



Une estimation économétrique de l'impact des travaux de rénovation énergétique sur la consommation d'énergie et les émissions de carbone

Matthieu Glachant, Victor Kahn, François Lévêque

Résultats du module 2 de l'étude

« Analyse économique et économétrique du dispositif des Certificats d'Economies d'Energie »

12 octobre 2020

i3-CERNA, UMR CNRS 9217, MINES ParisTech

www.cerna.minesparis.psl.eu

Préface

- L'analyse proposée dans ce document s'inscrit dans une étude économique et économétrique plus large sur le dispositif des Certificats d'Economies d'Energie (CEE). L'étude complète comprend trois modules :
 - **Module 1** : Une analyse économique du dispositif des CEE à l'aide des outils de l'économie industrielle et de l'économie de l'environnement visant à proposer des évolutions pour améliorer sa performance.
 - **Module 2** : Une estimation économétrique de l'impact des travaux de rénovation énergétique sur la consommation d'énergie et les émissions de carbone.
 - **Module 3** : Une estimation économétrique de l'impact du crédit d'impôt à la rénovation énergétique sur le prix des travaux.
- **Cette présentation rassemble les résultats du module 2.** Les présentations des modules 1 et 3 et une synthèse sont disponibles [ici](#).
- Le travail a été réalisé par
 - [Matthieu Glachant](#), professeur à MINES Paris – PSL et directeur du CERNA,
 - [Victor Kahn](#), doctorant à MINES Paris – PSL,
 - et [François Lévêque](#), professeur à MINES Paris – PSL,
- L'étude s'insère dans le programme de recherche pluriannuel sur l'économie de l'efficacité énergétique lancé par le CERNA de MINES Paris – PSL en 2016. La présentation du programme et des publications sont disponibles [ici](#).
- Elle a bénéficié d'un financement d'EDF et de l'Union Française de l'Electricité (UFE).
- Les auteurs remercient pour leurs remarques et leurs suggestions les adhérents de l'UFE et les membres du COPIL EEPPEE hébergé par l'Association Technique, Energie, Environnement (ATEE).

assistés par Craig Pesme, étudiant ingénieur civil à MINES Paris - PSL et stagiaire au CERNA.

▪ Sommaire

1. [Introduction](#)
2. [Méthodologie et description des données](#)
3. [Analyses économétriques](#)
4. [Validité externe de l'étude](#)
5. [Coût de la tonne de carbone évitée](#)
6. [Références](#)
7. [Annexes](#)

Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques des ménages dans le panel

Tableau 2. Résultats de l'approche naïve

Tableau 3. Empreintes carbone retenues

Tableau 4. Résultats de nos régressions, effet de 1000 € investis dans la rénovation énergétique sur différents paramètres

Tableau 5. Exemple de données fournies par le calculateur ADEME des fiches CEE

Tableau 6. Résultats corrigés à l'aide des coefficients obtenus par notre méthode

Tableau 7. Résumé d'autres résultats obtenus sur l'efficacité des travaux de rénovation énergétique à l'aide d'estimation ex post

Tableau 8. Scénario de rénovation énergétique et scénario de référence

Tableau 9. Caractéristiques du ménage-type utilisé pour calculer le coût de la tonne de carbone évitée

Tableau 10. Résumé des autres résultats obtenus sur le coût de la tonne de carbone évitée par la rénovation énergétique

• Tableau 11. Calcul des coefficients correctifs, calcul du $\alpha(2020)$

• Tableau 12. Calcul des coefficients correctifs, calcul du $\alpha(2000-2013)$

• Tableau 13. Consommation d'énergie des maisons individuelles en France

• Tableau 14. Statistiques sur les logements en France

• Tableau 15. Consommation d'énergie résidentielle en France

• Tableau 16. Scénarios de rénovation et scénario de référence pour le calcul des VAN

• Tableau 17. Hypothèses techniques sur les technologies installées lors du calcul des VAN

• Tableau 18. Matrice des changements d'énergie de chauffage

Liste des figures

Figure 1. Courbe de coût d'abattement du carbone selon McKinsey

Figure 2. Répartition des investissements dans les différentes catégories de gestes

Figure 3. Evolution comparative des prix de l'énergie en France selon le vecteur

Figure 4. Répartition des investissements dans les différentes catégories de travaux

Figure 5. Répartition des investissements dans les différentes catégories de travaux dans « l'Enquête Maîtrise de l'Energie » (2000-2013)

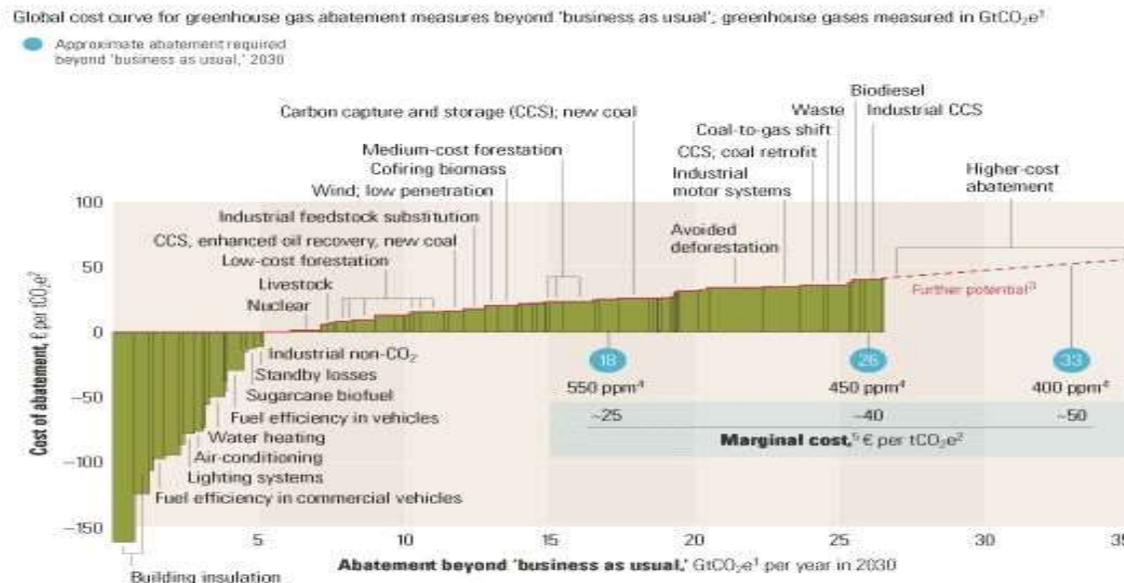
Figure 6. Répartition des investissements dans les différentes catégories de travaux dans la base de données TREMI (2015-2017)

- 1. Introduction

1. Introduction

Le concept d'« *energy efficiency gap* »

Figure 1 : Courbe de coût d'abattement du carbone selon McKinsey



¹ GtCO₂e = gigaton of carbon dioxide equivalent; "business as usual" based on emissions growth driven mainly by increasing demand for energy and transport around the world and by tropical deforestation.
² tCO₂e = ton of carbon dioxide equivalent.
³ Measures costing more than €40 a ton were not the focus of this study.
⁴ Atmospheric concentration of all greenhouse gases recalculated into CO₂ equivalents; ppm = parts per million.
⁵ Marginal cost of avoiding emissions of 1 ton of CO₂ equivalents in each abatement demand scenario.

- Plusieurs modèles d'ingénierie prévoient une importante efficacité économique de la rénovation des bâtiments. Comme le présente la célèbre courbe du coût d'abattement de McKinsey (figure 1) la rénovation énergétique des bâtiments correspondrait même à des économies de carbone à coût négatif pour la société.
- Pourtant, les ménages hésitent à investir dans la rénovation énergétique.
- C'est ce que certains économistes ont appelé « *the energy efficiency gap* » (Hirst & Brown, 1990). Un écart entre le comportement observé des ménages et celui qu'ils devraient adopter dans leur intérêt économique.
- Comblent cet écart justifie l'objectif des politiques d'aides à la rénovation énergétique qui, en France, ont pris de l'ampleur au cours des deux dernières décennies.

▪ Contexte

- Depuis 20 ans la France a mis en place différents outils de subvention à la rénovation énergétique : **TVA réduite, crédit d'impôts, prêt à taux zéro** ainsi que le **dispositif CEE**. En 2020, l'ambition de la politique de rénovation énergétique ne se dément pas :
 - Le dispositif CEE représente aujourd'hui un coût annuel de plusieurs milliards d'euros pour les obligés et par ricochet les consommateurs d'énergie particuliers et tertiaires ;
 - Lancement en 2020 de la toute nouvelle Prime Rénov' issue d'une fusion du CIDD (Crédit d'Impôt Développement Durable) et des subventions de l'ANAH.
- La convention citoyenne sur le climat a insisté dans ses propositions finales sur l'importance de la rénovation énergétique pour la France et a proposé un référendum sur l'obligation de rénovation des bâtiments publics.

▪ Objectif

- Notre étude cherche à déterminer **l'impact effectif des travaux de rénovation énergétique** à l'aide d'une **analyse ex post** de leur facture.

Plus précisément, il s'agit de :

- Estimer l'effet des travaux de rénovation énergétique (aidés ou non) sur la **facture énergétique**, la **consommation d'énergie finale** et les **émissions de CO₂**
- A l'aide d'une stratégie économétrique similaire à celle de l'étude de [Blaise et Glachant \(2019\)](#) : **un modèle de panel à effets fixes et variables instrumentales**

▪ Les résultats à retenir

- **L'investissement moyen de rénovation énergétique d'un logement** (égal à 11 750€ d'après l'enquête ADEME TREMI de 2018) diminue la facture d'énergie résidentielle finale d'un ménage de **12% soit 160 € par an**.
- Il diminue les émissions résidentielles annuelles de CO₂ de **22% soit 760 kg par an**.
 - Cela équivaut environ à 5 000 km en voiture soit 30% de la distance annuelle moyenne parcourue par un automobiliste ou 7,3% de l'empreinte carbone annuelle d'un français.
- L'effet est plus important sur les émissions de CO₂ pour deux raisons :
 - Les **ménages chauffés au fioul ont fait plus de travaux** que les autres, voire sont passés à des chauffages gaz/électricité moins polluants ;
 - La consommation **d'électricité spécifique**, peu concernée par les travaux de rénovation énergétique, n'a que peu d'influence sur les émissions de carbone mais est bel et bien visible sur la facture.
- Pour un panier de travaux composé de : l'isolation des murs, de l'isolation des planchers, de l'installation de chaudières et de pompe à chaleur, notre estimation du coût du **carbone évité est environ de 350€/tCO₂**

- 2. Méthodologie et description des données

▪ Démarche et données utilisées

- Nous utilisons les données de l'enquête Maîtrise de l'Energie « 10 000 ménages » réalisée par TNS-SOFRES pour l'ADEME de 2000 à 2013 :
 - Un panel représentatif de ménages français interrogés chaque année de 2000 à 2013 ;
 - 7100 à 8900 ménages selon l'année ;
 - Chaque ménage est présent en moyenne 6 ans dans les données.
- L'enquête fournit des données sur :
 - Leurs dépenses énergétiques du logement ;
 - Les travaux de maîtrise de l'énergie éventuellement effectués ;
 - Des caractéristiques du logement ;
 - Des caractéristiques socio-démographiques.

→ **Une base de données qui permet donc de calculer des différences de consommation avant et après travaux. Afin de tenir compte de l'évolution des travaux depuis la date de l'enquête, les résultats ont été corrigés et actualisés**

2. Méthodologie et description des données

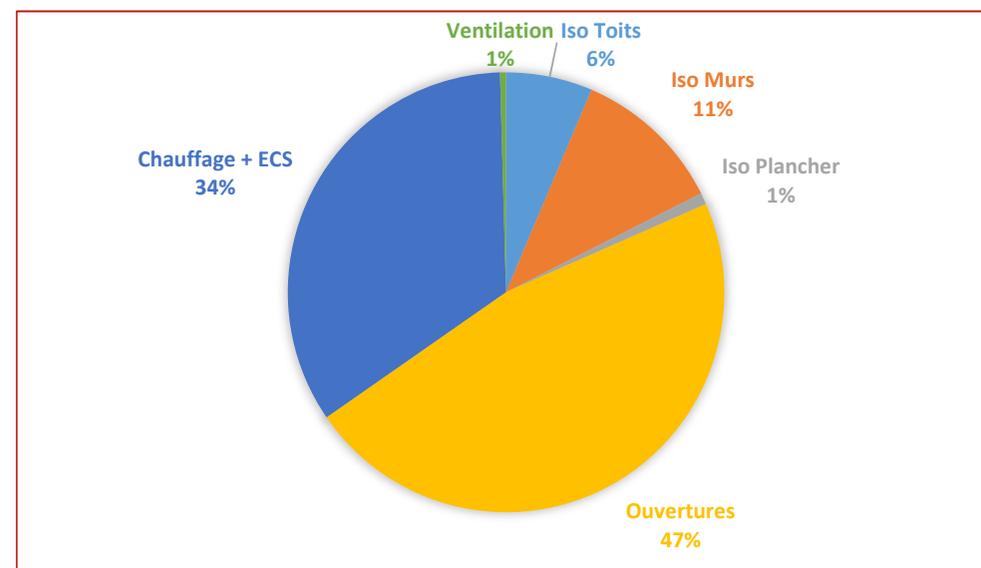
■ Description des données

- Chaque année, 13,1% des ménages réalisent des travaux d'une valeur moyenne de 4239 €, principalement des travaux d'ouvertures.
- Ils dépensent 1300€ dans leur facture énergétique, la moitié est due à l'électricité.

Tableau 1 : caractéristiques des ménages dans le panel

Variables	Moyenne	Ecart-type
Montant moyen des travaux	4239 €	4601 €
Dépense énergétique annuelle	1296 €	640 €
% électricité	55%	30%
% gaz	27%	31%
% fioul domestique	9%	23%

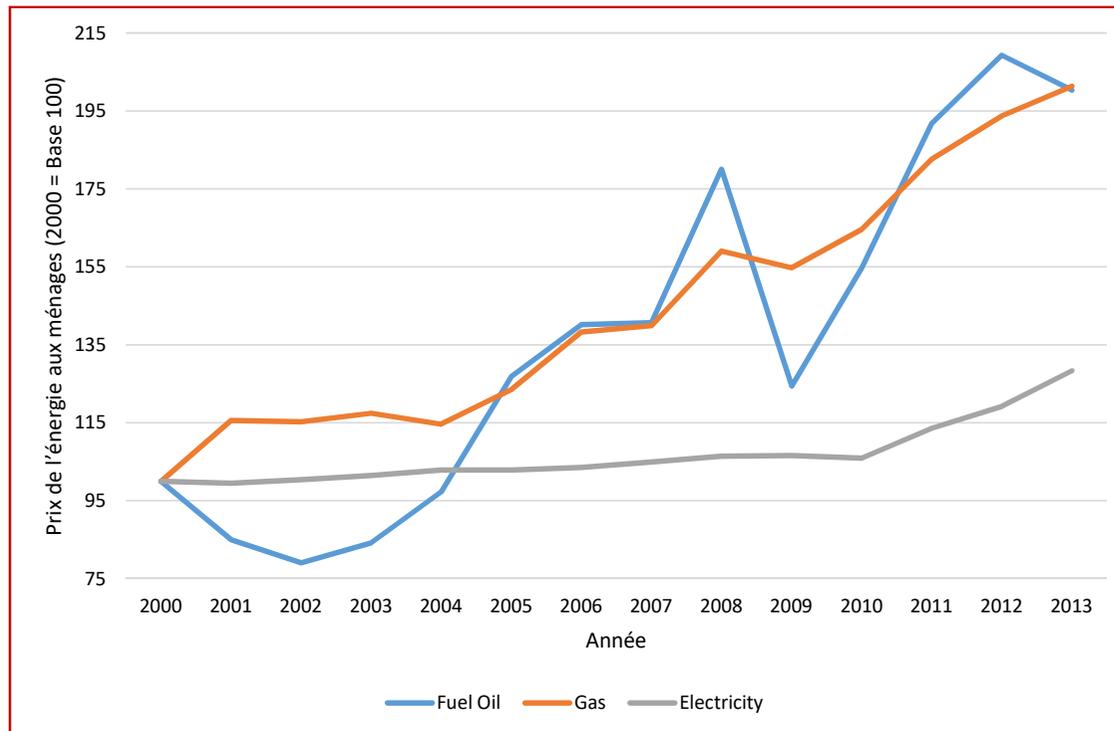
Figure 2 : répartition des investissements dans les différentes catégories de gestes



2. Méthodologie et description des données

▪ Evolution comparative du prix des énergies aux ménages en France

Figure 3 : évolution comparative des prix de l'énergie en France selon le vecteur

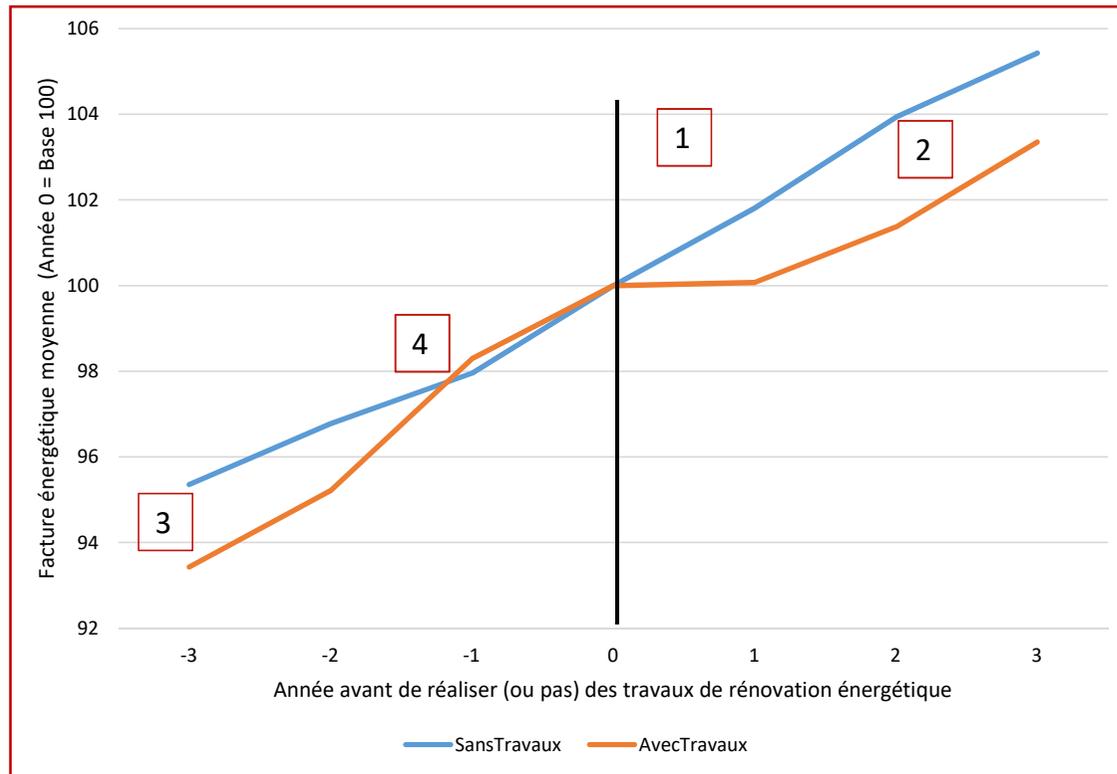


- La figure 2 montre que le gaz et le fioul ont suivi des évolutions de prix similaires entre 2000 et 2013 avec une multiplication par 2 du coût de ces énergies pour les ménages ;
- Le prix de l'électricité, par contre, a augmenté beaucoup moins vite, environ +30 % entre 2000 et 2013 ;
- Il est donc important de contrôler l'énergie de chauffage des ménages au cours de l'analyse.

2. Méthodologie et description des données

Evolution des factures des ménages selon la réalisation de travaux

Figure 4 : répartition des investissements dans les différentes catégories de travaux



- Les courbes représentent l'évolution de la facture énergétique des ménages avant et après une année de référence (année 0). La courbe bleue représente l'évolution des ménages n'ayant pas réalisé de travaux l'année 0, la courbe orange celle de ceux qui en ont réalisé la même année.
- Dans les années suivant les travaux, ce qui est observé est conforme avec la théorie :
 - Un an après les travaux les ménages en ayant réalisé voient leur facture énergétique baisser relativement aux autres ménages (1)
 - Puis les deux groupes de ménages se comportent de la même façon (les courbes sont parallèles) (2)
- Avant les travaux, on devrait normalement observer deux courbes confondues (comportements identiques) cependant :
 - La courbe orange est sous la courbe bleue au départ : les ménages qui ont réalisé des travaux voient leur facture énergétique augmenter plus vite que les autres avant de faire les travaux (3)
 - **La décision de réaliser des travaux est donc endogène et semble corrélée avec l'évolution de la facture énergétique (4)**

- 3. Analyses économétriques

3. Analyses économétriques

▪ Approche naïve : de la nécessité d'une étude économétrique

- Une première méthode naïve consiste à estimer l'impact des travaux en comparant l'évolution de la facture des ménages réalisant des travaux par rapport à celle des ménages n'en réalisant pas. Ci-dessous, par exemple, les résultats pour la facture énergétique.

Tableau 2 : Résultats de l'approche naïve

	Variation bi-annuelle moyenne de la facture énergétique
Groupe traité = ménages effectuant des travaux	+ 64,05 € (+ 11,05 %)
Groupe de contrôle = ménages ne réalisant pas de travaux	+ 83,58 € (+12,95 %)

Note : les variations sont égales à la différence entre la facture énergétique de l'année précédent les travaux et celle de l'année suivant les travaux (variation bi-annuelle)

- **Ces résultats sont biaisés car le traitement n'est pas randomisé** : Les ménages du groupe traité s'auto-sélectionnent en décidant de faire des travaux. Cette décision peut alors être corrélée avec la modification du comportement énergétique. Par exemple, imaginons un propriétaire qui va partir à la retraite. Il anticipe une augmentation de ses besoins énergétiques (parce qu'il va passer plus de temps dans le logement), ce qui l'incite à rénover. La variation avant-après les travaux mesurera à la fois l'effet des travaux (qui diminuent la facture) et l'effet du passage à la retraite (qui augmente la facture) sans que l'on puisse distinguer le poids respectif de ces deux facteurs. **L'approche économétrique permet d'identifier l'effet des travaux « toutes choses égales par ailleurs ».**

▪ Un modèle à effets fixes et variables instrumentales

On suppose que la relation entre le montant des travaux effectués par un ménage i et la facture énergétique a la forme suivante :

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

 **Le paramètre à estimer qui mesure l'effet des travaux sur la facture**

- $\ln(E_{it})$ = le logarithme de la facture du ménage i l'année t .
- K_{it-1} = montant cumulé des travaux réalisés depuis l'entrée du ménage dans le panel jusqu'à l'année $t - 1$.
- X_{it} = un vecteur qui inclut le nombre de personnes résidant dans le logement, sa surface et le niveau de revenu
- μ_i = un vecteur d'effets fixes ménages
- $\delta_{r(i)t}$ = un vecteur d'effets fixes croisant la région et l'année
- $\lambda_{e(it)t}$ = un vecteur d'effets fixes croisant le vecteur énergétique $e(it)$ utilisé par i pour le chauffage et l'année
- ε_{it} = un terme d'erreur capturant l'hétérogénéité non observée

Pour estimer l'impact sur la consommation et les émissions, l'équation est similaire sauf que E_{it} est remplacé par la consommation en kWh, puis par les émissions de CO2 en kg

▪ L'intuition

- Le modèle précédent est utilisé pour estimer la **valeur α** en comparant des **ménages réalisant des travaux** avec des **ménages n'effectuant pas de travaux** ou des **travaux d'un montant différent**.
- Pour identifier un effet « **toutes choses égales par ailleurs** », le modèle effectue cette comparaison entre des ménages :
 - observés la même année,
 - résidant dans une même région,
 - ayant un revenu similaire,
 - une taille de foyer identique,
 - une surface de logement identique
 - et utilisant le même vecteur énergétique pour se chauffer.
- En outre, pour régler les problèmes d'endogénéité, la variable « **montant des travaux** » est **instrumentée** avec une variable mesurant l'intention d'effectuer des travaux l'année précédente (pour plus d'information, voir [Blaise et Glachant, 2019](#))

▪ Estimation de la consommation énergétique du ménage

- L'Enquête « Maîtrise de l'énergie » ne fournit de l'information que sur **les factures (en €)**. Il est donc nécessaire d'inférer la **consommation énergétique (en kWh)** à partir des factures des ménages interrogés ;
- Nous utilisons la [Base PEGASE](#) qui fournit année par année les différents contrats de fourniture énergétique pour chaque vecteur ;
- Pour les vecteurs énergétiques autres que le gaz et l'électricité, on divise simplement la facture par le prix du vecteur pour obtenir la consommation énergétique ;
- Pour l'électricité et le gaz, la facture contient une part fixe et une part variable. Diviser le montant de la facture par le prix ne fournit donc pas la consommation. Il faut retrancher la partie fixe. L'approche retenue est la suivante :
 - Pour chaque contrat, nous connaissons le montant de la part variable et de la part fixe ;
 - On suppose qu'un ménage donné a **souscrit à l'abonnement qui maximisait sa consommation d'énergie** à facture donnée.
 - Dans notre modèle aucun ménage ne souscrit à des abonnements de type heures pleines / heures creuses.

3. Analyses économétriques

▪ Estimation des émissions de CO₂

- On déduit facilement les émissions de CO₂ d'un ménage donné à partir de la consommation énergétique. Il suffit juste de diviser la consommation d'énergie par l'empreinte carbone du vecteur.
- Pour obtenir les empreintes carbone de chaque vecteur énergétique la [Base CARBONE](#) de l'ADEME a été utilisée.
 - Cette empreinte **annuelle d'un usage donné dépend de son éventuelle saisonnalité.**
- Pour l'électricité, l'empreinte carbone dépend du type d'usage (en fait, de l'heure d'utilisation). On fait l'hypothèse que toute l'électricité utilisée est due au chauffage.

Tableau 3 : Empreintes carbone retenues

Vecteur	Electricité	Gaz	Fioul	Bois	Charbon	Gaz de Petrole Liquéfié
Empreinte carbone [kgCO2/Mwh]	147	227	324	29,5	387	272

3. Analyses économétriques

▪ Les résultats détaillés

Tableau 4 : Résultats de nos régressions, effet de 1000 € investis dans la rénovation énergétique sur différents paramètres

Données	Effet moyen %	Intervalle de confiance à 95%	Effet moyen en niveau	Intervalle de confiance à 95%
Facture énergétique annuelle	- 0,75 %	[-1,4 % ; - 0,1 %]	- 10 €	[-18€; -1,3€]
Consommation d'énergie annuelle	- 0,37 %	[- 1,3 % ; 0,6%]	- 59 kWh	[- 202 kWh ; 101kWh]
Emissions carbone annuelles	-1,3 %/an	[- 2,1% ; - 0,4 %]	- 39 kgCO2	[-63 kg; - 12 kg]

- On obtient des résultats significativement différents de 0 pour l'effet sur la facture énergétique et sur les émissions de carbone ;
- Cependant ces effets restent faibles : 10€ économisés par an pour 1000€ investis et une réduction d'à peine 1% des émissions de CO2 résidentielles ;
- On n'observe pas d'effet significativement différent de 0 sur la consommation d'énergie.

▪ En résumé

- Notre estimation identifie un **effet statistiquement significatif** du capital investi dans des travaux de rénovation énergétique sur :
 - **La facture énergétique** avec une diminution de 0,75 % pour 1000 € investi ;
 - **Les émissions de CO₂** avec une diminution de 1,3% pour 1000 € investi.
 - Ces effets restent **faibles**, les travaux ne semblent pas rentables économiquement ;
 - Par ailleurs, notre estimation n'est pas statistiquement significative en ce qui concerne la consommation énergétique ;
 - Ces résultats sont obtenus à l'aide de données anciennes, il est raisonnable de se demander à quel point ils sont encore valables aujourd'hui.
- C'est la question de la « **validité externe de l'étude** » qui est traitée dans la suite.

- 4. Validité externe de l'étude et résultats corrigés

4. Validité externe de l'étude et résultats corrigés

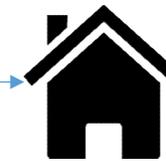
- Les différences à examiner

2000-2013

Aujourd'hui



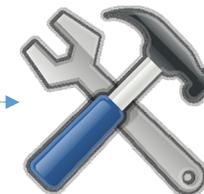
Même type de logements ?



Même type de ménages ?



Même type de travaux ?



▪ Analyse

- **Même type de logements ?**

→ **Oui.** Le parc immobilier français se renouvelle lentement. On peut considérer que les logements dans lesquels s'effectuent les travaux restent globalement les mêmes.

- **Même type de ménages ?**

→ **Non, mais...** le « Coup de pouce » et les CEE « précarités » ont certainement eu un effet sur le revenu moyen des ménages faisant les travaux. Néanmoins, Blaise & Glachant (2019) ont montré qu'il n'y avait pas un effet significatif du revenu des ménages sur l'impact énergétique des travaux par € investi.

- **Même type de travaux ?**

- → **Non.** Le portefeuille de travaux de rénovation énergétique a fortement changé entre 2000-2013 et aujourd'hui. **Nous avons donc corrigé les résultats économétriques obtenus sur 2000-2013 en prenant en compte ce changement dans les types de travaux effectués.**

4. Validité externe de l'étude et résultats corrigés

Les travaux réalisés en 2000-2013 versus 2015-2017

Figure 5 : répartition des investissements dans les différentes catégories de travaux dans « l'Enquête Maîtrise de l'Énergie » (2000-2013)

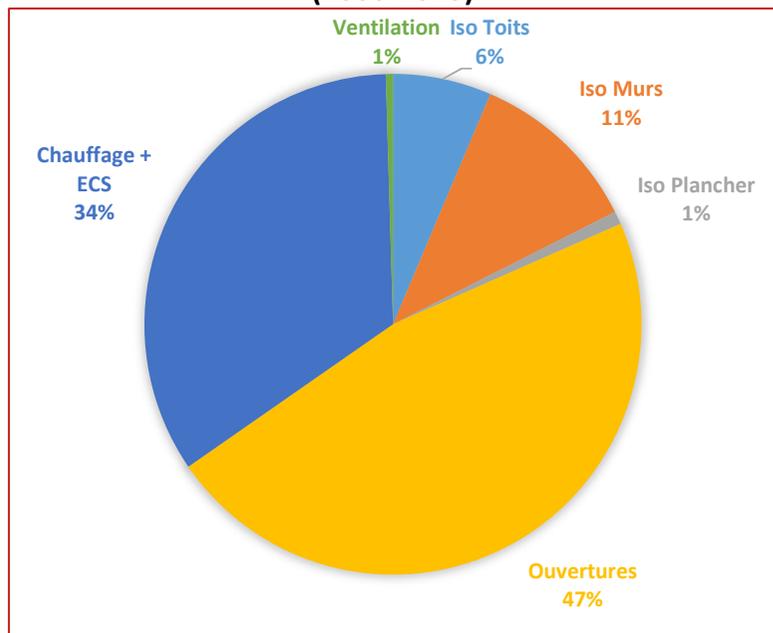
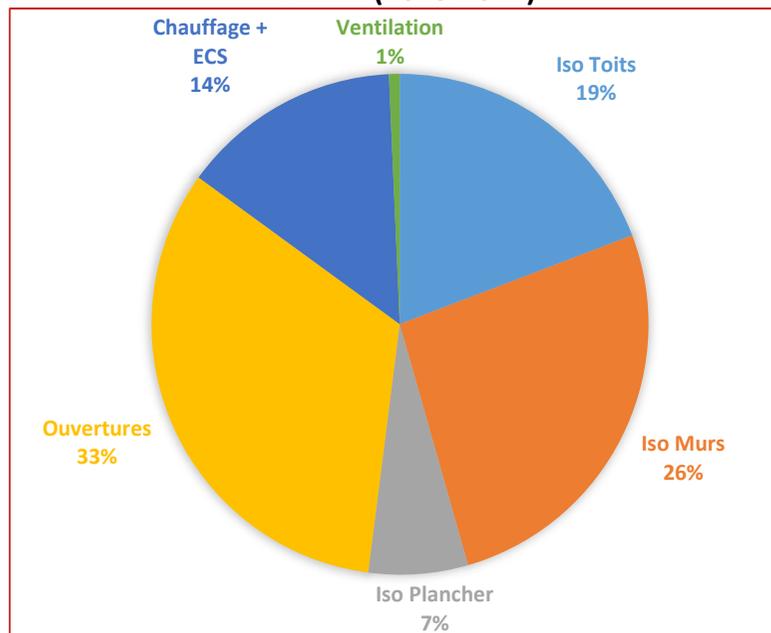


Figure 6 : répartition des investissements dans les différentes catégories de travaux dans la base de données TREMI (2015-2017)



- Le camembert de gauche présente la répartition du montant total investi en € dans les travaux décrits par l'enquête « Maîtrise de l'énergie » de l'ADEME sur la période 2000-2013.
- Le camembert de droite fait de même pour l'enquête ADEME TREMI sur la période 2015-2017.

→ Les travaux sur les ouvertures, dont les économies d'énergie sont notoirement plus faibles que les autres, sont moins fréquents dans TREMI. L'effet moyen du portefeuille de travaux TREMI est donc probablement plus élevé que celui de « 10 000 Ménages »

▪ Méthodologie – 1/2

- L'objectif est d'ajuster les résultats économétriques « 10 000 Ménages » au portefeuille de travaux décrits par TREMI. On connaît α , l'effet moyen de 1000 € investis dans la rénovation pour la période 2000 et 2013. Quelle est la valeur α' de cet effet avec le portefeuille de travaux décrit par TREMI ?
- Posons la définition suivante : $\alpha = \sum_j \beta_j x_j$
 - j , est l'indice décrivant chaque catégorie de travaux ;
 - x_j est la proportion d'argent investi dans les travaux de la catégorie j décrits dans « 10 000 Ménages » ;
 - β_j est l'impact de 1000 € de travaux de la catégorie j .
- Et l'hypothèse suivante : $\alpha' = \sum_j \beta_j x_j'$
 - x_j' est la proportion d'argent investi dans les travaux de la catégorie j décrits dans TREMI.
- L'effet énergétique β_j du geste j n'a donc pas changé au cours du temps. Cela revient à supposer que l'amélioration des technologies et des compétences des rénovateurs a été annulée par le fait que sont aujourd'hui des gisements d'économie d'énergie moins intéressants (rendements décroissants)

▪ Méthodologie – 2/2

- Le [calculateur CEE ADEME](#) fournit une estimation des β_j qui conduit à une valeur de α beaucoup plus élevée que celle que nous avons estimée économétriquement. Nous supposons toutefois qu'il fournit une estimation correcte des efficacités *relatives* de chaque geste.

- On pose $\gamma_j = \frac{\beta_j}{\beta_1}$ qui est l'efficacité relative de la catégorie j par rapport à la catégorie 1, celle des travaux d'ouvertures, On a donc

$$\bullet R = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\sum_j \beta_j x_j'}{\sum_j \beta_j x_j} = \frac{\sum_j \gamma_j x_j'}{\sum_j \gamma_j x_j}$$

- En utilisant les valeurs γ_j provenant du calculateur CEE de l'ADEME et les proportions de travaux x_j et x_j' des enquêtes « 10 000 Ménages » et TREMI, on calcule la valeur de R , le coefficient correctif à appliquer à α pour obtenir α' .
- R ne corrige que l'effet moyen pour la consommation d'énergie (en kWh) car le calculateur ADEME fournit des efficacités en kWhc/€ investi. Pour obtenir le coefficient correctif pour la facture, il suffit de multiplier l'efficacité relative γ_j par le rapport du prix du vecteur énergétique de la catégorie avec celui du vecteur énergétique de la référence. Même chose pour les effets de CO2 sauf qu'on utilise le rapport des empreintes carbone.

4. Validité externe de l'étude et résultats corrigés

■ Illustration : efficacité relative de 3 fiches CEE d'après le calculateur ADEME

Tableau 5 : Exemple de données fournies par le calculateur ADEME des fiches CEE

Type d'opérations		Variable de coût unitaire		Coût total (€ HT)	MWh cumac	Efficacité énergétique relative γ_i
Fiche	Nom	Paramètre	Valeur	Moy.		
BAR-TH-106	Chaudière individuelle à haute performance énergétique	Nombre de chaudières	1,00	3 113	46,900	2,19
BAR-EN-102	Isolation des murs (France métropolitaine)	Surface d'isolant (m2)	10,00	1 125	38,000	4,90
		Type d'isolant	Laine minérale + plâtre			
BAR-EN-104	Fenêtre ou porte-fenêtre complète avec vitrage isolant	Nombre de fenêtres posées	1,00	1 189	8,200	1
		Type de fenêtre	Aluminium avec rupture des ponts thermiques			

- Le calculateur ADEME permet de calculer des efficacités énergétiques relatives pour chaque catégorie de travaux.
- Cela nous permet de définir l'efficacité énergétique moyenne d'un portefeuille de travaux en pondérant cette efficacité relative par les investissements réalisés dans chaque catégorie de travaux.

4. Validité externe de l'étude et résultats corrigés

Les coefficients correctifs obtenus

Tableau 6 : Résultats corrigés à l'aide des coefficients obtenus par notre méthode

Données	Effet (2000-2013) de 12k€ investis		Coefficient Correctif*	Effet (2020) de 12k€ investis	
	%	Montant		%	Montant
Facture énergétique	- 9,0 %	- 117 €/an	1,37	- 12,3 %	- 160 €/an
Consommation énergétique	- 3,5 %	591 kWh/an	1,47	- 5,5 %	- 916 kWh/an
Empreinte carbone	- 15,275 %	535 kgCO2/an	1,42	-21,7 %	- 760 kgCO2/an

*Le détail des calculs est donné en [annexe](#)

→ Il est nécessaire d'inflater les estimations sur données 2000 – 2013 d'environ 40 % pour refléter le portefeuille des travaux réalisés dans TREMI 2018

▪ En résumé, les résultats économétriques corrigés

- En se fondant sur les **données de gestes réalisés TREMI (2017)** et le **calculateur de l'ADEME**, nous **augmentons de 40 %** l'effet du capital investi dans les travaux aujourd'hui par rapport à notre estimation économétrique initiale.
- Les effets des travaux de rénovation énergétique restent sensiblement faibles :
 - **La facture énergétique** diminue de 12 % pour 12000 € investis ;
 - **Les émissions de CO₂** diminue de 22% pour 12000 € investis.
- L'effet est plus important sur les émissions de CO₂ pour deux raisons :
 - Les ménages chauffés au fioul ont réalisé plus de travaux que les autres, voire sont passés à des chauffages gaz/électricité moins polluants (voir [Annexe 9](#)) ;
 - Une consommation énergétique se décompose en énergie de chauffage et en énergie spécifique, la seconde n'engendre un effet que sur la facture (l'électricité a un faible impact carbone en France).
- Nos estimations ne prennent pas en compte le bénéfice **d'augmentation du confort** pour les ménages éventuellement induit par la rénovation énergétique.

■ Comparaison avec les résultats d'autres analyses *ex post*

- Plusieurs autres études se sont intéressées à l'efficacité des travaux de rénovation énergétique à l'aide d'une estimation économétrique *ex post* :

Tableau 7 : Résumé d'autres résultats obtenus sur l'efficacité des travaux de rénovation énergétique à l'aide d'estimations *ex post*

Etudes	Année	Pays	Périmètre de l'étude	Méthode	Résultats	Différence avec les modèles d'ingénierie <i>ex ante</i>
Blaise, Glachant, Kahn	2020	France	Travaux de rénovation énergétique	Panel à effets fixes	15 € pour 1000€ investis	X
Raynaud	2014	Meuse, Haute Marne & PACA, France	Remplacement du système de chauffage et amélioration de l'enveloppe	Comparaison avant/après sur un échantillon de ménages réalisant des travaux	10 % de la facture économisés	X
Fowlie, Greenstone, Wolfram.	2018	Michigan, Etats-Unis	Résidentiel précaire	Essai randomisé contrôlé	40\$ pour 1000 \$ investis. Pas de preuve d'effet rebond (extrapolation)	50 % de l'effet <i>ex ante</i>
Graff Zivin, Novan	2016	San Diego, Etats-Unis	Résidentiel précaire. Facture d'électricité	Méthode en double différences	80 \$ économisés par an pour 1000 \$ investis *(pour les ménages qui ont des climatiseurs)	50 % de l'effet <i>ex ante</i>
Liang, Qiu, Ruddell	2017	Phoenix, Etats-Unis	Electricité résidentielle et tertiaire	Panel à effets fixes	12% d'économie pour le tertiaire, 8% d'économie pour le résidentiel	30 à 50 % de l'effet <i>ex ante</i>
Davis, Fuchs, Gertler	2014	Mexico DC, Mexique	Remplacement de climatisations et de réfrigérateurs	Méthode en double différences	Réfrigérateurs : 8 % d'économie Climatiseurs : augmentation de la facture	25 % de l'effet <i>ex ante</i>

▪ Commentaires

- Le [Tableau 7](#) montre une comparaison des résultats de différentes études économétriques *ex post* sur l'effet des travaux de rénovation sur la facture énergétique.
- Notre étude est celle qui produit les résultats les plus faibles, mais **quatre autres études sur cinq soulignent une surestimation importante des modèles d'ingénierie par rapport à la réalité.**
- Dans un contexte dominé par les **modèles d'ingénierie *ex ante*** , il paraît nécessaire de **produire plus d'études fondées sur des estimations *ex post*** des économies d'énergies réalisées par les gestes de rénovation.
- En France, nous estimons qu'il serait pertinent de **produire, de nouveau, des données de panel** de qualité afin de pouvoir réaliser des études similaires sur des **échantillons plus récents.**

- 5. Calcul du coût de la tonne de carbone évitée

▪ Objectifs

- Dans cette partie nous allons étudier à partir de nos résultats et d'hypothèses techniques **le coût moyen de la tonne de carbone évitée d'un « panier » de rénovation énergétique** composé, proportionnellement à leur importance dans la base de données TREMI, des gestes de rénovation suivants :
 1. Isolation des murs
 2. Isolation des planchers
 3. Installation d'une pompe à chaleur air/eau
 4. Installation d'une chaudière gaz à condensation
 5. Installation d'une chaudière biomasse à condensation.
 - Nous ne considérons pas les travaux d'huissierie car ils sont réputés peu efficaces.
- **Pour chacun de ces gestes sont définis un geste performant et un geste de référence**

5. Calcul du coût de la tonne de carbone évitée

■ Scénario de rénovation et scénario de référence

- Pour calculer la rentabilité d'un geste, il est nécessaire de définir une référence, c'est-à-dire ce qui se passerait en l'absence de rénovation. Pour l'isolation, nous supposons que le choix est entre isoler et ne rien faire. Pour les équipements, nous nous plaçons dans une situation où l'équipement est en fin de vie et doit être remplacé. Le choix est donc entre installer un équipement énergétiquement performant ou installer un équipement non performant. Le tableau 8 présente les différents scénarios.

Tableau 8 : Scénario de rénovation énergétique et scénario de référence

Scénario de rénovation énergétique	Scénario de référence
Isoler	Ne pas isoler
Installer une chaudière gaz condensation	Installer un équipement de performance énergétique minimale autorisée par la réglementation
Installer une chaudière biomasse condensation	
Installer une PAC Air/Eau	

Pour voir le détail des scénarios choisis voir [Annexe 7](#) et [l'Annexe 8](#)

5. Calcul du coût de la tonne de carbone évitée

▪ Hypothèses

- On effectue nos calculs pour le ménage médian français :

Tableau 9 : Caractéristiques du ménage-type utilisé pour calculer le coût de la tonne de carbone évitée

Données	Valeur
Nombre de personnes	2
Revenu fiscal	32 000 €
Surface habitée	100 m² (maison) en zone H1(nord)
Facture énergétique (en €)	1750 € [1]
Empreinte carbone (en kg)	3500 kgCO ₂ [2]
Taux d'actualisation	4 %

[1] Douenne ([2019](#))

[2] [Ministère de la Transition Ecologique](#)

5. Calcul du coût de la tonne de carbone évitée

▪ Effet spécifique de chaque geste

En utilisant les calculs utilisés pour corriger les résultats économétriques (planches [26](#) & [27](#)), on obtient la valeur β_j de l'effet 1000 € investis dans le geste j sur la facture énergétique annuelle :

$$\alpha_T = \sum_k \beta_k * x_{kT} = \beta_j * (x_{jT} + \sum_{k \neq j} \frac{\gamma_k}{\gamma_j} * x_{kT})$$

- D'où, pour toute catégorie de gestes j :

$$\beta_j = \frac{\alpha_{2013}}{x_{j2013} + \sum_{k \neq j} \frac{\gamma_k}{\gamma_j} * x_{k2013}}$$

α_T l'effet absolu global de 1000€ investis dans le portefeuille moyen de geste de rénovation de la période T sur la facture énergétique ;

β_j l'effet absolu moyen de 1000€ investis dans les gestes de rénovation de la catégorie j sur la facture énergétique ;

γ_j l'effet relatif moyen de 1000€ investis dans les gestes de rénovation de la catégorie j sur la facture énergétique par rapport aux travaux de double vitrage ;

x_{jT} la proportion de travaux de catégorie j lors de la période T.

→ Nous sommes ainsi en mesure de calculer l'effet moyen de chaque catégorie de gestes de rénovation énergétique, donc de calculer leur rentabilité.

5. Calcul du coût de la tonne de carbone évitée

▪ Résultats

- Compte tenu de nos scénarios de performance énergétique et de référence, nous calculons la valeur actuelle nette de l'investissement en efficacité énergétique pour le ménage de la manière suivante :
 - Pour l'isolation, la **Valeur Actuelle Nette privée = économies d'énergie actualisées - montant des travaux + aides**
 - Pour les autres actions **VAN privée = VAN privée (performance) – VAN privée (référence)**
- Et pour tous les scénarios, on a alors :
 - **Coût de la tonne de carbone évitée = (VAN privée - subventions) / carbone évité.**
- On calcule ce coût pour chacun des 5 gestes retenus, puis on pondère selon leur importance dans la Base TREMI ;
- **Cela nous permet d'aboutir à un coût de la tonne de carbone évitée de :**

335€/tCO₂

5. Calcul du coût de la tonne de carbone évitée

■ Comparaison avec d'autres études *ex post*

- Plusieurs autres études se sont intéressé à l'efficacité des travaux de rénovation énergétique à l'aide d'une estimation économétrique *ex post* :

Tableau 10 : Résumé des autres résultats obtenus sur le coût de la tonne de carbone évitée par la rénovation énergétique

Etudes	Année	Résultats
Notre étude	2020	335 €/tCO ₂ (isolation murs, planchers, chaudière et PAC)
Carbone 4 [1]	2018	200 €/tCO ₂ (PAC air/eau)
CGDD [2]	2019	230 €/tCO ₂ (tout geste de rénovation)
DG Trésor [3]	2017	100 €/tCO ₂ (chaudière) 400 €/tCO ₂ (isolation plancher)
Dispositif CEE [4]	2020	210€/tCO ₂ (tout geste)

Source : [France Stratégie](#) :

[1] Tableau 48, [2] Tableau 49, [3] Tableau 50

[4] notre calcul fondé sur un prix du certificat à 9€/MWhc et une empreinte carbone de 172g/MWh en France

12/10/2020

- Les paniers de solution étudiés ne sont pas strictement identiques, toutefois nos résultats semblent un peu plus élevés que ceux des autres évaluations menées en France ;
- Toutes pointent cependant un coût élevé de la tonne de carbone évitée par la rénovation énergétique en France, très loin du coût négatif prédit par la théorie du « *energy efficiency gap* ».

- 6. Références

■ Références bibliographiques

- Gaël Blaise, Matthieu Glachant (2019) "[Quel est l'impact des travaux de rénovation énergétique des logements sur la consommation d'énergie ? Une évaluation ex post sur données de panel](#)", Revue de l'Energie, n° 646, septembre-octobre.
- Graff Zivin, J. and Novan, K. (2015). [Upgrading efficiency and behavior: electricity savings from residential weatherization programs](#).
- Fowlie, M., Greenstone, M., Wolfram, C., (2018). [Do Energy Efficiency Investments Deliver? Evidence from the Weatherization Assistance Program](#)
- 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.
- Liang, J., Qiu, Y., Lyle Ruddell, B.,(2017) [Do energy retrofits work? Evidence from commercial and residential buildings in Phoenix](#)
- Hirst, E. and Brown, M., 1990. [Closing the efficiency gap: barriers to the efficient use of energy](#).
- Davis, L., Fuchs, A., and Gertler, P. (2014). [Cash for coolers: evaluating a large-scale appliance replacement program in Mexico](#)
- Allcott, H., Greenstone, M., 2012. [Is there an energy efficiency gap? Journal of Economic Perspectives, 26\(1\), pp 3-28](#).

■ Origines des données

- McKinsey & Company (2009). [Unlocking energy efficiency in the U.S. economy. Technical report, McKinsey Global Energy and Materials](#)
- Douenne, T., (2019). [The vertical and horizontal distributive effects of energy taxes : a case study of a French policy](#)
- [La valeur de l'action pour le climat](#), 2019, France Stratégie
- Enquête [TREMI](#), 2017, ADEME
- Calculateur CEE, [ADEME](#)
- [Base CARBONE](#), ADEME
- [Base PEGASE](#), Ministère de la Transition Ecologique
- Statista, [Parcours moyens annuels d'une voiture en France 2004 à 2018](#) (13 000 km, 2006)
- Car Labelling, ADEME, [Taux moyen d'émissions de CO2 en France](#) (150gCO2/km, 2006)
- [Consommation d'énergie résidentielle](#), Ministère de la Transition Ecologique

- 7. Annexes

Annexe 1 : Explication des calculs des coefficients correctifs

	Prix unitaire	MWhc	MWhc/an	Taux de couv kWh	Efficacité énergétique relative γ_i	Taux de couv €	Realtif €	Taux de couv CO ₂	Relatif CO ₂	Montant Investi [k€]	% Invest	$\gamma_j x_j$ kWh	$\gamma_j x_j$ CO ₂	$\gamma_j x_j$ €
Fiche	A	B	C	D=C/A	E=D/Ref	F	G=F/Re _f	H	I=I/Ref	J	K	K*E	K*I	K*G
BAR-EN-101 (vA33.3)	40	1,700	0,098	2,46	6,49	0,02	3,24	0,43	7,66	1,43E+07	22,09 %	1,43	1,69	0,72

Données fournies par le calculateur ADEME

Donnée calculée en prenant en compte la durée de vie indiquée sur la fiche et un taux d'actualisation de 4%

La référence est la valeur de la colonne D pour la fiche correspondant au double vitrage

Cette valeur est calculée en multipliant la colonne D par le prix (€/MWh) du vecteur énergétique

Cette valeur est calculée en multipliant la colonne D par l'empreinte carbone (kgCO₂/MWh) du vecteur énergétique

$$R = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\sum_j \beta_j x_j'}{\sum_j \beta_j x_j} = \frac{\sum_j \gamma_j x_j'}{\sum_j \gamma_j x_j}$$

Ces trois valeurs sont les $\gamma_j x_j$ associés à la consommation d'énergie, la facture et l'empreinte carbone

Annexe 2 : Calcul des coefficients, Base TREMI

Tableau 11 : Calcul des coefficients correctifs, calcul du $\alpha(2020)$

Fiche	Nom	Prix unitaire	MWhc	MWhc/an	Taux de couv kWh	Efficacité énergétique relative γ_i	Taux de couv €	Relatif €	Taux de couv CO2	Relatif CO2	Montant Investi [k€]	% Investi	$\gamma_j x_j$ kWh	$\gamma_j x_j$ CO2	$\gamma_j x_j$ €
		A	B	C	D=C/A	E=D/Ref	F	G=F/Ref	H	I=I/Ref	J	K	K*E	K*I	K*G
BAR-EN-101 (vA33.3)	Isolation de combles ou de toitures	40	1,700	0,098	2,46	6,49	0,02	3,24	0,43	7,66	1,43E+07	22,09%	1,43	1,69	0,72
BAR-EN-105	Isolation des toitures terrasses Electricité	100	1,400	0,081	0,81	2,14	0,01	2,14	0,12	2,14	5,38E+05	0,83%	0,02	0,02	0,02
BAR-EN-105	Isolation des toitures terrasses Combustible	100	2,200	0,127	1,27	3,36	0,01	1,44	0,29	5,18	5,38E+05	0,83%	0,03	0,04	0,01
BAR-EN-103 (vA33.3)	Isolation d'un plancher (vA33.3 à compter du 01-09-20)	35	1,600	0,093	2,64	6,98	0,02	3,49	0,46	8,24	3,31E+06	5,11%	0,36	0,42	0,18
BAR-EN-102	Isolation des murs (France métropolitaine) Elec	113	2,400	0,139	1,23	3,24	0,02	3,24	0,18	3,24	3,38E+06	5,23%	0,17	0,17	0,17
BAR-EN-102	Isolation des murs (France métropolitaine) Comb	113	3,800	0,220	1,94	5,13	0,01	2,21	0,44	7,92	3,38E+06	5,23%	0,27	0,41	0,12
BAR-EN-102	Isolation des murs (France métropolitaine) Elec	100	2,400	0,139	1,39	3,66	0,02	3,66	0,20	3,66	2,08E+06	3,21%	0,12	0,12	0,12
BAR-EN-102	Isolation des murs (France métropolitaine) Comb	100	3,800	0,220	2,20	5,80	0,01	2,49	0,50	8,96	2,08E+06	3,21%	0,19	0,29	0,08
BAR-EN-102	Isolation des murs (France métropolitaine) Elec	117	2,400	0,139	1,19	3,13	0,02	3,13	0,17	3,13	2,23E+06	3,44%	0,11	0,11	0,11
BAR-EN-102	Isolation des murs (France métropolitaine) Comb	117	3,800	0,220	1,88	4,96	0,01	2,13	0,43	7,65	2,23E+06	3,44%	0,17	0,26	0,07
BAR-EN-104	Fenêtre ou porte-fenêtre complète avec vitrage isolant Elec	900	5,200	0,341	0,38	1,00	0,01	1,00	0,06	1,00	8,50E+06	13,13%	0,13	0,13	0,13
BAR-EN-104	Fenêtre ou porte-fenêtre complète avec vitrage isolant Comb	900	8,200	0,538	0,60	1,58	0,00	0,68	0,14	2,44	8,50E+06	13,13%	0,21	0,32	0,09
BAR-EN-108	Fermeture isolante	3 110	0,800	0,052	0,02	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00		0,00%	0,00	0,00	0,00
BAR-EN-108	Fermeture isolante	3 110	1,300	0,085	0,03	0,07	0,00	0,03	0,00	0,00		0,00%	0,00	0,00	0,00
BAR-TH-129	Pompe à chaleur de type air/air	13 455	128,320	10,548	0,78	2,07	0,01	2,07	0,12	2,07	7,66E+05	1,18%	0,02	0,02	0,02
BAR-TH-113	Chaudière biomasse individuelle	10 000	206,800	16,999	1,70	4,49	0,01	1,26	0,05	0,90	6,94E+05	1,07%	0,05	0,01	0,01
BAR-TH-112	Appareil indépendant de chauffage au bois	2 500	52,120	4,284	1,71	4,52	0,01	2,26	0,56	9,97	2,26E+06	3,49%	0,16	0,35	0,08
BAR-TH-104	Pompe à chaleur de type air/eau ou eau/eau	13 200	150,373	12,360	0,94	2,47	0,01	2,47	0,30	5,45	1,03E+06	1,59%	0,04	0,09	0,04
BAR-TH-106	Chaudière individuelle à haute performance énergétique	4 500	94,285	7,750	1,72	4,54	0,01	1,95	0,39	7,02	5,17E+06	7,98%	0,36	0,56	0,16
BAR-TH-159	Pompe à chaleur hybride individuelle	15 000	118,560	9,745	0,65	1,71	0,01	1,71	0,21	3,78	5,53E+02	0,00%	0,00	0,00	0,00
BAR-TH-143	Système solaire combiné (France métropolitaine)	6 500	134,800	11,080	1,70	4,50	0,01	2,25	0,55	9,91	1,86E+02	0,00%	0,00	0,00	0,00
BAR-TH-101	Chauffe-eau solaire individuel (France métropolitaine)	1 725	21,500	1,767	1,02	2,70	0,01	1,35	0,33	5,96	5,13E+02	0,00%	0,00	0,00	0,00
BAR-TH-148	Chauffe-eau thermodynamique à accumulation	2 500	15,600	1,282	0,51	1,35	0,00	0,58	0,12	2,09	2,68E+04	0,04%	0,00	0,00	0,00
BAR-TH-125	Système de ventilation double flux autoréglable ou modulé à haute performance (France métropolitaine)	2 000	63,520	3,673	1,84	4,85	0,01	2,42	0,42	7,48	2,64E+04	0,04%	0,00	0,00	0,00
BAR-TH-127	Ventilation Mécanique Contrôlée simple flux hygro-équilibrable (France métropolitaine)	1 000	43,840	2,535	2,54	6,69	0,02	3,34	0,58	10,33	6,23E+05	0,96%	0,06	0,10	0,03
	Travaux ECS + Chauffage Faible				0,15	0,40	0,00	0,79	0,10	1,86	3,09E+06	4,77%	0,02	0,09	0,04
											6,48E+07		3,91	5,21	2,19

7. Annexes

Annexe 3 : Calcul des coefficients, Base « Maitrise de l'énergie »

Tableau 12 : Calcul des coefficients correctifs, calcul du $\alpha(2000-2013)$

Fiche	Nom	Prix unitaire	MWh cumac	MWhc/an	Taux de couv Energie	Efficacité énergétique relative γ_i	Taux de couv Facture	Relatif €	Taux de couv CO2	Relatif CO2	Montant Investi	% Investi	$\gamma_j x_j$ kWh	$\gamma_j x_j$ CO2	$\gamma_j x_j$ €
		A	B	C	D=C/A	E=D/Ref	F	G=F/Ref	H	I=I/Ref	J	K	K*E	K*I	K*G
BAR-EN-101 (vA33.3)	Isolation de combles ou de toitures	40	1,700	0,098	2,46	6,49	0,02	3,24	0,43	7,66			0,65	0,77	0,33
BAR-EN-105	Isolation des toitures terrasses Electricité	100	1,400	0,081	0,81	2,14	0,01	2,14	0,12	2,14	0,00E+00	0,00%	0,00	0,00	0,00
BAR-EN-105	Isolation des toitures terrasses Combustible	100	2,200	0,127	1,27	3,36	0,01	1,44	0,29	5,18	0,00E+00	0,00%	0,00	0,00	0,00
BAR-EN-103 (vA33.3)	Isolation d'un plancher (vA33.3 à compter du 01-09-20)	35	1,600	0,093	2,64	6,98	0,02	3,49	0,46	8,24	7,30E-01	2,01%	0,14	0,17	0,07
BAR-EN-102	Isolation des murs (France métropolitaine) Elec	113	2,400	0,139	1,23	3,24	0,02	3,24	0,18	3,24	1,17E+00	3,22%	0,10	0,10	0,10
BAR-EN-102	Isolation des murs (France métropolitaine) Comb	113	3,800	0,220	1,94	5,13	0,01	2,21	0,44	7,92	1,17E+00	3,22%	0,17	0,26	0,07
BAR-EN-104	Fenêtre ou porte-fenêtre complète avec vitrage isolant Elec	900	5,200	0,341	0,38	1,00	0,01	1,00	0,06	1,00	8,60E+00	23,68%	0,24	0,24	0,24
BAR-EN-104	Fenêtre ou porte-fenêtre complète avec vitrage isolant Comb	900	8,200	0,538	0,60	1,58	0,00	0,68	0,14	2,44	8,60E+00	23,68%	0,37	0,58	0,16
BAR-EN-108	Fermeture isolante	3 110	0,800	0,052	0,02	0,04	0,00	0,04	0,00	0,04		0,00%	0,00	0,00	0,00
BAR-EN-108	Fermeture isolante	3 110	1,300	0,085	0,03	0,07	0,00	0,03	0,01	0,11		0,00%	0,00	0,00	0,00
BAR-TH-129	Pompe à chaleur de type air/air	13 455	128,320	10,548	0,78	2,07	0,01	2,07	0,12	2,07	2,30E+00	6,33%	0,13	0,13	0,13
BAR-TH-113	Chaudière biomasse individuelle	10 550	206,800	16,999	1,61	4,25	0,01	2,12	0,62	11,19	0,00E+00	0,00%	0,00	0,00	0,00
BAR-TH-112	Appareil indépendant de chauffage au bois	2 500	52,120	4,284	1,71	4,52	0,01	2,26	0,56	9,97	0,00E+00	0,00%	0,00	0,00	0,00
BAR-TH-104	Pompe à chaleur de type air/eau ou eau/eau	13 200	150,373	12,360	0,94	2,47	0,01	2,47	0,30	5,45	2,30E+00	6,33%	0,16	0,34	0,16
BAR-TH-106	Chaudière individuelle à haute performance énergétique	4 500	94,285	7,750	1,72	4,54	0,01	1,95	0,39	7,02	5,00E+00	13,77%	0,63	0,97	0,27
BAR-TH-159	Pompe à chaleur hybride individuelle	15 000	118,560	9,745	0,65	1,71	0,01	1,71	0,21	3,78	0,00E+00	0,00%	0,00	0,00	0,00
BAR-TH-143	Système solaire combiné (France métropolitaine)	6 500	134,800	11,080	1,70	4,50	0,01	2,25	0,55	9,91	0,00E+00	0,00%	0,00	0,00	0,00
BAR-TH-101	Chauffe-eau solaire individuel (France métropolitaine)	1 725	21,500	1,767	1,02	2,70	0,01	1,35	0,33	5,96	0,00E+00	0,00%	0,00	0,00	0,00
BAR-TH-148	Chauffe-eau thermodynamique à accumulation	2 500	15,600	1,282	0,51	1,35	0,01	1,35	0,12	2,09	1,31E+00	3,61%	0,05	0,08	0,05
BAR-TH-125	Système de ventilation double flux autoréglable ou modulé à haute performance (France métropolitaine)	2 000	63,520	3,673	1,84	4,85	0,01	2,42	0,42	7,48	0,00E+00	0,00%	0,00	0,00	0,00
BAR-TH-127	Ventilation Mécanique Contrôlée simple flux hygro-réglable (France métropolitaine)	1 000	43,840	2,535	2,54	6,69	0,02	3,34	0,58	10,33	0,00E+00	0,00%	0,00	0,00	0,00
Travux ECS + Chauffage Faible					0,25	0,67	0,00	0,67	#VALEUR!	0,67	1,48E+00	4,08%	0,03	0,04	0,03
												3,63E+01	2,66	3,67	1,60

Correction kWh
3,91/2,66 = 1,47

Correction CO2
5,21/3,67 = 1,42

Correction €
2,19/1,60 = 1,37

Annexe 4 : Statistiques sur la consommation d'énergie par type de logement en France

Tableau 13 : Consommation d'énergie des maisons individuelles en France

	Energie (en TWh PCS ou PCI Gaz)	2018	2017	2016
Chauffage	Autres énergies	2,324	2,355	2,419
	Bois	77,032	81,524	86,077
	Pompe à chaleur	10,087	9,507	9,020
	Chauffage urbain	0,000	0,000	0,000
	Electricité	23,020	23,442	24,574
	dont pompe à chaleur	5,043	4,754	4,510
	Fioul domestique	31,425	35,386	38,211
	Gaz naturel	64,714	68,509	71,799
	Gaz de pétrole liquéfié	2,781	2,975	3,184
	Toutes énergies*	204,911	216,848	228,105
Eau chaude sanitaire	Autres énergies	0,128	0,122	0,110
	Bois	0,725	0,752	0,816
	Chauffage urbain	0,000	0,000	0,000
	Electricité	16,894	17,018	17,306
	Fioul domestique	4,456	4,686	4,764
	Gaz naturel	7,784	7,731	7,692
	Gaz de pétrole liquéfié	0,653	0,657	0,661
Toutes énergies*	29,861	30,193	30,579	
Cuisine	Electricité	7,238	7,177	7,118
	Gaz naturel	4,103	4,116	4,140
	Gaz de pétrole liquéfié	3,815	3,935	4,025
	Toutes énergies*	14,746	14,817	14,869
Electricité Spécifique	Electricité	48,376	48,619	49,134
Climatisation	Electricité	0,774	0,670	0,668

En multipliant chaque consommation par son empreinte carbone énergétique, puis en divisant par le nombre de ménages en maison individuelle on obtient l'empreinte carbone annuelle moyenne d'un ménage français en maison individuelle

**3740 kg/CO2
pour un ménage
en maison
individuelle**

- Annexe 5 : Statistiques sur les logements en France

Tableau 14 : Statistiques sur les logements en France

	2018		2017		2016	
	Milliers logement	Millions m ²	Milliers logement	Millions m ²	Milliers logement	Millions m ²
Appartement	12 652	801	12 547	793	12 390	782
Maison	16 385	1 853	16 273	1 840	16 165	1 827
Tous logements	29 037	2 654	28 820	2 632	28 555	2 609

[Consommation d'énergie résidentielle](#), Ministère de la Transition Ecologique

- Annexe 6 : Calcul de l’empreinte carbone du MWh moyen en France

Tableau 15 : Consommation d’énergie résidentielle en France

TOUS USAGES	2018	Empreinte carbone énergétique [kg/MWh]	Empreinte carbone 2018 [MtCO ₂]	Empreinte carbone énergétique moyenne [kgCO ₂ /MWh]
Electricité	143,0	147	21,0	
dont pompe à chaleur	5,2			
Gaz naturel	144,8	227	32,9	
Fioul domestique	43,3	324	14,0	
Gaz de pétrole liquéfié	8,7	272	2,4	
Chauffage urbain	17,7	100	1,8	
Charbon, autres	2,8	387	1,1	
Bois	82,8	29,5	2,4	
Pompe à chaleur	10,4	0	0	
Total	439,0		75,6	0,172

[Consommation d’énergie résidentielle](#), Ministère de la Transition Ecologique

- Annexe 7 : Description des scénarios de référence et de rénovation pour les équipements

Tableau 16 : Scénarios de rénovation et scénario de référence pour le calcul des VAN

Données	PAC Air/Eau	Chaudière Condensation	Chaudière granulés condensation	Chaudière BT (Référence)
Source des données	Mychauffage.com	Mychauffage.com	PicBleu.fr	Mychauffage.com
Référence exacte	Aquarea T-CAP GENERATION H All in One	Egalis CONDENS PLUS	X	Egalis BAS NOx Plus Cheminée
Puissance	12 KW monophasé	24 kW 150 L	X	24 kW 120 L
Prix TTC	10 574 €	3651 €	10550 €	2951 €
Prix HT	10 222 €	3461 €	10000 €	2683 €
Subventions	2000 €	1200 €	4000 €	0 €

- Annexe 8 : Hypothèses détaillées des 6 scénarios de rénovation énergétique

Tableau 17 : Hypothèses techniques sur les technologies installées lors du calcul des VAN

Fiche	Isolation	Chaudière	PAC Air/Eau	Biomasse
Durée de vie (fiches CEE)	30 ans	17 ans		
Type de vecteur énergétique	moyenne énergétique des combustibles en France	Gaz → Gaz	Gaz → Electricité	Gaz → Granulé Bois
Coût d'entretien	0 €	85 €	170 €	150 €

<https://www.travaux.com/chauffage/guide-des-prix/prix-entretien-pompe-a-chaaleur>

<https://www.fournisseur-energie.com/aides-fiches-techniques/entretien-chaudiere/tarifs/>

Entretien chaudière basique : 75 €

- Annexe 8 : Matrice des changements d'énergie de chauffage

Tableau 18 : Matrice des changements d'énergie de chauffage

Energie d'arrivée Energie de départ	Electricité	Fioul	Gaz de Ville	Propane	Petrole	Charbon	Bois	Vapeur	Total	Nouveaux arrivants
Electricité		613	1000	164	40	22	411	589	2839	83
Fioul	707		100	25	2	2	67	134	1037	-145
Gaz de Ville	961	52		12	5	1	37	315	1383	108
Propane	183	28	28		2	0	22	8	271	-32
Pétrole	40	1	5	6		0	1	1	54	-2
Charbon	38	5	2	0	0		8	0	53	-21
Bois	368	51	40	17	1	7		7	491	63
Vapeur	625	142	316	15	2	0	8		1108	-54
Total	2922	892	1491	239	52	32	554	1054		

▪ Annexe 9 : Glossaire

- Les trois études sont liées à la notion de rénovation énergétique. Nous définissons les termes suivants :
 - **Un geste** (de rénovation énergétique) : est une opération de rénovation énergétique associée à un coût. Par exemple : le remplacement d'une chaudière, l'isolation d'un toit, etc. Une fiche CEE sanctionne un geste précis de rénovation énergétique (exceptée la récente fiche « rénovation globale »).
 - **Les travaux** (de rénovation énergétique) : sont un ensemble de gestes de rénovation énergétique effectués par un ménage en une fois. On peut associer un coût à ces travaux (la somme du coût des gestes qui les composent). Lors de travaux de rénovation il est possible que certains gestes soient éligibles à des subventions et d'autres non.
 - **Facture énergétique** : le montant dépensé en € par les ménages pour leur énergie résidentielle (chauffage, cuisson, spécifique) pour tout vecteur énergétique ;
 - **Consommation d'énergie résidentielle** : le montant d'énergie en kWh utilisé par les ménages pour leur énergie résidentielle ;
 - **Emission de carbone résidentielle** : les émissions directes de CO2 en kg produites par les ménages par leur consommation d'énergie résidentielle.