

N° 646 / Septembre-Octobre 2019

Tribunes

Le monde irénique d'IRENA

Samuel Furfari, Ernest Mund

Penser au nombre de zéros

Jacques Maire

Articles

Industrie et grande distribution : sociologie de l'efficacité énergétique

Bénédicte Ballot-Miguët, Florence Bui-Vivan, Jean-Pierre Durand,
Lucie Goussard, Sébastien Petit, Guillaume Tiffon

La réglementation des bâtiments à l'heure de la neutralité carbone

Dominique Auverlot

Quel est l'impact des travaux de rénovation énergétique des logements sur la consommation d'énergie?

Gaël Blaise, Matthieu Glachant

L'utopie de la « croissance verte »

Philippe Charlez

Le point sur la production des pétroles en mer

Denis Babusiaux, Pierre-René Bauquis

Rubrique

Ma thèse en une page

Xavier Lambin

Quel est l'impact des travaux de rénovation énergétique des logements sur la consommation d'énergie ?

Une évaluation ex post sur données de panel

Gaël Blaise*, Matthieu Glachant*

Cet article propose une évaluation ex post de l'impact des travaux de rénovation énergétique dans le secteur résidentiel sur la dépense énergétique à l'aide des données de l'enquête Maîtrise de l'Énergie réalisée par TNS-SOFRES pour l'ADEME de 2000 à 2013. Le modèle à effets fixes et variables instrumentales identifie un effet très modeste des travaux puisque 1000 € supplémentaires dépensés induisent une diminution moyenne de la facture énergétique annuelle de 8,29 € (soit - 0,64 %). En conséquence, le bénéfice net actualisé de la rénovation d'un logement moyen est très négatif. Ces résultats interrogent la pertinence de subventions et d'aides publiques à la rénovation si elles sont motivées par les seules économies d'énergie.

1. Introduction

La rénovation énergétique des bâtiments est au cœur des discussions sur la transition énergétique. Dernières illustrations en date, le plan gouvernemental de rénovation énergétique des bâtiments annoncé en 2018 qui prévoit la rénovation de 500 000 logements par an pendant 5 ans, dont 150 000 « passoires thermiques », ou le discours de politique générale de juin 2019 du Premier ministre annonçant une réforme des aides publiques à la rénovation. Cette priorité se manifeste par une multiplication de politiques publiques et d'instruments : prêt à taux zéro, crédit d'impôt pour la transition énergétique, certificats d'économies d'énergie, diagnostic de performance énergétique, et les acronymes correspondants : PTZ, CITE, CEE, DPE...

Cet engouement repose d'abord sur un constat statistique : les bâtiments consomment 45 % de l'énergie finale en France, loin devant l'industrie ou les transports. Il est également alimenté par une croyance répandue selon laquelle la rénovation énergétique serait une stratégie gagnant-gagnant générant à la fois des bénéfices environnementaux associés aux économies d'énergie, et des gains économiques pour les consommateurs d'énergie [IEA, 2018]. Le paradoxe est alors que ces investissements, supposés rentables économiquement, tardent à se réaliser spontanément, justifiant ainsi des politiques publiques visant à combler un « *energy efficiency gap* » entre les comportements observés des consommateurs d'énergie et ceux qu'ils devraient adopter s'ils maximiseraient leur utilité [Allcott et Greenstone, 2012].

* MINES ParisTech - PSL (cf. biographies p.87-88).
Les auteurs remercient l'ADEME pour la mise à disposition gracieuse des données de l'enquête Maîtrise de l'Énergie

TNS - SOFRES. L'analyse développée dans cet article n'engage toutefois que les auteurs et ne reflète pas l'opinion de l'ADEME et de la TNS-SOFRES. Merci également à Camille Gay-Bellile pour sa contribution à l'analyse des données.

Quel est l'impact des travaux de rénovation énergétique des logements sur la consommation d'énergie ?

Cet article propose d'explorer la validité de cette hypothèse en réalisant une évaluation de la rentabilité économique des travaux de rénovation énergétique dans le secteur résidentiel en France. Elle repose sur une analyse ex post des comportements observés à partir des données de l'enquête Maîtrise de l'Énergie «10000 ménages» réalisée par TNS-SOFRES pour l'ADEME de 2000 à 2013. Cette enquête interrogeait chaque année un panel représentatif de quelques milliers de ménages sur leur facture énergétique et sur les travaux de rénovation éventuellement effectués. Chaque ménage était enquêté plusieurs années consécutives, ce qui autorise, comme nous allons le voir plus bas, des stratégies d'identification de l'effet des travaux beaucoup plus robustes que celles permises par des données croisées utilisées par exemple par Raynaud [2014]¹.

Plus précisément, l'objectif principal de ce travail est d'estimer quantitativement l'effet marginal d'un euro dépensé dans des travaux de rénovation sur la facture énergétique d'un logement moyen. Méthodologiquement, nous exploitons la structure de panel des données qui nous permet d'utiliser un modèle à effets fixes individuels et effets fixes région-année. Ainsi, l'identification de l'impact des travaux repose sur la comparaison de la variation interannuelle de la consommation d'un ménage effectuant des travaux avec celle des ménages résidant dans la même région ne réalisant pas la même année de travaux ou réalisant des travaux d'un montant différent. En outre, nous traitons l'endogénéité de la variable décrivant le montant des travaux à l'aide de variables instrumentales.

Les résultats de ce modèle confirment que les travaux ont un effet négatif statistiquement significatif sur les dépenses énergétiques. Cet effet est toutefois très modeste puisque 1000 € supplémentaires dépensés induisent une diminution moyenne de la facture annuelle de 8,29 € (soit - 0,64 %). Compte tenu du montant moyen des travaux observés dans nos données (un peu plus de 4200 €), cela correspond à une diminution de 2,7 %. Nous utilisons ensuite cette estimation pour calculer la rentabilité de

l'investissement moyen à l'aide de deux indicateurs. Le premier est le bénéfice net actualisé privé de la rénovation, c'est-à-dire le critère utilisé par un ménage rationnel qui maximise son surplus. Il correspond à la différence entre les flux actualisés d'économies d'énergie réalisées pendant la durée de vie de l'investissement et le coût de cet investissement net des éventuelles subventions reçues. Le second est le bénéfice social qui exclut les subventions et les aides, mais intègre la valeur monétaire des émissions de carbone évitées. Dans les deux cas, le bénéfice net de la rénovation actualisé à 5 % est sans surprise très négatif.

La suite de l'article est organisée de la manière suivante. Nous décrivons plus précisément les données utilisées dans la partie suivante. Puis la partie 3 présente l'analyse économétrique proprement dite. La partie 4 interprète les résultats obtenus. En conclusion, nous résumons l'analyse et présentons leurs implications pour les politiques publiques d'efficacité énergétique.

2. Les données

2.1. Présentation de l'enquête «10000 ménages»

L'enquête Maîtrise de l'Énergie ou «10000 ménages» a été réalisée chaque année de 2000 à 2013 par TNS-SOFRES pour le compte de l'ADEME. L'échantillon est constitué de ménages représentatifs de la population française sur des critères sociodémographiques et des caractéristiques de leur logement. Il inclut des propriétaires occupants et des locataires. TNS-SOFRES a cherché à conserver les mêmes ménages d'une année sur l'autre, la taille de l'échantillon varie toutefois de 7100 à 8900 ménages selon l'année. Chaque ménage est présent entre 1 et 14 ans, et il reste en moyenne 6 ans dans le panel. Au total, la base de données inclut 103083 observations ménage-année sur la période. Nous verrons plus loin que notre stratégie d'estimation exige qu'un ménage soit présent trois années consécutives. Cette contrainte conduit à une

Variabes	Moyenne	Écart-type
Montant moyen des travaux	4 239 €	4 601 €
Dépense énergétique annuelle	1 296 €	640 €
% électricité	55 %	30 %
% gaz	27 %	31 %
% fioul domestique	9 %	23 %

Tableau 1. Investissements et dépenses énergétiques des ménages

Notes : La facture énergétique totale est obtenue en faisant la somme des 10 factures associées à l'énergie utilisée : électricité, gaz naturel, gaz en bouteille, gaz en citerne, pétrole, fioul, charbon, bois, réseau urbain et charges collectives.

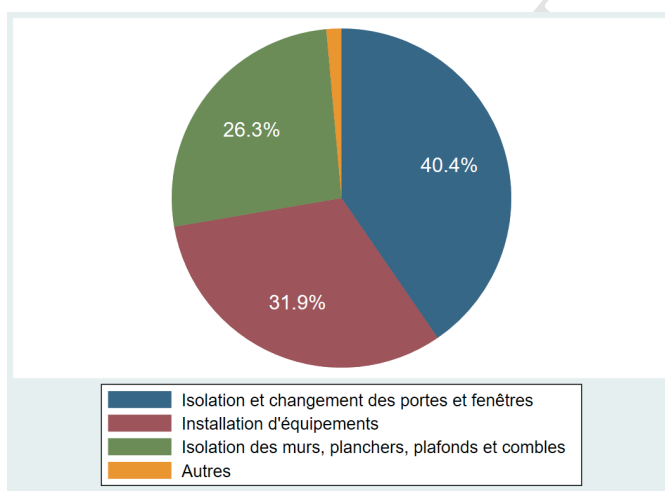


Figure 1. Répartition des investissements dans les différentes catégories de travaux de rénovation énergétique

réduction très forte de la taille de l'échantillon utilisé pour les régressions (environ 34 000 observations). Cette attrition ne pose pas de problème car la sortie du panel n'est a priori pas corrélée avec la propension à la réalisation des travaux.

Pour chaque ménage et chaque année, l'enquête fournit des informations essentielles pour notre évaluation : la facture énergétique annuelle par vecteur d'énergie (gaz, électricité, fioul domestique...) et le montant des travaux de rénovation énergétique éventuellement réalisés pendant l'année et classés par catégorie (par exemple, l'installation d'une pompe à chaleur, l'isolation de la toiture) et les aides obtenues. L'enquête fournit également des

informations sur les caractéristiques sociodémographiques du ménage (nombre de personnes, âge, catégorie socio-professionnelle, revenu...), les caractéristiques du logement (superficie, zone géographique, mode de chauffage principal, année de construction...), l'intérêt du ménage pour les questions environnementales et sa connaissance des aides dédiées à la rénovation énergétique des habitats (crédit d'impôt, éco-prêt à taux zéro, diagnostic de performance énergétique...).

En moyenne, environ 13,1 % des ménages réalisent des travaux de rénovation thermique pour un montant moyen de 4 200 € (voir le Tableau 1) avec une répartition entre les catégories décrites dans la Figure 1.

Quel est l'impact des travaux de rénovation énergétique des logements sur la consommation d'énergie ?

	Moyenne	Nombre d'observations
Groupe de contrôle = ménages ne réalisant pas de travaux les années $t-1$, t et $t+1$	+ 83,58 € (+ 12,95 %)	15 234
Groupe traité = ménages ne réalisant pas de travaux les années $t-1$ et $t+1$ et effectuant des travaux l'année t	+ 64,05 € (+ 11,05 %)	1 284

Tableau 2. Variation moyenne de la dépense énergétique ΔE_{it} en € par an et en pourcentage

Il est possible de produire une première estimation naïve en doubles différences de l'effet d'un investissement en comparant la variation « avant-après » des dépenses énergétiques des logements ayant été rénovés avec la même différence pour des logements n'ayant pas fait l'objet de travaux. Formellement, pour un logement i , on définit la différence :

$$\Delta E_{it} := E_{it+1} - E_{it-1}$$

dans laquelle E_{it-1} est la dépense énergétique du logement l'année $t-1$ et E_{it+1} est la dépense énergétique du logement l'année $t+1$. Le Tableau 2 compare la moyenne de cette variation pour deux groupes d'observations : les ménages ayant réalisé des travaux l'année t et ceux n'ayant pas réalisé de travaux. On observe donc que les deux groupes voient leurs dépenses énergétiques augmenter, ce qui peut signaler une augmentation du prix de l'énergie (non observable dans les données puisque nous disposons seulement d'informations sur le montant des factures énergétiques) ou de la consommation. Cette augmentation est toutefois moindre quand les ménages réalisent des travaux.

On serait alors tenté d'inférer le niveau des économies d'énergie réalisées en comparant les moyennes des deux groupes. Ce serait ignorer que l'on ne compare pas les mêmes ménages. Il se peut que ceux ayant réalisé les travaux aient décidé de les réaliser car leurs besoins énergétiques allaient augmenter pour une raison exogène (par exemple, une naissance augmentant la taille du foyer). Ne pas contrôler ces facteurs nous conduirait à sous-estimer l'effet

des travaux. Idéalement, il serait nécessaire de comparer la consommation d'énergie d'un ménage ayant réalisé des travaux avec celle qu'il aurait eue sans eux. Nous allons adopter une approche économétrique pour s'approcher de cet idéal.

3. Estimation économétrique

3.1. Stratégie d'identification

Pour isoler l'effet des travaux, nous adoptons un modèle de régression avec effets fixes et variables instrumentales. L'équation principale est la suivante :

$$\ln(E_{it}) = \alpha K_{it-1} + \beta X_{it} + \mu_i + \delta_{r(i)t} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

- La variable dépendante, $\ln(E_{it})$, est le logarithme de la dépense énergétique du ménage i l'année t . Il s'agit donc de la dépense totale, et non de la part consacrée au chauffage. Cela ne pose pas de problème puisque nous ne mesurerons avec cette équation que la variation de la facture induite par un investissement de rénovation énergétique.

- K_{it-1} est la variable d'intérêt. Il s'agit du montant cumulé des travaux réalisés depuis l'entrée du ménage dans le panel jusqu'à l'année précédant l'observation ($t-1$). L'hypothèse est ici qu'un investissement a un effet persistant une fois qu'il est réalisé. Sa durée de vie n'est pas infinie, mais elle est, en tout état de cause, supérieure au nombre d'années couvertes par la base de données (14 ans).

- X_{it} est un vecteur de variables de contrôle qui inclut le nombre de personnes résidant dans le logement l'année t et le niveau de revenu (mesuré par 11 classes).
- μ_i est un vecteur d'effets fixes propres à chaque ménage contrôlant des caractéristiques invariantes au cours du temps entre la première et la dernière observation du même ménage (une période incluse dans l'intervalle entre 2000 et 2013). Ces effets fixes contrôlent également pour les caractéristiques invariantes du logement et pour les caractéristiques énergétiques à l'entrée dans le panel qui sont constantes au cours du temps (performance énergétique, installation initiale de chauffage...).
- $\delta_{r(i)t}$ représente des effets fixes croisant la région et l'année, contrôlant par exemple pour les variations climatiques interannuelles ou des évolutions économiques à la fois spécifiques à chaque région et nationales qui peuvent générer une variation de la dépense énergétique moyenne des ménages. Chaque variable est une indicatrice égale à 1 si le ménage est dans la région r l'année t , 0 sinon.
- ε_{it} est un terme d'erreur capturant l'hétérogénéité non observée résiduelle.

L'objectif principal de l'analyse est d'estimer la valeur du coefficient α qui mesure l'impact moyen d'un euro d'investissement sur le logarithme de la facture énergétique. Plus précisément, compte tenu des effets fixes, l'équation (1) estime cet impact en exploitant la corrélation entre la variation interannuelle des dépenses d'investissement d'un ménage et celle de sa facture énergétique comparée à la variation de la consommation au cours de la même année des ménages résidant dans la même région qui ne réalisent pas de travaux ou des travaux de montant différent.

Pour l'estimation de α , le risque principal est la possibilité que des facteurs à la fois spécifiques à chaque ménage variant dans le temps et non inclus dans le vecteur X_{it} viennent influencer la dépense énergétique. Par exemple, un ménage peut rénover son logement car il anticipe une augmentation de ses besoins énergétiques du fait d'un départ à la retraite et donc

une durée de présence journalière plus longue dans le logement. Le coefficient α capturera à la fois l'effet des travaux mais aussi l'effet du départ à la retraite. Ne souhaitant identifier que le premier effet, la valeur estimée du coefficient sera biaisée. L'économètre utilise les termes de biais de variables omises et d'endogénéité de la variable K_{it-1} pour évoquer ce risque. Remarquons qu'utiliser la part de la dépense énergétique consacrée au chauffage au lieu de la facture totale ne résoudrait pas ce problème sauf à supposer que le biais ne concerne que la dépense consacrée à des usages non thermiques. Cette information n'est par ailleurs pas disponible dans les données qui ne déclinent la facture que par vecteur énergétique.

Nous traitons ce risque d'endogénéité à l'aide d'une variable instrumentale. Un instrument doit respecter deux conditions : (i) influencer le montant des travaux ; (ii) ne pas avoir d'effet direct sur le niveau de la consommation d'énergie. Pour le construire, nous exploitons le fait que l'enquête interroge chaque année les ménages sur leur connaissance des subventions à la rénovation énergétique proposées par l'État, sur celle du diagnostic de performance énergétique de leur logement et sur leur intention de faire des travaux dans les deux années qui viennent.

Dans le détail, nous créons dans un premier temps une variable indicatrice égale à 1 si le ménage i observé l'année t a déclaré l'année $t-1$ ou $t-2$ avoir l'intention de faire des travaux dans le futur ou si le ménage connaît simultanément l'existence du prêt à taux zéro et du crédit d'impôt l'année t ou si le ménage a lu les recommandations du diagnostic de performance énergétique (dans le cas où les questions existent l'année de l'observation, des ajustements sont réalisés si tel n'est pas le cas). L'instrument, noté Z_{it} , est alors la somme de cette variable indicatrice sur l'ensemble des observations du même ménage depuis son entrée dans l'enquête jusqu'à l'année précédant les travaux puisque la variable à instrumenter est le montant cumulé des travaux réalisés avant l'année t .

Quel est l'impact des travaux de rénovation énergétique des logements sur la consommation d'énergie ?

Cet instrument satisfait les deux conditions mentionnées plus haut :

- C'est un prédicteur des travaux de rénovation. La démonstration est évidente pour l'intention déclarée de faire des travaux au cours des deux prochaines années. Une bonne connaissance du logement à travers le diagnostic de performance énergétique traduit la volonté du ménage d'identifier les faiblesses de son logement ou de le louer/vendre. Dans les deux cas, cela augmente a priori la probabilité de réaliser des travaux dans un futur plus ou moins proche. Enfin, une bonne connaissance des dispositifs de subvention proposés par l'État peut indiquer une réflexion sur la réalisation ou non de travaux de rénovation avant leur début. Les résultats présentés en annexe confirment ces éléments (Tableau A2).

- Elles sont a priori décorrélées (au premier ordre) de la facture d'énergie observée l'année t à cause du décalage temporel. À la différence des travaux réalisés, avoir l'intention de faire des travaux une année précédant t n'a

pas d'effet direct sur la facture énergétique de l'année t .

Pour améliorer l'instrumentation, nous utilisons également le carré de la variable Z_{it} dans la mesure où la relation entre montant cumulé des travaux et intention passée de les réaliser n'est pas nécessairement linéaire. Pour le lecteur non averti, rappelons que cette construction complexe agrégeant plusieurs variables vise à améliorer la force de l'instrument sans remise en cause de l'exogénéité à partir du moment où les variables utilisées pour le construire sont exogènes. En annexe, le Tableau A1 fournit les statistiques descriptives des variables utilisées pour l'analyse économétrique.

3.2. Résultats du modèle de référence

Les résultats des estimations sont présentés dans le Tableau 3. Le modèle (1) correspond à l'estimation de l'équation (1) à l'aide de la méthode des moindres carrés ordinaires.

Modèle	(1) Moindres carrés ordinaires	(2) Variables instrumentales
Montant cumulé des travaux	- 0,00292** (.0008203)	- 0,00642* (.00327)
Taille du foyer	0,0541** (0.00692)	0,0539** (.00692)
Classes de revenu	Oui	Oui
Effets fixes ménage	Oui	Oui
Effets fixes région-année	Oui	Oui
Test de sous-identification (Kleibergeen-Paap)	-	287,224
Test d'identification faible (Kleibergeen-Paap)	-	178,804
Nombre observations	44 799	33 796
Nombre de ménages	20 179	9 176

Tableau 3. Impacts estimés des travaux de rénovation énergétique sur la dépense énergétique d'un ménage

Notes : Les erreurs standards robustes sont entre parenthèses. * significatif à 5 % ; ** significatif à 1 %. La variable dépendante est le log de la facture énergétique annuelle du ménage. La variable d'intérêt est le montant cumulé des travaux de rénovation énergétique en euros réalisés jusque l'année précédente. Le modèle (2) utilise deux instruments décrits plus hauts : Z_{it} et $(Z_{it})^2$.

Le problème d'endogénéité potentielle de la variable décrivant le montant des travaux n'est donc pas traité. Le modèle de référence (2) repose sur la méthode des variables instrumentales en utilisant les instruments que nous venons de décrire. Les résultats de la première étape de l'estimation sont présentés en annexe. Comme prévu, les instruments ont un effet positif et statistiquement significatif sur le montant cumulé des travaux. Par ailleurs, les coefficients des variables de contrôle présentent les signes attendus : la consommation d'énergie augmente avec la taille du foyer et avec le revenu (résultats non reportés).

Avec les deux modèles, on observe que le coefficient de la variable d'intérêt présente un signe négatif statistiquement significatif. Cette valeur est toutefois plus forte en valeur absolue dans le modèle de référence. Cette différence est conforme à ce que nous attendions : ne pas traiter le problème d'endogénéité conduit à sous-estimer l'effet des travaux en contrôlant imparfaitement des anticipations d'augmentation des besoins énergétiques par les ménages. Comme il est usuel, instrumenter le montant des travaux conduit toutefois à diminuer l'efficacité de l'estimation avec un coefficient qui n'est plus significatif qu'à 5 % (p-value = 0,049), d'autant que la taille de l'échantillon diminue.

Pour un logement moyen de l'échantillon, la valeur estimée du coefficient du modèle (2) correspond à une diminution de la dépense énergétique de 0,64 % ou 8,29 € euros par an pour 1000 € investi dans les travaux. À noter que la borne supérieure de l'intervalle

de confiance à 95 % ne modifie pas radicalement le résultat : l'impact passe à - 1,28 %, soit 16,5 € en moyenne.

Ces estimations nous permettent de calculer le bénéfice net actualisé de l'investissement moyen. Nous présentons deux versions de ce bénéfice. La première est le bénéfice privé, c'est-à-dire le critère utilisé par le ménage rationnel qui maximise son surplus. Il correspond à la différence entre les flux d'économies d'énergie réalisées pendant la durée de vie de l'investissement et le coût de cet investissement net des éventuelles subventions reçues. La formule est la suivante :

$$B = -I + \sum_{\tau=1}^D \frac{\Delta E}{(1+i)^\tau}$$

Dans cette expression,

- I est la différence entre le montant des travaux et les subventions reçues (TVA réduite et crédit d'impôt)²;
- D est la durée de vie de l'investissement que l'on suppose égal à 20 ans pour tous les travaux;
- i est le taux d'actualisation que l'on fixe à 5 %;
- ΔE est l'économie d'énergie annuelle réalisée qui est supposée constante et que l'on calcule en utilisant l'estimation du coefficient estimé α . Son calcul précis est décrit en annexe. Il n'inclut pas la taxe carbone qui n'a été mise qu'en place en 2014.

	Bénéfice privé actualisé	Bénéfice social actualisé
Moyenne	- 3 300 €	- 3 397 €
Intervalle de confiance à 95 %	[- 3 911 €, - 2 649 €]	[- 4 461 €, - 2 266 €]
Temps de retour moyen (I/ΔE)	121 ans	81 ans

Tableau 4. Bénéfice privé, bénéfice social et temps de retour d'un investissement moyen dans la rénovation d'un logement

Notes : Le bénéfice est actualisé à 5 % en supposant une durée de vie de l'investissement de 20 ans. Le bénéfice social est égal au bénéfice privé — les subventions (TVA réduite et CIDD) + le coût évité des émissions de carbone. Le calcul de ce coût évité et des économies d'énergie est détaillé en annexe.

Quel est l'impact des travaux de rénovation énergétique des logements sur la consommation d'énergie ?

Nous calculons également le bénéfice social, la fonction représentant l'intérêt général. Il est égal au bénéfice privé auquel on retranche les éventuelles subventions reçues (considérées comme des transferts au niveau de l'économie française) et auquel on ajoute le coût des émissions de carbone évitées pour prendre en compte les externalités générées par le changement climatique. Pour le coût évité du carbone, nous utilisons la valeur tutélaire du carbone extraite du tout récent rapport Quinet II [France Stratégie, 2019]. Comme les investissements ont une durée de vie longue, nous choisissons le prix prévu pour l'année 2030, en l'occurrence, 250 €/teqCO₂. Les émissions évitées sont calculées par une procédure décrite dans l'annexe.

Le Tableau 4 présente les résultats obtenus. Dans les deux cas, le bénéfice est très nettement négatif. Les temps de retour sur investissement correspondant au ratio du montant de l'investissement divisé par l'économie d'énergie annuelle sont également très longs. Le fait que le bénéfice privé soit (légèrement) supérieur au bénéfice social signifie que les subventions et aides à l'investissement sont supérieures aux économies externes de CO₂ tarifées à un prix du carbone pourtant très élevé (250 €/teqCO₂). Elles créaient donc pendant la période couverte par l'étude un prix implicite du carbone extrêmement élevé qui interroge sur l'efficacité de la dépense publique.

3.3. Effet du revenu

Le débat public porte en partie sur l'intérêt de cibler plus nettement les aides vers les ménages à bas revenus. Pour nourrir cette discussion, nous estimons l'équation suivante :

$$\ln(E_{it}) = \alpha_1 K_{it-1} + \alpha_2 K_{it-1} \times R_{it} + \beta X_{it} + \mu_i + \delta_{r(i)t} + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

Elle est similaire à l'équation (1) sauf que la variable du montant cumulé de travaux est maintenant croisée avec R_{it} , une variable indicatrice égale à 1 si le revenu de l'année t du chef du ménage i est supérieur à la médiane du revenu de l'ensemble des ménages la même

année. Avec cette spécification, α_1 mesure l'effet marginal des travaux pour les ménages ayant un revenu supérieur à la médiane et α_2 , l'effet différentiel des travaux quand le ménage a un revenu inférieur à la médiane. Dans l'esprit de ce qui est fait pour le modèle de référence, nous instrumentons K_{it-1} et $K_{it-1} \times R_{it}$ avec les variables Z_{it} et $Z_{it} \times R_{it}$ et le carré de ces deux variables.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 5. La valeur de α_2 est négative, mais très faible par rapport à celle de α_1 et non significative. Le modèle n'identifie ainsi pas de différences significatives entre ménages à bas et à hauts revenus. La valeur de α_1 est, elle, proche de celle obtenue avec le modèle de référence (Tableau 4) ce qui rassure sur la robustesse de l'analyse. Il est toutefois moins significatif (p-value = 0,084) ce qui, là aussi, est conforme à ce que l'on attend quand on introduit une nouvelle variable d'interaction.

3.4. Effet du type de travaux

Il est notoire que l'impact sur les économies d'énergie varie selon le type de travaux réalisés. En particulier, les investissements dans les huisseries (portes et fenêtres) sont souvent critiqués pour leur faible efficacité. Pour examiner ces aspects, nous estimons l'équation :

$$\ln(E_{it}) = \sum_{k=1}^4 \alpha_k K_{it-1}^k + \beta X_{it} + \mu_i + \delta_{r(i)t} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

Dans cette expression, K_{it-1}^k décrit maintenant le montant cumulé des travaux de la catégorie k . Nous distinguons quatre catégories : 1) l'isolation et changement des portes et fenêtres, 2) l'installation d'équipements, 3) l'isolation des murs, planchers, plafonds et combles et 4) les autres opérations. Nous instrumentons toujours avec Z_{it} et $(Z_{it})^2$ croisés avec des variables indicatrices pour chaque catégorie de travaux. Les résultats du Tableau 6 sont statistiquement moins significatifs, mais ils montrent clairement que les investissements dans l'isolation et changement des portes et fenêtres ont nettement moins d'effet que les

autres. Le coefficient de la variable correspondante est environ 4 fois plus faible que celui des autres catégories. Nous verrons plus bas dans le Tableau 7 que ces différences relatives ne sont pas en contradiction avec le contenu des fiches «Certificats d'Économie d'Énergie».

4. Discussion des résultats

4.1. Comparaison avec d'autres études ex post

Comment se comparent nos résultats à d'autres analyses ex post? Le travail le plus proche est la thèse de doctorat de Raynaud [2014] qui utilise un échantillon de logements rénovés dans la Meuse, la Haute-Marne et la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Il identifie des impacts plus importants que les nôtres puisqu'environ 70 % des logements de

l'échantillon ont des économies d'énergie supérieures à 10 %, alors que notre estimation est une économie de 2,71 % pour une opération moyenne (dont le coût est de 4239 €). Les résultats de Raynaud doivent toutefois être pris avec une extrême précaution. La taille de l'échantillon est très faible (186 logements). Il n'est pas représentatif. À titre d'illustration, tous les travaux des logements situés dans la Meuse et la Haute-Marne sont effectués par des entreprises appartenant au réseau Bleu Ciel d'EDF qui certifient les acteurs les plus performants de la rénovation énergétique. En outre, il n'existe pas de groupe de contrôle puisque seuls des logements rénovés sont inclus dans l'échantillon. Enfin, l'approche méthodologique choisie ne corrige que les facteurs climatiques alors que les effets fixes et l'instrumentation permises par la structure de panel

Variables	Effets fixes et variables instrumentales
$K_{it}-1$	- 0,00528 (0,00305)
$K_{it}-1 \times R_{it}$	- 0,000784 (0,00320)
Taille du foyer	0,0539** (0,00692)
Classes de revenu	Oui
Effets fixes ménage	Oui
Effets fixes région-année	Oui
Test de sous-identification (Kleibergen-Paap)	262,078
Test d'identification faible (Kleibergen-Paap)	80,340
Nombre observations	33 796
Nombre de ménages	9 176

Tableau 5. Impacts estimés des travaux de rénovation énergétique sur la dépense énergétique des ménages en fonction de leur revenu

Notes : Les erreurs standards robustes sont entre parenthèses. * significatif à 5 % ; ** significatif à 1%. La variable dépendante est le log de la facture énergétique annuelle du ménage. Les deux variables d'intérêt sont K_{it-1} , le montant cumulé des travaux de rénovation énergétique en euros réalisés jusque l'année précédente et $K_{it-1} \times R_{it}$, la même variable croisée avec une variable indicatrice = 1 si le ménage a un revenu inférieur à la médiane de l'échantillon. Le modèle utilise quatre instruments décrits plus hauts : Z_{it} , $(Z_{it})^2$, $Z_{it} \times R_{it}$ et $(Z_{it})^2 \times R_{it}$.

Quel est l'impact des travaux de rénovation énergétique des logements sur la consommation d'énergie ?

de nos données contrôlent pour une gamme beaucoup plus étendue de facteurs.

Une récente étude de Fowlie, Greenstone et Wolfram [2018] fait beaucoup parler d'elle aux États-Unis. Il s'agit également d'une analyse ex post. La qualité de la méthodologie est supérieure à la nôtre puisque les chercheurs impliqués ont pu réaliser une expérience randomisée dans le Michigan pour générer les données. Les résultats convergent. Ils estiment comme nous des impacts très faibles. En outre, les économies estimées sont environ 2,5 fois inférieures à celles prédites par le modèle de simulation ex ante NEAT (*National Energy Audit Tool*) utilisé par les autorités publiques américaines

pour piloter de nombreux programmes de soutien à la rénovation énergétique.

4.2. Comparaison avec les fiches Certificats d'Économie d'Énergie

Le système des CEE fournit un autre point de comparaison : les fiches des opérations standardisées. Ces fiches sont associées à des opérations d'économie d'énergie bien identifiées, par exemple l'isolation des combles, la pose de double vitrage. Chaque fiche inclut une évaluation de l'impact énergétique de l'opération construite à partir de dires d'experts et de simulations ex ante provenant de modèles de l'ADEME et du CEREN. Cette estimation est ensuite utilisée pour calculer la quantité de

Variables	Effets fixes et variables instrumentales
Montant travaux murs	- 0,00645 (0,00429)
Montant travaux fenêtres et portes	- 0,00145 (0,00238)
Montant travaux équipements	- 0,00613* (0,00264)
Montant autres opérations	- 0,00681 (0,0165)
Taille du foyer	+ 0,0569** (0,00682)
Classes de revenu	Oui
Effets fixes ménage	Oui
Effets fixes région-année	Oui
Test de sous-identification (Kleibergen-Paap)	183,637
Test d'identification faible (Kleibergen-Paap)	33,255
Nombre observations	34601
Nombre de ménages	9356

Tableau 6. Impacts estimés des travaux de rénovation énergétique sur la dépense énergétique par catégorie de travaux

Notes : Les erreurs standards robustes sont entre parenthèses. * significatif à 5 % ; ** significatif à 1 %. La variable dépendante est le log de la facture énergétique annuelle du ménage. Les variables d'intérêt sont les montants cumulés des travaux de rénovation énergétique en euros réalisés jusque l'année précédente dans chacune des quatre catégories. Le modèle utilise huit instruments : Z_{it} et $(Z_{it})^2$ croisés avec des variables indicatrices pour chaque catégorie de travaux.

	Part des kWhc*	Valeur annuelle de l'économie d'énergie	Coût total des travaux pour le particulier	Valeur annuelle de l'économie d'énergie pour 1 000 € investis
Chaudière individuelle à condensation	16,43 %	387,50 €	6 423 €	60 €
Isolation de combles ou de toitures (par m ²)	9,23 %	4,78 €	69 €	69 €
Isolation des murs (par m ²)	6,84 %	7,69 €	83 €	93 €
Chaudière collective à condensation	6,66 %	2 047 €	29 512 €	69 €
Appareil indépendant de chauffage au bois	5,94 %	115,25 €	1 912 €	60 €
Fenêtre ou porte-fenêtre avec vitrage isolant	4,67 %	15,31 €	1 144 €	13 €
Chaudière collective à condensation avec contrat	3,90 %	2 538,12 €	29 512 €	86 €
Pompe à chaleur Air/eau	3,44 %	620,83 €	12 919 €	48 €
Chaudière biomasse individuelle	1,67 %	333,59 €	5 549 €	60 €
Isolation d'un plancher (par m ²)	1,09 %	9,51 €	69 €	138 €
Pompe à chaleur eau/eau	0,55 %	766,27 €	12 647 €	61 €
			Moyenne pondérée	65 €

Tableau 7. Coût d'investissement et valeur des économies d'énergie générés par 11 opérations standardisées estimés dans les fiches CEE correspondantes

Note : L'unité de mesure des Certificats d'Économies d'Énergie est le kWhc qui correspond à l'énergie finale cumulée et actualisée sur la durée de vie du produit qui aura été économisée grâce aux opérations d'économies d'énergie mises en place. Le kWhc indiqué ici correspond à la période du 01/01/06 au 31/12/13. Source : Les certificats d'économies d'énergie : efficacité énergétique et analyse économique (2014). Rapport du CGEDD, IGF, CGIET et calcul des auteurs.

certificats d'énergie utilisés pour justifier le respect des obligations d'économie d'énergie.

Le rapport d'évaluation des CEE «Les certificats d'économies d'énergie : efficacité énergétique et analyse économique» [CGEDD, IGF, CGIET, 2014] fournit des éléments pour comparer les fiches à nos résultats. Il décrit en effet le coût d'investissement et les économies d'énergie estimés dans 11 fiches qui représentaient au 31 décembre 2013, soit la fin de la période étudiée dans cet article, environ

60 % des CEE générés depuis 2006 (et 76 % des CEE obtenus sur le parc résidentiel). Dans la dernière colonne du Tableau 7, nous utilisons ces données pour calculer la valeur annuelle des économies d'énergie générées pour 1 000 € investis. On obtient des montants bien supérieurs à notre estimation de 8,39 €, même pour la pose de double vitrage, l'opération notoirement la moins impactante (Tableau 5). La moyenne pondérée de ces opérations est de 65 € pour 1 000 € investis, soit environ 8 fois plus que notre estimation.

Quel est l'impact des travaux de rénovation énergétique des logements sur la consommation d'énergie ?

4.3. Interprétation des résultats

Pourquoi alors une proportion significative de ménages, environ 13 % dans notre échantillon, réalisent-ils des travaux non rentables économiquement? Une première explication est qu'ils ne cherchent pas en priorité à réaliser des économies d'énergie. Cette hypothèse est confortée par les résultats de l'enquête «10000 ménages» puisque seuls 23 % des ménages de l'échantillon interrogés sur la raison principale justifiant leur investissement citent la diminution de la facture énergétique (voir la Figure 2). 26 % mettent en avant l'augmentation du confort qui peut diminuer les économies d'énergie du fait d'un effet rebond selon lequel un logement mieux isolé conduira à augmenter la température intérieure, rognant ainsi sur les économies d'énergie que l'on pouvait anticiper à comportement inchangé. À l'appui de ces conjectures, on peut également citer l'étude de Charlier et Risch [2018] qui pointent l'importance des préférences pour le confort pour expliquer la consommation d'énergie.

À noter que l'importance de la motivation de réduction de la consommation d'énergie augmente pendant la période de l'étude — elle devient ainsi la raison principale de réalisation des travaux en 2013 ce qui nous permet de

rappeler qu'il s'agit d'une analyse ex post sur des comportements observés il y a au minimum six ans.

D'autres explications sont disponibles. Nous avons vu plus haut que certaines mesures comme l'isolation des portes et des fenêtres étaient peu efficaces alors qu'elles représentent 40 % des travaux effectués dans nos données. Le faible impact énergétique peut également refléter une faible qualité des travaux effectués (bricolage de particuliers, entreprises défaillantes).

5. Conclusion

En résumé, l'investissement moyen de rénovation énergétique a bien un impact statistiquement significatif négatif sur la facture énergétique dans le secteur résidentiel, mais il est faible : une diminution de 8,39 € par an de la facture énergétique pour 1000 € investis, soit - 0,64 %. Cet impact n'est pas statistiquement différent entre les ménages à hauts et à bas revenus. Il est très nettement inférieur à celui prédit par les fiches Certificats d'Économie d'Énergie. À partir de données sur les 11 fiches CEE les plus utilisées pendant la période 2006-2013,

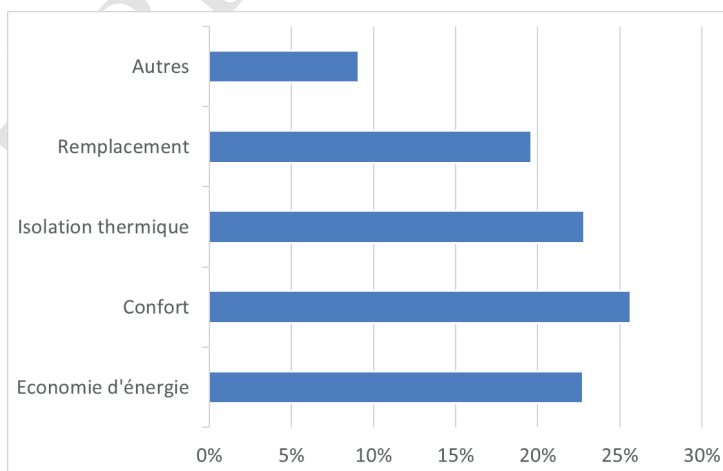


Figure 2. Réponse à la question de l'enquête Maîtrise de l'Énergie : «Quelle est la raison principale pour laquelle vous avez réalisé ces travaux?»

Source : Enquête «Maîtrise de l'Énergie», ADEME, TNS-SOFRES

une estimation rudimentaire conduit même à une différence d'un facteur 8.

En conséquence, le bénéfice net actualisé de l'investissement moyen est très négatif, et ce, même en intégrant un coût évité des émissions de carbone à 250 €/teCO₂. La rénovation énergétique ne fournirait donc pas un gisement peu coûteux d'actions de réduction de la consommation d'énergie. Il est toutefois important de rappeler que ce bénéfice net n'est pas le résultat d'une analyse coût-bénéfice exhaustive. Il inclut les coûts et bénéfices monétaires mais ignore les bénéfices de confort, particulièrement élevés quand l'investissement consiste à remplacer un équipement en fin de vie. Il ne faut donc pas déduire de notre estimation que les ménages de l'échantillon sont irrationnels.

Ces résultats conduisent à s'interroger sur la pertinence des subventions à l'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel si elles sont motivées par la réduction de la consommation d'énergie. À tout le moins, ils suggèrent d'être sélectif sur les types de travaux à privilégier, ce qui se dessine aujourd'hui. Le ciblage des aides sur les ménages à bas revenus prévu par le gouvernement ne modifierait en revanche pas l'équation énergétique. Enfin, les résultats conduisent également à s'interroger sur le système des Certificats d'Économie d'Énergie et, en particulier, le contenu des fiches d'opérations standardisées.

RÉFÉRENCES

Allcott, H., Greenstone, M., 2012. Is there an energy efficiency gap? *Journal of Economic Perspectives*, 26(1), pp 3-28.

Bakaloglou, S., Charlier, D., 2018. Energy Consumption in the French Residential Sector: How Much do Individual Preferences Matter? Working Papers 2018.05, FAERE — French Association of Environmental and Resource Economists.

CGEDD, IGF, CGIET, 2014. Les certificats d'économies d'énergie : efficacité énergétique et analyse économique. https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/certificats-energie.pdf

Fowle, M., Greenstone, M., Wolfram, C., 2018. Do Energy Efficiency Investments Deliver? Evidence from the Weatherization Assistance Program. *The Quarterly Journal of Economics*, 133(3), pp 1597-1644, <https://doi.org/10.1093/qje/qjy005>

France Stratégie, 2019, La valeur de l'action pour le climat — Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques. Rapport de la Commission présidée par Alain Quinet.

International Energy Agency, 2018. Energy Efficiency 2018. Market Report Series, <https://webstore.iea.org/market-report-series-energy-efficiency-2018>

Nauleau, M-L., 2014. Free-riding on tax credits for home insulation in France: An econometric assessment using panel data, *Energy Economics*, 46, pp 78-92.

Raynaud, M., 2014. Évaluation ex post de l'efficacité de solutions de rénovation énergétique en résidentiel. Thèse de doctorat École Nationale Supérieure des Mines de Paris.

NOTES

1. À notre connaissance, la seule exploitation économétrique de l'enquête «10000 ménages» a été réalisée par Marie-Laure Nauleau [2014] pour évaluer les effets d'aubaine du crédit d'impôt CIDD.

2. Faute de données fiables, nous n'avons pas soustrait la subvention implicite du Prêt à Taux Zéro. Celle-ci n'affecte sans doute que faiblement les résultats dans la mesure où le PTZ n'a été que très peu souvent utilisé.

Quel est l'impact des travaux de rénovation énergétique des logements sur la consommation d'énergie ?

Annexe

A. Statistiques descriptives de l'échantillon utilisé pour l'estimation

Variable	Moyenne	Écart-type
Dépense énergétique annuelle E_{it}	1 296 €	640 €
Montant des travaux cumulés jusqu'à l'année $t-1$ K_{it-1}	791 €	3 019 €
Classe de revenus (incluse dans X_{it} , Échelle de 1 à 11)	5,82	2,50
Nombre de personnes vivant dans le foyer (inclus dans X_{it})	2,36	1,19
Instrument Z_{it}	1,05	1,77
Instrument Z_{it}^2	4,22	11,11

Tableau A1. Moyennes et écart-types des variables utilisées pour l'estimation

Source : Enquête Maîtrise de l'Énergie ADEME – TS – SOFRES

B. Résultats de l'estimation de la première étape du modèle avec variables instrumentales

Instruments	Coefficient (écart type)
Z_{it}	0,592** (0,0584)
$(Z_{it})^2$	0,0341** (0,00951)
Nombre d'observations	44 799
Nombre de ménages	20 179

Tableau A2. Résultats de l'estimation de la première étape du modèle avec variables instrumentales

Notes : Les erreurs standards robustes sont entre parenthèses. ** significatif à 1 %. La variable dépendante est le montant cumulé des travaux de rénovation énergétique en euros réalisés jusque l'année précédente. Les deux instruments, Z_{it} et $(Z_{it})^2$, sont décrits dans la section 3.1.

C. Calcul des économies d'énergie réalisées

Notons $\hat{\alpha}$, la valeur estimée du coefficient α . La dépense énergétique d'un logement i l'année t prédite par le modèle est alors égale à

$$\hat{E}_{it} = \exp(\hat{\alpha}K_{it-1} + \hat{\gamma}Y_{it})$$

où, pour simplifier l'écriture, Y_{it} est le vecteur des variables de contrôle (y compris les effets fixes) et $\hat{\gamma}$, le vecteur des coefficients estimés. Dans le cas où des travaux ont été effectués l'année $t-1$, la consommation s'il n'y avait pas eu de travaux s'écrit

$$\hat{E}_{it}^0 := \exp(\hat{\alpha}K_{it-2} + \hat{\gamma}Y_{it})$$

puisque l'on ignore la dépense effectuée l'année $t-1$. L'économie d'énergie des travaux effectués l'année $t-1$ dans le logement i toutes choses égales par ailleurs est alors

$$\Delta \hat{E}_{it} = \hat{E}_{it}^0 - \hat{E}_{it} = \hat{E}_{it} \left(\frac{1}{\exp \hat{\alpha} (K_{it-1} - K_{it-2})} - 1 \right)$$

où $K_{it-1} - K_{it-2}$ est le montant des travaux effectivement réalisés l'année $t-1$.

D. Calcul des émissions de carbone évitées

Cette annexe vise à fournir des informations complémentaires sur les hypothèses faites pour le calcul des émissions de carbone évitées par la rénovation énergétique. On suppose que la totalité de cette réduction est une réduction de la facture de chauffage du ménage, le chauffage étant le poste le plus important de la facture énergétique d'un logement et les travaux ayant pour but d'améliorer l'efficacité énergétique du logement. On suppose alors que la répartition de la facture de chauffage qu'aurait eue un foyer sans la réalisation des travaux est celle de l'année précédente du même ménage. Les coefficients de conversion énergie-CO₂ sont présentés dans le tableau A3.

Les données de l'enquête nous fournissent les dépenses en euros alors que le calcul des émissions nécessite des valeurs exprimées en kWh. Pour les obtenir, le prix de chaque vecteur d'énergie au kWh est estimé à partir de plusieurs historiques entre 2000 et 2013 fournis notamment par l'ADEME. Des chiffres obtenus sur des sites d'information sur le secteur énergétique ou d'entreprises comme ENGIE ont permis d'estimer que la proportion de la facture de chauffage électrique dans la facture totale d'électricité est de 55 % si le foyer se chauffe à l'électricité. La proportion de la facture de gaz dédié au chauffage pour un ménage se chauffant au gaz est estimée à 81,5 %.

Combustible	Émissions de CO ₂ en g/kWh d'énergie finale
Fioul domestique	300
Fioul lourd	320
Gaz naturel	234
Gaz propane ou butane	274
Charbon	384
Bois	13*
Réseau de chaleur	20 à 373
Électricité (chauffage)	180
Électricité (eau chaude sanitaire et climatisation)	40

Tableau A3. Contenu en carbone des différents vecteurs énergétiques

Source : <http://www.economiedenergie.fr/les-%C3%A9missions-de-co2-par-%C3%A9nergie.html>

S'ABONNER À LA REVUE



► **Contribuer à une meilleure compréhension des enjeux et des opportunités dans le domaine de l'énergie**

► **Partager les meilleures stratégies et politiques pour favoriser la transition vers des systèmes énergétiques plus durables**

Je m'abonne à *La Revue de l'Énergie* pour un an (soit 6 numéros, offre intégrale – papier et numérique) dès réception du bulletin, en ligne sur www.larevuedelenergie.com ou en remplissant ce formulaire :

- tarif France 211 € TTC (TVA : 5,5 %)
 tarif étranger 230 € TTC

M. / Mme Nom : Prénom :

Organisation :

Adresse :

Complément d'adresse :

Code postal : Ville : Pays :

Téléphone :

E-mail :

- ou Je joins un chèque à l'ordre de La Revue de l'Énergie.
 Je règlerai à réception de la facture.

Date :

Signature :

Bulletin d'abonnement à envoyer à :

La Revue de l'Énergie – 12 rue de Saint-Quentin – 75010 Paris – France

Ou à : abonnement@larevuedelenergie.com

Des tarifs réduits (étudiants, retraités...) existent ; pour en bénéficier, écrire à :
abonnement@larevuedelenergie.com

Les informations recueillies sur ce formulaire sont enregistrées dans un fichier informatisé par La Revue de l'Énergie pour la gestion de votre abonnement. Conformément à la loi « informatique et libertés », vous pouvez accéder aux informations vous concernant, les rectifier et vous opposer à leur transmission éventuelle en écrivant à la rédaction à : redaction@larevuedelenergie.com