



DOCUMENTS DE TRAVAIL DE LA DG TRÉSOR

Numéro 2017/02 – Mars 2017

Barrières à l'investissement dans l'efficacité énergétique : quels outils pour quelles économies ?

Isabelle CAMILIER-CORTIAL
Alexis LOUBLIER
Étienne PERROT
Arthur SOULETIE

BARRIÈRES À L'INVESTISSEMENT DANS L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE : QUELS OUTILS POUR QUELLES ÉCONOMIES ?

Isabelle CAMILIER-CORTIAL*

Alexis LOUBLIER*

Étienne PERROT*

Arthur SOULETIE^{*1}

Ce document de travail n'engage que ses auteurs. L'objet de sa diffusion est de stimuler le débat et d'appeler commentaires et critiques.

* **Isabelle CAMILIER-CORTIAL** est en poste à la Direction Générale du Trésor au Ministère de l'Économie et des Finances (France)

isabelle.camilier-cortial@dgtresor.gouv.fr (+33-1-44-87-14-35)

* **Alexis LOUBLIER** est en poste à la Direction Générale du Trésor au Ministère de l'Économie et des Finances (France)

alexis.loublier@dgtresor.gouv.fr (+33-1-44-87-71-19)

* **Étienne PERROT** est étudiant à l'École Polytechnique (France)

* **Arthur SOULETIE** est en poste à la Direction Générale du Trésor au Ministère de l'Économie et des Finances (France)

arthur.souletie@dgtresor.gouv.fr (+33-1-44-87-14-30)

¹ Les auteurs remercient l'agence Ylios pour la transmission des données ainsi que l'Union française de l'électricité (UFE) pour les multiples échanges concernant leur enquête.

Table des matières

Résumé.....	3
Synthèse	4
1. Introduction.....	6
2. Modélisation de la rentabilité privée et socio-économique des investissements en présence de défaillances de marché et de comportements irrationnels	10
2.1 Rentabilité privée.....	10
2.2 Rentabilité socio-économique	11
2.3 Calibration des paramètres	11
3. Les données	12
3.1 L'enquête Phébus	12
3.2 Prix de l'énergie	13
3.3 Coûts et gains associés aux principaux travaux	13
3.4 Calcul de la VAN	14
3.5 Différences méthodologiques par rapport à UFE (2013).....	14
4. Estimation des gisements d'économie par rentabilité.....	15
4.1 Comparaison des travaux de rénovation en termes de coûts, durées de vie et économies d'énergie associées.....	15
4.2 Calcul des gisements d'économie	16
4.3 Tests de robustesse	17
4.3.1 Variation du prix de l'énergie	17
4.3.2 Variation des coûts cachés.....	18
5. Impact de l'irrationalité, des défaillances de marché et de l'écart de préférence avec les préférences socio-économiques sur le stock de gisements rentables	19
5.1 Variation du taux d'irrationalité	19
5.2 Gisement chez les locataires.....	20
5.3 Ménages à faibles revenus et contrainte de crédit.....	21
6. Identification des gisements d'économie par actions.....	22
7. Principales limites de l'approche utilisée	24
8. Implications en termes de politiques publiques	25
9. Conclusion.....	27
Bibliographie	28

Résumé

À partir de l'enquête Phébus, nous montrons qu'il existe un gisement de rénovation thermique rentable pour les ménages compris entre 32 et 51 TWh, hors prix du carbone. En particulier, certains travaux comme les robinets thermostatiques ou les programmeurs sont systématiquement rentables. Plusieurs défaillances de marché ou biais cognitifs peuvent empêcher l'exploitation de ce gisement, ce qui nécessite une grande variété d'outils en réponse. La mise en place d'un prix sur le carbone augmente le gisement rentable de 5 à 15 TWh (pour un prix du carbone de 400 €/tonne à l'horizon 2030). Il existe par ailleurs, même avec un prix du carbone, un stock de gisements rentables du point de vue socio-économique mais non rentable du point de vue privé de 6 à 28 TWh.

Abstract

In this paper, using data from the Phebus survey, we show that there is a profitable thermal renovation potential estimated between 32 and 51 TWh of energy savings in the French residential sector, even in the absence of a carbon price. In particular, certain types of thermal renovations, such as thermostatic valves or thermostatic programmers, are systematically profitable. However, households fail to exploit a significant part of these profitable investment opportunities in energy efficiency, due to several market failures or cognitive biases. Several different tools are thus required in response. We show that introducing a carbon price increases the potential of energy savings through profitable thermal renovations by 5 to 15 TWh (for a carbon price of €400 per ton of CO₂ by 2030). Furthermore, even with a carbon price, there is an energy savings potential that is profitable from a socio-economic point of view but not from a private point of view, ranging from 6 to 28 TWh.

Synthèse

La rénovation thermique des bâtiments résidentiels constitue un levier essentiel de la transition énergétique et de réduction de la facture énergétique dans la mesure où le logement résidentiel représente en France près d'un tiers de la consommation finale d'énergie. La loi relative à la transition énergétique pour une croissance verte (LTECV), votée en 2015, a ainsi fixé, entre autres objectifs, une cible de 500 000 rénovations par an à compter de 2017. Les études montrent en général qu'il existe potentiellement des gisements de rénovation très rentables, mais que les investissements correspondants ne sont pas réalisés car le marché de la rénovation thermique est caractérisé par de nombreuses défaillances (asymétrie et manque d'information sur les gains escomptés, problèmes d'incitations entre propriétaires et locataires, contrainte de crédit) ainsi que l'existence de coûts « cachés ». Par ailleurs, l'investissement est également freiné par des comportements économiquement irrationnels (biais cognitif, préférence pour le présent, rationalité limitée). Une intervention publique accrue peut donc s'avérer nécessaire et de fait, une grande variété d'outils a été mise en place pour déclencher les investissements (par exemple : crédit d'impôt transition énergétique, Eco-PTZ, certificats d'économies d'énergie, TVA à taux réduit).

Les études existantes sur la rénovation thermique portent essentiellement sur des données américaines, et identifient le plus souvent les freins à l'investissement de manière isolée et évaluent rarement le gain à attendre des différents outils mis en place pour lever ces freins. Au niveau français, l'Union française de l'électricité (UFE) a estimé les gisements rentables techniquement accessibles mais n'analyse pas comment les différentes défaillances affectent l'exploitation de ce gisement. Par ailleurs, à notre connaissance, aucune étude ne fournit une analyse distinguant la rentabilité privée de la rentabilité socio-économique des opérations de rénovation, distinction pourtant indispensable pour la juste conception des politiques publiques.

Dans ce contexte, cette étude propose une évaluation des économies d'énergie qu'il est possible d'atteindre en France en réalisant un certain nombre d'opérations de rénovation (isolation, chauffage, programmation, eau chaude sanitaire), en distinguant leur rentabilité à la fois privée et socio-économique et en tenant compte des diverses défaillances de marché et des comportements irrationnels identifiés. Une telle distinction est déterminante pour la formulation de recommandations de politiques publiques efficaces et la calibration d'un éventuel soutien financier public. À partir des données issues des diagnostics de performance énergétique (DPE) de l'enquête Phébus de 2013, de l'enquête du cabinet Ylios de 2016 sur les coûts et les bénéfices des investissements et des données de l'Agence Nationale de l'Habitat, nous calculons pour chaque opération de rénovation une valeur actualisée nette (VAN). En particulier, nous distinguons un taux d'actualisation privé, relativement élevé en raison d'une préférence pour le court terme plus marquée chez les ménages et un taux d'actualisation socio-économique plus faible reflétant les gains pour la collectivité au fil du temps. En classant les actions par VAN décroissantes, nous identifions le stock de gisements rentables du point de vue privé et du point de vue socio-économique. Les données permettent de montrer qu'il existe, pour les résidences principales construites avant 1990, un gisement important de rénovations thermiques rentables pour les ménages, compris entre 32 et 51 TWh (soit 7 à 11 % de l'ensemble de la consommation des résidences principales en 2013) et qui concernent entre 5 et 9 millions de logements, y compris en l'absence de taxation des émissions de carbone.

Nous examinons ensuite comment la rentabilité est affectée par les diverses défaillances de marché et les biais cognitifs afin de suggérer des mesures de politique publique adéquates. Cette étude suggère la pertinence, selon les cas, de mesures informatives, de normes ou de mesures favorisant l'accès au crédit pour permettre la réalisation des investissements correspondants. Les données soulignent également l'importance du problème locataire/propriétaire, puisque 12 à 20 TWh d'économies rentables se trouvent chez des ménages non propriétaires de leur logement. Par ailleurs, notre étude permet de montrer qu'une forte augmentation du niveau de la taxe carbone rend rentable pour les ménages une partie significative des gisements d'économies (entre 12 et 15 TWh en plus pour une taxe à 400 €/tCO₂ en 2030). Enfin, entre 6 et 28 TWh de gisements apparaissent rentables du point de vue socio-économique mais pas privé, ce qui justifie que des mesures de type subventions puissent être envisagées pour déclencher les investissements ainsi identifiés. Enfin, l'étude permet d'identifier les travaux sur lequel centrer les dispositifs de soutien.

1. Introduction

Le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) est le premier consommateur d'énergie finale en France (45,1 % de la consommation finale en 2014) et émet environ 20 % des gaz à effet de serre (GES). En particulier, le secteur résidentiel représente 30,5 % de la consommation finale d'énergie en 2014. L'identification des gisements d'économies d'énergie permise par des opérations de rénovation thermique constitue donc un enjeu essentiel de la transition énergétique au sein de laquelle la réduction de facture énergétique et l'augmentation de l'efficacité énergétique occupent un rôle prépondérant. La loi relative à la transition énergétique pour une croissance verte (LTECV), adoptée en août 2015, a ainsi fixé plusieurs objectifs ambitieux qui concernent directement ou indirectement le secteur résidentiel :

- Réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) de 40 % en 2030 par rapport au niveau de 1990 et de 75 % en 2050. La stratégie nationale bas-carbone, qui décline ces objectifs par secteur, prévoit une baisse des émissions de 99 MtCO₂eq à 46 MtCO₂eq entre 2013 et 2028 pour l'ensemble du secteur du bâtiment, soit une baisse de 54 %.
- Réduction de la consommation énergétique finale de 50 % en 2050 par rapport à 2012.
- Rénovation de 500 000 logements par an à partir de 2017, dont la moitié est occupée par des ménages modestes, visant ainsi une baisse de la précarité énergétique d'ici 2020.

Plusieurs études mettent en avant des gains potentiellement importants liés à l'investissement dans l'efficacité énergétique. Un rapport de McKinsey & Company (2009) estime qu'aux États-Unis, 835 Mt de CO₂ pourraient ainsi être évitées, correspondant à une économie de 45 Md\$ d'ici 2030, dans l'ensemble des secteurs, le secteur résidentiel représentant environ 40 % de cet effort. Dans une étude de 2013, l'Union française de l'électricité (UFE) identifie le gisement techniquement accessible de rénovation énergétique à horizon 2020 (estimé à 89 TWh) et montre qu'il existe en France des gisements de rénovation rentables compris entre 14 TWh et 38,5 TWh selon les spécifications retenues. Plus généralement, Allcott et Greenstone (2012) rappellent qu'il existe depuis les années 1980 une littérature importante montrant que certains investissements dans l'efficacité énergétique se font à coût négatif pour les ménages, c'est-à-dire que le coût de l'investissement est inférieur au gain de revenu lié à la baisse de la consommation d'énergie, même en l'absence de prise en compte des externalités liées aux émissions.

Cependant, en dépit des économies potentiellement élevées et donc des gains de bien-être associés, il existe un sous-investissement manifeste dans ces actions de rénovation même quand celles-ci sont rentables d'un point de vue privé. Une littérature grandissante a essayé d'expliquer les causes de cette « *energy efficiency gap* »². Les différentes explications applicables au secteur du résidentiel (*i.e.* essentiellement à la rénovation³) peuvent être rangées dans les catégories suivantes : préférences individuelles marquées (aversion au risque, taux d'actualisation), comportements irrationnels, coûts cachés, défaillances de marché.

Il est cependant nécessaire de noter qu'une part non négligeable de l'écart entre les estimations des gisements potentiels et les investissements réalisés pourrait aussi venir d'une surestimation dans ces études des gains nets à attendre d'une rénovation. En effet, d'après Allcott et Greenstone (2012), la plupart des analyses ne tiennent pas compte de la consommation réelle et des usages des individus, qui s'adaptent à l'efficacité énergétique du bâtiment, par exemple en consommant moins quand leur logement a une faible efficacité énergétique. Ainsi, une amélioration de l'efficacité énergétique peut paradoxalement conduire à une augmentation de la consommation d'énergie (« effet rebond ») si une partie des

² Cf. Allcott et Greenstone (2012) ou Gillingham et Palmer (2014) pour des synthèses de cette littérature.

³ La plupart de ces problèmes ne se rencontrent pas dans le bâtiment neuf.

économies d'énergie est réinvestie dans de nouveaux usages énergétiques ou dans l'augmentation des usages déjà présents. Par ailleurs, les estimations de performance énergétique effective peuvent être biaisées (Blasnik, 2010), ce qui conduit également à une surestimation des gains escomptés. Les écarts entre performance énergétique théorique et réelle peuvent dépasser à l'échelle d'un logement plus de la moitié de la consommation énergétique liée au chauffage (Cayla et al., 2010), d'où l'intérêt des évaluations *ex-post* (Suerkemper, 2012)⁴.

Les différences entre les préférences individuelles, notamment une certaine préférence pour le court terme, et les paramètres de l'analyse socio-économique, dont l'horizon dépasse la durée d'occupation d'un logement, peuvent être élevées et contribuer à réduire le stock d'investissements spontanément réalisés par rapport aux gisements socio-économiquement rentables.

- Les ménages ont un taux d'actualisation élevé, reflétant une forme de myopie et la valorisation de gains sur une durée plus courte, ce qui réduit mécaniquement la rentabilité des investissements. Newell et Siikamaki (2015) estiment des taux d'actualisation à partir de données américaines et montrent que les ménages avec un taux d'actualisation plus faible investissent davantage dans l'efficacité énergétique.
- Une aversion au risque élevée peut également contribuer au sous-investissement par rapport aux gisements socio-économiquement rentables. En effet, l'investissement dans la rénovation énergétique présente plusieurs risques, avec notamment des incertitudes sur le coût des énergies et l'efficacité des technologies adoptées et donc *in fine* sur les gains à attendre de l'investissement. Les ménages les plus averses au risque investissent ainsi moins dans l'efficacité énergétique, par exemple dans l'isolation (Farsi, 2010) ou dans la ventilation et l'éclairage (Qiu et al., 2014).
- À l'inverse, les ménages peuvent avoir des préférences environnementales qui les poussent à investir dans les technologies réduisant la consommation, même si ces technologies présentent une rentabilité faible. Cependant, Diaz-Rainey et Ashton (2015) montrent que les motivations environnementales sont moins souvent citées que les incitations monétaires comme justification des travaux. De même, la revue de littérature de Schleich et al. (2016) indique que les motifs environnementaux n'ont un effet que sur les dépenses d'un faible montant (du type changement d'ampoule).

Les comportements irrationnels ou les biais cognitifs ont également un effet négatif sur l'investissement dans la rénovation thermique, et peuvent expliquer que des investissements rentables ne soient pas réalisés.

- La rationalité limitée des agents, i.e. le fait qu'ils n'aient pas la capacité (ou pas l'intérêt) d'explorer toutes les possibilités (la recherche d'information étant coûteuse), pourrait réduire l'investissement dans la rénovation si les bons investissements demandent plus d'informations, ce qui empiriquement semble confirmé (Gilligham et Palmer, 2014).
- Le biais en faveur du *statu quo* peut expliquer que certains travaux ne soient pas entrepris (Brown et al., 2013).
- Une forte préférence pour le présent⁵ peut biaiser les investissements, notamment parce que les investissements dans l'efficacité énergétique ont un temps de retour

⁴ La question de la mesure de la performance énergétique réelle des bâtiments sera amenée à prendre de l'importance au fur et à mesure que la conception des bâtiments vise la basse consommation.

⁵ La préférence pour le présent est à distinguer des questions de taux d'actualisation. En effet, le présent est alors surévalué par rapport au futur à un niveau qui n'est pas compatible avec un taux d'actualisation. On peut alors le modéliser avec des préférences hyperboliques (Laibson, 1997).

assez long. Cohen *et al.* (2015) montrent l'existence d'un tel effet pour les réfrigérateurs.

- La distorsion des probabilités (surestimation des faibles probabilités et sous-estimation des fortes probabilités, *cf.* Kahneman et Tversky, 1979) pourrait limiter l'adoption de nouvelles technologies plus efficaces, comme dans d'autres domaines⁶, mais à notre connaissance, aucune étude n'a pour l'instant testé cela.

Il peut également exister des coûts cachés comme le fait que les travaux peuvent prendre du temps et empêcher certains usages, ce qui représente un coût d'opportunité qui vient augmenter le coût total de l'investissement (*cf.* Allibe, 2012) et dégrader la rentabilité à la fois privée et socio-économique.

Enfin, les défaillances de marché sont nombreuses dans le domaine de la rénovation, et constituent des freins potentiellement très importants à l'investissement, même dans le cas d'investissements rentables d'un point de vue privé.

- Les économies d'énergie sont insuffisamment valorisées dès lors que le prix de l'énergie ne reflète qu'imparfaitement ses coûts complets incluant de multiples externalités (émission de GES, sécurité d'approvisionnement énergétique).
- Il existe un manque d'information et une asymétrie d'information sur les coûts et les gains à attendre de la rénovation thermique. Les ménages peuvent ne pas connaître les gains et les coûts de l'investissement dans des technologies efficaces. Par ailleurs, une fois les travaux effectués, ils peuvent n'observer qu'imparfaitement le résultat des travaux, ce qui peut entraîner une forme d'aléas moral avec les entreprises de rénovation. Palmer *et al.* (2012) ou Allcott et Taubinsky (2015) montrent qu'une meilleure information augmente l'investissement dans des technologies efficaces. De même pour Giraudet (2015), un système de garantie de performance permet de réduire l'asymétrie d'information.
- Les incitations sont, dans le cas de la relation locataire-bailleur, mal orientées. Les propriétaires n'ont pas d'incitations à investir dans la rénovation, puisqu'en cas d'imperfection sur le marché immobilier (location et achat), ils peuvent ne pas bénéficier directement des gains d'énergie. Par ailleurs, ces investissements ont des durées de retour en général plus élevées que la durée de location d'un logement, et ces travaux ne peuvent se faire sans l'accord du propriétaire, ce qui n'incite pas les locataires à les entreprendre. Plusieurs études ont montré que le fait d'être propriétaire occupant du logement habité augmentait la probabilité de réaliser des travaux d'efficacité énergétique (ainsi que le montant de ces travaux) pour presque tous les usages⁷. Par ailleurs, en analysant la vitesse de diffusion des technologies, Diaz-Rainey et Ashton (2015) montrent que les ménages propriétaires sont plus souvent des « *innovators* » ou « *early adopter* », c'est-à-dire des ménages qui adoptent les premiers ces technologies. En France, les propriétaires-occupants représentaient 57,6 % des résidences principales en 2013⁸. Le problème locataire-bailleur concerne donc potentiellement une part importante du gisement d'économie.
- La complexité des droits de co-propriété, et notamment la division du pouvoir de décision, peut également freiner l'investissement dans les travaux de rénovation.
- L'investissement dans les économies d'énergie n'est rentable que sur un temps assez long, et de manière incertaine, pour un coût fixe initial important. Il en résulte des

⁶ Liu (2013) montre sur des données chinoises que les fermiers qui distordent les petites probabilités adoptent moins fréquemment de nouvelles méthodes d'agriculture.

⁷ De l'utilisation d'ampoule économique aux travaux d'isolation les plus lourds. (*cf.* Ameli et Brand, 2015 ; Krishnamurthy et Kriström, 2015, Gillingham *et al.* 2012).

⁸ Source : Insee et SOeS.

contraintes d'accès au crédit nécessaire à la réalisation de ces travaux, qui peuvent rendre difficile le financement des travaux pour les ménages les plus modestes.

Au final, l'écart entre le stock d'investissement souhaitable d'un point de vue socio-économique et l'investissement effectivement réalisé provient de causes potentiellement très diverses qui appellent une réponse différenciée de la part du décideur publique. Tout d'abord, il existe un écart entre le stock de gisements rentables d'un point de vue socio-économique et d'un point de vue privé. Le déclenchement d'un investissement rentable d'un point de vue socio-économique mais pas du point de vue du ménage peut en théorie être favorisé via une subvention publique calibrée de manière à rendre le projet tout juste rentable pour le ménage. Ensuite, il existe des projets qui sont rentables pour les ménages mais qui ne sont pas réalisés. S'il s'agit de la conséquence d'une asymétrie ou d'un manque d'information, le problème peut être réduit par des campagnes d'information ou des mécanismes de certification. S'il s'agit d'un comportement irrationnel, des outils de type normes (pour les mesures systématiquement rentables et peu coûteuses) ou *nudge*⁹ (en jouant notamment sur la comparaison sociale) peuvent être adoptés. Les externalités liées notamment à l'émission de GES peuvent être internalisées en donnant un prix au carbone, via une taxe ou un marché des quotas. Enfin, des mécanismes de subvention peuvent être étudiés pour lever certaines contraintes d'accès au crédit.

Les études mentionnées *supra*, qui essaient d'identifier et de quantifier les barrières à l'investissement dans la rénovation thermique, portent essentiellement sur des données américaines et évaluent les obstacles de manière séparée, utilisant diverses approches, sans en proposer une analyse complète. Au niveau français, l'UFE a estimé les gisements rentables techniquement accessibles¹⁰, mais elle n'évalue pas le stock de gisements disponibles ni ne chiffre l'impact des différentes défaillances identifiées. Par ailleurs, à notre connaissance, aucune étude ne fournit une analyse distinguant la rentabilité privée de la rentabilité socio-économique des opérations de rénovation, distinction pourtant indispensable pour la juste conception des politiques publiques.

Dans ce contexte, l'objectif de ce document de travail est triple. D'une part, nous développons une méthodologie permettant d'estimer le niveau des gisements d'économies d'énergie dans le secteur résidentiel français en fonction de leur rentabilité à la fois privée et socio-économique. D'autre part, nous proposons une estimation de l'impact des principales défaillances de marché identifiées et de l'irrationalité des ménages sur la décision d'investir. Enfin, nous utilisons ces différentes estimations pour proposer des recommandations d'intervention publique destinées à lever efficacement les freins à l'investissement identifiés.

Notre étude se concentre sur le parc des résidences principales en France métropolitaine, qui représentent 82 % du parc total. Par ailleurs, nous ne prenons en compte que les logements construits avant 1990 (soit 75 % du parc) qui sont les logements essentiellement concernés par la rénovation, les normes de performance énergétique étant beaucoup plus exigeantes pour la construction des logements plus récents. En outre, faute de données suffisantes, les rénovations liées au chauffage collectif dans les immeubles sont exclues de notre étude.

Le reste du papier est organisé de la façon suivante : la partie 2 présente la modélisation retenue pour évaluer la rentabilité socio-économique et privée en présence de défaillances de marché et d'irrationalité des ménages. La partie 3 présente les données utilisées et leur traitement. La partie 4 présente l'estimation des gisements selon leur rentabilité privée et socio-économique. La partie 5 évalue l'impact des défaillances de marchés et de l'irrationalité des ménages sur la rentabilité des gisements. La partie 6 réalise une analyse des gisements

⁹ *Nudge* désigne les mécanismes orientant le choix des individus dans une direction donnée. Allcott et Mullainathan (2010) cite par exemple l'envoi de lettre comportant la consommation des ménages et la consommation moyenne dans le quartier, ainsi que des conseils pour réduire la consommation.

¹⁰ Pour certains travaux, l'UFE n'examine pas l'ensemble du stock, mais prend en compte les capacités des entreprises du secteur.

par type d'action. La partie 7 discute ces résultats. La partie 8 développe les implications en termes de politiques publiques et la partie 9 conclut.

2. Modélisation de la rentabilité privée et socio-économique des investissements en présence de défaillances de marché et de comportements irrationnels

2.1 Rentabilité privée

Nous reprenons et adaptons la modélisation proposée par Allcott et Greenstone (2012), qui permet de séparer la rentabilité privée et la rentabilité socio-économique des actions de rénovation en présence de défaillances de marché et de comportements irrationnels. La décision d'investir pour un ménage i aura lieu si l'investissement est rentable d'un point de vue privé, i.e. si l'espérance du gain sur la facture énergétique réalisé grâce aux travaux (c'est-à-dire la somme des gains futurs actualisés en déduisant les coûts cachés estimés) est supérieure au coût des travaux, y compris le coût du crédit contracté pour les réaliser. Cela peut s'écrire sous la forme :

$$E_i \left(\sum_{t=0}^{\theta} \frac{\gamma_i p_t m_{it} (e_{i0} - e_{i1})}{(1 + \beta_i)^t} - \tau \right) > c + \sum_{t=0}^{\mu} \frac{D_{it} r_{it}}{(1 + \beta_i)^t} \quad (1)$$

Avec le p_t le prix des énergies à la date t , m_{it} une fonction reprenant les préférences du ménage i et les actions associées à ces préférences, e_{i0} et e_{i1} la consommation énergétique de deux types de biens (le second étant plus efficient : $e_{i0} > e_{i1}$), β_i le taux d'actualisation privé, τ les coûts cachés (recherche d'information, coût d'opportunité des travaux qui empêchent l'utilisation du logement, ou à l'inverse, gains non chiffrés¹¹), c le coût observable du projet¹² hors frais financiers, D_{it} la dette contractée restante (i.e. la dette initiale moins l'ensemble des remboursements déjà effectué) pour financer la rénovation (en supposant que le ménage a accès au crédit) et r_{it} le taux d'intérêt payé sur cette dette à chaque période, θ la durée de vie du bien et μ la durée d'emprunt. Cette modélisation permet de prendre en compte les préférences individuelles (le taux d'actualisation pouvant varier entre les individus) et le coût du crédit (le taux d'intérêt est potentiellement différent entre les individus¹³). Pour tenir compte des problèmes de comportements irrationnels, on pose $\gamma_i \leq 1$. Il existe une incertitude sur le prix de l'énergie, du fait de l'existence de chocs :

$$p_t = p'_t + u$$

Où p' est la tendance de long terme et u une variable d'espérance nulle. De même, on suppose que les individus ont une information imparfaite concernant les consommations énergétiques et donc les gains à attendre de la rénovation.

$$e_{i0} = e'_0 + \varepsilon_i$$

Où e'_0 est la consommation énergétique réelle, et ε_i une variable d'espérance nulle (pas d'hypothèse sur le sens du biais).

Cette modélisation permet de tenir compte de l'irrationalité des ménages ainsi que de certaines défaillances de marché (information, contraintes de crédit), du fait desquelles les ménages risquent alors ne pas effectuer certains investissements rentables. On peut noter que le problème bailleurs/locataires peut se modéliser dans ce cadre : les bailleurs ne supportent que

¹¹ Par exemple la réduction du bruit dans le cas de l'isolation.

¹² On suppose que les coûts visibles et les coûts cachés sont payés en une fois.

¹³ La situation où le ménage n'a pas accès au crédit correspond à r égal à l'infini.

les coûts, alors que les locataires n'ont pas forcément le temps de rentabiliser les travaux (θ sera alors faible). Par ailleurs, du fait des problèmes d'information, ces travaux peuvent ne se refléter qu'imparfaitement dans le prix du logement (incertitude sur la valeur des e_i), tant à la vente qu'à la location, ce qui réduit l'incitation à investir.

2.2 Rentabilité socio-économique

Du point de vue social, il est nécessaire de tenir compte de l'externalité environnementale δ . L'investissement devient alors rentable du point de vue socio-économique si :

$$\sum_{t=0}^{\theta} \frac{(\delta + E(p_t))m_{it}(e'_0 - e'_1)}{(1 + \beta_s)^t} - \tau > c + \sum_{t=0}^{\mu} \frac{D_{it}r_t}{(1 + \beta_s)^t} \quad (2)$$

Au niveau socio-économique, on suppose que le problème d'accès au crédit est résolu et que le taux d'actualisation est le taux d'actualisation socio-économique. Par ailleurs, au niveau social, on suppose qu'il n'y a pas de problème d'information sur le gain à la rénovation. En revanche, il existe toujours une incertitude sur le niveau des prix.

2.3 Calibration des paramètres

On supposera dans cette étude que la fonction m_i est linéaire et égale à 1. Autrement dit, on considère à ce stade que la baisse de la consommation du fait de la rénovation énergétique n'entraîne pas une hausse de la consommation pour des usages déjà existants ou de nouveaux usages (effet rebond).

Le taux d'actualisation socio-économique est égal à 2,5 % conformément aux préconisations du rapport Quinet (2013)¹⁴.

Le taux d'actualisation privé est égal à 4 ou 10 %, ce qui correspond respectivement au taux d'actualisation des certificats d'économie d'énergie et au taux retenu par l'UFE¹⁵. Ce taux plus élevé des ménages renvoie à une forme de myopie et aux désirs des ménages exigeant un retour sur l'investissement plus rapide que celui de l'analyse socio-économique.

L'actualisation commence à partir de 2016 (on suppose que tous les travaux sont effectués à cette date).

On examine l'effet de différents prix du carbone en 2030 :

- Un prix du carbone de 0€/tCO₂, en l'absence de taxe carbone.
- Un prix du carbone de 100 €/tCO₂, ce qui correspond à la valeur du prix du carbone en 2030 inscrite dans la LTECV, et également la valeur préconisée par le rapport Quinet 2008¹⁶.

¹⁴ Quinet E., 2013, *Évaluation socioéconomique des investissements publics*, rapport du Commissariat général à la stratégie et à la prospective. Le taux socio-économique est composé d'un taux sans risque de 2,5 % et d'une prime de risque (égale à 2 % en moyenne sur l'ensemble des investissements de l'économie) qui dépend de la corrélation entre les gains spécifiques au projet et l'activité macroéconomique (valorisation des investissements qui ont un effet stabilisateur). Dans le cas de la rénovation, le rapport suggère l'utilisation d'une prime de risque nulle : les gains sont plus élevés quand les prix de l'énergie sont élevés (ce qui a généralement un effet récessif sur l'activité). De fait, en France, les prix de l'énergie et la croissance du PIB sont anti-corrélés. Le taux d'actualisation socio-économique est donc de 2,5 %.

¹⁵ UFE, 2013, *L'ordre de priorité des actions d'efficacité énergétique*.

¹⁶ Quinet A. (2008), *La valeur tutélaire du carbone*, rapport du Centre d'analyse stratégique, Paris, La Documentation française. Cependant, dans le rapport Quinet, le 100 € en 2030 est exprimé en euro de 2008, alors que, dans la LTECV, il est exprimé en euro de 2030.

- Un prix du carbone supérieur, choisi à titre indicatif égal à 400 €/tCO₂. Outre le prix du carbone, la LTECV prévoit en effet la mise en place d'un certain nombre d'outils pour l'atteinte de l'objectif de réduction de GES de 40 % en 2030 (achat de véhicule à faible émission par l'État, norme pour les bâtiments, prime pour les énergies renouvelables). Si le prix du carbone était le seul outil mis en place¹⁷, une valeur de 100 €/tCO₂ en 2030 serait insuffisante. Nous prenons pour ce cas une valeur de 400 €/tCO₂, qui est suffisante seule pour atteindre l'objectif de baisse des émissions selon l'analyse d'ENERDATA (2014)¹⁸.

L'équation (1) renvoie donc à un taux d'actualisation de 4 ou 10 %, sans prix du carbone (les ménages ne prenant pas en compte l'externalité), alors que l'équation (2) renvoie à un taux d'actualisation de 2,5 % avec un prix du carbone de 100 ou 400 €/t, suivant la tarification prix donné à l'externalité environnementale. On suppose que le prix du carbone est égal au coût de l'externalité carbone dans l'analyse socio-économique. Autrement dit, le prix du carbone suffit à internaliser l'externalité liée aux émissions.

Le calcul de base de la rentabilité privée se fait en supposant $\gamma_i = 1$ et $\tau = 0$.

Pour chacun de ces cas et de ces prix du carbone, on proposera plusieurs tests de robustesse, en faisant varier les prix de l'énergie, les coûts cachés, le niveau d'irrationalité du comportement. On examinera également le stock de gisement présent chez les locataires et chez des ménages ayant un revenu faible, pour tenir compte d'une éventuelle contrainte de crédit.

3. Les données

3.1 L'enquête Phébus

Nous exploitons les données de l'enquête Phébus (Performance de l'Habitat, Équipements, Besoins et Usages de l'énergie), réalisée en 2013 par le Commissariat général au développement durable (CGDD) sur des logements principaux et qui comporte 2 volets :

- le volet Clode, qui regroupe des questions concernant en particulier les caractéristiques du ménage, du logement, les modes de chauffage, mais aussi les travaux réalisés (échantillon de 5405 logements) ;
- le volet DPE : tous ces logements se sont ensuite vus proposer un Diagnostic de Performance Énergétique (DPE) gratuit, ce qui implique un autre rendez-vous. Du fait de l'attrition¹⁹, seuls 2389 logements sont pris en compte. Le volet Clode et le volet DPE utilisent donc des pondérations différentes pour rendre la base représentative de l'ensemble des résidences principales de France. Comme nous repartons de la base DPE, nous utilisons les poids de cette base.

Nous nous concentrons ici sur les usages « chauffage » et « eau-chaude sanitaire », la plupart des recommandations portant sur ces deux domaines. Les usages spécifiques de cuisson, d'électricité et de climatisation ne sont donc pas pris en compte.

Lors de la réalisation d'un DPE, le diagnostiqueur entre dans un des logiciels (validés par le Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer) les caractéristiques du logement

¹⁷ Ce scénario considère que toutes les mesures d'efficacité énergétique supplémentaires par rapport à un scénario « Étalon » sont capturées par une taxe carbone après 2020.

¹⁸ ENERDATA obtient environ 400 €/t en 2030 pour le secteur hors *European Trading Scheme* (plus précisément 411€/t pour le secteur hors *European Trading Scheme* et 400€/t pour le secteur *European Trading Scheme*). Le bâtiment étant pour l'essentiel hors ETS, nous retiendrons cette valeur. Cette étude a été effectuée pour le compte de la Direction Générale du Climat et de l'Énergie et la DG Trésor.

¹⁹ Au-delà des problèmes classiques d'attrition (personne absente lors du second rendez-vous, ou ayant déménagé), certains ménages ont refusé le DPE.

(surfaces des parois, type d'isolation, orientation des baies, énergie de chauffage, ...). Le logiciel évalue alors des valeurs théoriques de consommation énergétique selon la source utilisée (on parle de « méthode conventionnelle²⁰ »), afin de déterminer la consommation d'énergie primaire par mètre carré (et les émissions de CO₂ associées via un taux moyen pour chaque usage) ; ces informations doivent par exemple être fournies pour la mise en vente ou location du logement conformément à la réglementation.

Le DPE ne tient cependant pas compte des usages spécifiques à chaque ménage, ce qui réduit sa fiabilité. En particulier, pour un même logement, la prévision sera ainsi identique quel que soit le nombre d'habitants. Ainsi Allibe (2012) a montré qu'il pouvait exister des écarts importants entre la prévision des DPE et la consommation effective. Ces écarts dépendent notamment de la performance thermique des logements, du climat et du prix de l'énergie et ne sont pas toujours dans la même direction (le DPE surestime la consommation des logements les plus mal classés d'un point de vue énergétique et sous-estime la consommation des mieux classés). Dans notre cas, la consommation de chauffage issue des DPE impliquerait une consommation de chauffage pour l'ensemble de la France supérieure de 27 % à la consommation calculée par le CGDD. Nous appliquons donc un facteur correctif pour que le total issu de la base DPE soit égal aux chiffres du CGDD.

Le DPE donne également lieu à la proposition d'un certain nombre d'opérations de rénovation thermique pour le logement (mais sans réel chiffrage des économies attendues). Les propositions sont très concentrées sur quelques travaux (programmation, isolation, remplacement de chaudière, cf. *infra*). Nous utilisons ces propositions pour pouvoir évaluer le potentiel de rénovation thermique dans le secteur résidentiel en France restreint aux logements antérieurs à 1990 (qui sont les logements les plus consommateurs en énergie).

3.2 Prix de l'énergie

Pour les données sur les prix des énergies, nous nous appuyons, dans le scénario de base, sur le *New Policy Scenario* (NPS) de l'Agence Internationale de l'énergie (AIE), pour le gaz, le pétrole et la biomasse²¹, et sur une maquette de la DG Trésor simulant le fonctionnement du parc électrique français pour le prix de l'électricité²². Les prix des énergies varient en fonction de la taxe carbone retenue. D'autres scénarios de l'AIE sont utilisés lors des tests de robustesse.

3.3 Coûts et gains associés aux principaux travaux

Nous utilisons les données d'une étude du cabinet Ylios (2016), qui contient notamment les valeurs de coûts des opérations ainsi que le pourcentage d'énergie de chauffage économisé grâce à leur installation, que nous complétons dans certains cas avec les fiches des certificats d'économies d'énergie de l'Agence Nationale de l'Habitat. Le calcul des coûts des mesures de rénovation est réalisé en utilisant les coûts moyens des différentes opérations par logement. Nous avons choisi d'évaluer ces gisements dans une perspective de consommation d'énergie finale, en cohérence avec la LTECV qui fixe des objectifs de consommation d'énergie finale.

Le calcul des économies sur le chauffage se fait en appliquant les pourcentages de l'étude Ylios (qui sont proches des valeurs de l'ANAH²³ utilisées par l'UFE dans son étude²⁴) aux valeurs de consommations annuelles de chauffage calculées lors du DPE. Par exemple, comme les combles représentent 30 % des pertes thermiques environ, si le logement considéré consomme 10 MWh par an pour son chauffage (valeur calculée par la méthode du

²⁰ Pour le détail des calculs, cf. Annexe – Méthode 3CL-DPE : http://www.rt-batiment.fr/fileadmin/documents/RT_existant/DPE/DPE_outils/Annexe_methode_de_calcul_3CL-DPE_V1.3.pdf

²¹ Cf. partie 5.a. pour le prix de l'énergie dans différents scénarios aux différentes échelles de temps.

²² Ce modèle calcule le prix de l'électricité en fonction de l'évolution du mix électrique et du prix des différentes énergies.

²³ « Les travaux de rénovation thermique les plus efficaces » (2010).

²⁴ « L'ordre de priorité des actions d'efficacité énergétique » (2013).

DPE conventionnel), on considèrera que l'économie permise par l'isolation des combles est de 3 MWh par an.

L'interaction entre les mesures est prise en compte. En effet, le pourcentage pour une opération supplémentaire s'applique sur la nouvelle consommation obtenue après réalisation des premières améliorations. On considère de plus que l'ordre de réalisation des opérations est déterminé par leur rentabilité (on réalise en premier lieu les opérations les plus rentables). L'algorithme que nous utilisons détermine cet ordre individuellement pour chaque logement de l'échantillon.

3.4 Calcul de la VAN

Une valeur actualisée nette (VAN) est calculée pour chaque ménage et pour chaque action de rénovation en utilisant les équations (1) et (2), en utilisant les données sur le coût, le gain à attendre en fonction du prix de l'énergie, et le taux d'actualisation choisi. Pour la calculer, on mobilise les taux d'actualisation présentés dans la partie précédente. Les coûts sont ceux de l'enquête Ylios, et les gains reposent sur la baisse de la consommation de l'énergie, multipliée par le prix de l'énergie concernée chaque année. L'année des travaux est 2016. Dans le cas de l'analyse socio-économique, on suppose que le prix du carbone est égal au coût de l'externalité d'émission.

Pour chaque logement, les actions de rénovation sont effectuées par VAN décroissante. La prévision de la consommation de chauffage est mise à jour à chaque étape, pour tenir compte des effets d'interaction. Cette méthode ne permet pas de tenir compte de l'ensemble des interactions entre les différents travaux. Par exemple, les éventuels effets de complémentarité entre les travaux, qui peuvent justifier la mise en place de bouquet de travaux, ne sont ici pas pris en compte. Par ailleurs, on considère uniquement les travaux dans un logement (que l'on soit dans une maison individuelle ou un logement collectif). Les rénovations de l'ensemble d'une copropriété sont donc laissées de côté.

3.5 Différences méthodologiques par rapport à UFE (2013)

Comme mentionné en introduction, ce travail s'inscrit dans la continuité de l'étude de l'UFE sur l'ordre de priorité des actions d'efficacité énergétique. Les principales différences méthodologiques sont les suivantes :

- L'UFE a évalué le volume des gisements d'économies techniquement réalisables entre 2013 et 2020, en utilisant les flux naturel de logements rénovés par an pour chaque opération, et non les volumes totaux de rénovations possibles en France.
- L'UFE a choisi, pour les mesures de rénovation, d'utiliser des coûts du type de chauffage des logements, en attribuant un unique type de chauffage à chaque logement. Nous avons choisi d'utiliser des valeurs de coûts uniques pour chaque opération. En effet, de nombreux logements présentent plusieurs types de chauffage simultanément (en outre, les coûts de l'étude Ylios sont trop spécifiques par rapport au degré de précision sur le chauffage dans les DPE de l'étude Phébus).
- Dans notre analyse, nous avons choisi de ne pas prendre en compte les opérations de rénovation proposées dans les DPE réalisés pour les immeubles entiers (notamment pour le chauffage collectif), afin d'éviter de comptabiliser celles-ci deux fois et parce que les travaux dans les copropriétés sont plus complexes. Cela conduit à une sous-estimation du gisement.
- Nous avons évalué les rentabilités des projets en 2016 (pour les trajectoires de prix utilisées) et non en 2012.
- L'UFE prend en compte les pompes à chaleur qui ne sont presque jamais proposées dans les DPE, mais ne tient pas compte d'autres types de travaux (programmateur, robinet thermostatique).

4. Estimation des gisements d'économie par rentabilité

4.1 Comparaison des travaux de rénovation en termes de coûts, durées de vie et économies d'énergie associées

Les travaux de rénovation présentent des coûts, des durées de vie²⁵ et des baisses de consommation très différents. À titre d'exemple, on peut comparer les différents travaux en calculant un coût du MWh cumac²⁶ économisé en moyenne sur l'échantillon (cf. Tableau 1).

Tableau 1 : coût des améliorations pour une consommation de chauffage annuelle de 12 MWh

Amélioration	Coût (en €/MWh cumac évité)	% d'économie
Isolation plancher LC ²⁷	15,1	10
Isolation combles ou toitures LC	16,7	9
Robinets thermostatiques	22,1	5
Chaudière (gaz à condensation) LC	40,5	25
VMC ²⁸ Hygro	41,3	15
Chaudière (fioul à condensation) LC	47,0	21
Programmateur MI	51,2	5
Thermostat d'ambiance MI	51,2	5
Isolation murs par l'intérieur LC	59,9	41
Chauffe-eau thermodynamique LC	64,2	43
VMR ²⁹	68,8	6
Isolation porte d'entrée	69,5	2
Isolation combles ou toitures MI ³⁰	74,1	25
Isolation murs par l'extérieur LC	82,3	38
Chaudière (gaz à condensation) MI	87,9	25
ECS ³¹ solaire MI	153,4	70
Programmateur LC	170,8	3
Thermostat d'ambiance LC	170,8	3
ECS solaire LC	174,2	37
Isolation plancher MI	176,9	11
Chaudière (gaz basse température)	197,1	15
Chaudière (fioul basse température)	197,1	15
Chaudière (fioul à condensation) MI	201,3	18
Isolation murs par l'intérieur MI	216,2	18
Isolation murs par l'extérieur MI	292,1	23
Vitrage LC	297,8	9
Chauffe-eau thermodynamique MI	657,0	39
Vitrage MI	946,0	5

Source : Ylios, ANAH, calculs DG Trésor. Taux d'actualisation de 4 %.

²⁵ La durée de vie est spécifique à chaque opération de rénovation. La durée de vie d'un programmeur est par exemple de 12 ans, alors que les isolations ont un effet pendant 30 ans.

²⁶ Cela correspond au total des économies d'énergie réalisées pendant la durée de vie de l'équipement, en actualisant au taux de 4 %, conformément au taux des certificats d'économies d'énergie.

²⁷ Logement collectif.

²⁸ Ventilation mécanique contrôlée.

²⁹ Ventilation mécanique répartie.

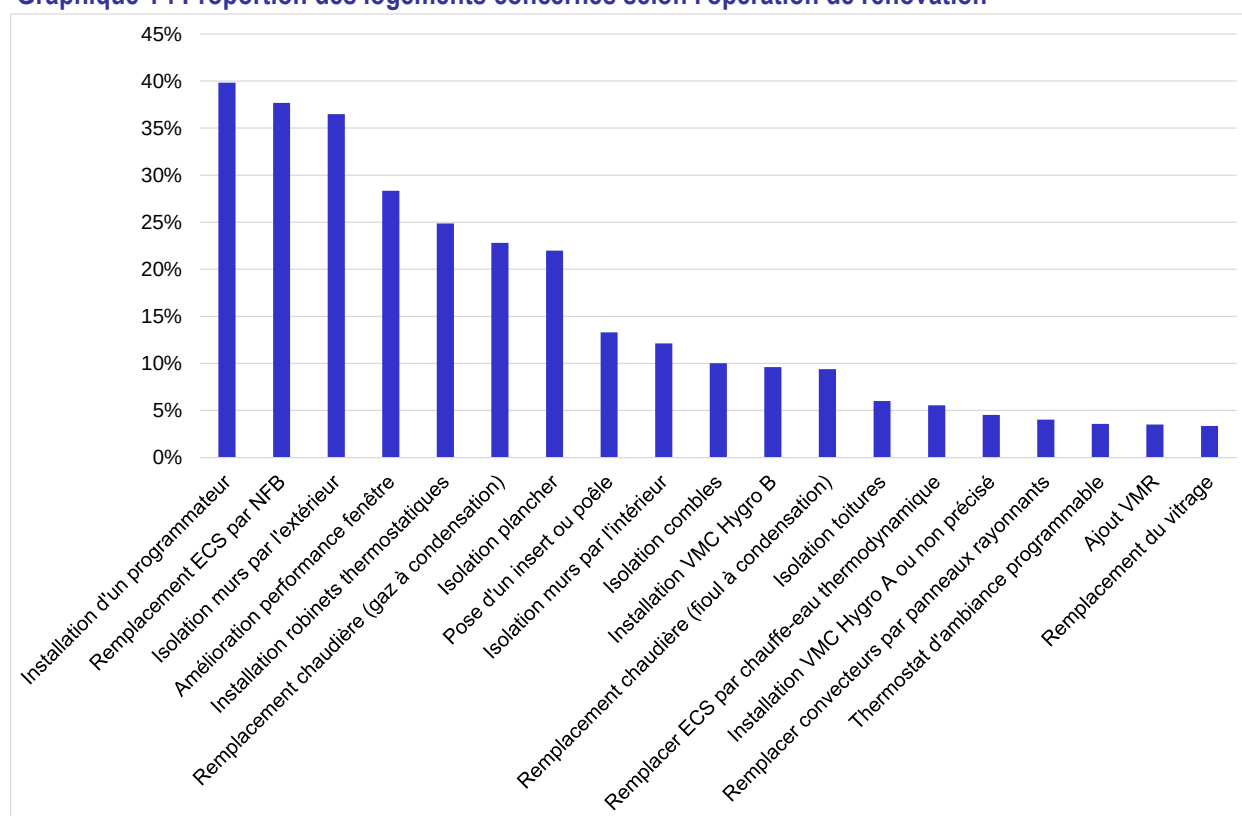
³⁰ Maison individuelle.

³¹ Eau chaude sanitaire.

On constate une très forte hétérogénéité dans le coût du MWh cumac évité, avec un grand nombre d'opérations présentant un coût inférieur à 100 €/MWh cumac (isolation des combles, robinets thermostatiques, isolation du plancher dans les logements collectifs). À l'inverse, plusieurs améliorations présentent des coûts importants (notamment celles-liées au vitrage).

Par ailleurs, les propositions d'amélioration présentes dans l'enquête Phébus sont concentrées sur quelques travaux. Les 10 premières mesures représentent ainsi 75 % des propositions, les 20 premières 90 % des propositions³². En particulier, plus de 35 % des logements de l'enquête se sont vus proposer l'installation d'un programmateur, le remplacement de l'ECS³³ par un ballon d'eau chaude NFB, l'isolation par les murs extérieurs (cf. Graphique 1), et plus de 20 % le remplacement d'une chaudière à gaz par une chaudière à condensation, l'isolation d'un plancher, l'amélioration des fenêtres et l'installation de robinets thermostatiques.

Graphique 1 : Proportion des logements concernés selon l'opération de rénovation



Source : Phébus.

4.2 Calcul des gisements d'économie

Dans cette partie, on se place dans un scénario central où les ménages privés ne sont pas victimes d'irrationalité, de coûts cachés, de problèmes d'accès au crédit ou de problèmes locataire/bailleur. Ces hypothèses seront relevées par la suite.

On distingue 3 cas : les ménages privés court-termistes (taux d'actualisation de 10 %), les ménages privés standards (taux d'actualisation de 4 %) et l'analyse socio-économique (taux d'actualisation de 2,5 %). Le gisement privé rentable dans le cas des ménages court termistes est de 32 TWh (avant prise en compte du prix du carbone). Une taxe carbone de 400 €/t en 2030 fait passer ce niveau à 44 TWh, soit une augmentation de 38 %.

³² CGDD, 2014, Le parc des logements en France métropolitaine, en 2012 : plus de la moitié des résidences principales ont une étiquette énergie D ou E.

³³ Eau chaude sanitaire.

Le gisement rentable du point de vue socio-économique est compris entre 64 TWh et 72 TWh selon le prix du carbone retenu. À titre de comparaison, le gisement total accessible est de 91 TWh.

On constate donc que le prix du carbone permet d'augmenter le niveau du gisement, mais qu'il existe un gisement rentable important même avec un prix du carbone nul.

Tableau 2 : gisement rentable pour différents taux d'actualisation et prix du carbone

Prix carbone	Ménage court termiste (TWh)	Ménage standard (TWh)	Socio-économique (TWh)
0 €/t en 2030	32	51	–
100 €/t en 2030	38	58	64
400 €/t en 2030	44	67	72

Source : Phébus, Ylios, ANAH, calculs DG Trésor.

Cela représente un investissement compris entre 14 et 36 Md€ dans le cas privé sans taxe carbone, et entre 64 et 72 Md€ dans le cas socio-économique suivant le prix du carbone retenu.

L'UFE (2013) estime que le gisement toujours rentable est de 14 TWh, et qu'il existe en plus un gisement rentable « sous condition³⁴ » de 24,5 TWh. Nos estimations sont donc plus élevées que celle de l'UFE, notamment du fait que nous prenons en compte davantage de travaux que l'UFE (cf. 3.e).

4.3 Tests de robustesse

4.3.1 Variation du prix de l'énergie

La rentabilité des travaux et donc l'arbitrage des ménages sont susceptibles d'être influencés par les prix de l'énergie. Pour tester l'impact des prix de l'énergie sur l'investissement dans la rénovation, nous examinons l'impact sur la rentabilité des gisements de prix plus ou moins élevés selon différents scénarios de prix des énergies de l'AIE :

- Le *New Policy Scenario (NPS)* est le scénario central de l'AIE. C'est le scénario que nous retenons dans ce document de travail.
- le *Current Policy Scenario (CPS)*. Il s'agit d'un scénario qui prévoit une hausse plus importante du prix des énergies, du fait d'un effort moindre pour réduire la consommation.
- le *Low Oil Scenario (LOS)*. Ce scénario tient compte de la récente baisse du prix des énergies, et fait l'hypothèse que cette baisse pourrait être durable.

Le prix de l'électricité et de la biomasse est supposé constant dans les différents scénarios.

³⁴ En prenant pour certains travaux un taux d'actualisation de 4 %.

Tableau 3 : prix des combustibles dans différents scénarios (en \$ de 2014).

	2020	2030	2040
Gaz (\$/Mbtu)			
NPS	7,8	11,2	12,4
CPS	8,1	12,5	13,8
LOS	5,9	8,9	11,4
Pétrole (\$/baril)			
NPS	80	113	128
CPS	83	130	150
LOS	55	70	85

Source : AIE (2015).

L'application de ces prix aux modèles déjà présentés se trouve dans les tableaux 4 et 5.

Tableau 4 : gisements rentables avec des prix de l'énergie plus élevés (scénario CPS).

Prix carbone	Ménage court termiste (TWh)	Ménage standard (TWh)	Socio-économique (TWh)
0 €/t en 2030	33	53	–
100 €/t en 2030	39	59	65
400 €/t en 2030	45	67	73

Source : Phébus, Ylios, ANAH, calculs DG Trésor.

Tableau 5 : gisements rentables avec des prix de l'énergie plus faibles (scénario LOS).

Prix carbone	Ménage court termiste (TWh)	Ménage standard (TWh)	Socio-économique (TWh)
0 €/t en 2030	31	49	–
100 €/t en 2030	36	56	62
400 €/t en 2030	43	66	71

Source : Phébus, Ylios, ANAH, calculs DG Trésor.

Le niveau des différents gisements est dans l'ensemble peu sensible à une variation de prix des énergies.

4.3.2 Variation des coûts cachés

Dans cette partie, nous examinons l'impact des coûts cachés (incluant les coûts d'opportunité) sur le gisement de rénovation énergétique. Il peut s'agir par exemple du coût qui pèse sur un propriétaire qui ne peut pas louer un appartement pendant la durée des travaux. Ces coûts cachés sont potentiellement importants. Andersen et Newell (2004) ont ainsi analysé des audits énergétiques gratuits pour des entreprises, et montré que 50 % des travaux présentant des rendements forts à court terme n'ont pas été menés. Dans plus de 90 % des cas, les travaux n'ont pas été réalisés pour des raisons économiques, du fait notamment de coûts d'opportunité forts. Gillingham et Palmer (2014) notent cependant qu'il existe peu de preuves empiriques globales de ces coûts : il est difficile de mesurer ces coûts cachés, qui sont, par ailleurs, potentiellement variables pour chaque type de travaux.

On compare ici trois niveaux de coût caché, qui augmentent les coûts de l'ensemble des travaux étudiés de 10, 25 et 50 %. Le taux de 50 % peut sembler plausible si on prend l'exemple d'un propriétaire ne pouvant louer son bien pendant la durée des travaux (par exemple pendant 1 mois).

Ces coûts cachés font varier fortement le niveau de rentabilité (cf. Tableau 6). Pour les ménages court-termistes, en l'absence de prix du carbone, le gisement est réduit de 21 TWh (soit une baisse de 35 %) en cas de coût caché équivalent à 50 % du coût total.

Tableau 6 : gisement en fonction du niveau de coûts cachés

	Ménage court termiste (TWh)	Ménage standard (TWh)	Socio-économique (TWh)
10 % de coûts cachés			
0 €/t en 2030	30	48	–
100 €/t en 2030	34	55	60
400 €/t en 2030	41	64	70
25 % de coûts cachés			
0 €/t en 2030	26	43	–
100 €/t en 2030	30	49	57
400 €/t en 2030	38	60	66
50 % de coûts cachés			
0 €/t en 2030	21	37	–
100 €/t en 2030	26	43	50
400 €/t en 2030	31	54	60

Source : Phébus, Ylios, ANAH, calculs DG Trésor.

Les estimations sont donc beaucoup plus sensibles à la présence de coûts cachés. Cependant, même avec des coûts cachés élevés, un part du gisement reste rentable (environ 10 TWh quand le coût caché est égal à 150 %).

5. Impact de l'irrationalité, des défaillances de marché et de l'écart de préférence avec les préférences socio-économiques sur le stock de gisements rentables

5.1 Variation du taux d'irrationalité

Dans le scénario de base, γ est supposé égal à 1. Choisir une valeur différente de 1 permet de prendre en compte l'irrationalité des agents comme dans la modélisation proposée plus haut. Dans leur revue de la littérature, Allcott et Greenstone (2012) concluent que si $\gamma < 1$, il l'est faiblement. Nous choisissons donc d'évaluer l'impact de l'irrationalité des agents sur le gisement pour deux valeurs de γ (respectivement $\gamma=90\%$ et 75%). Ce dernier cas correspond à l'agent le moins rationnel qui ne perçoit que 75 % des gains énergétiques à attendre des travaux de rénovation. La réduction des gains entraîne une forte baisse du gisement privé, qui n'est pas proportionnelle. Ainsi, si les ménages court-termistes ne prennent en compte que 75 % des gains, alors le gisement se réduit à 19 TWh (dans le cas où il n'y a pas de prix du carbone) soit une baisse de 40 %.

Le gisement rentable est donc particulièrement sensible à cette hypothèse sur l'irrationalité.

Tableau 7 : gisement en fonction du niveau d'irrationalité

	Ménage court termiste		Ménage standard	
	TWh	% du gisement initial	TWh	% du gisement initial
90 % des gains				
0 €/t en 2030	27	84%	44	85%
100 €/t en 2030	31	83%	50	87%
400 €/t en 2030	38	84%	58	88%
75 % des gains				
0 €/t en 2030	19	58%	32	62%
100 €/t en 2030	22	59%	37	64%
400 €/t en 2030	27	62%	45	68%

Source : Phébus, Ylios, ANAH, calculs DG Trésor.

5.2 Gisement chez les locataires

Les incitations pour les locataires et les propriétaires bailleurs ne sont pas alignées. Les propriétaires bailleurs n'ont pas d'intérêt direct à entreprendre les travaux (si les gains liés aux travaux de rénovation ne se reflètent qu'imparfaitement dans le prix), puisqu'ils ne bénéficient pas de la baisse de consommation³⁵, et les locataires peuvent ne pas rester assez longtemps pour amortir l'investissement.

Le gisement total présent chez des non-propriétaires (i.e. des logés gratuits, des personnes en usufruit ou des locataires³⁶) représente 12 TWh dans le cas des ménages court-termistes sans taxe carbone, et 29 TWh si on considère l'analyse socio-économique avec une taxe carbone de 400 €/tCO₂ (cf. Tableau 8).

La part du gisement dans les logements dont l'occupant n'est pas le propriétaire est proche de leur part dans la population en général (environ 40 %). De fait, même si les locataires habitent plus souvent dans des logements très énergivores³⁷ et représentent 60 % des ménages habitant un logement de type G dans notre échantillon, d'après les données DPE, la consommation théorique des ménages propriétaires d'un logement G est plus importante (+40 % environ en moyenne). Il est donc nécessaire de distinguer deux types de difficultés :

- Les non-propriétaires représentent une part importante du gisement (de l'ordre de 40 %), ce qui suggère que le problème d'incitation pourrait être un frein important.
- Certains ménages propriétaires vivent dans des logements ayant une très forte consommation théorique, même pour des logements de classe G. Il s'agit cependant d'un calcul théorique, basé sur les caractéristiques des logements et il est possible que les propriétaires adaptent leur comportement.

³⁵ Cet effet peut être réduit si une partie des travaux se reflètent dans les prix de l'immobilier, tant à la vente qu'à la location.

³⁶ Ces données sont obtenues à partir de la base Clode de Phébus.

³⁷ CGDD(2014).

Tableau 8 : taille du gisement chez ménages n'étant pas propriétaire occupant.

Prix carbone	Ménage court termiste (TWh) /% gisement initial	Ménage standard (TWh) /% gisement initial	Socio-économique (TWh) /% gisement initial
0 €/t en 2030	12 (38%)	20 (39 %)	—
100 €/t en 2030	14 (38 %)	23 (40 %)	26 (40 %)
400 €/t en 2030	18 (40 %)	27 (41 %)	29 (40 %)

Source : Phébus, Ylios, ANAH, calculs DG Trésor.

5.3 Ménages à faibles revenus et contrainte de crédit

Pour évaluer les contraintes de crédit qui pourraient peser sur les ménages cherchant à mettre en place des actions de rénovation énergétique importantes, nous adoptons deux approches. D'une part, nous examinons la part du gisement se trouvant chez les ménages présentant le revenu le plus faible³⁸ (le premier quintile ou la médiane suivant les cas). Cette approche se concentre sur les ménages qui seraient susceptibles soit de ne pas avoir accès au crédit soit d'avoir accès au crédit mais à des taux plus élevés. Nous considérons ici tous les types de travaux, même ceux dont le coût est le plus faible (cf. Graphique 9). D'autre part, nous examinons les travaux pour lesquels un emprunt est plus probable, mais en prenant en compte l'ensemble des individus et pas uniquement ceux qui connaissent des contraintes de crédit. Pour cela, nous examinons l'impact du coût du crédit sur le coût des plus gros travaux (supérieur à 1000 €). En effet, près de 20 % des ménages ont financé leurs travaux de rénovation énergétique par un emprunt, mais seulement 11 % d'entre eux ont eu recours à un éco-PTZ³⁹. A titre d'exemple nous évaluons l'impact d'une augmentation de 10 %⁴⁰ du coût de tous les travaux de plus de 1000 € (cf. Tableau 10).

Dans le premier cas, on constate que le gisement rentable sans prix du carbone est de 7 TWh pour le premier quintile et de 15 TWh pour la première moitié des ménages. Au niveau socio-économique, les gisements sont compris entre 13 et 15 TWh (selon le prix du carbone) pour le premier quintile et entre 31 et 35 TWh pour la première moitié. On peut noter que la part des gisements dans le gisement total (respectivement 21 % et 47 %) est proche de la part de ces ménages dans la population totale. On retrouve le même phénomène que pour les locataires : ces ménages habitent plus souvent des logements énergivores, mais au sein de ces logements, leur consommation moyenne d'énergie liée à la structure des logements serait inférieure à celle des autres ménages. Cette première approche permet d'identifier les gisements potentiellement concernés par le problème de contrainte de crédit, mais ne permet d'affirmer que cette contrainte existe.

³⁸ En divisant le revenu par les unités de consommation pour tenir compte de la taille du ménage.

³⁹ Étude Open 2015, ADEME.

⁴⁰ Cela correspond au coût du crédit actualisé pour un emprunt à 5 % repart en 60 mensualités.

Tableau 9 : taille du gisement chez les gisements pour les ménages les plus pauvres (revenu du ménage/UC), en TWh et en pourcentage du gisement rentable total.

	Ménage court termiste (TWh) /% gisement initial	Ménage standard (TWh) /% gisement initial	Socio-économique (TWh) /% gisement initial
20 % des ménages avec le revenu le plus faible			
0 €/t en 2030	7 (22%)	11 (22%)	–
100 €/t en 2030	8 (21%)	12 (21%)	13 (20%)
400 €/t en 2030	9 (20%)	14 (21%)	15 (21%)
50 % des ménages avec le revenu le plus faible			
0 €/t en 2030	15 (47%)	25 (49%)	–
100 €/t en 2030	17 (45%)	28 (48%)	31 (48%)
400 €/t en 2030	21 (48%)	33 (49%)	35 (49%)

Source : Phébus, Ylios, ANAH, calculs DG Trésor.

La deuxième spécification permet de constater que l'augmentation du coût du crédit a peu d'effet sur la taille du gisement. En effet le gisement pour les ménages court-termistes passe de 32 TWh à 30 TWh (sans prix du carbone). Le gisement socio-économique passe de 64/72 TWh à 60/70 TWh. La principale difficulté pourrait donc concerner l'accès au crédit et pas l'augmentation du coût des travaux lié à des taux élevés, puisqu'environ 20 % du gisement se trouve chez les ménages les plus pauvres.

Tableau 10 : gisement de rénovation avec un crédit augmentant le coût des travaux de 10 %

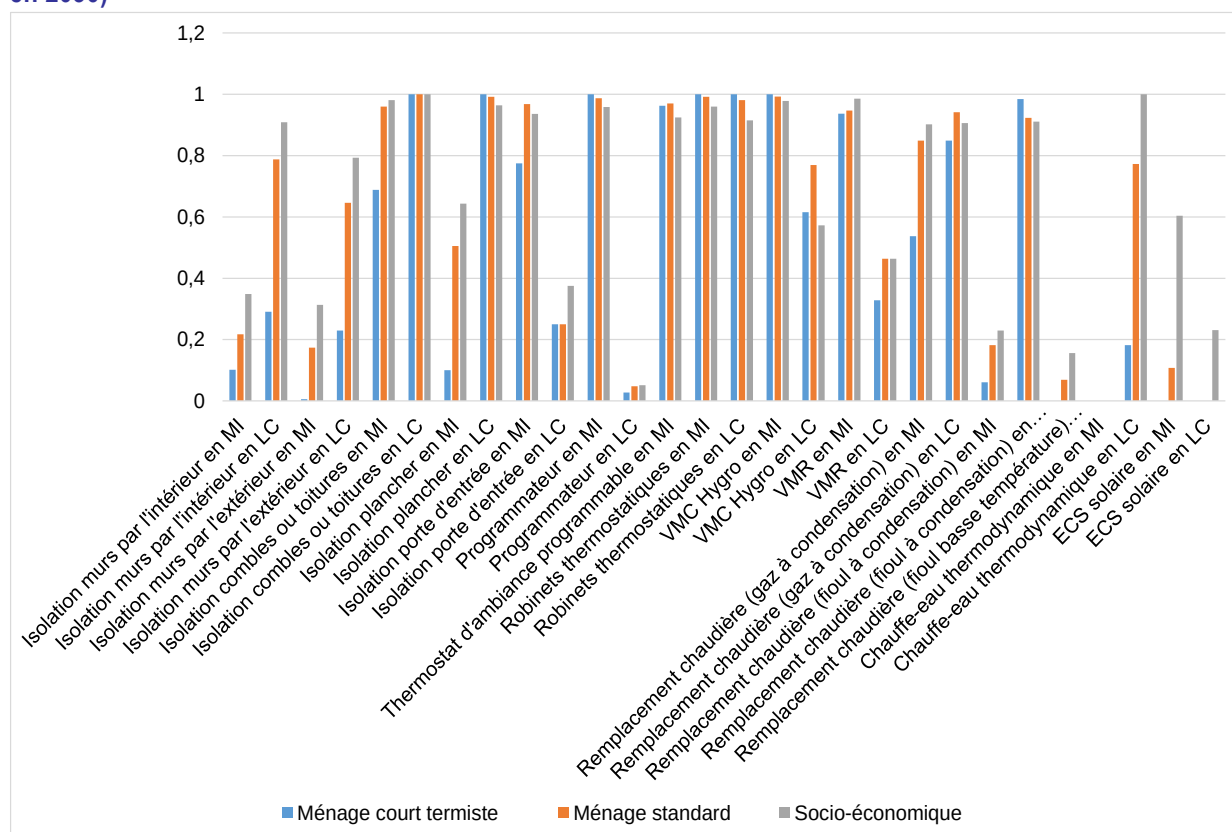
Prix carbone	Ménage court termiste (TWh)	Ménage standard (TWh)	Socio-économique (TWh)
0 €/t en 2030	30	48	–
100 €/t en 2030	35	55	60
400 €/t en 2030	42	64	70

Source : Phébus, Ylios, ANAH, calculs DG Trésor.

6. Identification des gisements d'économie par actions

Les parties précédentes ayant permis de mettre en évidence qu'une partie significative du gisement de rénovation thermique était rentable, nous cherchons désormais à affiner ces résultats en distinguant les différentes actions de rénovation. Dans un premier temps, nous cherchons à identifier si parmi les actions de rénovations, certaines sont tout le temps rentables, même pour des ménages court-termistes. En examinant la rentabilité de chaque action, en fonction du type de ménage (par exemple dans le cas d'une taxe carbone à 100 €/tCO₂), on constate que plusieurs actions ont un gisement rentable qui équivaut à presque 100 % du gisement total techniquement accessible, tant pour les ménages court-termistes, que dans l'analyse socio-économique (cf. Graphique 2) : il s'agit des travaux sur les robinets thermostatiques et l'isolation des combles et toitures notamment. Plus généralement, pour un certain nombre d'actions de travaux, les travaux de rénovation sont rentables dans plus de 90 % du gisement (isolation des combles et du plancher en logement collectif, programmeur, programmeur, thermostat programmable et VMC hygro dans les maisons individuelles, robinets thermostatiques en logement collectif et individuel).

Graphique 2 : part du gisement rentable dans le gisement total (pour un prix du carbone de 100 €/tCO2 en 2030)

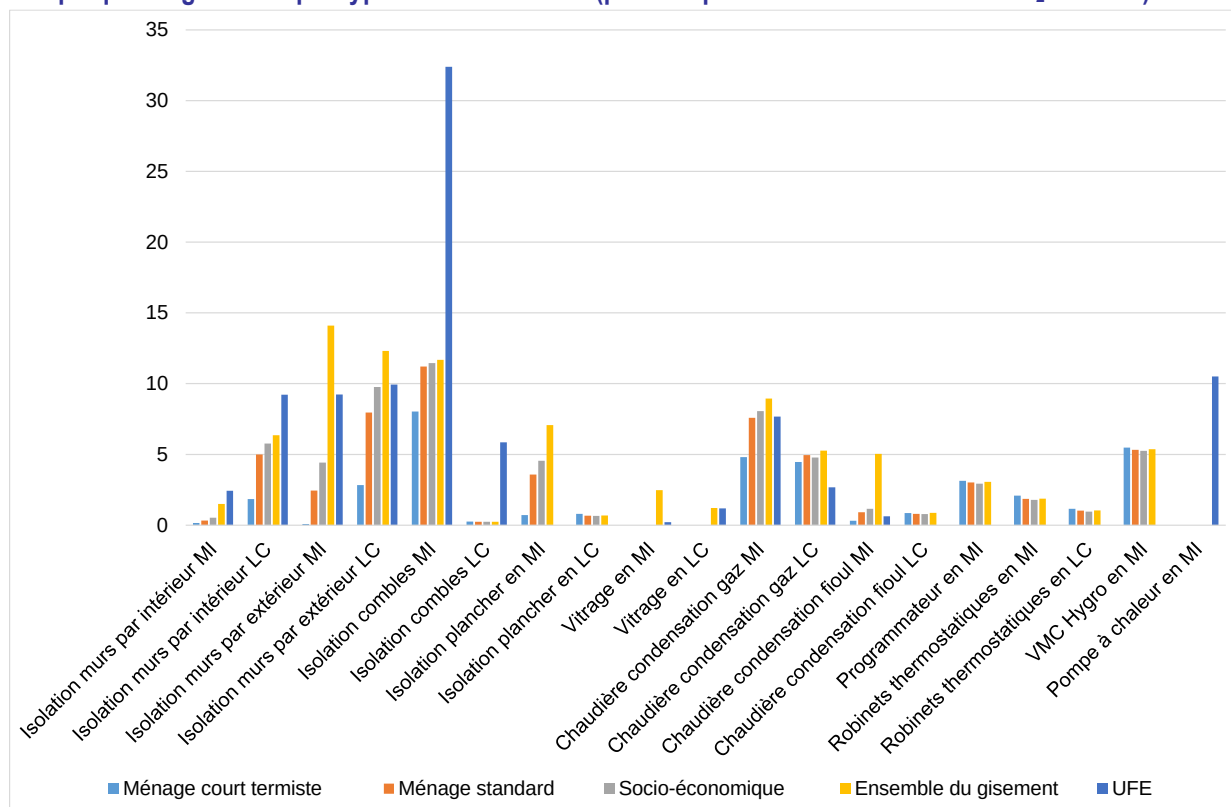


Source : Phébus, Ylios, ANAH, calculs DG Trésor.

Note : Le chauffe-eau thermodynamique pour les maisons individuelles n'est rentable dans aucune des spécifications retenues pour un prix du carbone de 100 €/t en 2030.

Nous cherchons ensuite à déterminer quel est le gisement rentable associé à chaque action de rénovation, notamment pour les gisements fortement rentables. Si on examine la taille des gisements par type d'opération (cf. Graphique 3), on constate que l'isolation des combles des maisons (environ 1 TWh rentable socio-économiquement) et des murs extérieurs (environ 1 TWh pour les logements collectifs et 4 TWh pour les maisons individuelles) ou intérieurs (6 TWh pour les logements collectifs) constitue le gisement de rénovation le plus important, suivi par les chaudières à condensation au gaz (TWh pour les maisons individuelles et 5 pour les logements collectifs). Les programmeurs (TWh pour les maisons) et les robinets thermostatiques (3 TWh dans l'ensemble) sont également des gisements à prendre en compte.

Graphique 3 : gisement par type d'action en TWh (pour un prix du carbone de 100€/tCO₂ en 2030)



Source : Phébus, Ylios, ANAH, calculs DG Trésor.

7. Principales limites de l'approche utilisée

Les résultats quantitatifs concernant ces gisements présentent certaines incertitudes difficiles à évaluer.

L'une des plus importantes est la forte incertitude sur l'impact de l'effet rebond. Lorsque l'efficacité énergétique d'un bien augmente, il en résulte une baisse de coût énergétique pour l'individu, qui utilise souvent une partie des économies réalisées pour augmenter sa consommation énergétique. Ainsi, les économies d'énergie espérées peuvent être moindres que celles anticipées : c'est le phénomène d'effet rebond. Les données de l'analyse Phébus ne permettent pas d'estimer l'effet rebond puisqu'on ne mesure pas la consommation réelle avant et après les travaux. Un certain nombre d'études donnent des ordres de grandeur de 10 à 40 %, mais avec une importante variabilité en fonction des outils et des travaux. Elles sont par ailleurs souvent réalisées sur des échantillons de petites tailles. Aydin *et al.* (2013) montrent, à partir d'une enquête portant sur 600 000 logements aux Pays-Bas, qui compare les consommations données dans les DPE aux consommations réelles, que :

- l'effet rebond dépend de nombreux paramètres : il croît quand le revenu des ménages diminue (consommation accrue pour atteindre un niveau de confort standard), et les auteurs estiment cet effet de l'ordre de 41 % pour les locataires contre 27 % pour les propriétaires (en interprétant cette différence par une corrélation entre statut de propriétaire et plus grande richesse du ménage) ;
- l'ampleur de l'effet rebond dépend significativement de la performance énergétique initiale du logement (il est d'autant plus important que la consommation initiale est élevée : en effet les habitants de ces logements tendent à restreindre leur consommation).

Par ailleurs, l'effet rebond dépend des outils utilisés. En effet, selon Giraudet et Quirion (2008), l'augmentation du prix des énergies via une taxe carbone réduit le risque d'un effet rebond,

tandis que les subventions à la rénovation s'accompagnent d'un effet rebond plus important. Cela vient du fait que seule la mise en place d'un prix carbone augmente le coût marginal d'utilisation de l'énergie par rapport à une subvention.

Il est également important de noter que dans la méthode présentée dans cette étude, les actions de rénovation thermique sont effectuées par VAN décroissante. Cela ne correspond pas systématiquement à la réalité des travaux de rénovation, pour lesquels les « bouquets de travaux »⁴¹ sont fréquents. On appelle « bouquet de travaux » la combinaison d'au moins deux actions d'amélioration de la performance énergétique d'un logement. Certains travaux sont ainsi potentiellement plus efficaces s'ils sont combinés, ce qui pourrait augmenter le gisement. Par ailleurs, les travaux de rénovation thermique peuvent faire partie de travaux de rénovation plus généraux. Ainsi, un changement de toiture peut être couplé à une isolation des combles. Nous ne prenons pas en compte ce cas.

Par ailleurs, certains gisements n'ont pas pu être évalués précisément faute d'informations suffisantes⁴². Il existe aussi un biais possible sur la rentabilité des changements de systèmes de chauffage collectif (puisque les DPE retenus dans nos calculs ne concernent pas l'immeuble entier dans ces cas). Il faut noter également que les résultats de cette étude s'appliquent aux logements individuels et non aux copropriétés.

8. Implications en termes de politiques publiques

Les estimations conduites dans les parties précédentes montrent qu'il existe un gisement de rénovation thermique rentable important pour les ménages privés, même avec un prix du carbone nul (de 32 TWh à 51 TWh suivant les hypothèses choisies dans le scénario central). Cela confirme que la mise en place d'un prix du carbone ne suffit pas à déclencher les investissements dans le domaine de la rénovation énergétique des bâtiments, et que des outils supplémentaires sont bien nécessaires pour traiter les différentes défaillances identifiées dans le secteur.

Comme identifié dans l'introduction, plusieurs types de frein peuvent empêcher l'exploitation de ce gisement, ce qui appelle une réponse différenciée de la puissance publique :

- Des mécanismes de type campagne ou point d'information ou la certification des professionnels sont de nature à réduire les problèmes d'information et favoriser l'investissement. De même, des expérimentations pourraient être menées pour améliorer l'implication des propriétaires et des locataires dans les projets d'efficacité énergétique, par exemple en leur fournissant un accès simple aux données de consommation. Ce type de projets permettrait de s'assurer que les ménages ont les données nécessaires pour évaluer le bénéfice potentiel d'une rénovation énergétique ou d'un changement de leurs comportements.
- La question de l'irrationalité de certains choix peut également être traitée via une amélioration de l'accès à l'information, mais aussi via des mécanismes de type *nudge* (par exemple en indiquant aux individus la consommation moyenne de leur voisinage). L'usage de la norme pourrait également être envisagé pour les actions systématiquement rentables et présentant des coûts faibles. Il est cependant nécessaire de s'assurer que les biens n'ont pas de différence autre qu'en termes d'efficacité énergétique⁴³.

⁴¹ Exemple de bouquet de travaux : isolation des toits et isolation des murs.

⁴² Pompes à chaleur, remplacement des convecteurs par des panneaux rayonnants, remplacement eau chaude sanitaire par NFB (meilleur calorifugeage).

⁴³ Allcot et Taubinsky (2015) montrent que les ampoules basse consommation et les ampoules standards n'ont pas les mêmes propriétés, et que certains consommateurs ont une préférence pour les secondes même après prise en compte des économies d'énergie. Les auteurs estiment que l'imposition d'une norme aurait un impact négatif sur le bien-être général, les économies d'énergie ne compensant pas la baisse de satisfaction de ces individus.

- Concernant le problème locataire/bailleur, les calculs montrent qu'entre 12 TWh et 20 TWh se trouvent chez des ménages qui ne sont pas propriétaires de leur logement, soit environ 40 % du gisement. Un meilleur fonctionnement du marché immobilier permettrait de mieux prendre en compte le partage des gains liés à la rénovation thermique dans les prix (prix du logement, loyers).
- L'étude du crédit montre que l'accès au crédit, plus que le renchérissement des coûts pourrait poser problème. Environ 20 % du gisement se trouve dans le premier quintile. Des subventions, sous condition de ressources strictes mais également de solvabilité, pourraient être étudiées (de manière similaire au programme Habiter Mieux de l'ANAH).

Il peut exister de réels problèmes à identifier ces gisements (problèmes d'information) et à inciter les ménages à faire les travaux. Des organismes comme l'Agence Nationale de l'Habitat (ANAH) et son programme « Habiter mieux », qui au-delà des subventions, accompagnent les ménages dans la rénovation énergétique, peuvent faciliter l'exploitation de ce gisement privé. En théorie, des mécanismes de type certificat d'économies d'énergie, qui s'appuient sur les informations détenues par les professionnels, seraient aussi susceptibles de favoriser l'exploitation de ces gisements.

Par ailleurs, l'analyse socio-économique montre qu'il existe des gisements qui ne sont pas rentables d'un point de vue privé, mais qui le sont d'un point de vue socio-économique. Cela s'explique par deux facteurs :

- La prise en compte de l'externalité carbone : la mise en place d'un prix du carbone de 100 €/tCO₂ en 2030 permet d'augmenter le gisement rentable de 5 à 6 TWh environ (12 à 15 TWh pour un prix de 400 €/tCO₂). Par ailleurs, la taxe carbone permet en théorie, via le changement de prix, de réduire l'effet rebond.
- Des préférences des ménages différentes de celles de l'analyse socio-économique (taux d'actualisation plus fort) : des mécanismes de subventions pour favoriser l'investissement dans des actions rentables d'un point de vue public, mais pas privé, pourraient être mis en place. Ce gisement peut être estimé entre 6 et 28 TWh.

La question qui se pose est alors celle de la calibration de la subvention. À l'optimum de 1^{er} rang, la subvention devrait concerner uniquement les actions rentables du point de vue socio-économique mais pas privé, et ne couvrir que la différence de rentabilité moyenne pour chaque action éligible. Cela pourrait passer par des organismes comme l'ANAH pour pouvoir identifier précisément ces gisements. Cependant, une telle solution seraient techniquement compliquée à mettre en place. Un choix de second rang serait l'adoption d'une subvention calculée (ou d'un crédit d'impôt) pour garantir un niveau donné d'investissement dans la rénovation, en acceptant la présence d'effet d'aubaine. Il y aura alors un arbitrage entre le niveau d'investissement visé et l'effet d'aubaine accepté.

Enfin, les travaux présentant une rentabilité faible ne devraient pas être soutenus. À l'inverse, les travaux rentables dans toutes les configurations (comme les robinets thermostatiques ou les programmeurs dans les maisons individuelles) doivent être soutenus. Ce soutien peut se faire par l'intermédiaire de campagnes d'information visant à orienter les ménages vers certains types d'actions de rénovation. Une autre possibilité serait la mise en place de normes, par exemple pour les travaux pour lesquels plus de 90 % du gisement est rentable.

À noter que nous avons fait ici l'hypothèse qu'il n'y pas eu et qu'il n'existera pas de problème d'offre et nous ne considérons pas ici l'opportunité d'un éventuel soutien à la filière. Il serait cependant nécessaire de vérifier que la filière du bâtiment a la capacité de réaliser dans un délai rapide les travaux présentés ici.

9. Conclusion

L'investissement dans la rénovation thermique n'est en général pas déclenché en raison de nombreux obstacles (défaillance de marché, préférences particulières et irrationalité des agents, coûts cachés). À l'aide de l'enquête Phébus, nous avons évalué le gisement de rénovation rentable du point de vue privé et du point de vue socio-économique. Il existe en France un gisement de rénovation thermique rentable de manière privée de 32 à 51 TWh, ce qui correspond à un investissement compris entre 14 et 36 Md€. Le gisement rentable du point de vue socio-économique est compris entre 64 et 72 TWh suivant le prix du carbone retenu. L'investissement est alors entre 64 et 72 Md€⁴⁴. Nous avons également estimé les gisements associés aux principales barrières. Cela permet notamment d'estimer l'impact des outils mis en place pour réduire ou éliminer ces barrières.

Les études doivent se poursuivre, notamment pour améliorer l'information sur les coûts cachés, qui peuvent réduire fortement le gisement rentable. Du côté des outils, la recherche dans les *nudges* et plus généralement en économie comportementale pourrait offrir des pistes intéressantes pour favoriser l'investissement dans la rénovation à un coût relativement faible.

⁴⁴ Une éventuelle subvention ne couvrirait pas l'ensemble de la différence entre 14/36 Md€ et les 64/72 Md€ car une part de l'écart viendrait de dépenses privées déclenchées par la subvention.

Bibliographie

Allcott H. et Taubinsky D. (2015), "Evaluating Behaviorally Motivated Policy: Experimental Evidence from the Lightbulb Market", *American Economic Review*, 105(8), 2501-2538.

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

Allcott H. et Mullainathan S. (2010), "Behavior and energy policy", *Science*, 327(5970), 1204-1205.

Allibe B. (2012), « Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel français à long terme – Amélioration du réalisme comportemental et scénarios volontaristes », Phd Thesis.

Ameli N. et Brandt N. (2015), "Determinants of households' investment in energy efficiency and renewables: Evidence from the OECD survey on household environmental behavior and attitudes", *Environmental Research Letters* 10, 44015.

Aydin E., Brounen D. et Kok N. (2013), "The Rebound Effect in Residential Heating", *Working Paper*.

Blasnik M. (2010), "Energy Models vs. Reality." Presentation, *Southface Lecture Series*, January 26.

Brown Z., Johnstone N., Haščič I., Vong L. et Barascud F. (2013), "Testing the effect of defaults on the thermostat settings of OECD employees", *Energy Economics* 39, 128–134.

CGDD, 2014, *Le parc des logements en France métropolitaine, en 2012 : plus de la moitié des résidences principales ont une étiquette énergie D ou E*.

Cayla J-M., Allibe B. et Laurent M-H. (2010), « From practices to behaviors: Estimating the impact of household behavior on space heating energy consumption », Communication, *ACEEE*.

Cohen F., Glachant M. et Söderberg M. (2015), "The impact of energy prices on energy efficiency: Evidence from the UK refrigerator market", Centre for Climate Change Economics and Policy, *Working Paper* No.203.

Diaz-Rainey, I. et Ashton J-K. (2015), "Investment inefficiency and the adoption of eco-innovations: The case of household energy efficiency technologies", *Energy Policy* 82, 105-117.

ENERDATA-SEURECO (2014), « Étude de différents scénarios d'atteinte de l'objectif de réduction des émissions de GES à l'horizon 2030 à l'échelle de l'Union Européenne ».

Farsi M. (2010), "Risk aversion and willingness to pay for energy efficient systems in rental apartments", *Energy Policy* 38, 3078–3088.

Gillingham K., Harding M. et Rapson D. (2012), "Split incentives in residential energy consumption", *Energy Journal* 33, 37–62.

Gillingham K. et Palmer K. (2014), "Bridging the energy efficiency gap: Policy in-sights from economic theory and empirical evidence", *Review of Environmental Economics and Policy* 8, 18–38.

Giraudet L.G et Quirion P. (2008), "Efficiency and distributional impacts of tradable white certificates compared to taxes, subsidies and regulations", *Revue d'économie politique*, vol 118, p885-914.

- Giraudet L-G. (2015), «Qualité des travaux de rénovation, asymétries d'information et garanties de performance énergétique », *La Revue du CGDD*, p 67-72.
- Kahneman D. et A. Tversky A. (1979), "Prospect theory: An analysis of decision under risk", *Econometrica* 66, 497–527.
- Krishnamurthy C.K.B et Kriström B. (2015), "How large is the owner-renter divide in energy efficient technology? Evidence from an OECD cross-section", *The Energy Journal* 36(4), 85-104.
- Laibson D. (1997), "Golden eggs and hyperbolic discounting", *Quarterly Journal of Economics* 112, 443–477.
- Liu E-M. (2013), "Time to change what to sow: Risk preferences and technology adoption decisions of cotton farmers in China", *Review of Economics and Statistics* 95, 1386–1403.
- Newell R.G. et Siikamäki J. V (2015), "Individual time preferences and energy efficiency", *American Economic Review* 105, 196–200.
- McKinsey & Co. (2009), "Unlocking Energy Efficiency in the US Economy".
- Newell R.G. et Siikamäki J. V (2013), "Nudging energy efficiency behavior: The role of information labels", *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists* 1, 555–598.
- Qiu Y., Colson G., Grebitus C. (2014), "Risk preferences and purchase of energy-efficient technologies in the residential sector", *Ecological Economics* 107, 216–229.
- Quinet A. (2008), « *La valeur tutélaire du carbone* », rapport du Centre d'analyse stratégique, Paris, La Documentation française.
- Quinet E. (2013), « *Évaluation socioéconomique des investissements publics* », Rapport du Commissariat général à la stratégie et à la prospective.
- Palmer K., Walls M., Gordon H. et Gerarden T. (2012), "Assessing the energy-efficiency information gap: Results from a survey of home energy auditors", *Energy Efficiency* 6, 271–292.
- Schleich J., Gassmann X., Faure C. and Meissner T. (2016), "Making the implicit explicit: A look inside the implicit discount rate", *Energy Policy* 97, 321-331.
- Suerkemper F., Thomas S., Osso D., et Baudry P. (2012), "Cost-effectiveness of energy efficiency programmes evaluating the impacts of a regional programme in France", *Energy Efficiency*, 5(1), 121-135.
- Union française de l'énergie (2013), « L'ordre de priorité des actions d'efficacité énergétique ».
- Ylios (2016), « Coûts et bénéfices économiques des investissements en matière d'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel et immobilier de bureaux en France ».