REVUE D'ÉCONOMIE INDUSTRIELLE

Revue d'économie industrielle

148 | 4e trimestre 2014
Transition énergétique, industries et marchés

Efficacité énergétique dans le bâtiment et paradoxe énergétique : quelles conséquences pour la transition énergétique ?

Dorothée Charlier

OpenEdition Journals

Édition électronique
URL : https://journals.openedition.org/rei/5985
DOI : 10.4000/rei.5985
ISSN : 1773-0198

Éditeur
De Boeck Supérieur

Édition imprimée
Date de publication : 30 décembre 2014
Pagination : 229-262
ISBN : 9782804193409
ISSN : 0154-3229

Référence électronique
Dorothée Charlier, « Efficacité énergétique dans le bâtiment et paradoxe énergétique : quelles conséquences pour la transition énergétique ? », *Revue d'économie industrielle* [En ligne], 148 | 4e trimestre 2014, mis en ligne le 30 décembre 2016, consulté le 03 juin 2022. URL : http://journals.openedition.org/rei/5985 ; DOI : https://doi.org/10.4000/rei.5985

© Revue d'économie industrielle

EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS LE BÂTIMENT ET PARADOXE ÉNERGÉTIQUE : QUELLES CONSÉQUENCES POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ?

Dorothée Charlier*

Mots clés : Efficacité énergétique, modèle Tobit bivarié, analyse coût-bénéfice, rénovation, secteur résidentiel, paradoxe énergétique.

Keywords: Energy efficiency, Bivariate Tobit Model, Cost-Benefit Analysis, Renovation, Housing Sector, Energy Paradox.

1. INTRODUCTION

Aujourd'hui, si la transition énergétique n'est possible que dans le cas de développement de solutions alternatives aux énergies fossiles, il est aussi indispensable de faire en sorte que les ménages adoptent des solutions en efficacité énergétique. Le secteur résidentiel consomme plus d'énergie que n'importe quel autre secteur en France. Il représente aussi le plus gros potentiel d'économie d'énergie. Il est donc possible d'économiser de l'énergie et de limiter les émissions de gaz à effet de serre en investissant dans des rénovations énergétiques (Stern, 1998, p. 9). Malheureusement, le taux de rénovation énergétique est relativement faible et ne permettra pas d'atteindre les objectifs fixés par le gouvernement français.

* dorothee.charlier@univ-montp1.fr ; Université Montpellier 1, UFR d'Économie, site Richter.

L'objectif de cette étude est (i) d'analyser les déterminants des dépenses en rénovation en efficacité énergétique en introduisant la rentabilité de l'investissement comme variable explicative et (ii) de déterminer le profil des ménages qui n'investissent pas, même quand la rénovation en efficacité énergétique s'avère rentable dans l'absolu (i.e. si les bénéfices du projet excèdent les coûts) d'un point de vue empirique. Si la littérature théorique sur le paradoxe énergétique est vaste (DeCanio, 1993 ; Jaffe et Stavins, 1994a ; DeCanio, 1998 ; Boulanger, 2007), très peu d'études ont essayé de vérifier ce phénomène empiriquement. Pour cela, une forte contribution de ce papier tient à la construction d'une base de données sur les dépenses énergétiques avant et après travaux et sur les coûts à la rénovation. Cet article contribue donc à la littérature sur le paradoxe énergétique mais aussi à la littérature sur le choix du consommateur (Hanna, 2007, p. 102 ; Kahn, 2007, p. 2) qui se concentre plus particulièrement sur les choix d'investissement en rénovation dans le secteur résidentiel. En effet, les investissements en efficacité énergétique sont différents des autres types d'investissement (Jaffe et Stavins, 1994a, p. 97 ; 1994b, p. 805). On constate que *les ménages font quasiment systématiquement abstraction d'opportunités d'investissements très attractives en termes de technologies énergétiques, avec des taux de rendement élevés, supérieurs à ceux que l'on pourrait obtenir avec des actifs financiers standards* : il s'agit du « paradoxe énergétique » (Hassett et Metcalf, 1995, p. 202). En d'autres termes, Jaffe et Stavins (1994b, p. 804) montrent que les investissements en efficacité énergétique sont significativement plus faibles que leurs gains potentiels nets pourraient le suggérer. Un contraste est manifeste entre les opportunités technologiques présentes sur le marché qui visent à réduire les consommations (et donc les coûts) énergétiques et les investissements effectivement réalisés par les ménages pour tirer avantage de ces opportunités. De nombreux auteurs ont tenté d'expliquer ce « paradoxe » de la diffusion très progressive d'équipements énergétiques apparemment rentables (i.e. si les gains énergétiques procurés par l'investissement du projet excèdent les coûts) en analysant la nature et l'occurrence des freins à l'investissement (DeCanio, 1993 ; Jaffe et Stavins, 1994a ; Jaffe et Stavins, 1994b ; DeCanio, 1998 ; Brown, 2001 ; Boulanger, 2007). Ces auteurs font donc une distinction entre les barrières de marché (réparties en deux catégories : les défaillances de marché et les barrières économiques) et les risques associés aux investissements en efficacité énergétique. Si les défaillances de marché sont liées à l'asymétrie d'information, à l'imperfection de l'information et aux incitations divergentes, les barrières économiques sont, quant à

elles, dues aux coûts cachés, à l'hétérogénéité entre les agents et aux difficultés d'accès au capital. Concernant les risques associés à ce type d'investissement, trois aspects de leur diffusion sur le marché peuvent être considérés : les incertitudes, la flexibilité et l'hétérogénéité. Dans cette étude, nous voulons donc, d'une part, vérifier si le paradoxe énergétique se vérifie au cas français (c'est-à-dire si les ménages n'investissent pas malgré la profitabilité absolue de l'investissement) et, d'autre part, étudier le profil des ménages qui seraient dans une telle situation afin d'identifier les freins à l'investissement. Nous obtenons comme résultat principal que 50 % des ménages n'ont pas investi alors que cela était profitable pour eux en 2006. Le paradoxe énergétique semble confirmé. De plus, en étudiant les ménages qui n'ont pas investi en 2006 et qui présentaient pourtant une analyse coût bénéfice favorable, nous remarquons que le statut d'occupation (ou le problème des incitations divergentes) et la difficulté d'accès au capital sont des variables déterminantes.

De plus, dans cet article, nous voulons aussi étudier les critères qui expliquent, d'un point de vue théorique et empirique, la faiblesse de l'adoption d'équipements économiseurs d'énergie. Nous faisons une distinction entre les rénovations en isolation (RI) et les rénovations de remplacement des équipements (RE). La littérature sur les facteurs qui influencent la décision de rénovation en efficacité énergétique en se focalisant sur les dépenses de rénovation est assez rare. Quelques auteurs ont étudié les déterminants de la rénovation en utilisant des modèles de choix discrets. Cameron (1985, p. 205) étudie la demande en rénovation énergétique en tenant compte de l'efficacité des différents appareils. L'étude est basée sur des données collectées lors d'une enquête nationale sur la consommation énergétique. En utilisant un modèle Logit emboîté sur deux niveaux, elle montre que l'investissement des ménages est sensible au prix de l'énergie, au coût de l'investissement et au revenu. Plus récemment, Groschen et Vance (2009, p. 142) étudient les déterminants de la demande en équipements économiseurs d'énergie à l'aide d'un modèle Logit emboîté. Les auteurs font la distinction entre 16 catégories différentes de rénovation énergétique (isolation du toit, des murs, des fenêtres…). Ils montrent que les coûts et les gains potentiels espérés sont des variables clés de la décision d'investir. Des résultats similaires sont obtenus par Banfi *et al.* (2006, p. 514). Les ménages qui ont un coût élevé de l'énergie sont plus enclins à investir (Nair *et al.*, 2010,

p. 2960). De plus, dans la littérature, des caractéristiques socio-économiques, comme le revenu, l'âge, le statut d'occupation ou le niveau de diplôme peuvent expliquer la décision de rénover. Montgomery (1992, p. 328) étudie les dépenses de rénovation en tenant compte de la mobilité des individus. En utilisant des données américaines, elle met en évidence que les ménages qui souhaitent améliorer considérablement la qualité de leur logement préfèrent déménager. Elle montre aussi que les ménages à revenu élevé et avec un haut niveau d'étude sont plus susceptibles d'améliorer leur logement. De plus, l'ensemble des études s'accorde sur le fait que les locataires sont peu enclins à investir (Arnott, Davidson, et Pines, 1983, p. 485 ; Rehdanz, 2007, p. 2 ; Davis, 2010, p. 1). Diaz-Rainey et Ashton (2009, p. 7), sur des données transversales britanniques, montrent à l'aide d'un modèle Tobit que 14 % des ménages qui ne rénovent pas motivent leur décision à cause de leur statut d'occupation. Finalement, la décision d'investir est une fonction des caractéristiques thermiques des bâtiments. Mahapatra et Gustavsson (2008, p. 589) soulignent que les gains à la rénovation sont une fonction de la taille du logement. Plaut et Plaut (2010, p. 481) analysent la décision de rénovation en essayant de cerner, d'une part, les facteurs qui incitent les ménages à rénover et, d'autre part, le choix d'un type de rénovation. Ils étudient ce problème empiriquement à l'aide d'une base de données américaine. Ils ont trois catégories de variables explicatives : celles relatives au ménage, celles qui décrivent le logement et des variables qui décrivent le voisinage. Ils montrent que la probabilité de rénover est plus élevée dans les maisons individuelles. Montgomery (1992, p. 346), quant à elle, souligne l'importance de la période de construction. Plus un logement est ancien, plus la probabilité de rénover est élevée.

Ainsi, si la littérature sur les facteurs qui influencent la décision de rénovation en efficacité énergétique est relativement rare, nous avons aussi montré que les études qui tiennent compte de la profitabilité de l'investissement comme variable déterminante dans la décision d'investir sont elles aussi en nombre limité. Pourtant, une particularité très importante de la décision d'adoption d'investissements économiseurs d'énergie réside dans le fait que les ménages leur appliquent de hauts taux d'actualisation. Ces taux d'actualisation sont plus élevés pour ce type d'investissement que pour les autres. Ils accorderaient ainsi moins de valeur présente aux bénéfices à venir d'un investissement économiseur d'énergie que de tout autre

investissement (Sanstad *et al.*, 1995, pp. 739-743). De plus, les dépenses en technologies efficientes sont largement irréversibles (ceci est principalement dû aux coûts irrécouvrables). Ces investissements peuvent être retardés (le moment d'adoption est aussi flexible) donnant ainsi au ménage une opportunité pour obtenir de nouvelles informations. Une décision d'investir peut être alors indéfiniment remise à plus tard[1]. Ainsi, la règle de la valeur actuelle nette (c'est-à-dire qu'il est rentable d'investir lorsque la somme des profits bruts actualisés moins l'investissement de départ est positive) doit être changée. Nous voulons donc vérifier, sur données françaises, si les ménages tiennent compte du critère de la valeur actuelle nette pour entreprendre des travaux en efficacité énergétique ou si ce critère doit être modifié. Nous obtenons comme résultat principal que les ménages n'appliquent pas le critère de la valeur actualisée comme le suggère la littérature.

Le reste du papier est divisé de la manière suivante. La section 2 de ce papier présente le cadre théorique. Les données, les variables et les statistiques descriptives sont disponibles en section 3. Dans la section 4, nous nous intéressons au cadre empirique. Le modèle économétrique sur les déterminants de la rénovation ainsi que les résultats sont présentés en section 4.1. Dans la section 4.2, nous nous intéresserons à l'étude empirique sur le paradoxe énergétique. La section 5 conclut.

2. CADRE THÉORIQUE

2.1. Modèle

Nous considérons une économie avec un seul type d'agent qui occupe le logement. Nous définissons un horizon discret fini tel que $t \in \{0,1\}$.

1 De nombreux auteurs ont travaillé sur ces risques associés aux investissements économiseurs d'énergie (Henry, 1974, p. 1007 ; Dixit et Pindyck, 1994). Tandis que le ménage attend de nouvelles informations, il profite d'une opportunité d'investir, analogue à une option financière, en ce sens qu'il a le droit mais pas l'obligation d'investir. C'est ce qu'on appelle la valeur d'option de l'investissement. En revanche, lorsque cet agent réalise un investissement irréversible, il « tue » cette option (Dixit et Pindyck, 1994). Cette perte de valeur d'option représente un coût d'opportunité pour l'agent qu'il doit nécessairement inclure dans son coût d'investissement.

durant la première période, l'agent a le choix entre consommer et investir. Dans la seconde période, il consomme seulement. Nous introduisons une fonction de qualité du logement. Cette fonction représente aussi la valeur monétaire de ce dernier. Cette fonction dépend du montant investi par l'agent en période 0, de la qualité initiale du logement X_0, et d'un facteur de dépréciation δ (avec $0 < \delta < 1$). Nous avons donc :

$$X_1 = I_0 + (1-\delta)X_0 \tag{1}$$

L'agent peut consommer des biens énergétiques et non énergétiques. Nous avons la fonction d'utilité suivante :

$$U(C_t^{ne}, C_t^e) = \ln(C_t^e C_t^{ne}) \tag{2}$$

Le problème de cet agent est de maximiser sa fonction d'utilité sous contrainte de :

$$(R_0 - C_0^{ne} - p_0(X_0)C_0^e - I_0)(1+r) + \frac{X_1}{1+r} = C_1^e p_1(X_1) + C_1^{ne} \tag{3}$$

$$R_1 = (R_0 - C_0^{ne} - p_0(X_0)C_0^e - I_0)(1+r)$$

où R_0 et R_1 sont les revenus de l'agent de période 0 et de période 1. $p_0(X_0)$ et $p_1(X_1)$ représentent le coût du service énergétique en période 0 et en période 1. Ces fonctions de coût dépendent de la qualité énergétique du logement. Si la qualité énergétique (ou l'efficacité énergétique) du logement s'accroît, le coût d'une unité de consommation de service énergétique sera plus faible. En d'autres termes, cela signifie qu'une augmentation de l'efficacité énergétique conduit à un coût de l'énergie plus faible (il devient moins coûteux de chauffer le logement par exemple). Nous supposons que cette fonction de coût est une fonction linéaire. f est le montant maximum de dépenses énergétiques : c'est le montant des dépenses énergétiques de l'agent en l'absence d'une quelconque efficacité (c'est-à-dire en l'absence d'isolation et de matériels énergétiques performants). Le paramètre ξ mesure la sensibilité du coût de l'énergie à l'investissement. Ce paramètre mesure aussi la sensibilité des gains énergétiques procurés par la rénovation sur le prix de l'énergie. Ainsi, plus le prix de l'énergie est élevé, et plus les équipements en efficacité énergétique sont performants,

plus la valeur de ce paramètre sera élevée, ce qui aura un impact d'autant plus important sur le coût de l'énergie. Ainsi, nous avons :

$$p_t(X_t) = -\xi X_t + f \tag{4}$$

Nous pouvons écrire le problème de l'agent suivant :

$$\max_{C_0^e, C_0^{ne}, C_1^e, I_0} U(C_0^{ne}, C_0^e, I_0, C_{1,}^{ne} C_1^e) = \ln(C_0^e C_0^{ne}) + \beta \ln(C_1^{ne}, C_1^e) \tag{5}$$

β est le taux d'actualisation. Nous avons un problème sur deux périodes. En utilisant les conditions de premier ordre (voir annexe A), nous obtenons quatre équations à quatre inconnues. En résolvant ce programme, nous obtenons des solutions pour C_1^e , C_0^{ne} , C_0^e , I_0 :

$$I_0 = \frac{2fr(r+2)(\beta+1) + \left((2X_0(\beta+1)(\delta-1) - \mathrm{R}_0\beta)r^2 + (4X_0(\beta+1)(\delta-1) - 2\mathrm{R}_0\beta)r - \beta(\mathrm{R}_0 + X_0 - X_0\delta)\right)\xi}{r(r+2)(\beta+2)\xi} \tag{6}$$

$$\mathrm{C}_1^{\mathrm{e}} = \frac{r(r+2)}{(r+1)\xi} \tag{7}$$

$$\mathrm{C}_0^{\mathrm{Lne}} = \frac{-\dfrac{fr(r+2)}{(r+1)^2\xi} + \mathrm{R}_0 + X_0 - X_0\delta}{\beta+2} \tag{8}$$

$$\mathrm{C}_0^{\mathrm{Le}} = \frac{(r+1)^2(\mathrm{R}_0 + X_0 - X_0\delta)\xi - fr(r+2)}{(r+1)^2(\beta+2)\xi(f - X_0\xi)} \tag{9}$$

L'investissement de l'agent dépend de la qualité initiale du logement, du revenu, du rendement du revenu, du facteur de dépréciation et des paramètres du coût de l'énergie (ξ et f). Des analyses de sensibilité sont fournies dans la section suivante.

Les consommations de biens énergétiques et non énergétiques sont des fonctions croissantes du revenu. La consommation de biens non énergétiques dépend positivement du revenu. Plus la qualité énergétique initiale du logement est bonne, plus le coût de l'énergie est faible et donc l'agent peut dédier une plus grande partie de son revenu à la consommation de biens non énergétiques.

2.2. Calibrage et analyses de sensibilité

Le taux d'actualisation β est 0.99. Le taux de dépréciation et le taux de rendement du revenu r sont de 0.05[2]. À présent, des données françaises sont utilisées pour calibrer le modèle. Une difficulté réside dans la mesure de l'efficacité énergétique (qualité énergétique) du logement. Nous utilisons la valeur moyenne des logements comme mesure de la qualité. Cela signifie qu'une augmentation de l'efficacité énergétique du logement s'accompagne d'une augmentation de son prix. En 2006, le prix moyen est de 181 066 euros (INSEE, 2010, p. 2) pour une surface moyenne de 90 mètres carrés. Nous avons aussi besoin de déterminer le coût des services énergétiques. Pour cela, nous utilisons les données de l'enquête logement. Le coût de l'énergie pour un logement en France en 2006 est environ 0,0967 euro par mètre carré et par an, ce qui représente 1 697 euros. Les rénovations énergétiques permettent de diminuer le coût de l'énergie. Selon l'Observatoire Permanent de l'amélioration ENergétique des logements (OPEN), il faut investir en moyenne 12 000 euros pour obtenir une amélioration significative de l'efficacité énergétique (c'est-à-dire pour changer d'étiquette énergétique[3]). Dans ce cas, quand un logement fait l'objet d'une rénovation énergétique, son coût décroît à 0,0812 euro par mètre carré. En utilisant l'équation (4), nous calculons ξ et nous obtenons $\xi = 0.05$. Le paramètre f est égal à 10750. Les résultats sont résumés dans le tableau 1 qui suit :

Tableau 1. Calcul du paramètre ξ

Qualité du logement X_o	Consommation énergétique moyenne en $kWh_{ef}/m^2/an$	Coût de l'énergie en €/ m^2/an	Coût total de l'énergie en euros	ξ
181,066	195	0.0967	1697	
193,066	150	0.0812	1096	0.05

Concernant les résultats des analyses de sensibilité, les figures 1 et 2 sont fournies en annexe B.

2 Voir Nehru et Dhareshwar (1993) et Charlier, Mosiño et Pommeret (2011).

3 Une étiquette énergétique a été instaurée pour les logements de façon similaire à ce qui existe pour les appareils électroménagers. Pour plus d'informations, se référer au site de l'ADEME.

Premièrement, l'investissement de l'agent en efficacité énergétique est positif. L'agent investit. Nous remarquons que plus l'efficacité énergétique du logement est élevée, plus le niveau en investissement est faible. Ce résultat semble cohérent avec les faits observés. Les individus investissent uniquement dans des logements de mauvaise qualité énergétique, car ils ont des bénéfices à investir (nous faisons référence à la rentabilité de l'investissement). Un résultat intéressant concerne l'effet du taux d'actualisation. Plus β est élevé (c'est-à-dire plus l'agent est concerné par le futur), plus le niveau en investissement est élevé. L'horizon temporel de l'agent est donc un facteur déterminant de la décision d'investir. Nous pouvons supposer que des agents qui souhaitent quitter leur logement (qui ont des désirs de mobilité forts) n'entreprennent pas de travaux en efficacité énergétique. Concernant l'effet du revenu, nous obtenons un résultat surprenant. Plus le revenu de l'agent est élevé, plus le niveau en investissement est faible. Nous étudierons plus en détail ce résultat dans la partie empirique. Par ailleurs, les paramètres du coût de l'énergie sont des facteurs clés de la décision d'investir. Plus le logement est initialement de mauvaise qualité énergétique (f élevé), plus les agents investiront. Cela met en évidence la nécessité de tenir compte des caractéristiques des logements (par exemple la période de construction).

Finalement, concernant la consommation de biens énergétiques, nous remarquons que lorsque la qualité du logement est bonne et que le revenu est élevé, le niveau de consommation de biens énergétiques l'est aussi. Ainsi, quand la consommation de biens énergétiques devient moins coûteuse, elle augmente. Ce résultat suggère l'existence d'un potentiel effet rebond[4] de la consommation énergétique après investissement.

Compte tenu que d'un point de vue théorique l'agent devrait investir en efficacité énergétique, nous essayons de comprendre d'un point de vue empirique pourquoi le taux d'adoption est aussi faible et ne converge pas

4 Les économies d'énergie issues de l'utilisation d'une nouvelle technologie sont partiellement ou complètement compensées suite à une adaptation du comportement de la société. C'est ce que l'on définit par l'effet rebond. Il peut être de trois natures : direct, indirect ou macroéconomique. Pour plus d'information, voir Kazzhoom (1980, pp. 21-40), Greening *et al.* (2000, pp. 389-401) et Sorrell *et al.* (2009, pp. 1356-1371).

avec les résultats théoriques. Nous allons retenir dans le modèle les mêmes variables que celles suggérées par le modèle théorique, soit des caractéristiques sur le logement (qualité énergétique), des caractéristiques sur le ménage (revenu, statut d'occupation…) et des caractéristiques sur la rentabilité de l'investissement. Nous allons, d'une part, vérifier si les investissements en équipements économiseurs d'énergie sont rentables en France. D'autre part, s'il s'avère que ces investissements sont rentables, nous allons étudier le profil des ménages qui ne rénovent pas en vue d'illustrer le phénomène du paradoxe énergétique.

3. DONNÉES, VARIABLES ET STATISTIQUES DESCRIPTIVES

3.1. Données

Dans cette étude, nous utilisons l'*Enquête Logement 2006*. Cette enquête a pour objet de décrire les conditions de logement des ménages et leurs dépenses en logement. Nous utilisons aussi la base « *travaux* ». En fusionnant les deux bases de données, nous avons 22 228 ménages. Cette enquête fournit des informations sur les caractéristiques physiques du parc de logement, mais aussi sur les caractéristiques des ménages, sur les systèmes de chauffage et sur les travaux de rénovation. Dans cette étude, nous nous intéressons plus particulièrement aux travaux en efficacité énergétique. Nous faisons une distinction entre les travaux de rénovation en efficacité énergétique destinés à l'amélioration de l'isolation (RI) et les travaux de rénovation en efficacité énergétique destinés au changement des équipements (RE). Huit catégories de rénovations énergétiques sont donc considérées en accord avec la définition de l'OPEN : l'installation de double vitrage, l'isolation du toit, des murs et du sol, l'installation d'une Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC), d'un insert ou encore le remplacement des équipements de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Ces rénovations sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2. Les différentes catégories de rénovation

	Description
Rénovation en efficacité énergétique (REE)	Ces travaux améliorent la qualité énergétique des logements
Rénovation de l'isolation (RI)	Double vitrage, isolation des murs, isolation du toit, isolation du sol
Remplacement des équipements (RE)	Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC), introduction d'un insert, remplacement des équipements d'eau chaude sanitaire et remplacement des équipements de chauffage

Toutefois, dans cette base de données, nous ne disposons pas d'information sur la rentabilité des investissements, c'est-à-dire sur les dépenses énergétiques espérées après travaux et sur le coût à la rénovation. Pour pallier ce problème, nous créons de nouvelles variables à l'aide d'un logiciel PROMODUL pour obtenir des informations sur les gains à la rénovation. Ce logiciel utilise la méthode 3CL[5] et permet d'enrichir la base de données avec de nouvelles informations. Afin de simuler avec le plus d'exactitude possible la consommation énergétique des logements, le parc de logements est divisé en fonction de ses caractéristiques (les mêmes que celles disponibles dans l'enquête logement). Nous faisons une distinction entre le type de logement (individuel ou collectif), les périodes de construction (5 périodes), les zones climatiques (4 zones climatiques, la zone 1 étant la plus froide), le type d'isolation du toit (bon, intermédiaire, mauvais), le type de vitrage (double vitrage ou non), le système de ventilation (VMC ou non), le combustible principal utilisé pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage (électricité, gaz, fuel). Au final, nous disposons de 2 160 catégories de logements. Pour chaque catégorie de logements, une simulation est réalisée avant travaux et après chacune des 8 rénovations énergétiques. Nous sommes en mesure de connaître les dépenses énergétiques avant travaux en euros par mètre carré et par an ainsi que les dépenses énergétiques après chaque type de rénovation en euros par mètre carré et par an. Nous calculons les gains énergétiques pour chaque type de rénovation en fonction des caractéristiques du logement. Pour les coûts à la rénovation, nous utilisons des données fournies par l'OPEN. Nous faisons une distinction entre les coûts avec et sans main-d'œuvre. L'étape de la construction

5 La méthode de calcul 3CL appliquée pour la réalisation des DPE est définie par l'arrêté du 15 septembre 2006.

de la base de données est une des fortes contributions de ce travail. Nous fusionnons les données obtenues avec celles de l'Enquête Logement.

3.2. Variables et statistiques descriptives

3.2.1. Variables dépendantes

Dans cette étude, nous souhaitons (i) comprendre les déterminants des dépenses en rénovation et (ii) déterminer le profil des ménages qui n'investissent pas même quand la rénovation en efficacité énergétique s'avère rentable dans l'absolu (i.e. si les bénéfices du projet excèdent les coûts) d'un point de vue empirique.

Premièrement, pour analyser les déterminants des dépenses en rénovation en efficacité énergétique, nous allons considérer comme variables dépendantes le logarithme des dépenses en isolation et le logarithme des dépenses en remplacement.

Deuxièmement, nous allons étudier la probabilité de ne pas investir en efficacité énergétique alors que l'investissement est rentable dans l'absolu (i.e. que les bénéfices excèdent les coûts). Nous voulons identifier le profil des ménages qui n'investissent pas alors que les travaux en efficacité énergétique sont profitables.

Nous avons donc besoin de créer de nouvelles variables. En effet, si les dépenses en rénovation sont disponibles dans la base, ce n'est pas le cas pour les variables de rentabilité de l'investissement. Il est nécessaire de savoir quels sont les logements qui ont une analyse coût bénéfice favorable. Nous créons donc une variable binaire qui prend la valeur 1 quand l'investissement est rentable. Pour créer cette variable, nous devons disposer des gains énergétiques à la rénovation. Ces gains sont obtenus en faisant la différence entre les dépenses théoriques avant travaux et les dépenses théoriques après travaux qui ont été calculées à l'aide du logiciel PROMODUL. Pour éviter de comparer un coût total à un gain annuel (G_{it}), nous actualisons les gains énergétiques en euros constants afin d'obtenir une valeur actualisée (VA_{it}), pour chaque logement i à chaque année t.

$$VA_{it} = T_{t=1}^{k} \frac{G_{it}}{(1+\phi)^{T_k}} \qquad (1)$$

où ϕ est le taux d'intérêt du marché de long terme et T_k la durée de vie moyenne des équipements. Si la valeur actualisée est supérieure aux coûts des rénovations sans main-d'œuvre en euros constants, la variable binaire prend la valeur 1. Cette étape nous permet aussi de calculer la valeur actualisée nette de l'investissement. Cette analyse coût bénéfice repose toutefois sur l'hypothèse que les ménages ne tiennent pas compte des coûts et bénéfices cachés qui peuvent affecter la rentabilité. De plus, le calcul de la rentabilité de l'investissement est réalisé de manière absolue. Nous comparons uniquement les bénéfices et les coûts de la rénovation sans tenir compte des caractéristiques des ménages. En effet, des données sur de tels coûts et bénéfices ne sont pas disponibles à notre connaissance et il n'a pas été possible d'en tenir compte dans cette étude. De plus, notre objectif est d'identifier les ménages qui ne rénovent pas malgré la profitabilité de l'investissement. Les valeurs des variables de gains potentiels et de coût sont résumées dans le tableau C2 en annexe.

3.2.2. Variables indépendantes

Les variables explicatives introduites sont issues d'une part de la littérature et d'autre part des résultats obtenus dans le modèle théorique. Ainsi, nous faisons une distinction entre les caractéristiques socio-économiques des ménages, les caractéristiques du bâti et les caractéristiques des travaux.

Les caractéristiques socio-économiques des ménages

Dans les caractéristiques socio-économiques, nous introduisons le revenu, le statut d'occupation et le niveau de diplôme. Les dépenses en efficacité énergétique ainsi que les ménages en situation de paradoxe énergétique peuvent s'expliquer en partie par l'hétérogénéité entre les agents, par la difficulté d'accès au capital et par l'existence d'incitations divergentes. Les incitations divergentes sont une situation où un agent n'a aucun intérêt à faire une action tandis que l'autre agent va bénéficier de cet investissement sans avoir à en payer les coûts. Le faible taux d'adoption d'équipements énergétiques peut, par conséquent, s'expliquer dans des situations où les bénéfices et les coûts de l'efficience énergétique reviennent à des individus différents. Chacun aura alors intérêt à ce que le coût soit supporté par l'autre (van Soest et Bulte, 2001, p. 102). De nombreux chercheurs ont d'ailleurs démontré que la probabilité d'investissement en efficacité

énergétique augmentait avec le fait d'être propriétaire occupant (dont Hassett et Metcalf, 1995, p. 214).

Finalement, dans l'analyse descriptive, nous regardons aussi le désir de mobilité des ménages.

Les caractéristiques du bâti

Afin de déterminer les dépenses de rénovation en efficacité énergétique et le profil des ménages qui n'investissent pas même quand les rénovations sont profitables (i.e. qui sont dans une situation de paradoxe énergétique), il convient aussi d'introduire des variables sur les caractéristiques du bâti. Dans le modèle théorique, la qualité énergétique du bâtiment est une variable déterminante de la décision d'investir en efficacité énergétique. C'est aussi un moyen d'expliquer la profitabilité de l'investissement. Nous allons donc tenir compte des périodes de construction, du mode de chauffage (individuel ou collectif) ou du type de logement (individuel ou collectif) et de la zone climatique. Nous introduisons aussi des données sur la surface des logements et sur l'orientation de ces derniers.

Les caractéristiques des travaux

Groschen et Vance (2009, p. 138) ont souligné l'importance de tenir compte des variables économiques dans la décision de rénover en efficacité énergétique. Nous introduisons donc la rentabilité de l'investissement pour voir si les ménages tiennent compte dans leur décision d'investir de cette variable. Nous introduisons aussi le nombre de travaux. Les variables sont résumées dans le tableau C1 en annexe.

3.2.3. Statistiques descriptives

En 2006, environ 69 % des ménages ont entrepris des travaux en efficacité énergétique avec une analyse coût bénéfice favorable. Par contre, les travaux d'isolation sont souvent plus rentables que les travaux en remplacement (tableau C2 en annexe). 28 % des ménages vivant en résidence principale ont entrepris des travaux de rénovation et seulement 4 % ont réalisé des travaux en efficacité énergétique (ces données sont légèrement plus faibles que celles constatées par l'OPEN qui avoisinent les 9 %). En moyenne, les ménages qui ont entrepris une rénovation ont dépensé

6 169 euros (tableaux C3 et C4 en annexe pour des statistiques descriptives détaillées des variables). Les ménages peuvent réaliser plusieurs types de rénovation en même temps.

Pour étudier le paradoxe énergétique, nous comparons les ménages qui ont une analyse coût bénéfice favorable et qui ont entrepris des travaux avec ceux qui n'ont pas entrepris de travaux (voir tableau 3).

Tableau 3. Les ménages et le paradoxe énergétique

	Logements rénovés avec une analyse coût bénéfice rentable	Logements non rénovés avec une analyse coût bénéfice rentable	Répartition des ménages avec une analyse coût bénéfice rentable
Revenu			
Quintile 1	19.15 %*	20.46 %	20.36 %
Quintile 2	19.52 %	19.91 %	19.88 %
Quintile 3	20.07 %	19.98 %	19.99 %
Quintile 4	22.28 %	20.58 %	20.71 %
Quintile 5	18.97 %	19.07 %	19.06 %
Statut d'occupation			
Propriétaire	54.14 %	48.3 %	51.31 %
Locataire	45.86 %	51.7 %	48.69 %
Type de logement			
Maison individuelle	44 %	27.77 %	28.81 %
Immeuble collectif	55 %	72.23 %	71.19 %
Âge			
Moins de 30 ans	8.29 %	12 %	11.36 %
Entre 30 et 39 ans	19.52 %	22.13 %	21.94 %
Entre 40 et 49 ans	26.23 %	21.51 %	21.78 %
Entre 50 et 64 ans	27.54 %	24.78 %	24.92 %
Après 65 ans	18.42 %	19.58 %	20 %
Marché du travail			
En emploi	61.88 %	58.96 %	59.18 %
Sans emploi	38.12 %	41.04 %	40.82 %
Désir de mobilité			
Avec un désir de mobilité	30.94 %	39.50 %	38.86 %
Sans désir de mobilité	69.06 %	60.50 %	61.14 %

Note : *19.15 % des ménages avec une analyse coût bénéfice rentable qui entreprennent des travaux en efficacité énergétique appartiennent au premier quintile de revenu.

Le profil des ménages qui ont une analyse coût bénéfice favorable mais qui n'ont pas entrepris de travaux est le suivant. Ce sont plutôt des locataires qui vivent dans des logements collectifs. Ils sont souvent jeunes, retraités ou sans emploi. Ils appartiennent au premier quintile de revenu. Finalement, ils ont un désir de mobilité (de changer de logement) plutôt fort. Malheureusement, le désir de mobilité étant une variable fortement endogène, nous ne pourrons pas l'introduire dans l'analyse économétrique. Au regard des statistiques descriptives, plusieurs arguments peuvent expliquer ce paradoxe comme l'existence de barrières de marché par exemple. En effet, les difficultés d'accès au capital ou l'existence d'incitations divergentes peuvent être des freins à l'investissement. Un investissement qui serait alors rentable dans l'absolu ne le sera pas forcément en fonction des caractéristiques du ménage. Il convient donc d'identifier le profil des ménages qui n'investissent pas malgré la rentabilité du projet (ce qui démontre l'existence de défaillances de marché) afin d'adapter les politiques publiques.

4. MODÈLES ET RÉSULTATS

Nous allons procéder en deux étapes. Premièrement, nous allons regarder si les dépenses en efficacité énergétique sont déterminées par la rentabilité de l'investissement. Deuxièmement, nous allons déterminer le profil des ménages qui n'investissent pas, même quand la rénovation en efficacité énergétique s'avère rentable (i.e. si les bénéfices du projet excèdent les coûts) d'un point de vue empirique.

4.1. L'analyse des dépenses en efficacité énergétique

L'analyse des données est compliquée à cause de deux aspects. Premièrement, environ 88 % des ménages n'ont reporté aucune dépense de rénovation en 2006. Dans ce cas, estimer les dépenses de rénovation en utilisant les moindres carrés ordinaires peut poser certains problèmes techniques. Deuxièmement, si nous considérons nos deux catégories de rénovation : les rénovations d'isolation du bâti et les rénovations de remplacement des équipements, la part des ménages qui n'ont entrepris aucune rénovation est respectivement de 82,72 % et 97,02 %. Dans ce cas, une régression Tobit (Heckman, 1979 ; Tobin, 1958 ; Amemiya, 1973) est utilisée. Un autre type de problème est l'interdépendance possible entre les deux catégories de rénovation. Le modèle

économétrique qui permet de tenir compte de la censure en zéro et de l'interdépendance est un modèle Tobit bivarié (Amemiya, 1974).

Ce modèle est une extension du modèle Tobit de régression simple. Avec un modèle Tobit bivarié, il est donc possible d'estimer conjointement les dépenses de rénovation d'isolation du bâti et les dépenses de remplacement des équipements tout en tenant compte de l'interdépendance entre ces deux catégories de rénovation. La significativité globale du modèle est analysée en utilisant un test du maximum de vraisemblance. La statistique de test du χ^2 est 482.22. Nous rejetons donc l'hypothèse nulle de non-significativité des coefficients. L'interdépendance entre les deux types de rénovation est testée en appliquant un test du rapport de vraisemblance. Le test utilise le fait que les coefficients entre les termes d'erreur ρ_{LRI} et ρ_{LRE} dans les deux équations de dépense sont contraints en zéro quand un modèle univarié est utilisé. La statistique de test de Student pour le coefficient $\rho_{LRI'LRE}$ est significative au seuil de 1 %, donc l'hypothèse d'indépendance des erreurs ($\rho_{LRI'LRE} = 0$) est rejetée. Il est clair à partir des résultats obtenus que les données doivent être analysées à l'aide d'un modèle Tobit bivarié.

Les résultats (voir tableau 4) montrent, toutes choses égales par ailleurs, que plus les individus sont diplômés, plus ils dépensent dans des rénovations en économie d'énergie. Ces résultats sont cohérents avec Nair *et al.* (2010, p. 2960). En revanche, nous remarquons aussi que les individus qui ont un diplôme inférieur au baccalauréat dépensent plus que les individus sans qualification. Ces ménages exercent parfois des métiers techniques et manuels, ce qui leur permet d'auto-entreprendre des travaux.

Nous remarquons que le revenu n'a pas d'effet sur la décision d'entreprendre des travaux en économie d'énergie. Les dépenses sont des montants bruts. Ainsi, il n'a pas été possible de déduire des dépenses le montant des aides publiques attribué aux individus. Le statut d'occupation du logement est un déterminant des dépenses en rénovation. Le fait d'être propriétaire de son logement joue positivement et significativement, toutes choses égales par ailleurs, sur les dépenses en isolation. En revanche, le statut d'occupation n'a pas d'effet sur les dépenses en remplacement des équipements. Dans l'Enquête Logement 2006, nous ne disposons pas d'informations complémentaires sur les raisons qui ont conduit les ménages à remplacer leurs équipements. Il est possible que ces derniers décident de changer leurs appareils de

chauffage et d'eau chaude sanitaire lorsqu'une panne survient. En France, les propriétaires sont dans l'obligation de remplacer ces équipements dans les logements loués lorsqu'une panne se produit. Ceci pourrait expliquer pourquoi le statut d'occupation n'a pas d'effet dans ce cas-là. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Arnott, Davidson, et Pines (1983, p. 485), Rehdanz (2007, p. 2) et Davis (2010, p. 1). Si les caractéristiques socio-économiques des ménages et principalement le statut d'occupation semblent être des déterminants des dépenses en rénovation énergétique, les caractéristiques des logements semblent aussi essentielles. Plus la surface du logement est élevée, plus les dépenses, toutes choses égales par ailleurs, sont importantes. Toutefois, il y a un effet non linéaire de la surface, puisque la variable « surface au carré » joue négativement et significativement sur les dépenses en rénovation. Ceci implique que les dépenses augmentent dans un premier temps avec la surface jusqu'à un certain seuil, puis diminuent ensuite. Les ménages qui vivent dans des maisons individuelles dépensent plus, toutes choses égales par ailleurs, que ceux qui vivent dans des logements collectifs. Ce résultat n'est pas surprenant. Compte tenu de la spécificité des logements collectifs avec un chauffage collectif en France (les assemblées de copropriétaires doivent voter les travaux à la majorité), nombreux sont les logements qui peuvent ne pas faire l'objet de travaux en économie d'énergie. Les travaux en isolation ont lieu dans les bâtiments anciens construits avant 1974. Les études dans la littérature ont obtenu des résultats similaires. Nair *et al.* (2010, p. 2959) ont montré que les individus qui vivent dans des logements qui ont plus de 35 ans sont plus enclins à entreprendre des travaux majeurs de rénovation en économie d'énergie comme le remplacement et l'isolation des murs extérieurs.

Les caractéristiques des travaux sont aussi des déterminants des dépenses en rénovation. Le nombre de travaux joue positivement et significativement quel que soit le type de rénovation. Finalement, les résultats montrent que la profitabilité de l'investissement n'est pas significative sur le fait d'entreprendre des travaux d'isolation et de remplacement. Des résultats similaires sont obtenus lorsque la valeur actualisée nette est introduite comme une variable continue (voir tableau C5 en annexe). Ceci peut s'expliquer de deux façons. Premièrement, nous rappelons que l'analyse coût bénéfice repose sur l'hypothèse que les ménages ne tiennent pas compte des coûts et bénéfices cachés qui peuvent affecter la rentabilité. Dans le cas de l'isolation, autres que les bénéfices monétaires de l'investissement, les ménages peuvent investir pour améliorer l'isolation phonique

Tableau 4. Résultats de l'estimation – Tobit bivarié

Variables[a]	LRI		LRE	
Caractéristiques socio-économiques des ménages				
Inf bac	1,492*	(0,898)	1,170	(1,365)
Bac	-1,141	(1,275)	-0,0232	(1,874)
Bac+2	2,934**	(1,257)	0,0499	(2,096)
Supbac+2	1,430	(1,181)	3,265*	(1,693)
LRevenu	0,0127	(1,304)	0,945	(1,897)
Bef30	-0,631	(1,035)	-0,802	(1,565)
30-39	-0,204	(0,995)	0,975	(1,437)
40-49	-0,483	(0,948)	-2,141	(1,474)
50-64	-0,318	(0,404)	0,00532	(0,549)
Propriétaires	1,661**	(0,721)	1,742	(1,060)
Caractéristiques du bâti				
Avt1974	2,416*	(1,459)	-0,967	(2,068)
1974-1981	1,701	(1,688)	-0,570	(2,395)
1982-1989	1,229	(1,736)	2,048	(2,399)
1990-2001	0,124	(1,635)	-0,603	(2,286)
Surface	0,159***	(0,0304)	0,215***	(0,0344)
Surface2	-0,000255**	(0,000110)	-0,000439***	(0,000124)
Climat1	1,104	(1,029)	2,294	(1,591)
Climat2	0,455	(0,999)	2,293	(1,534)
Climat3	1,084	(1,149)	1,019	(1,816)
Ind	2,935***	(0,773)	4,267***	(1,195)
Caractéristiques des travaux				
LNB	2,067***	(0,429)	1,686***	(0,610)
Coût-bénéfice isolation	0,230	(0,782)	3,579***	(1,175)
Coût-bénéfice remplacement	-0,801	(2,071)	-1,478	(3,285)
Constante	-48,66***	(4,647)	-66,41***	(6,344)
$\rho_{LRI,\ LRE} = 0.49093^{***}(0.036605)$				
Ho dépenses indépendantes $\chi^2(1) = 143,375$				
N	16697			
Log-likelihood	-5323,986			
	$H_o\ B_j^b = 0$		$\chi^2(46) = 482,22$	

Note : les écarts-types corrigés de l'hétéroscédasticité sont entre parenthèses. *, **, et *** indique la significativité statistique des coefficients au seuil de 10 %, 5 % et 1 % respectivement. [a] Les variables sont définies dans le tableau C1 en annexe L'hypothèse nulle $B^j = 0$ est utilisée pour tester la significativité globale du modèle. L'hypothèse nulle postule que tous les coefficients, excepté la constante, sont égaux à zéro.

ou la qualité de l'air. Il est d'ailleurs probable qu'ils tiennent compte de ces critères dans la décision d'investir. Deuxièmement, l'analyse coût bénéfice repose sur une analyse de long terme des ménages. Ces derniers analysent peut-être la décision de rénovation sur du court terme. Il semblerait donc que les ménages n'appliquent pas le critère de la valeur actualisée comme le suggère la littérature (Henry, 1974, p. 1007 ; Dixit et Pindyck, 1994). Ainsi, la règle de la valeur actuelle nette doit être changée.

Finalement, les dépenses pour les rénovations en isolation sont mieux expliquées que pour les travaux de remplacement. Pour rappel, dans l'Enquête Logement 2006, nous ne disposons pas d'information sur la vétusté des équipements. De plus, nous ne connaissons pas les motifs de remplacement de ces derniers.

4.2. L'analyse du paradoxe énergétique

À présent, comme nous avons constaté que les ménages n'utilisent pas le critère de la valeur actualisée pour formaliser leur décision d'investissement en efficacité énergétique (ce qui est en accord avec la littérature sur le paradoxe énergétique), nous allons étudier le profil des ménages qui ont une analyse coût bénéfice profitable (les gains énergétiques sont supérieurs au coût de la rénovation), mais qui n'ont pas investi en 2006. Nous voulons voir si l'absence d'investissement est liée à l'existence de barrières de marché comme le statut d'occupation ou l'accès au capital. Sachant que la variable à expliquer est une variable discrète binaire nous allons adopter un modèle Probit. La réalisation d'un test du ratio de vraisemblance qui permet de comparer le modèle présent et un modèle qui ne comporterait que la constante nous montre que le modèle estimé est globalement explicatif. Les résultats (tableau 5) montrent que le fait d'être propriétaire diminue la probabilité d'avoir une analyse coût bénéfice favorable et de ne pas investir de 5,62 %. Le statut d'occupation est donc une variable déterminante. En effet, le fait d'être locataire augmente la probabilité de ne pas investir même lorsque la rénovation est profitable. L'effet significatif de cette variable est en accord avec la littérature sur les incitations divergentes (IEA, 2007, pp. 1-224) et le paradoxe énergétique. De plus, même s'il est difficile de tester l'accès au capital des ménages, nous pouvons étudier l'effet du revenu. Nous supposons que les ménages avec un revenu élevé peuvent accéder plus facilement au capital et disposent aussi d'une

Tableau 5. La probabilité d'avoir un investissement profitable et de ne pas réaliser des travaux en efficacité énergétique

Variables	Coefficients (Écarts-types)	Effets marginaux
Caractéristiques socio-économiques des ménages		
Propriétaires	-0,141***	-0,0562***
	(0,0205)	(0,00816)
LRevenu	-0,0315***	-0,0125***
	(0,0118)	(0,00469)
Caractéristiques du bâti		
Avant 1974	1,029***	0,391***
	(0,0496)	(0,0170)
1974-1981	0,870***	0,323***
	(0,0563)	(0,0178)
1982-1989	0,671***	0,256***
	(0,0582)	(0,0201)
1990-2001	0,445***	0,175***
	(0,0542)	(0,0206)
Climat1	0,0893***	0,0356***
	(0,0314)	(0,0125)
Climat2	0,0506*	0,0202*
	(0,0301)	(0,0120)
Climat3	0,0525	0,0209
	(0,0350)	(0,0140)
Est	0,156***	0,0623***
	(0,0295)	(0,0117)
Ouest	0,188***	0,0750***
	(0,0297)	(0,0118)
Nord	0,119***	0,0476***
	(0,0291)	(0,0116)
Surface	-0,00235***	-0,000937***
	(0,000245)	(9,78e-05)
Constante	-0,398***	
	(0,130)	
Observations	16,012	

Note : les écarts-types corrigés de l'hétéroscédasticité sont entre parenthèses. *, **, et ***indique la significativité statistique des coefficients au seuil de 10 %, 5 % et 1 % respectivement.

épargne plus élevée. Il est donc plus aisé pour ces ménages d'entreprendre des travaux en efficacité énergétique. Ainsi, nous obtenons, toutes choses égales par ailleurs, qu'une unité supplémentaire de revenu diminue la probabilité de 1,25 % de ne pas entreprendre des travaux même si ces derniers sont rentables.

En s'intéressant aux variables du bâti, les ménages qui n'investissent pas malgré la rentabilité de l'investissement vivent dans des logements anciens, peu exposés à lumière, avec des petites surfaces et situés dans des zones climatiques froides toutes choses égales par ailleurs. Ces résultats confirment en partie que l'absence d'investissement même quand celui-ci est profitable tient à l'existence de barrières de marché comme les incitations divergentes, la difficulté d'accès au capital ou l'hétérogénéité entre les agents. Compte tenu des données, il est malheureusement impossible, dans cette étude, de tester les autres éléments qui visent à expliquer le paradoxe énergétique. Toutefois, l'existence de défaillances de marché suggère le recours aux politiques publiques. Il convient alors au gouvernement d'intervenir pour mettre en place des politiques publiques en faveur de l'investissement en efficacité énergétique pour les ménages concernés. À titre d'exemple, les ménages à faibles revenus n'ont pas la capacité de financer avec leur épargne le montant des travaux. Des subventions avant travaux pour ces ménages pourraient être une solution. Il faudrait aussi envisager des mesures financières ou réglementaires pour inciter les travaux en efficacité énergétique dans les logements loués.

Les individus en situation de paradoxe énergétique ont aussi un désir mobilité très fort et sont insatisfaits du rapport qualité prix de leur mode de chauffage. Si, en moyenne, 65 % des ménages sont satisfaits du rapport qualité prix de leur mode de chauffage, seulement 59 % des ménages qui sont dans une situation de paradoxe énergétique sont satisfaits. Ce résultat, combiné à l'effet du revenu, suggère que ces individus peuvent être dans une situation de précarité énergétique (revenu faible et facture énergétique élevée). S'il est nécessaire de recourir à l'intervention politique pour réduire les défaillances de marché, il pourrait être pertinent de mettre en place des mesures de lutte contre la pauvreté notamment pour les ménages les moins aisés qui sont dans une situation de précarité énergétique. Ces résultats restent toutefois à confirmer.

5. CONCLUSION

Investir dans les mesures en efficacité énergétique peut jouer un rôle central dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'objectif de cette étude était (i) d'analyser les déterminants des dépenses en rénovation en efficacité énergétique en introduisant la rentabilité de l'investissement comme variable explicative et (ii) de déterminer le profil des ménages qui n'investissaient pas même quand la rénovation en efficacité énergétique s'avérait rentable (i.e. si les bénéfices du projet excèdent les coûts). Si la littérature théorique sur le paradoxe énergétique est vaste, très peu d'études ont essayé de vérifier ce phénomène empiriquement. Pour cela, une forte contribution de ce papier tient à la construction d'une base de données sur les dépenses énergétiques avant et après travaux et sur les coûts à la rénovation. Cette étude contribue donc à la littérature sur le paradoxe énergétique, mais aussi à la littérature sur le choix du consommateur qui se concentre plus particulièrement sur les choix d'investissement en rénovation dans le secteur résidentiel. Nous obtenons comme résultat principal que les ménages n'appliquent pas le critère de la valeur actualisée comme le suggère la littérature. En étudiant les ménages qui n'ont pas investi en 2006 et qui présentaient pourtant une analyse coût bénéfice favorable, nous remarquons que l'absence d'investissement de ces derniers provient de l'existence de barrières de marché (statut d'occupation et difficulté d'accès au capital). De plus, les résultats semblent aussi montrer que ces ménages ont des revenus faibles et font face à un coût de l'énergie élevé. À l'avenir, il faudrait approfondir ces résultats en s'intéressant à la question de la précarité énergétique. Ainsi, il paraît nécessaire de recourir à l'intervention politique pour réduire, d'une part, les défaillances de marché, notamment dans le cas des incitations divergentes, et, d'autre part, pour mettre en place des mesures de lutte contre la précarité énergétique. En effet, en l'absence de politiques publiques pour inciter l'adoption d'investissements en efficacité énergétique, les objectifs fixés par le gouvernement en matière d'émissions et de consommation énergétiques semblent difficiles à atteindre.

BIBLIOGRAPHIE

AMEMIYA, TAKESHI (1973), « Regression Analysis When the Dependent Variable Is Truncated Normal », *Econometrica*, vol. 41, n° 6, pp. 997-1016.

AMEMIYA, TAKESHI (1974), « Multivariate Regression and Simultaneous Equation Models When the Dependent Variables Are Truncated Normal », *Econometrica*, vol. 42, n° 6, pp. 999-1012.

ARNOTT, R., DAVIDSON, R. et PINES, D. (1983), « Housing Quality, Maintenance and Rehabilitation », *The Review of Economic Studies*, vol. 50, n° 3, pp. 467-494.

BANFI, S., FARSI, M., FILIPPINI, M. et JAKOB, M. (2008), « Willingness to Pay for Energy-Saving Measures in Residential Buildings », *Energy Economics*, vol. 30, n° 2, pp. 503-516.

BOULANGER, P.-M. (2007), « Les barrières à l'efficacité énergétique », *Reflets et perspectives de la vie économique*, tome XLVI, pp. 49-62.

BROWN, M. A. (2001), « Market Failures and Barriers as a Basis for Clean Energy Policies », *Energy Policy*, vol. 29, n° 14, pp. 1197-1207.

CAMERON, T. A., (1985), « A Nested Logit Model of Energy Conservation Activity by Owners of Existing Single Family Dwellings », *The Review of Economics and Statistics*, vol. 67, n° 2, pp. 205-211.

CHARLIER D., MOSIÑO A. et POMMERET A. (2011), « Energy Saving technology adoption under uncertainty in the housing sector », *Annals of Economics and Statistics*, special issue on environmental and resource economics, n° 103-104, pp. 43-70.

DAVIS, L. W. (2010), « Evaluating the Slow Adoption of Energy Efficient Investments: Are Renters Less Likely to Have Energy Efficient Appliances? », *NBER Working Paper*, No. 16114.

DECANIO, S. J. (1993), « Barriers within Firms to Energy-Efficient Investments », *Energy Policy*, vol. 21, n° 9, pp. 906-914.

DECANIO, S. J. (1998), « The Efficiency Paradox: Bureaucratic and Organizational Barriers to Profitable Energy-Saving Investments », *Energy Policy*, vol. 25, n° 5, pp. 441-454.

DIAZ-RAINEY, I. et ASHTON J. K. (2009), « Domestic Energy Efficiency Measures Adopter Heterogeneity and Policies to Induce Diffusion », *Working Paper SSRN*.

DIXIT, A. K. et PINDYCK, R. S. (1994), *Investment under Uncertainty*. Princeton University Press.

GREENING, L. A. et GREENE, D. L. (2000), « Energy Efficiency and Consumption - the Rebound Effect – a Survey », *Energy Policy*, vol. 28, n° 6-7, pp. 389-401.

GROSCHEN, P et VANCE, C. (2009), « Willingness to Pay for Energy Conservation and Free-Ridership on Subsidization: Evidence from Germany », *Energy Journal*, vol. 30, n° 2, pp. 135-153.

HANNA, B. G. (2007), « House Values, Incomes, and Industrial Pollution », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 54, n° 1, pp. 100-112.

HASSETT, K. A. et METCALF, G. E. (1995), « Energy Tax Credits and Residential Conservation Investment: Evidence from Panel Data », *Journal of Public Economics*, vol. 57, n° 2, pp. 201-217.

HECKMAN, J. J. (1979), « Sample Selection Bias as a Specification Error », *Econometrica*, vol. 47, n° 1, pp. 153-161.

HENRY, C. (1974), « Investment Decisions under Uncertainty: The Irreversibility Effect », *American Economic Review*, vol. 64, n° 5, pp. 1006-1012.

INSEE (2010), « Prix des logements anciens », *Insee Première*, n° 197, pp. 1-4.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2007), « Mind the Gap – Quantifying Principal-Agent Problems in Energy Efficiency », OECD, IEA, pp. 1-224.

JAFFE, A. B. et STAVINS, R. N. (1994a), « The Energy Paradox and the Diffusion of Conservation Technology », *Resource and Energy Economics*, vol. 16, n° 2, pp. 91-122.

JAFFE, A. B. et STAVINS, R. N. (1994b), «The Energy-Efficiency Gap What Does It Mean? », *Energy Policy*, vol. 22, n° 10, pp. 804-810.

KAHN, M. E. (2007), « Do Greens Drive Hummers or Hybrids? Environmental Ideology as a Determinant of Consumer Choice », *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 54, n° 2, pp. 129-145.

KHAZZOOM, J. D. (1980), « Economic Implications of Mandated Efficiency in Standards for Household Appliances », *The Energy Journal*, vol. 1, n° 4, pp. 21-40.

MAHAPATRA, K. et GUSTAVSSON, L. (2008), « An Adopter-Centric Approach to Analyze the Diffusion Patterns of Innovative Residential Heating Systems in Sweden », *Energy Policy*, vol. 36, n° 2, pp. 577-590.

MONTGOMERY, C. (1992), « Explaining Home Improvement in the Context of Household Investment in Residential Housing », *Journal of Urban Economics*, vol. 32, n° 3, pp. 326-350.

NAIR, G., GUSTAVSSON, L. et MAHAPATRA, K. (2010), « Factors Influencing Energy Efficiency Investments in Existing Swedish Residential Buildings », *Energy Policy*, vol. 38, n° 6, pp. 2956-2963.

NEHRU, V. et DHARESHWAR A. (1993), « A New Database on Physical Capital Stock: Sources, Methodology and Results », *Revista de Analisis Economica*, vol. 8, n° 1, pp. 37-59.

PLAUT, S. et PLAUT, P. (2010), « Decisions to Renovate and to Move », *JRER*, vol. 32, n° 4.

REHDANZ, K. (2007), « Determinants of Residential Space Heating Expenditures in Germany », *Energy Economics*, vol. 29, n° 2, pp. 167-182.

SANSTAD, A. H., BLUMSTEIN, C. et STOFT, S. E. (1995), « How High Are Option Values in Energy-Efficiency Investments? », *Energy Policy*, vol. 23, n° 9, pp. 739-743.

SORRELL, S., DIMITROPOULOS, J. et SOMMERVILLE, M. (2009), « Empirical Estimates of the Direct Rebound Effect: A Review », *Energy Policy*, vol. 37, n° 4, pp. 1356-1371.

STERN, N. (2008), « The Economics of Climate Change », *American Economic Review*, vol. 98, n° 2, pp. 1-37.

TOBIN, J. (1958), « Estimation of Relationships for Limited Dependent Variables », *Econometrica*, vol. 26, n° 1, pp. 24-36.

VAN SOEST, D. P. et BULTE, E. H. (2001), « Does the Energy-Efficiency Paradox Exist? Technological Progress and Uncertainty », *Environmental and Resource Economics*, vol. 18, n° 1, pp. 101-112.

ANNEXES

Annexe A. Le modèle : conditions de premier ordre

$$\frac{\partial U}{\partial C_1^e} = \frac{b\left(\frac{I_0 + X_0(1-\delta)}{r+1} - C_1^e(f - (I_0 + X_0(1-\delta))\zeta) + C_1^e((I_0 + X_0(1-\delta))\zeta - f) + (r+1)(-C_0^{ne} - I_0 + R_0 - C_0^e(f - X\zeta))\right)}{C_1^e\left(\frac{I_0 + X_0(1-\delta)}{r+1} - C_1^e(f - (I_0 + X_0(1-\delta))) + (r+1)(-C_0^{ne} - I_0 + R_0 - C_0^e(f - X\zeta))\right)} = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial C_0^e} = \frac{(r+1)\beta(X_0\zeta - f)}{\frac{I_0 + X_0(1-\delta)}{r+1} - C_1^e(f - (I_0 + X_0(1-\delta))\zeta) + (r+1)(-C_0^{ne} - I_0 + R_0 - C_0^e(f - X_0\zeta))} + \frac{1}{C_0^e} = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial C_0^{ne}} = \frac{(-r-1)\beta}{\frac{I_0 + X_0(1-\delta)}{r+1} - C_1^e(f - (I_0 + X_0(1-d))\zeta) + (r+1)(-C_0^{ne} - I_0 + R_0 - C_0^e(f - X_0\zeta))} + \frac{1}{C_0^{ne}} = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial I_0} = \frac{\beta\left(-r + C_1^e\zeta + \frac{1}{r+1} - 1\right)}{\frac{I_0 + X_0(1-\delta)}{r+1} - C_1^e(f - (I_0 + X_0(1-\delta))\zeta) + (r+1)(-C_0^{ne} - I_0 + R_0 - C_0^e(f - X_0\zeta))} = 0$$

Annexe B. Analyses de sensibilité

Figure 1. Analyses de sensibilité sur l'investissement

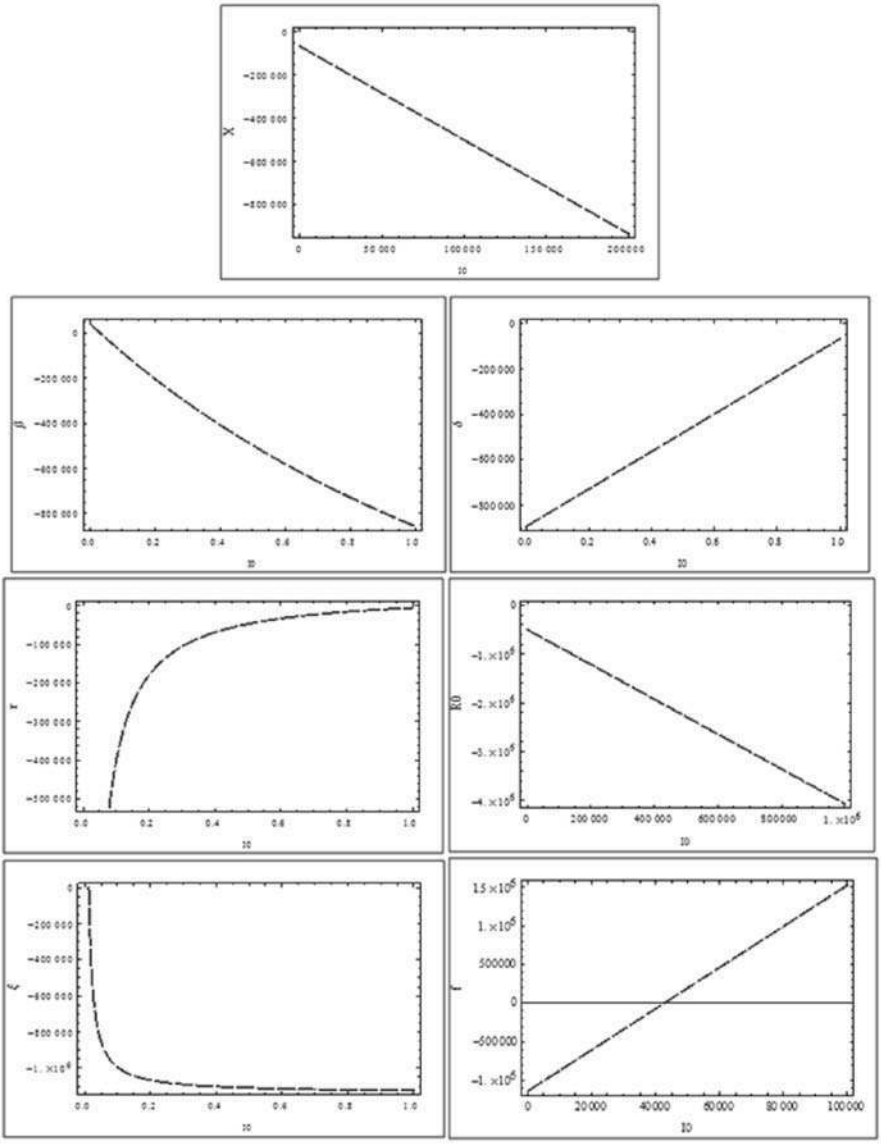
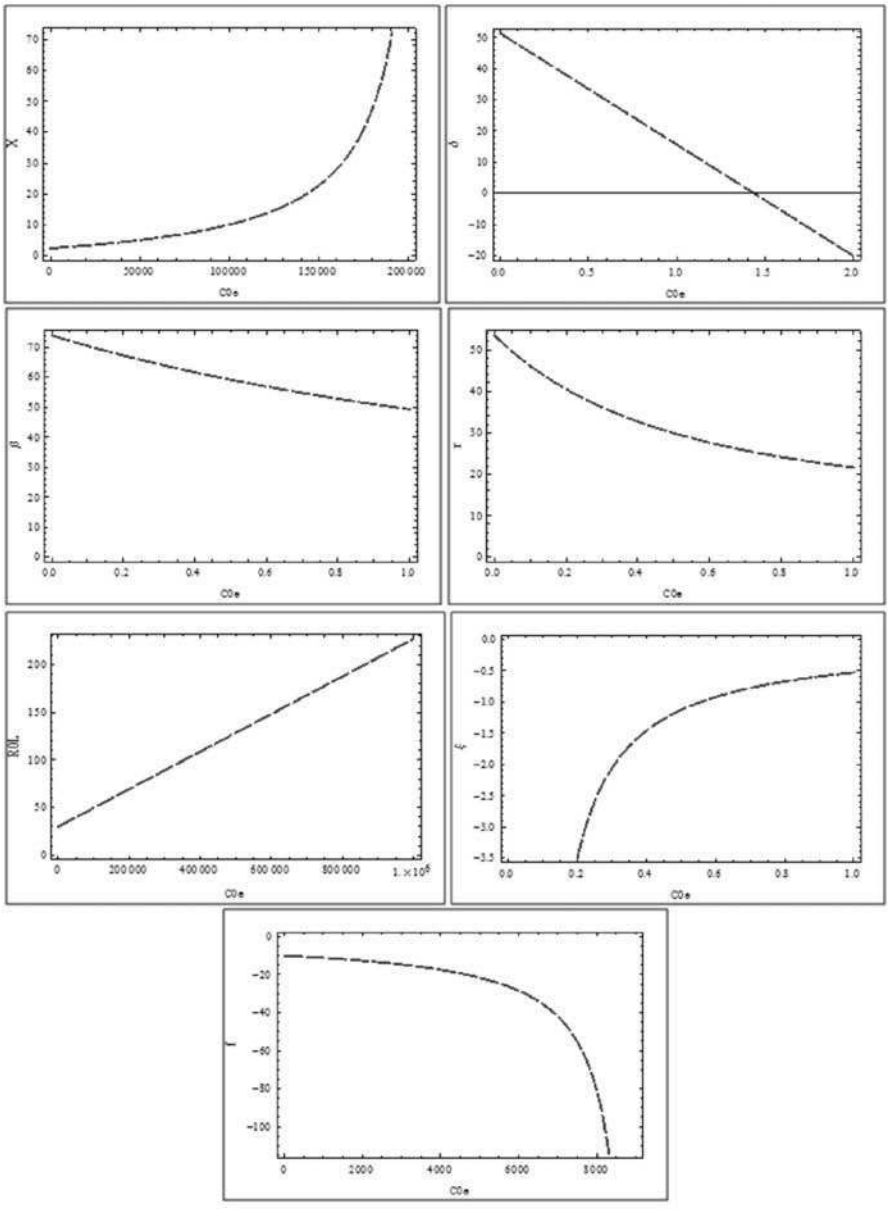


Figure 2. Analyse de sensibilité sur la consommation de biens énergétiques



Annexe C. Analyse empirique

Tableau C1. Description des variables

Variables	Nom	Définitions	Unités
Variables dépendantes			
Dépenses de rénovation en l'isolation	LRI	Le montant des dépenses de rénovation pour l'isolation	En euros et en logarithme
Dépenses de rénovation en remplacement des équipements	LRE	Le montant des dépenses de rénovation pour le remplacement des équipements	En euros et en logarithme
Variables indépendantes			
Caractéristiques socio-économiques des ménages			
Niveau de diplôme		Variable binaire introduite pour chaque niveau (5 niveaux)	
Sans qualification	Ref	Ménages sans qualification	0/1
Inférieur au baccalauréat	Infbac	Ménages dont la qualification est inférieure au baccalauréat	0/1
Baccalauréat	Bac	Ménages avec le baccalauréat	0/1
Baccalauréat plus deux années	Bac+2	Ménages avec deux années d'études supérieures baccalauréat	0/1
Supérieur au baccalauréat plus deux années	Supbac+2	Ménages avec un diplôme supérieur au baccalauréat plus deux années	0/1
Revenu	LRevenu	Revenu annuel net moyen des individus	En euros et en logarithme
	Quintile	Variable binaire introduite pour chaque quintile de revenu (5 quintiles)	0/1
Âge			
Moins de 30 ans	Avt30	Ménages âgés de moins de 30 ans	0/1
Entre 30 et 39 ans	30-39	Ménages âgés entre 30 et 39 ans	0/1
Entre 40 et 49 ans	40-49	Ménages âgés entre 40 et 49 ans	0/1
Entre 50 et 64 ans	50-64	Ménages âgés entre 50 et 64 ans	0/1
Plus de 65 ans	Ref	Ménages âgés de plus de 65 ans	0/1
Statut d'occupation	Propriétaire	Variable binaire introduite pour les propriétaires	0/1
	Locataire	Variable binaire introduite pour les locataires	0/1
Marché du travail			
En emploi		Ménages ayant un emploi	0/1
Sans emploi		Ménages sans emploi	0/1
Désir de mobilité			
Avec un désir de mobilité		Ménages souhaitant changer de logement	0/1
Sans désir de mobilité		Ménages ne souhaitant pas changer de logement	0/1

Variables	Nom	Définitions	Unités
Caractéristiques des logements			
Périodes de construction			
Avant 1974	Avt74	Avant 1974	0/1
De 1974 à 1981	1974-1981	De 1974 à 1981	0/1
De 1982 à 1989	1982-1989	De 1982 à 1989	0/1
De 1990 à 2001	1990-2001	De 1990 à 2001	0/1
Après 2002	Ref	Après 2002	Ref
Surface	Surface	Surface	Surface
Surface au carré	Surface2	Surface au carré	Surface2
Zone climatique			
Zone climatique 1	Climat1	Ménages qui vivent dans la zone climatique 1	0/1
Zone climatique 2	Climat2	Ménages qui vivent dans la zone climatique 2	0/1
Zone climatique 3	Climat3	Ménages qui vivent dans la zone climatique 3	0/1
Zone climatique 4	Ref	Ménages qui vivent dans la zone climatique 4	0/1
Orientation du logement			
Est	Est	Logement orienté à l'est	0/1
Ouest	Ouest	Logement orienté à l'ouest	0/1
Nord	Nord	Logement orienté au nord	0/1
Sud	Ref	Logement orienté au sud	0/1
Maison individuelle	Ind	Ménages qui vivent dans des maisons individuelles	0/1
Immeuble collectif		Ménages qui vivent dans des immeubles collectifs	0/1
Caractéristiques économiques et financières des travaux			
Nombre de travaux	LNB	Nombre de travaux	continue et en logarithme
Analyse coût bénéfice pour l'isolation	Coût-bénéfice isolation	Variable binaire quand le ménage a un investissement profitable pour les travaux d'isolation	0/1
	Van isolation	Valeur actualisée nette pour les travaux d'isolation	Continue
Analyse coût bénéfice pour les travaux de remplacement	Coût-bénéfice remplacement	Variable binaire quand le ménage a un investissement profitable pour les travaux de remplacement.	0/1
	Van remplacement	Valeur actualisée nette pour les travaux de remplacement	Continue

Tableau C2. Gains énergétiques, coût total et profitabilité de l'investissement

		Amélioration de l'isolation				Remplacement des équipements				Total
		Double vitrage	Murs	Toit	Sol	VMC	Insert	Chauffage	Eau chaude	
Dépenses d'énergie après travaux	En euros (1)	13.1	12.2	12.2	09.9	8.4	12.9	8.8	10.9	12.4
Dépenses d'énergie avant travaux	En euros (2)	17.2	17.0	17.5	12.6	11.6	17.6	11.8	14.6	16.0
Gains énergétiques potentiels	(1) – (2)	4,1	4,8	5,3	2,7	3,2	1,7	3	3,7	3,6
Analyse coût-bénéfice										
Durée de vie des équipements		35	30	35	30	30	10	16	15	
Valeur actualisée des gains théoriques à la rénovation	En moyenne (3)	9935	6984	6604	1769	3177	864	7312	4469	18080
	En moyenne dans les logements rénovés (4)	13235	9482	8400	1627	4096	1150	9513	1380	25298
Coût total en euros	(5)	7411	8100	7548	4099	3674	4320	4322	2124	8196
Coût sans main-d'œuvre en euros	(6)	3705	6237	2059	2869	2204	2592	2593	1274	3178
Comparaison VA / Coût sans main-d'œuvre	Comparaison (3) et (6)	+	-	-	-	-	-	+	+	
Cost benefit analysis	En moyenne (%)	83.7*	93.6	90.9	47.3	50.9	26.8	89.1	88.5	51.37
	En moyenne dans les logements rénovés (%)	83.5**	96.7	92	48.6	40.9	60.9	16.3	85.8	81.35

Note : *L'analyse coût bénéfice est favorable dans 83,7 % des logements. **L'analyse coût bénéfice est favorable dans 83,5 %des logements rénovés.

Tableau C3. Dépenses en travaux en fonction des caractéristiques du bâti et des individus

Variables	REE	RI	RE
Caractéristiques des ménages			
Sans qualification	5551 (155)	5029 (117)	6790 (46)
Infbac	6574(293)	7017 (210)	5781 (110)
Bac	5763 (89)	5898 (71)	5210 (27)
Bac+2	3409 (55)	4196 (41)	1792 (21)
Supbac+2	7977 (93)	7522 (73)	8835 (31)
Quintile1	7175 (139)	7276 (98)	6965 (56)
Quintile 2	63 (131)	6678(103)	5317 (38)
Quintile 3	5988 (137)	6758 (100)	3779 (50)
Quintile 4	6644 (150)	6226 (111)	7803 (48)
Quintile 5	4544 (128)	4332 (100)	5694 (43)
Avt30	7053 (60)	7835 (44)	4655 (20)
30–39	6150 (140)	6418 (105)	5573 (45)
40–49	6508 (168)	7011 (129)	5426 (52)
50–64	5741 (179)	4891 (133)	7452 (62)
Plus de 65 ans	5458 (127)	5609 (94)	4964 (46)
Propriétaire	5901 (374)	5696 (279)	6693 (127)
Locataire	6488 (313)	6919 (232)	5096 (108)
Caractéristiques des logements			
Avant 1974	6218 (378)	6400 (290)	6052 (131)
De 1974 à 1981	6188 (64)	7352 (43)	3759 (25)
De 1982 à 1989	7500 (73)	7533 (54)	6436 (27)
De 1990 à 2001	5112 (111)	4735 (83)	5635 (39)
Après 2002	6059 (56)	5336 (45)	9236 (13)
Zone climatique 1	6370 (208)	6637 (152)	5636 (78)
Zone climatique 2	5726 (265)	5553 (206)	6489 (84)
Zone climatique 3	6587 (100)	6679 (66)	6383 (41)
Zone climatique 4	6498 (112)	6906 (87)	4816 (32)
Maisons individuelles	6046(346)	6245 (267)	5222 (105)
Logements collectifs	6303 (339)	6244 (244)	6555 (130)
Coût-bénéfice	5965 (550)	6101 (670)	5656 (136)
Moyenne	**6173 *(685)***	**6251 *(513)***	**5939 *(235)***

Note : Le nombre d'observations est entre parenthèses.

Tableau C4. Dépenses en travaux en fonction des caractéristiques du bâti et des individus

Variables	Observations	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Caractéristiques des ménages					
Aucun diplôme	16697	0.2114	0.4083	0	1
Inf bac	16697	0.4153	0.4927	0	1
bac	16697	0.1290	0.3352	0	1
bac+2	16697	0.0950	0.2932	0	1
Supbac+2	16697	0.1486	0.3557	0	1
Revenu	16697	28598	23523	0	706926
Avt30	16697	0.1037	0.3049	0	1
30-39	16697	0.2171	0.4122	0	1
40-49	16697	0.2162	0.4117	0	1
50-64	16697	0.2526	0.4345	0	1
Après 65	16697	0.1968	0.3975	0	1
Propriétaire	16697	0.5254	0.4993	0	1
Locataire	16697	0.4745	0.4993	0	1
Caractéristiques des logements					
Avt74	16697	0.5802	0.4935	0	1
De75a81	16697	0.1114	0.3147	0	1
De82a89	16697	0.0923	0.2895	0	1
De90a01	16697	0.1596	0.3663	0	1
De02a06	16697	0.0562	0.2305	0	1
Surface	16697	88.003	42.806	1	750
Climat1	16697	0.2935	0.4553	0	1
Climat2	16697	0.3738	0.4838	0	1
Climat3	16697	0.1715	0.3770	0	1
Climat4	16697	0.1609	0.3675	0	1
Est	16697	0.1503	0.3574	0	1
Ouest	16697	0.1473	0.3544	0	1
Nord	16697	0.1557	0.3625	0	1
Sud	16697	0.5466	0.4978	0	1
Ind	16697	0.5005	0.5000	0	1
Collectif	16697	0.4851	0.4997	0	1
Caractéristiques économiques et financières des travaux					
LNB	16697	2.654249	3.027733	0	21
Coût-bénéfice	16697	0.5006289	0.5000146	0	1
Coût-bénéfice isolation	16697	0.4316344	0.4953189	0	1
Coût-bénéfice remplacement	16697	0.0280889	0.1652317	0	1

Tableau C5. Résultats de l'estimation – Tobit bivarié avec la valeur actualisée nette

Variables*a*	LRI		LRE	
Caractéristiques socio-économiques des ménages				
Infbac	1,534*	(0,881)	1,55	(1,352)
Bac	-1,072	(1,247)	0.669	(1.857)
Bac+2	2,871**	(1,236)	0.350	(2,086)
Supbac+2	1,350	(1,153)	3,776*	(1.680)
LRevenu	0,039	(0.326)	-0.542	(0.476)
Bef30	0.0221	(1,026)	0,370	(1,865)
30-39	-0,307	(1.027)	-0,901	(1,563)
40-49	-0,118	(0,987)	1.248	(1,421)
50-64	-0,442	(0,940)	-2.022	(1.451)
Propriétaires	1,561**	(0,711)	1,588	(1,043)
Caractéristiques du bâti				
Avt1974	2,344*	(1,434)	-0,114	(2,063)
1974-1981	1,790	(1,658)	-0,032	(2,411)
1982-1989	1,126	(1,711)	2,384	(2,401)
1990-2001	-0.172	(1,616)	-0,155	(2,276)
Surface	0,148***	(0,0294)	0,198***	(0,0349)
Surface2	-0,000238**	(0,000105)	-0,000399***	(0,000121)
Climat1	1,238	(1,011)	2,904*	(1,579)
Climat2	0,573	(0,978)	2,553*	(1.532)
Climat3	0.978	(1,134)	1,610	(1,038)
Ind	2,796***	(0.670)	2.378***	(1,038)
Caractéristiques des travaux				
LNB	2,063***	(0,423)	1,942***	(0,613)
Van isolation	0.0005	(0,000008)	0.0000409***	(0.0000117)
Van remplacement	-0.00019	(0.000054)	-0.0006257	(0.00203)
Constante	-48,24***	(4,08)	-59.5***	(5.58)
$\rho_{LRI,\ LRE}$ =0.49093***(0.036605)				
	Ho dépenses indépendantes $\chi^2(1)$= 135.018			
N	16697			
Log-likelihood	-5464			
	$H_o\ B_j^b = 0$		$\chi^2(46)$= 559.76	