction*, numéro 7-1 de Theory and Decision Library, pages 218–239. Springer Netherlands.
- MAUREL, F. (2011). Modèle économétrique sur le choix de véhicules des ménages. *Etudes & Documents*, (31).
- McFADDEN, D. (1974). Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior. *In Frontiers in Econometrics*, pages 303–328. Academic Press, New York, p. zarembka édition.
- McFADDEN, D. (1978). Modelling the Choice of Residential Location. *In Spatial Interaction Theory and Planning Models*, pages 75–96. North Holland, Amsterdam.
- McFADDEN, D. et TRAIN, K. (2000). Mixed MNL models for discrete response. *Journal of Applied Econometrics*, 15(5):447–470.
- MIN, J., AZEVEDO, I. L., MICHALEK, J. et de BRUIN, W. B. (2014). Labeling energy cost on light bulbs lowers implicit discount rates. *Ecological Economics*, 97:42–50.
- NAULEAU, M.-L. (2014). Free-riding on tax credits for home insulation in France : An econometric assessment using panel data. *Energy Economics*, 46:78–92.
- NAULEAU, M.-L. (2015). *L’efficacité énergétique dans le secteur résidentiel français : analyse des déterminants d’investissement et des politiques publiques*. Thèse, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales.
- NESBAKKEN, R. (1999). Price sensitivity of residential energy consumption in Norway. *Energy economics*, 21(6):493–515.
- NOCEDAL, J. et WRIGHT, S. J. (2006). *Numerical optimization*. Springer series in operations research. Springer, New York, 2nd ed édition.
- PACIFICO, D. et YOO, H. i. (2013). lcglogit : A Stata command for fitting latent-class conditional logit models via the expectation-maximization algorithm. *Stata Journal*, 13(3):625–639.
- PAPAVASILIOU, A., HINDI, H. et GREENE, D. (2010). Market-based control mechanisms for electric power demand response. *In 49th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 1891–1898.
- PARZEN, E. (1962). On Estimation of a Probability Density Function and Mode. *The Annals of Mathematical Statistics*, 33(3):1065–1076.
- PEARMAIN, D. et SWANSON, J. (1991). *Stated preference techniques : a guide to practice*. Steer Davies Gleave, Richmond.

- PHILLIPS, Y. (2012). Landlords versus tenants : Information asymmetry and mismatched preferences for home energy efficiency. *Energy Policy*, 45:112–121.
- RABE-HESKETH, S., SKRONDAL, A., PICKLES, A. et OTHERS (2002). Reliable estimation of generalized linear mixed models using adaptive quadrature. *The Stata Journal*, 2(1):1–21.
- RAYNAUD, M. (2014). *Evaluation ex-post de l'efficacité de solutions de rénovation énergétique en résidentiel*. Thèse, Ecole nationale supérieure des mines de Paris.
- RISCH, A. (2013). *Environment and energy : analysis and evaluation of public policies*. Thèse, Université de Grenoble.
- ROTILLON, G. (2010). *Economie des ressources naturelles*. La Découverte, Paris.
- ROUVINEN, S. et MATERO, J. (2013). Stated preferences of Finnish private homeowners for residential heating systems : A discrete choice experiment. *Biomass and Bioenergy*, 57:22–32.
- ROY, R. (1947). La distribution du revenu entre les divers biens. *Econometrica*, 15(3):205.
- SAMMER, K. et WÜSTENHAGEN, R. (2006). The influence of eco-labelling on consumer behaviour—results of a discrete choice analysis for washing machines. *Business Strategy and the Environment*, 15(3):185–199.
- SCARPA, R., THIENE, M. et TRAIN, K. (2008). Utility in Willingness to Pay Space : A Tool to Address Confounding Random Scale Effects in Destination Choice to the Alps. *American Journal of Agricultural Economics*, 90(4):994–1010.
- SCARPA, R. et WILLIS, K. (2010). Willingness-to-pay for renewable energy : Primary and discretionary choice of British households' for micro-generation technologies. *Energy Economics*, 32(1):129–136.
- SCASNY, M. et URBAN, J. (2009). Household Behaviour and Environmental Policy : Residential Energy Efficiency. In *Household Behaviour and Environmental Policy*, Paris. OECD.
- SCHWARZ, G. (1978). Estimating the Dimension of a Model. *The Annals of Statistics*, 6(2):461–464.
- SEEIDD (2015). La rénovation thermique des logements : quels enjeux, quelles solutions ? Rapport technique, Commissariat général au développement durable.
- SHANNO, D. F. (1970). Conditioning of quasi-Newton methods for function minimization. *Mathematics of Computation*, 24(111):647–647.

- SILBERHORN, N., BOZTUG, Y. et HILDEBRANDT, L. (2007). Estimation with the Nested Logit Model : Specifications and Software Particularities. Discussion Paper SFB649DP2007-046, Humboldt University.
- SOES (2014). Pégase.
- TERRA, S. et FLEURET, A. (2009). L'acceptabilité sociale des éoliennes : des riverains prêts à payer pour conserver leurs éoliennes. *Etudes & Documents*, (5).
- THEIS, G. W. (2011). *Incorporating Attitudes in Airline Itinerary Choice ; Modeling the Impact of Elapsed Time*. Thèse, Massachusetts Institute of Technology.
- THURSTONE, L. L. (1927). A law of comparative judgment. *Psychological Review*, 34(4): 273–286.
- TRAIN, K. (1985). Discount rates in consumers' energy-related decisions : A review of the literature. *Energy*, 10(12):1243–1253.
- TRAIN, K. E. (2009). *Discrete Choice Methods with Simulation*. Cambridge University Press, Cambridge ; New York, 2 édition.
- TRAISEL, J.-P., JOLITON, D., LAURENT, M.-H., CAFFIAUX, S. et MAZZENGA, A. (2010). Habitat facteur 4 : étude d'une réduction des émissions de CO₂ liées au confort thermique dans l'habitat à l'horizon 2050. *Cahiers du CLIP*, (20).
- TVERSKY, A. (1972). Elimination by aspects : A theory of choice. *Psychological Review*, 79(4):281–299.
- UFE (2012). Un instrument clé de pilotage de la politique énergétique : l'ordre de priorité des actions d'efficacité énergétique. Rapport technique, Union Française de l'Electricité.
- VAAGE, K. (2000). Heating technology and energy use : a discrete/continuous choice approach to Norwegian household energy demand. *Energy Economics*, 22(6):649–666.

Résumé

Les préférences des ménages français pour les travaux de rénovation énergétique dans le logement ont été peu étudiées jusqu'à présent. Or, elles sont la clé d'une politique énergétique efficace et réaliste pour le secteur résidentiel, tant au niveau des aides proposées, qu'au niveau des objectifs à réaliser. Les ménages sont-ils intéressés par des travaux à fort potentiel d'économie d'énergie ? Combien sont-ils prêt à payer et est-ce que c'est suffisant pour couvrir les coûts réels ? Combien de ménages n'ont pas le choix de leur mode de chauffage et quel est leur profil ?

La thèse s'attache à répondre à ces questions de façon empirique à l'aide de modèles de choix discrets. Il s'agit, dans un premier temps, d'analyser les contraintes techniques, sociodémographiques et spatiales que rencontrent les ménages et qui entravent les choix énergétiques dans le logement. Une méthodologie de détection des ménages contraints a été proposée, puis appliquée au choix du chauffage en 2006 et 2013. Dans un deuxième temps, les préférences des ménages pour les équipements de chauffage et les travaux de rénovation ont été analysées. Cette deuxième partie utilise une enquête expérimentale qui a été réalisée spécialement pour ce travail de recherche auprès de 2000 ménages.

Ce travail a permis de comprendre les préférences des ménages, leur hétérogénéité, et d'en déduire les consentements à payer, les taux d'actualisation implicites et les différents effets économiques.

Mots Clés

Efficacité énergétique, Ménages, Secteur résidentiel, Préférences déclarées, Modèles de choix discrets

Abstract

Little research has been done to date on French households' preferences for energy retrofits in the dwelling. However, the economic role of these choices is crucial for implementing an effective and realistic energy policy in the residential sector, both in terms of proposed aid and targets. Are households interested in retrofits with high energy-savings potential? How much are they willing to pay and is it sufficient to cover the up-front costs? How many households have no choice of heating system, and what is their profile?

The essay sets out to answer these questions empirically using discrete choice models. It starts by analyzing the technical, socio-demographic and spatial constraints that face households and create barriers to domestic energy choices. A method to detect household constraint is devised and applied to the choice of space heating system in 2006 and 2013. The second stage analyzes household preferences for heating equipment and retrofits. This second part is based on a discrete choice experiment specially carried out for this research among 2,000 households.

This work sheds light on households' preferences and heterogeneity, as well as their willingness to pay, the implicit discount rate and other economic impacts.

Keywords

Energy Efficiency, Households, Residential Sector, Stated Preferences, Discrete Choice Models