conseil d'analyse économique

Focus
n° 106
juin 2024

Analyse socio-économique de la rénovation énergétique des logements

Louis-Gaëtan Giraudet et Lucas Vivier, École des ponts ParisTech Cired, Cired

En complément à la *Note* n° 81 du CAE, ce *Focus* détaille l'état des connaissances sur les coûts et bénéfices de la rénovation énergétique des logements et la méthode de quantification du gisement d'opérations rentables. Il actualise et prolonge les évaluations de gisement réalisées par la DG Trésor (2017) et France Stratégie (2022) en utilisant les données les plus à jour et en proposant une analyse plus approfondie des barrières à l'investissement.

Ce *Focus* est publié sous la responsabilité des auteurs et n'engage qu'eux.

Qu'est-ce qu'une rénovation énergétique ?

Au sens large, la rénovation énergétique est un investissement dans un logement existant visant à optimiser la production des services énergétiques – chauffage, eau chaude sanitaire, cuisson, électricité spécifique (éclairage, électronique, électroménager) et rafraîchissement. Dans la suite de l'analyse, nous nous concentrons sur l'optimisation de la production de chauffage, qui représentait en 2021 69 % de la consommation d'énergie finale résidentielle en France, contre 10 % pour l'eau chaude sanitaire, 15 % pour la cuisson, 5 % pour l'électricité spécifique et une part encore négligeable pour la climatisation[1].

Encadré 1. Quels travaux pour la rénovation énergétique ?

Pour chauffer un logement à moindre coût, il est nécessaire de limiter les déperditions thermiques liées à l'enveloppe du bâtiment et d'améliorer le rendement du système de chauffage. La première option passe par l'isolation des quatre composantes de l'enveloppe : les combles et toitures (que nous abrégeons par "toit"), les murs, les parois vitrées (« fenêtres » et les planchers bas (« plancher). La seconde option passe par le remplacement du système de chauffage par un modèle plus performant, qui peut éventuellement s'accompagner d'un changement de vecteur. L'isolation réduisant l'étanchéité à l'air, un système de ventilation actif doit être installé en complément à ces travaux pour recréer une circulation d'air, indispensable à la bonne qualité de l'air intérieur.

La rénovation énergétique d'un logement consiste donc en une intervention sur au moins un des six postes de travaux : isolation du toit, des murs, du plancher et des fenêtres, amélioration du système de chauffage et installation d'une ventilation mécanique contrôlée (VMC). Une rénovation est en général considérée comme performante quand elle combine plusieurs opérations – au moins l'isolation des murs, du toit, du plancher, et un système de chauffage consommant majoritairement du charbon, du fioul ou du gaz[2]. Une coordination étroite de ces opérations est essentielle pour garantir la performance finale de la rénovation.

Les déperditions de l'enveloppe sont mesurées par le coefficient de transfert thermique U (en m².K/W), dont l'inverse mesure la résistance (R=1/U, en W/(m².K)). Le Tableau 1 indique les valeurs de conductivité à atteindre sur chaque poste pour satisfaire aux exigences réglementaires pour atteindre le niveau bâtiment basse consommation (BBC) et les coûts moyens associés, estimés d'après Ademe (2019a), Enertech (2021a) et Effinergie (2021).

Tableau 1. Coût moyen de l'isolation

	R : (m².K)/W	U : W/(m².K)	Coût spécifique €/m2
Mur	4	0,25	160
Plancher	4	0,25	50
Toit	6	0,17	80
Fenêtres		1,3	540

Les systèmes de chauffage se caractérisent par leur rendement en énergie finale et le vecteur utilisé. Les systèmes à combustibles (gaz, fioul, bois) reposent sur des équipements de type chaudière, dont le rendement total est typiquement égal à 0,8 – la combustion d'1 kWh de combustible produit 0,8 kWh de chaleur pour l'occupant du logement. Les systèmes électriques reposent sur deux technologies très différentes – les radiateurs, qui émettent de la chaleur par effet Joule, et les pompes à chaleur (PAC), qui transfèrent la chaleur d'une source chaude vers une source froide en exploitant le cycle condensation-évaporation. On se concentre ici sur les PAC dites "air-eau", qui utilisent l'air extérieur comme source chaude et un circuit d'eau comme source froide, qui distribue la chaleur à des émetteurs. Les radiateurs ont un rendement conventionnel de 1, contre 2,5 en moyenne pour les PAC air-eau. Ainsi, le rendement des PAC est près de trois fois supérieur à celui des systèmes combustibles. Le Tableau 2 décrit ces paramètres et les coûts moyens associés, estimés d'après Ademe (2019a), Enertech (2021a) et Effinergie (2021).

[1] Source : CEREN. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/consommation-denergie-par-usage-du-residentiel

[2] Voir https://www.ecologie.gouv.fr/coup-pouce-renovation-performante-dune-maison-individuelle

Tableau 2 : Coût moyen des systèmes de chauffage

	Rendement en énergie finale	Vecteur	Coût unitaire (€)	Coût spécifique (€/kW)
Chaudière gaz	0,8	gaz naturel	6 000	750
Chaudière fioul	0,8	fioul domestique	Installation interdite depuis le 1er juillet 2022	
Radiateur électrique	1,0	électricité	3 600	450
Pompe à chaleur air/eau	2,5	électricité	13 000	1 625
Chaudière bois	0,8	bois-énergie	12 500	1 563

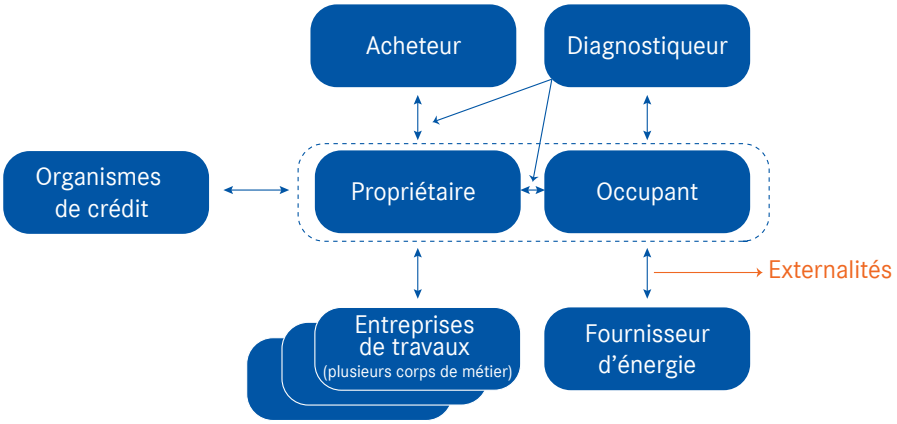
D'un point de vue économique, la rénovation énergétique est un bien singulier. La combinaison de différentes opérations en fait d'abord un bien composite. Sa fourniture implique de coordonner plusieurs corps de métier : chauffagiste, plaquiste, couvreur, menuisier, façadier. Ces opérations doivent de plus être étroitement coordonnées pour s'adapter aux caractéristiques architecturales du bâtiment, au climat local et aux attentes des clients, qui diffèrent selon plusieurs dimensions – leur sensibilité à la chaleur et au froid, leur capacité d'investissement, etc. La rénovation constitue donc une prestation sur-mesure, qui en fait un actif hautement spécifique. L'absence de standardisation rend la décision d'investissement plus fastidieuse que dans le cas d'un produit standardisé, comme un véhicule, qui se situe dans la même gamme de prix. Elle implique également qu'il est difficile de déployer la rénovation à grande échelle, ce qui limite les perspectives de baisse de coût.

En outre, chaque opération comporte une part de travail importante pour les tâches d'installation, dont la qualité est partiellement inobservable. Une fois réalisée, la rénovation voit son rendement varier en fonction de la rigueur des hivers et des prix de l'énergie, inconnus à l'avance. Ces multiples sources d'incertitude confèrent à la rénovation énergétique le statut de « bien de croyance », dont la qualité n'est jamais parfaitement révélée, même longtemps après l'investissement (Giraudet, 2020 ; Lanz et Reins, 2021).

Enfin, la fourniture de rénovation énergétique repose sur un riche écosystème impliquant, au-delà des propriétaires-investisseurs et entreprises du bâtiment : un ménage locataire, lorsque le logement est loué ; un futur acquéreur du bien, dont l'existence, même virtuelle, oriente les décisions d'investissement ; un diagnostiqueur, qui opère en marge des décisions de vente et de location ; un fournisseur d'énergie, sans lequel la rénovation énergétique est sans objet ; et un organisme de crédit, fréquemment sollicité pour réaliser un investissement de plusieurs dizaines de milliers d'euros. Cet écosystème, schématisé à la Figure 1, implique que l'investisseur est tributaire des décisions d'autres parties prenantes, dont les objectifs ne sont pas nécessairement alignés avec les siens.

La combinaison de ces caractéristiques fait de la rénovation énergétique un cas d'école de marché hautement imparfait, sujet à des défaillances multiples, sur lesquelles nous reviendrons ultérieurement. Elle implique que les coûts et les bénéfices de la rénovation énergétique sont difficiles à circonscrire, comme nous allons le voir à présent.

Figure 1. Écosystème de la rénovation énergétique



Les coûts de la rénovation énergétique

L'évaluation des coûts est la première brique de l'analyse coût-bénéfice. Souvent réduits aux dépenses d'investissement qui découlent des Tableaux 1 et 2, les coûts de la rénovation énergétique recouvrent en réalité différents postes – techniques, financiers et liés au bien-être des ménages – qui ne s'observent pas tous avec la même facilité.

Coûts techniques

Les coûts techniques désignent ici les coûts qui figurent dans les devis et factures de travaux.

Valeurs centrales

Chacun des six postes de rénovation présente plusieurs modalités (épaisseur et matériau d'isolation variables, changement ou pas de vecteur de chauffage, etc.) et tous sont déployés à des échelles différentes (nombre de fenêtres, surface de murs à isoler, etc.). Ainsi il n'existe pas une rénovation-type mais des milliers de combinaisons de gestes possibles, qui génèrent une forte dispersion des coûts. Les meilleures sources disponibles, synthétisées dans le Tableau 3, font état de coûts variant de 200 à 500 € par mètre carré de surface habitable pour atteindre un niveau BBC. Pour une valeur centrale de 350 €/m² et une taille de référence de 100 m², le coût d'une rénovation BBC s'élève ainsi à 35 000 €. Ces coûts peuvent paraître élevés, mais doivent être relativisés en comparaison des coûts plus généraux de la rénovation des logements, estimés d'après diverses sources commerciales à 250-750 €/m² pour une rénovation légère, 750-1 000 €/m² pour une rénovation partielle et 1 000 € à 2 500 €/m² pour une rénovation complète[3].

Tableau 3 : Estimations des coûts techniques de la rénovation énergétique

Source	Méthode	Estimations
RTE (2020)	Revue de 8 études	Coûts entre 150 € et 250 €/m², avec des extrêmes à 50 € et 400 €
Effinergie (2021)	59 maisons rénovées au niveau BBC	Moyenne 366 €HT/m², avec des extrêmes à 100 € et 800 €
Enertech (2021a)	106 maisons rénovées au niveau BBC	Coût moyen de 526 €TTC/m².
Osso et Bouhi (2024)	800 000 simulations	Coût médian de 200 € à 350 €/m², avec des extrêmes à 168 € et 458 €

Pour une rénovation énergétique complète, les coûts surfaciques sont relativement constants quelle que soit la performance de départ du logement, puisqu'une partie des coûts sont fixes (installation du chantier, nettoyage) et que le coût d'isolation varie peu en fonction du niveau d'isolation de départ (puisque l'ancien isolant doit de toute façon être déposé). Pour ces raisons, le coût tend à décroître quand on l'exprime en unité d'énergie économisée, ce qui traduit un rapport coût-efficacité plus favorable pour la rénovation des passoires thermiques. Effinergie rapporte ainsi des coûts d'atteinte du niveau BBC de 1,20 € par kilowattheure économisé par an pour un logement G, 2,30 €/kWh pour un logement F, 3,60 € pour un logement E et 5,40 € pour un logement D. Exprimés en flux d'énergie cumulé sur 25 ans et actualisé à 4 % (« cumac »), ces coûts s'établissent entre 75 et 338 €/MWh cumac

Souvent assimilés, coût et prix ne doivent cependant pas être confondus. À la variabilité des premiers[4], liée à la diversité des parcours techniques, s'ajoute celle des seconds, liée à l'intensité variable de la concurrence sur des marchés de la rénovation essentiellement locaux. Il en résulte une forte dispersion des prix, qui peuvent varier d'un facteur trois à quatre pour une même opération, soit une dispersion moyenne de 30 % (Grandclément et al., 2018) à 50 % (Enertech, 2021a).

[3] Source : HelloArtisan, Hemea

[4] Les coûts se décomposent en général entre fourniture et pose. À titre indicatif, les coûts de fourniture correspondent au coût des matériaux augmentés d'une marge de 10 à 30 %. La pose représente typiquement 20 à 40 % du coût total, avec un coût de main-d'œuvre de 40 à 60 €HT/heure (minimum 20, maximum 80). Sources : Crédit Agricole, Placedeschantiers, artisandubatiment, Traxxeo.

Dynamique des coûts

Dans une perspective dynamique, les coûts varient en fonction de l'échelle des chantiers et leur temporalité. On examine ici trois effets : la coordination des actions à l'échelle d'un logement, de plusieurs logements, et le progrès technique.

En premier lieu, les multiples gestes à effectuer peuvent être réalisés en une seule fois dans le cadre d'une rénovation dite « globale » ou séquencés dans le cadre d'une rénovation dite « par étapes ». Sur le plan technique, la rénovation globale présente certains avantages, qui la rendent supérieure à la rénovation par étapes pour atteindre un certain niveau de performance au moindre coût (Enertech, 2021b ; Effinergie, 2021 ; Maia et al., 2024) :

- Gestion des interfaces : Les interfaces désignent les points de jonction entre différents postes d'isolation. Le soin insuffisant porté à ces interfaces dans le cadre des rénovations par étapes génère des défauts d'étanchéité à l'air et des ponts thermiques, qui peuvent représenter jusqu'à 20 % de déperdition. Ces déperditions impliquent une surconsommation d'énergie pour atteindre un niveau de confort donné.
- Coordination de l'isolation et de la ventilation : L'isolation doit s'accompagner de l'installation d'une VMC, sous peine de voir la qualité de l'air intérieur se dégrader et des moisissures apparaître. Lorsque la VMC est omise, comme c'est souvent le cas avec les rénovations par étapes, le renouvellement de l'air intérieur est généralement assuré par l'ouverture des fenêtres, qui génère une surconsommation d'énergie.
- Coordination de l'isolation et du système de chauffage : L'isolation d'un logement réduit ses besoins de chauffage. Le système de chauffage existant se trouve alors surdimensionné, et s'il est conservé, il fonctionnera avec un rendement dégradé, qui réduira l'ampleur des économies d'énergie[2] espérées. Il est donc nécessaire de coupler l'isolation au remplacement du système de chauffage par un modèle de moindre puissance. Inversement, une intervention sur le système de chauffage sans travaux d'isolation associés peut s'avérer sans effet sur la consommation d'énergie. C'est le cas de l'installation d'une PAC, qui nécessite un niveau d'isolation suffisant pour fonctionner de manière optimale et assurer une température intérieure de 19 °C minimum.
- Coûts fixes : Tout chantier de rénovation comporte des coûts fixes (installation des protections, échafaudage, nettoyage), qui se trouvent dupliqués en cas de rénovation par étapes.

Bien établie en théorie, la supériorité de la rénovation globale par rapport à la rénovation par étapes est encore peu documentée empiriquement. La meilleure étude disponible en France est celle d'Enertech (2021b). À partir de simulations de parcours de travaux réalisées sur 10 typologies de bâtiments, elle indique que, par rapport à une rénovation BBC en une étape, un séquençage en deux étapes augmente la consommation finale de 7 %, de 30 % pour trois ou quatre étapes et de 60 % pour six étapes. Dans ces deux derniers cas, la hausse est telle que le logement perd son label BBC. On peut donc déduire de ces effets un surcoût par kWh économisé d'environ 30 %.

La coordination des gestes peut également s'envisager à l'échelle de plusieurs logements. Les économies d'échelle qui en découlent sont encore peu documentées[5]. La seule étude dont nous ayons connaissance a été réalisée en Allemagne sur plus de 100 000 logements (Michelsen et al., 2015). Elle indique que, lorsque les rénovations sont réalisées par des sociétés immobilières, et donc déployées à une échelle plus grande que ne le peuvent les bailleurs privés, l'efficacité énergétique atteinte est 25 % supérieure. Les auteurs attribuent cette supériorité aux effets d'apprentissage et de spécialisation.

Enfin, comme toute technologie, la rénovation énergétique est en théorie sujette à des baisses de coût sous l'effet du progrès technique. La seule étude disponible à notre connaissance fait état de taux d'apprentissage – baisse de coût associée à un doublement de la production cumulée – de 32 % pour les pompes à chaleur, 10 % pour les autres systèmes de chauffage, 18 % pour l'isolation et 15 % pour les climatiseurs (Weiss et al., 2010). Les auteurs estiment ces valeurs comparables à celles observées dans d'autres secteurs – 14 % pour l'automobile, 12 % pour les téléviseurs et 26 % pour le petit électronique. RTE retient une hypothèse de réduction du coût des PAC de 20 % à horizon 2035 (RTE, 2020). Toutefois, en raison du caractère non standardisé de la rénovation et de son intensité en travail, il semble peu probable que les baisses de coût spécifiques à chaque technologie s'additionnent. Comme l'indiquent les données détaillées de l'Insee, l'indice des prix pour l'entretien et la rénovation des logements a augmenté de plus de 100 % depuis 2000, contre 45 % pour les véhicules neufs. Aussi, en matière de rénovation énergétique globale, l'ampleur du progrès technique reste à démontrer, et les innovations à attendre sont au moins aussi organisationnelles que technologiques.

[5] L'étude française la plus complète à ce jour est celle de l'APUR (2024), qui fait état d'économies d'énergie réelles de 30 % sur des opérations réalisées sur le parc social parisien. Cependant, cette étude ne fournit pas de détail sur les gestes réalisés et les coûts observés.

Coûts de financement

Avec un coût de plusieurs dizaines de milliers d'euros, une rénovation énergétique est rarement financée à 100 % sur fonds propres. D'après l'enquête TREMI 2017, 32 % des ménages ayant réalisé des travaux ont eu recours à des solutions bancaires. Cette part monte à 51 % dans le cas de rénovations lourdes (d'un coût moyen de 26 000 €) (Ademe, 2018).

Dans ce contexte, le coût total de financement présente deux composantes. La première est le coût du crédit, quand celui-ci est mobilisé. D'après l'enquête TREMI 2017, les prêts à la consommation représentaient entre 34 % et 40 % des solutions de crédit, les crédits immobiliers entre 31 % et 38 % et l'éco-prêt à taux zéro entre 13 % et 15 %, pour un taux d'intérêt moyen de 3,6 % sur 82 mois (et 3,9 % sur 103 mois pour les rénovations lourdes). De façon contre-intuitive, les taux d'intérêt offerts par les banques sur les prêts travaux sont plus élevés que ceux pratiqués sur les véhicules (Giraudet et al., 2021), pour des raisons encore mal comprises[6]. Pour une rénovation lourde de 26 000 €, le coût du crédit représente donc 10 100 €, soit un surcoût de près de 40 %. La seconde composante correspond au coût d'opportunité de l'épargne pour la partie financée sur fonds propres. Le taux des solutions d'épargne sans risque, comme le livret A, fournit une bonne approximation de ce coût. Dans la suite de l'étude, on adoptera l'hypothèse conservatrice d'un financement à crédit de 100 % du montant investi, avec un taux d'intérêt de 3,9 % sur 10 ans.

Coûts induits

En plus des dépenses directement liées à la performance thermique, les rénovations énergétiques induisent un ensemble de coûts supplémentaires, généralement plus difficiles à circonscrire et estimer.

Coûts induits monétaires

Les travaux de rénovation impliquent généralement des travaux de dépose et démolition préalables et d'embellissement intérieur (enduits, peinture, finitions, etc.). Pourtant indispensables à l'achèvement du chantier, ces travaux ne sont pas systématiquement pris en compte dans le coût total. C'est notamment le cas lorsque les opérations énergétiques s'insèrent dans un ensemble de travaux plus large, de type rénovation complète ou agrandissement, rendant la part de démolitions et embellissements strictement attribuables aux postes énergétiques plus difficiles à isoler[7]. Le cas de l'agrandissement est particulièrement important, puisqu'un tiers des rénovations BBC s'accompagnent d'une extension de surface de 10 % à 150 % (Effinergie, 2021). Dans le même ordre d'idée, Enertech (2021a) rapporte que les rénovations BBC occasionnent un supplément de dépense de 40 % sur des postes non énergétiques et non-thermiques. A ces coûts techniques induits peuvent enfin s'ajouter des prestations intellectuelles, comme un audit énergétique (autour de 1 000 €), une conception architecturale (typiquement plusieurs milliers d'euros) et/ou une maîtrise d'œuvre (généralement 10 à 15 % du montant total du chantier).

Coûts induits non monétaires

La réalisation de travaux dans leur logement occasionne enfin pour les ménages désagrément et inconfort. La pose d'équipements de chauffage (chaudière, PAC, insert, etc.) prend généralement plusieurs jours, les travaux d'électricité et de plomberie prennent facilement une à deux semaines et les travaux de façade et toiture encore davantage[8]. En conséquence, une rénovation combinant ces travaux prend généralement plusieurs semaines[9], pendant lesquelles le logement n'est pas habitable, ou alors avec un confort dégradé. On peut estimer la valeur hédonique de ces coûts par le loyer à payer pour un relogement, soit un coût mensuel moyen de 1 200 € par logement[10]. À l'inverse, certaines opérations induisent des bénéfices non monétaires, en raison de leurs attributs non énergétiques, eux aussi rarement pris

[6] On s'attendrait en effet à ce que la rénovation énergétique, en réduisant la dépense des ménages, augmente leur solvabilité et conduise donc à des taux d'intérêt plus faibles que pour un véhicule. L'absence d'un tel effet peut s'expliquer par l'anticipation par les banquiers d'une possible contre-performance de la rénovation (détaillée supra). On peut également penser à un effet de discrimination par les prix, les ménages les plus disposés à investir étant les propriétaires, dont le revenu est relativement plus élevé que la moyenne.

[7] Les règles concernant la TVA à taux réduit prévoient d'ailleurs que démolitions et embellissements ne sont pas éligibles à la réduction de TVA si d'autres travaux (non énergétiques) sont réalisés concomitamment.

[8] Source : HelloArtisan

[9] En l'absence de données précises sur la durée des travaux, la meilleure source indique que, sur les 90 maisons ayant procédé à une rénovation performante, les travaux se sont déroulés sur une seule année civile dans 32 % des cas, deux années civiles dans 50 % des cas et trois années civiles ou plus (soit une durée de travaux supérieure à une année pleine) dans les 18 % restants (Enertech, 2021b).

[10] Loyer moyen au 15 avril 2024 selon seloger.com : 13 €/m² (valeur minimale 9 ; valeur maximale 20). Cette valeur est ensuite appliquée à une surface moyenne de 92 m².

en compte. C'est notamment le cas des fenêtres, qui offrent des gains esthétiques et acoustiques en complément à leur performance thermique.

La notion de coûts induits non monétaires nous amène plus généralement à la question de la valeur inobservée des rénovations.

Valeur inobservée

Au-delà des caractéristiques couramment reportées dans les données (revenu et statut d'occupation, auxquels on pourrait ajouter taille du ménage, l'âge, etc.), les ménages diffèrent selon nombre d'aspects moins systématiquement observés, qui peuvent s'avérer déterminants dans leur décision d'investissement. On pense ici aux préférences idiosyncratiques pour les technologies – certains individus sont plus frileux que d'autres, et peuvent donc être plus enclins à investir pour réduire leur facture de chauffage. On pense également aux événements de la vie, qui peuvent réduire ou augmenter les coûts indirects de la rénovation (coûts de financement et coûts induits). D'après la dernière enquête TREMI, les principaux facteurs déclencheurs des travaux de rénovation énergétiques sont en effet conjoncturels : remplacement suite à une casse ou sinistre, opportunité de financement de type aide ou héritage, emménagement dans un nouveau logement (cause qui se hisse à la première place dans le cas des rénovations les plus performantes), réalisation d'aménagements intérieurs, situation particulièrement propice (ex. arrivée d'un enfant) (ONRE, 2021, p. 92).

Ces éléments déterminent l'utilité inobservée des ménages. Par essence très hétérogène, elle explique pourquoi deux ménages aux caractéristiques observables identiques peuvent procéder à des choix d'investissement différents. Toutefois, elle est souvent ignorée, ce qui peut conduire l'observateur à s'étonner qu'un investissement supposé rentable du point de vue privé ne soit pas réalisé, alors que cette décision est précisément rationalisée par l'utilité idiosyncratique non observée.

En exploitant les données des dispositifs MaPrimeRénov' (MPR) et Certificats d'économies d'énergie (CEE), nous estimons la valeur moyenne pondérée des travaux d'isolation à 58 000 €, avec un minimum à 49 000 € pour l'isolation du toit et 142 000 € pour l'isolation du plancher. La méthode utilisée est résumée dans l'encadré 2 et détaillée dans Vivier et Giraudet (2024). Ces valeurs, qui peuvent paraître élevées, sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par Allcott et Greenstone (2017) aux États-Unis. Elles traduisent la forte inertie de la rénovation énergétique des logements, qui ne concerne chaque année que 3 % du parc.

Encadré 2. Estimation de la valeur inobservée des travaux d'isolation

Un ménage a la possibilité de combiner jusqu'à quatre postes d'isolation, ce qui offre 16 options – 15 combinaisons de gestes plus l'option de ne pas investir. Cette configuration nous offre la possibilité de comparer les décisions de ménages aux caractéristiques identiques. Nous calibrons un modèle de choix discret sur les flux d'isolation observés, en estimant l'utilité observée comme le résidu de calibrage. Le modèle met ainsi en regard le coût d'investissement de chaque option et les bénéfices monétaires qu'elle génère (i.e., économies d'énergie réelles valorisées au prix des énergies). La rentabilité qui en résulte varie selon les caractéristiques des ménages, avec un coût de financement et un taux de préférence pour le présent qui dépendent du revenu et le coût des frictions locatives et collectives qui vient éventuellement s'ajouter. On suppose que les choix sont indépendants et identiquement distribués. Les flux annuels de rénovation sont estimés en multipliant les parts de marché des différentes combinaisons de gestes issues des statistiques MPR par le taux de rénovation global issu des statistiques des CEE[a].

Les résultats obtenus sont détaillés au tableau 9, en normalisant à zéro la valeur moyenne inobservée de ne pas investir et en incluant que 34 % des logements rénovés sont des passoires thermiques. La valeur moyenne pondérée s'établit à 58 000 €, avec un minimum à 49 000 € pour l'isolation du toit et un maximum à 142 000 € pour le plancher seul. Le coût inobservé des rénovations complètes est de 63 000 €. Les coûts tendent à être élevés pour les gestes isolés et à diminuer à mesure que l'on combine des gestes, ce qui traduit une forme de bénéfice intangible à combiner des gestes. Les coûts inobservés sont en revanche plus faibles – voire quasi systématiquement négatifs – lorsque l'on s'intéresse à l'investisseur marginal pour chaque geste, identifié par le percentile de la distribution qui correspond au taux de rénovation pour ce geste.

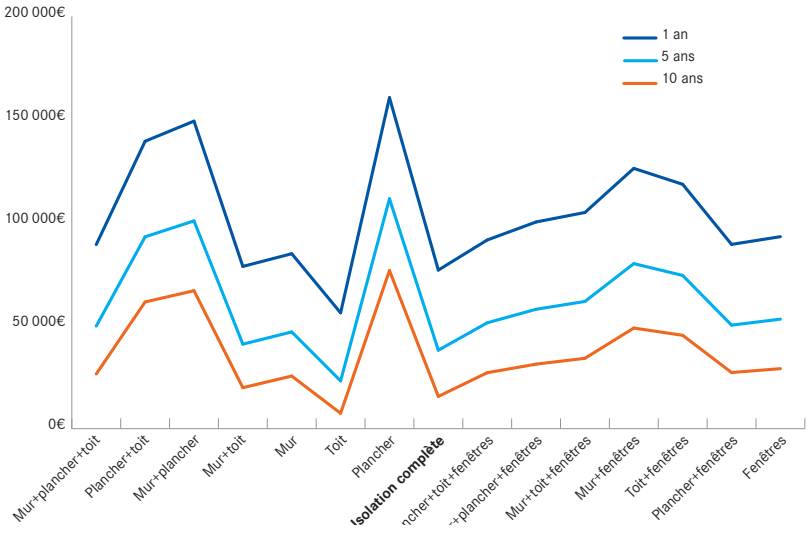
[a] Source : ONRE.

Entre autres déterminants, la valeur inobservée capte les opportunités de rénovation qui s'offrent aux ménages de façon hétérogène. Elle est donc intrinsèquement dynamique et peut varier selon l'horizon temporel considéré. Par exemple, si une occasion d'emménagement se produit une fois tous les 10 ans, elle se produira avec une probabilité de 0,1 si l'horizon temporel est de 1 an, 0,5 si l'horizon est de 5 ans et 1 si l'horizon est de 10 ans. La Figure 2 propose une analyse de sensibilité de la valeur inobservée à l'horizon temporel considéré, en cumulant les flux de rénovation sur un plus ou moins grand nombre d'années. Il apparaît clairement que les coûts moyens décroissent avec l'allongement de l'horizon temporel.

Tableau 4 : Estimation de la valeur inobservée pour différentes combinaisons de gestes (en milliers d'euros)

				Taux de rénovation	Valeur moyenne	Valeur marginale
Mur	Plancher	Toit		0,09 %	76	-23
	Plancher	Toit		0,01 %	123	-9
Mur	Plancher			0,00 %	129	-13
Mur		Toit		0,23 %	67	-19
Mur				0,21 %	73	-14
		Toit		1,99 %	49	-6
	Plancher			0,00 %	142	1
Mur	Plancher	Toit	Fenêtres	0,08 %	63	-37
	Plancher	Toit	Fenêtres	0,11 %	79	-17
Mur	Plancher		Fenêtres	0,03 %	85	-30
Mur		Toit	Fenêtres	0,01 %	88	-36
Mur			Fenêtres	0,01 %	108	-26
		Toit	Fenêtres	0,02 %	103	-15
	Plancher		Fenêtres	0,15 %	78	-13
			Fenêtres	0,11 %	81	-14
Moyennes pondérées				3,06 %	58	-10

Figure 2 : Sensibilité de la valeur inobservée à l'horizon temporel considéré



Coûts sociaux

La rénovation énergétique génère enfin des coûts pour la collectivité, qui viennent contrebalancer les bénéfices qui seront décrits ultérieurement. Mal connus, ces coûts sont en général négligés. Nous examinons ici la validité de cette approximation.

Émissions grises

La rénovation énergétique génère des émissions de CO_2 dites “grises”, liées à l’énergie utilisée pour la production des matériaux, au contenu matière des matériaux et à l’énergie consommée lors de l’exécution du chantier. Une étude récente estime le contenu carbone de l’isolation à 120 kCO_2/m^2, réduit de moitié en cas de recours à des matériaux biosourcés (Sidler, 2021). Les hypothèses sous-jacentes ne sont cependant pas détaillées par poste de rénovation. Cette étude confirme en tout cas le constat de l’Ademe (2019b) que la rénovation est nettement moins consommatrice en ressources que la construction neuve. Un contenu de référence de 0,1 tCO_2/m^2 rapporté à une surface de référence de 100 m^2 implique des émissions grises de 10 tCO_2 par rénovation. Cette valeur représente environ un tiers des émissions évitées par la rénovation, comme nous le verrons plus tard.

Coûts administratifs

En France, le soutien à la rénovation énergétique passe par des guichets publics d’aide (MaPrimeRénov’, TVA à taux réduit, éco-prêt à taux zéro) et des réglementations (réglementation thermique, label RGE, délivrance des CEE). Les premiers génèrent un coût d’opportunité des fonds publics (généralement estimé à 0,20 € par euro de subvention distribué), partiellement réduit par les revenus de la taxe carbone prélevée sur le même périmètre. Les secondes impliquent des coûts de contrôle. À notre connaissance, aucun de ces coûts n’a été évalué. En parallèle, la complexité des dispositifs d’aide est régulièrement pointée du doigt, et nombreux sont les ménages qui subissent des délais importants dans leur demande d’aide, au point parfois d’y renoncer. Enfin, les cas de fraude eux aussi largement médiatisés impliquent des coûts de remise en état non étudiés.

Ce tour d’horizon des coûts de la rénovation énergétique met en lumière leur dispersion et leur manque de visibilité. Il pointe également le manque de connaissance sur les aspects dynamiques – essentiels à l’analyse de l’équilibre économique de long terme de la politique de rénovation énergétique – et administratifs.

Les bénéfices de la rénovation énergétique

Les bénéfices de la rénovation énergétique prennent différents aspects — financiers, climatiques, sanitaires voire géopolitiques. Ils résultent de la valorisation économique des économies d’énergie, dont la quantification est sujette à certains écueils qu’il convient d’examiner en détail.

La matérialité des économies d’énergie

Une critique récurrente de la rénovation énergétique est qu’elle génère moins d’économies d’énergie qu’espéré. On pourrait arguer qu’il n’y a rien d’extraordinaire à ce qu’une performance technologique mesurée in situ diffère de celle prédite sous conditions contrôlées — l’évaluation des émissions des véhicules vient récemment de le rappeler (Cour des comptes européenne, 2024). Toutefois, dans le cas de la rénovation énergétique, des biais systématiques s’observent, méritant une analyse approfondie.

Les économies d’énergie théoriques

La performance d’une rénovation énergétique dépend d’interactions complexes entre la résistance thermique de l’enveloppe (qui doit être corrigée des déperditions et infiltrations), le rendement du système de chauffage, et un ensemble de facteurs climatiques (température extérieure), architecturaux (exposition déterminant les apports solaires) et comportementaux (température de chauffage et nombre de pièces chauffées). La prise en compte de ces interactions nécessite l’emploi de logiciels de simulation thermique. En France, le calcul de la consommation théorique d’un logement s’appuie sur la méthode dite 3CL, elle-même basée sur la méthodologie européenne EN ISO 13790. La performance d’une rénovation est prédite en calculant la consommation théorique avant et après travaux. De cette performance en énergie finale est déduite une consommation en énergie primaire, qui permet de déduire le DPE du logement en fonction de conventions — changeantes — édictées par l’État[11]. Afin de s’affranchir des aléas réglementaires, nous prenons la consommation d’énergie finale comme principale variable d’intérêt dans la suite de l’analyse.

Les économies d'énergie réelles

En pratique, les économies d'énergie mesurées in situ sont nettement inférieures à celles prédites par les modèles de simulation thermique. Cet écart, couramment appelé energy performance gap, a été identifié dès les premières évaluations de programmes de *demand-side management* aux États-Unis à partir des années 1980 (Hirst and Goeltz, 1985; Joskow and Marron, 1992). Il fait l'objet d'un regain d'intérêt depuis une dizaine d'années, porté à la fois par la hausse des dépenses publiques consacrées à la rénovation énergétique et le « tournant de la crédibilité » en économie appliquée engendré par l'avènement de techniques statistiques permettant d'établir plus rigoureusement la causalité des effets (Giraudet et Missemer, 2023). Pour ne citer que l'étude la plus médiatisée, Fowlie et al. (2018) identifient un écart de 70 % dans le cadre d'un programme de rénovation mis en œuvre dans le Michigan. En France, différentes études ont mis en évidence un écart du même ordre de grandeur (Allibe, 2009; Blaise et Glachant, 2019; Charlier, 2021).

Plusieurs causes sont généralement invoquées pour expliquer ces écarts. La plus fréquente est l'effet rebond, qui correspond à une utilisation plus intensive du système de chauffage après rénovation, par exemple via une hausse de la température intérieure ou une augmentation de la surface chauffée. Le mécanisme sous-jacent est décrit à l'encadré 3. La non-prise en compte de ces ajustements conduit naturellement à sous-estimer la consommation après travaux, et donc à surestimer les économies d'énergie. Les estimations de l'effet rebond varient grandement d'une étude à l'autre, en raison d'une difficulté intrinsèque à relier consommation d'énergie et ajustements comportementaux, dont le suivi nécessite de lourds protocoles d'instrumentation. Ainsi, sur la base des déclarations d'un sous-échantillon de leur étude, Fowlie et al. (2018) identifient un effet rebond négligeable, de l'ordre de quelques pourcents d'augmentation de la consommation après travaux. À l'inverse, à partir de diverses sources de données françaises, Belaïd et al. (2018, 2020) identifient un effet rebond élevé, variant de 53 % à 86 % selon les énergies de chauffage et les niveaux de consommation des ménages. La majorité des études, néanmoins, estiment l'effet rebond entre 10 % et 30 %, soit une valeur centrale de 20 % (Sorrell et al., 2009).

La deuxième source d'écart la plus fréquemment invoquée est la surestimation de la consommation avant travaux, parfois appelée effet « prébond ». Diamétralement opposé à l'effet rebond, il conduit à une surestimation des consommations d'énergie. Il est par ailleurs du même ordre de grandeur – 30 %, comme estimé par exemple en Allemagne (Galvin et Sunikka-Blank, 2012). L'effet prébond est typiquement dû à un paramétrage erroné des modèles de simulation (généralement dû à un usage excessif des valeurs par défaut), qui reflète un problème d'erreur de mesure. L'erreur semble toutefois opérer systématiquement dans le même sens, ce qui révèle un biais plus fondamental dans la prise en compte des comportements. Le manquement le plus significatif concerne les ménages modestes, qui tendent à restreindre leur consommation de chauffage par rapport aux valeurs supposées (Allibe, 2009; Charlier, 2021).

Les défauts de qualité constituent la troisième source d'écart couramment invoquée. On fait référence ici aux malfaçons qui se produisent lors de la pose de l'isolation ou l'installation des équipements de chauffage. Largement médiatisés en France, notamment suite aux « arnaques » des travaux d'isolation à 1 €[12], ils sont néanmoins moins étudiés que les effets rebond et prébond. Par rapport à ces derniers, ils se produisent à un maillon intermédiaire de la chaîne – pendant la rénovation. Les travaux sujets à malfaçon génèrent typiquement une surconsommation après travaux d'environ 40 % (Enertech, 2021a), ce qui réduit d'autant les économies d'énergie. Là encore, leur caractère systématique révèle un mécanisme économique particulier – une asymétrie d'information entre entrepreneur et maître d'ouvrage. Il est en effet établi que, plus les actions prises par les premiers revêtent un caractère inobservable (l'isolation en particulier, dont la qualité ne peut être vérifiée sans détruire ce qui vient d'être posé), plus les défauts de qualité sont fréquents et graves (Laprie et al., 2024) et moins les économies d'énergie sont importantes (Giraudet et al., 2018), dans des proportions conformes aux 40 % révélés par Enertech (2021a).

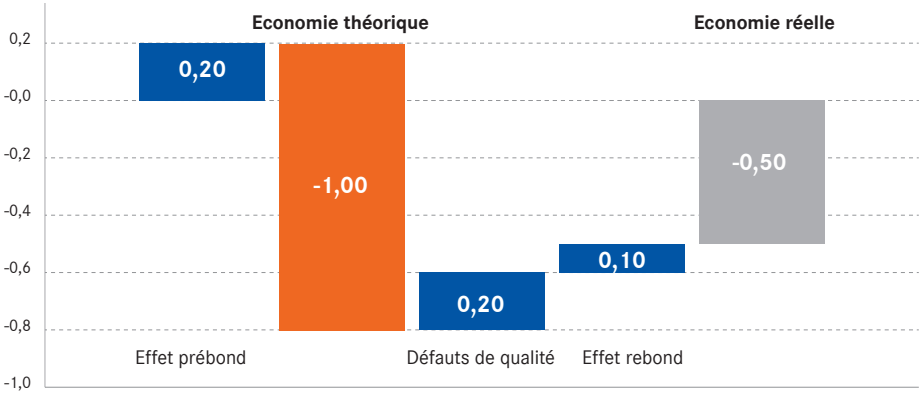
Ces trois mécanismes ont longtemps été analysés séparément. Une étude récente les analyse conjointement, permettant ainsi de les hiérarchiser. En exploitant les données de 9 800 rénovations réalisées dans l'Illinois à l'aide de techniques de machine learning, Christensen et al. (2021) identifient un écart de 51 %, dont ils attribuent 42 % aux problèmes de qualité, 40 % aux erreurs de modélisation et 6 % à l'effet rebond (14 % restant inexpliqués). Ces valeurs sont conformes à celles passées en revue ci-dessus, sauf pour l'effet rebond, qui apparaît relativement modeste.

[11] L'énergie primaire correspond à l'énergie telle qu'elle se présente dans la nature : bois, pétrole, gaz, uranium avant toute transformation. L'énergie finale correspond à celle qui est livrée et facturée au consommateur. Par convention, énergie primaire et finale sont confondues, sauf pour l'électricité, où l'on considère que 1 kWh d'électricité finale correspond à 2,3 kWh d'énergie primaire, en raison des pertes liées à la transformation de sources primaires et au transport et à la distribution de l'énergie. Pour une mise en perspective des évolutions récentes du DPE, voir Noguès et al. (2024).

[12] Voir par exemple *Les Échos*, « Les arnaques sur l'isolation des combles à 1 euro se multiplient », 8 octobre 2019.

Sur la base de cette revue de littérature, les ordres de grandeur s'établissent à 50 % pour l'écart entre les économies d'énergie théoriques et réelles, dont 40 % (soit 20 points de pourcentage) est dû aux problèmes de qualité, 40 % (20 p.p.) aux erreurs de modélisation et 20 % (soit 10 p.p.) à l'effet rebond. Cette décomposition est illustrée à la figure 3.

Figure 3 : Décomposition de l'écart entre économies d'énergie réelle et théorique



Bénéfices privés

Les économies d'énergie peuvent être valorisées de différentes façons par les ménages.

Économies monétaires

Le bénéfice privé le plus évident de la rénovation énergétique est la réduction de facture énergétique qu'elle occasionne, généralement calculée en multipliant le flux annuel d'économies d'énergies réelles par une séquence de prix des énergies. En apparence simple, cette approche implique toutefois des présupposés importants. D'abord, elle n'est pas exempte d'incertitudes, puisque les prix futurs de l'énergie sont par essence inconnus. Ensuite, elle n'est valide que si les prix des énergies reflètent leur coût social (hors considération pour le carbone) – ce qui reste à démontrer, la coexistence entre des prix de l'énergie réglementés et non réglementés entretenant une certaine confusion dans le secteur résidentiel.

Gains de confort

En plus de réduire la facture énergétique, l'investissement d'efficacité énergétique occasionne des gains de confort. Essentiellement physiologique, la notion de confort thermique est influencée par des paramètres technologiques (température des parois, circulation d'air) que la rénovation permet d'améliorer. En termes économiques, elle se traduit par des gains d'utilité, dont la valeur financière de l'effet rebond fournit une bonne approximation.

Capitalisation

Les bénéfices privés – économie d'énergie et gain de confort – constituent un flux qui perdure aussi longtemps que dure l'investissement. Avec une durée de vie moyenne de 25 ans (16 à 20 ans pour les systèmes de chauffage et 30 à 35 ans pour l'isolation), cet horizon temporel dépasse largement la durée de résidence moyenne d'un ménage dans son logement, qui se situe autour de 7 ans (environ 10 ans pour les propriétaires-occupants et 3 ans pour les locataires). Lors d'une mutation du logement, les bénéfices sont donc transférés de l'occupant actuel aux occupants ultérieurs. Le coût d'investissement, lui, est en revanche supporté par le seul investisseur initial, qui ne l'a pas nécessairement rentabilisé au moment de la mutation. Toutefois, il peut espérer en récupérer la valeur résiduelle en augmentant le prix de vente du bien ou le loyer payé par un éventuel locataire.

La capitalisation de la valeur des économies d'énergie dans la valeur immobilière porte le nom de « valeur verte ». Sous l'hypothèse d'un fonctionnement parfait des marchés, elle est égale à 1, chaque euro d'économie d'énergie cumulée actualisée augmentant la valeur du bien de 1 €. En pratique, les marchés immobiliers sont entachés de multiples frictions, qui peuvent générer des écarts à cette valeur – à la hausse comme à la baisse. Nous revenons sur ces frictions ultérieurement.

Bénéfices sociaux

Les économies d'énergie sont par ailleurs à la source de multiples bénéfices sociaux.

Emissions évitées

Les économies d'énergie réelles génèrent des réductions d'émissions de gaz à effets de serre, plus ou moins importantes selon le contenu carbone des énergies, qui par convention varie de 30 gCO_2/kWh pour le bois-énergie à 324 gCO_2/kWh pour le fioul domestique[13]. Il faut cependant rappeler que le contenu carbone de l'électricité varie de façon journalière en fonction des appels de puissance et de façon saisonnière en fonction des conditions climatiques. Par ailleurs, les contenus carbone de toutes les énergies sont susceptibles de varier en fonction des investissements réalisés dans le système énergétique (pénétration du solaire et de l'éolien, du biogaz, etc.). Une économie annuelle de 1,6 tCO_2 (typique d'une rénovation performante) cumulée sur 25 ans se traduit par des économies de 28 tCO_2 – l'équivalent de trois années d'émissions moyennes d'un Français.

Ces émissions évitées doivent ensuite être valorisées à la valeur sociale du carbone (VSC). En France, cette valeur a été calculée comme le coût d'opportunité de la neutralité carbone à l'horizon 2050 (Quinet, 2019). Elle s'établit à 152 €/tCO_2 en 2024 et 250 €/tCO_2 en 2030. Une partie de cette valeur est déjà incluse dans les prix des énergies, puisque les consommations de gaz et fioul sont sujettes à une taxe carbone de 44,60 €/tCO_2 et que le prix de l'électricité est en partie déterminé par le prix des quotas CO_2 sur le marché d'échange européen (qui a fluctué entre 50 € et 100 €/tCO_2 depuis le 1er janvier 2022). Comme l'indique le Tableau 5, la fraction carbone reste faible dans le prix des énergies actuel, mais s'établirait à près de 40 % pour les énergies fossiles pour une VSC de 200 €/tCO_2.

Tableau 5. Prix des énergies et composante carbone

	Électricité	Gaz naturel	Fioul domestique	Bois énergie
Part des logements	38 %	38 %	9 %	11 %
Prix hors composante carbone €/kWh	0,170	0,090	0,100	0,060
Taxe carbone à 44,60 €/tCO_2				
Contenu carbone appliqué pour la taxe carbone gCO_2/kWh	0	204	271	0
Composante carbone€/kWh	0,000	0,009	0,012	0,000
Prix total €/kWh	0,170	0,099	0,112	0,060
Fraction carbone	0 %	9 %	11 %	0 %
Valeur du carbone à 200 €/tCO_2				
Contenu carbone de la RE 2020 gCO_2/kWh	79	227	324	30
Composante carbone €/kWh	0,016	0,045	0,065	0,006
Prix total €/kWh	0,186	0,135	0,165	0,066
Fraction carbone	9 %	34 %	39 %	9 %

Réduction de l'exposition au froid

Le chauffage est en réalité bien plus qu'un service de confort – c'est un sujet de santé publique. Un logement mal chauffé expose en effet ses occupants à des maladies cardiovasculaires et respiratoires. Ces effets se produisent lorsqu'une mauvaise performance énergétique du logement se combine à un faible revenu de l'occupant, qui se trouve dans l'incapacité de supporter une dépense de chauffage élevée (Charlier et Legendre, 2022).

Longtemps ignorés, ces effets de santé ont récemment été estimés par un groupe de travail coordonné par France Stratégie. Dervaux et Rochaix (2022) estiment ainsi que les logements dont la consommation théorique de chauffage dépasse 378 kWh énergie finale/m²/an exposent leurs occupants à un risque de syndrome coronaire aigu, pneumonie et infection respiratoire sévère. Ces maladies se produisent dans 1 cas sur 18, engendrant alors un coût social de 135 000 €, soit un coût moyen par logement exposé de 7 500 €. La probabilité d'occurrence de 1/18 varie en réalité

[13] Source : RE 2020.

selon le revenu de l'occupant – 1/4 pour les ménages situés sous le seuil de pauvreté, 1/20 pour les ménages des trois premiers déciles et 1/320 pour les ménages des catégories supérieures. Le coût social se décompose de la façon suivante :

- Coûts de soin : la survenance de maladies occasionne des frais médicaux (consultation, médicaments) à hauteur de 6 000 €, soit un coût moyen par logement exposé de 400 €
- Coûts de morbidité : les maladies occasionnent également des pertes d'utilité (incapacité), estimées par France Stratégie à 22 000 € par événement, soit un coût moyen par logement exposé de 1 400 €
- Coûts de mortalité : enfin, dans 3 % des cas, les maladies conduisent à un décès, dont le coût social correspond à la valeur de la vie statistique de 3,4 millions d'euros 2018 (Quinet, 2013), soit 5 700 € par logement concerné.

Cette décomposition est résumée au Tableau 6a. Le Tableau 6b décrit la distribution des coûts sur les quatre principaux segments du parc exposés, en fonction de la répartition du revenu et de la performance énergétique dans le parc.

Tableau 6a. Coûts de santé

	Coût individuel	Occurrence	
Dépenses de soin	6 000 €	1/4 si < seuil de pauvreté 1/20 si < D3 1/320 si au-delà	400 €
Mortalité	22 000 €		1 400 €
Morbidité	3 400 000 €	1/18*3 %	5 700 €
Total			7 500 €

Tableau 6b. Distribution des coûts de santé dans le parc de logements

	D1-D3	D4-D10
G	6 539 €	143 €
F	4 231 €	93 €

Ces estimations, les meilleures disponibles à ce jour, appellent deux remarques. Sur le plan conceptuel, l'interprétation des effets de morbidité et de mortalité est ambiguë. Dans la mesure où ils sont directement subis par le ménage, leur persistance peut s'assimiler à une anomalie comportementale : les ménages sous-estiment les gains de santé de leur décision de rénovation de leur logement. Leur restriction aux trois premiers déciles les lie néanmoins à des contraintes de crédit, qui empêchent les ménages modestes d'investir pour les éviter ou aux frictions du parc locatif lorsque c'est au propriétaire bailleur de réaliser les travaux (cf. supra). Dans cette optique, il semble légitime de traiter les effets de santé comme de pures externalités. Sur le plan méthodologique, ces premières estimations appellent d'autres travaux visant à corroborer le lien de cause à effet entre la mauvaise performance thermique et les effets de santé.

Autres bénéfices sociaux

En complément à la réduction de l'exposition au froid, d'autres bénéfices de santé peuvent être attribués à la rénovation énergétique. En l'absence d'estimations disponibles, nous nous contentons ici de les lister, en appelant à davantage d'études sur le sujet :

- Réduction de la pollution aux particules fines en cas de remplacement d'un système de chauffage au bois par un modèle plus performant (Yvon et Yvroud, 2021)
- Réduction de l'exposition à l'humidité, qui souvent se combine à l'exposition au froid pour générer des maladies cardiovasculaires et respiratoires (Dervaux et Rochaix, 2022)
- Réduction de l'exposition aux vagues de chaleur par une utilisation plus efficace des systèmes de climatisation

Enfin, il faut rappeler que les préoccupations de maîtrise de la demande d'énergie sont nées en réaction aux chocs pétroliers des années 1970 (Martin et al., 1998), bien avant que l'enjeu climatique ne prenne le dessus comme justification principale à partir des années 2000[14]. À cette période, des conflits internationaux motivaient une quête d'indépendance énergétique. La guerre en Ukraine a spectaculairement ravivé cet enjeu, créant une crise majeure sur les marchés énergétiques européens qui a conduit la France à engager un effort de sobriété important, qui s'est traduit par

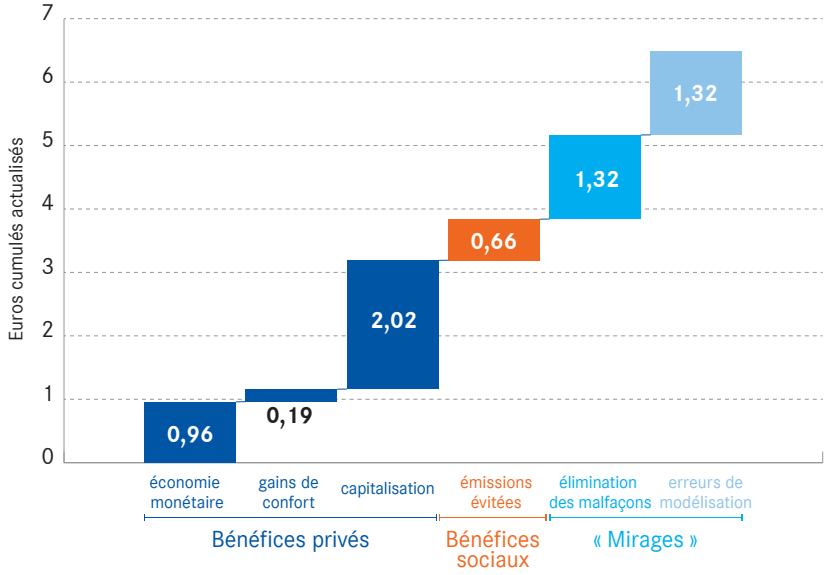
une réduction de consommation électrique de 9 % à l'hiver 2023 (RTE, 2023). Les efforts revendiqués au titre de l'action climatique n'ont encore jamais atteint de tels niveaux.

Actualisation

Dans une perspective d'analyse socio-économique, les bénéfices doivent être cumulés et actualisés sur la durée de vie de l'investissement. La valeur usuelle pour le taux d'actualisation social en France est de 3,2 % (France Stratégie, 2021). Par la suite, nous appliquons ce taux à une durée de vie de 25 ans, qui correspond à la moyenne entre la durée de vie des systèmes de chauffage (16 à 20 ans) et celle de l'isolation (30 à 35 ans).

Sous ces hypothèses, la Figure 7 illustre la décomposition des bénéfices directement liés aux économies d'énergie, en distinguant les bénéfices privés, eux-mêmes décomposés en gains financiers, gains de confort et gains patrimoniaux, les bénéfices climatiques et les bénéfices non réalisés dus aux défauts de qualité et à l'effet pré-bond. Ces « mirages » sont valorisés ici à leur valeur privée plus sociale, soit à un prix de l'énergie incluant une VSC de 200 €/tCO_2. On notera que ces deux mirages n'ont pas le même statut : si l'élimination des malfaçons augmente effectivement la valeur sociale, la persistance de l'effet pré-bond la gonfle artificiellement.

Figure 5 : Décomposition des bénéfices directement liés aux économies d'énergie



Note : pour une économie annuelle réelle de 1 kWh et un vecteur énergétique moyen (prix = 0,15 €/kWh ; contenu carbone = 150gCO_2/kWh), avec l'hypothèse d'une durée de résidence dans le logement de 7 ans

Les barrières à l'investissement

Les coûts et bénéfices détaillés ci-dessus ne sont acquis que lorsque l'investissement est réalisé. Pour en arriver là, les ménages candidats doivent toutefois surmonter un ensemble de barrières à l'investissement. Tous n'y parviennent pas, ce qui in fine crée un déficit d'efficacité énergétique – l'Energy Efficiency Gap (Jaffe et Stavins, 1994). Historiquement, le déficit a été mis en évidence par des taux d'actualisation anormalement élevés pour rationaliser les investissements observés (Giraudet et Missemer, 2013) – de l'ordre de 10 % à 30 %, contre une valeur usuelle de 5 % à 7 % (Train, 1985). Cette pratique tend néanmoins à confondre toutes les barrières en une seule, gommant ainsi leur variété et leurs implications politiques distinctes.

Nous passons ici en revue ces barrières, en distinguant les défaillances de marché (externalités, concurrence imparfaite, asymétries d'information), qui appellent une intervention correctrice de l'État et les écarts à la rationalité, qui

[14] Dans une perspective historique encore plus longue, on peut rappeler que les toutes premières réflexions sur l'efficacité énergétique sont nées de la problématique d'épuisement des ressources au milieu du XIXe siècle (Giraudet et Missemer, 2023).

peuvent justifier des interventions de type nudge, néanmoins débattues. Nous proposons des estimations en forme réduite pour chacune, dans l'optique de les extraire du taux d'actualisation et ne dédier ce dernier qu'à la préférence pure pour le présent.

Défaillances de marchés

Nous nous concentrons ici sur trois défaillances importantes, qui s'ajoutent à celles présentées plus haut – l'externalité climatique, les externalités de santé et les asymétries d'information à l'origine des défauts de qualité. Faute d'estimations empiriques, nous n'abordons pas les problèmes de concurrence imparfaite à l'origine de possibles effets inflationnistes en réponse à des chocs d'offre (par exemple l'introduction du label RGE) ou de demande (suite par exemple à l'obligation pour les bailleurs de rénover les passoires thermiques).

Les asymétries d'information sur les marchés du crédit

La dernière enquête TREMI révèle que la contrainte financière constitue de loin la principale barrière à l'investissement (ONRE, 2021, p. 91). Si le crédit offre une solution pour lever cet obstacle, il n'y parvient que partiellement, en raison d'asymétries d'information. Dans l'incapacité d'observer parfaitement le risque associé à l'investissement, les banques l'approximent par un critère observable – le revenu du ménage, par exemple en imposant des taux maximums d'endettement. Bien que corrélés, revenu et risque ne se confondent pas, de telle sorte que l'application d'un tel critère prive des ménages modestes mais solvables d'accès au crédit (Stiglitz et Weiss, 1981). Les subventions à l'investissement et prêts bonifiés offrent une solution à cette défaillance. En France, le recours à l'éco-prêt à taux zéro est ainsi plus marqué chez les propriétaires à bas revenu, ce qui confirme indirectement l'importance des contraintes de crédit (Eryzhenskiy et al., 2023).

Dans la suite du Focus, nous modélisons cette défaillance de marché comme un refus de crédit pour les ménages dont l'annuité de remboursement dépasse 5 % du revenu annuel. Nous reprenons ici une hypothèse de Dolques et al. (2022), qui demande encore à être étayée empiriquement. Dans la mesure où les ménages dans cette situation ne disposent pas non plus d'épargne, le refus de crédit équivaut ici à un défaut d'investissement.

Les asymétries d'information sur les marchés immobiliers

Comme évoqué plus haut, les marchés immobiliers, s'ils fonctionnaient parfaitement, fixeraient la valeur verte à 1, chaque euro d'économie d'énergie cumulée actualisée se traduisant par 1 € de plus-value à la vente ou 1 € d'annuité de hausse de loyer. Cette mécanique est cependant contrariée par le caractère partiellement inobservable de la performance énergétique. Il est par exemple impossible d'apprécier le niveau d'isolation à l'œil nu sans détruire une partie des murs et des plafonds. Dans ce contexte, l'acheteur (acquéreur ou locataire) est peu enclin à payer plus cher pour des bénéfices incertains.

Le déploiement du diagnostic de performance énergétique (DPE) en Europe à partir de 2007 visait à résoudre ce problème. Il a incidemment fourni la matière à de nombreuses évaluations empiriques de la valeur verte. L'analyse d'une trentaine d'études (21 liées à des ventes et 9 à des locations) conclut aux résultats suivants : l'étiquette DPE se reflète dans le prix des logements, dans une proportion proche de 1 pour 1, avec toutefois un gradient plus ou moins fort selon l'adéquation entre offre et demande sur le marché local ; le gradient est en revanche très faible concernant les loyers (Giraudet, 2020). Cette dichotomie explique pourquoi, en France comme ailleurs, la performance énergétique du parc locatif privé est en moyenne plus faible que celle du parc des propriétaires-occupants (Baba-Moussa et La Saout, 2023). La faiblesse de la valeur verte locative peut s'expliquer par des contraintes réglementaires qui limitent les possibilités de répercuter le coût des travaux dans les loyers[15].

Dans la suite du Focus, nous considérons donc la valeur verte vénale égale à 1 et la valeur verte locative très limitée. Nous considérons que les logements loués subissent un coût implicite de 18 000 € qui vient grever la rentabilité de la rénovation. Estimé en calibrant un modèle d'investissement sur les flux de rénovation observés (voir encadré 2), ce montant est en général supérieur à la valeur moyenne du flux d'économies d'énergie. Cette différence implique que le

[15] En cours de bail, une révision à la hausse après travaux n'est possible qu'en cas d'accord préalable entre le locataire et le bailleur. Lors du renouvellement de bail, la révision des loyers est réglementée dans les zones tendues, et les possibilités de hausses de loyers suite à des travaux de rénovation sont limitées. Dans les zones tendues, la hausse des loyers ne peut dépasser 15 % du coût des travaux ou 50 % de la différence entre l'ancien loyer et les loyers comparables dans la zone géographique. Dans les zones soumises de plus au contrôle des loyers, les loyers ne peuvent dépasser un certain montant de loyer majoré (+20 % du loyer de référence à Paris). Le loyer d'un logement qui serait déjà au plafond ne peut donc théoriquement pas être augmenté après une rénovation à Paris.

bailleur, en plus de n'avoir aucun espoir de répercuter la valeur de son investissement dans le loyer, subit des coûts supplémentaires, liés par exemple à la nécessité d'offrir une solution de relogement à son locataire pendant la durée des travaux.

Les problèmes de coordination en logement collectif

Les décisions de rénovation énergétique dans l'habitat collectif impliquent souvent plusieurs parties prenantes, créant ainsi des problèmes de coordination. D'une part, la rénovation énergétique des immeubles collectifs passe souvent par des décisions de copropriété, typiquement sujettes à un problème de bien public – les copropriétaires ne jouissent pas nécessairement des bénéfices à hauteur de leur contribution. Ce problème peut être résolu en ajustant les quotes-parts d'investissement, comme c'est par exemple le cas pour le financement d'un ascenseur, pour lequel la contribution demandée augmente avec l'étage de résidence. Néanmoins, cette règle n'est pas appliquée aux travaux de rénovation énergétique, comme l'isolation du toit, qui reste financée aux tantièmes, pénalisant potentiellement les résidents des étages les plus bas.

D'autre part, indépendamment des décisions de copropriété, le pouvoir de décision des copropriétaires ne s'étend pas à l'ensemble des surfaces déperditives de leur logement. Des transferts de chaleur peuvent donc se produire entre logements adjacents, générant ainsi des externalités — négatives comme positives — qui dans tous les cas diluent les bénéfices de l'investissement, puisque, comme on l'a vu, seule une maîtrise totale de toutes les surfaces déperditives permet de maximiser les économies d'énergie.

Ces problèmes sont remarquablement peu étudiés, et nous ne disposons pas d'estimation de leur valeur. Dans la suite du Focus, nous les assimilons à un coût de 14 000 € subi par les propriétaires d'appartements, estimé par l'approche introduite à l'encadré 2. Les frictions locatives et collectives ainsi obtenues sont additives, de telle sorte que, pour les bailleurs d'appartements, les 14 000 € de friction collective s'ajoutent aux 18 000 € de friction locative, soit un coût additionnel de 32 000 € par rapport aux propriétaires-occupants en maison individuelle.

Écarts à la rationalité

Parallèlement aux défaillances de marché, les agents économiques peuvent avoir un comportement qui s'éloigne la rationalité postulée dans les modèles microéconomiques standards. Le bien-fondé des nudges, qui visent à corriger ces effets, est débattu sur le plan conceptuel, notamment pour leur aspect paternaliste. Il n'en demeure pas moins que les écarts à la rationalité affectent l'action des instruments traditionnels de correction des défaillances de marché, et doivent donc être pris en compte dans l'action publique.

Anticipation myope des prix des énergies

Pour calculer la rentabilité d'un investissement d'efficacité énergétique, il est nécessaire de formuler des anticipations sur les prix futurs des énergies. L'anticipation myope, qui consiste à appliquer le prix de l'énergie actuel sur tout l'horizon d'investissement, constitue l'hypothèse la plus routinière. Cette heuristique est avérée dans le secteur automobile aux États-Unis, où elle semble offrir aux particuliers une couverture au risque assez efficace – sauf dans les périodes de crise, où elle est de toute façon délaissée en anticipation de rebonds (Anderson et al., 2013). Faute d'études similaires, nous supposons dans la suite du Focus qu'elle s'applique dans le logement comme dans les transports.

Biais pour le présent

De nombreuses études indiquent qu'en matière de consommation énergétique, les consommateurs sont court-termistes, exigeant des rendements d'investissement supérieurs à ceux offerts par les marchés financiers. Cette préférence marquée pour le présent est souvent déduite des taux d'actualisation élevés qui rationalisent les décisions d'investissement. Les deux ne se confondent pourtant pas, puisque, comme évoqué précédemment, les taux d'actualisation implicites ont longtemps été l'unique révélateur de l'ensemble des barrières à l'investissement – coût de financement, contrainte de crédit, frictions dans les parcs locatif et collectif.

En France, Solyarova (2016) a estimé le taux de préférence pure pour le présent des ménages en matière de rénovation énergétique, en l'isolant d'autres paramètres dans le cadre d'une expérience de choix discret[16]. Elle obtient un taux moyen de 8,3 %, qui varie en fonction du revenu, comme décrit au Tableau 7. Il est important de souligner que ces taux

sont nets du coût de financement auquel ont accès les différentes catégories de revenu. Le fait qu'ils soient malgré tout corrélés au revenu est révélateur de la façon dont la précarité limite les perspectives financières des consommateurs.

Tableau 7. Distribution de la préférence pour le présent (source : Stolyarova, 2016)

Quintile de revenu	Taux de préférence pour le présent
C1	19,0 %
C2	10,3 %
C3	5,2 %
C4	5,2 %
C5	3,2 %

Quantification du gisement de rénovation énergétique

Les coûts, bénéfices, et barrières à l'investissement ayant été explicités, tous les éléments sont à présent réunis pour évaluer la rentabilité agrégée des rénovations énergétiques, en prenant en compte l'hétérogénéité du parc de logements. La méthodologie employée est détaillée dans Vivier et Giraudet (2024).

Méthodologie

Parc de logements

Le parc de logements constitue l'assise de l'analyse de rentabilité agrégée. En 2023, le parc de logements français compte 37 millions de logements, dont 30 millions de résidences principales (Baba-Moussa et Le Saout, 2023). Si la plupart des caractéristiques du parc sont bien connues grâce aux données fiscales, c'est moins le cas pour la performance énergétique, dont le suivi n'a commencé qu'à la fin des années 2000 avec la mise en place du DPE[17]. Le croisement des caractéristiques socio-économiques (revenu, statut d'occupation, type d'habitat, énergie de chauffage) et de la performance énergétique est aujourd'hui réalisé à partir de la base des DPE, qui contient des informations sur environ 13 millions de logements existants. L'incomplétude de la base implique des biais, qui ne peuvent être qu'imparfaitement corrigés (Giraudet et Vivier, 2022). Il en résulte une certaine incertitude autour de la principale variable d'intérêt pour l'action publique – le nombre de passoires thermiques. La dernière évaluation du Service des données et études statistiques (SDES) l'évalue à 5 millions en 2018, là où l'enquête Phébus, menée en 2012 à partir d'une procédure d'échantillonnage fine, l'évaluait à 8 millions. Les fréquentes modifications du mode de calcul des étiquettes DPE viennent par ailleurs ajouter de l'incertitude à ces estimations.

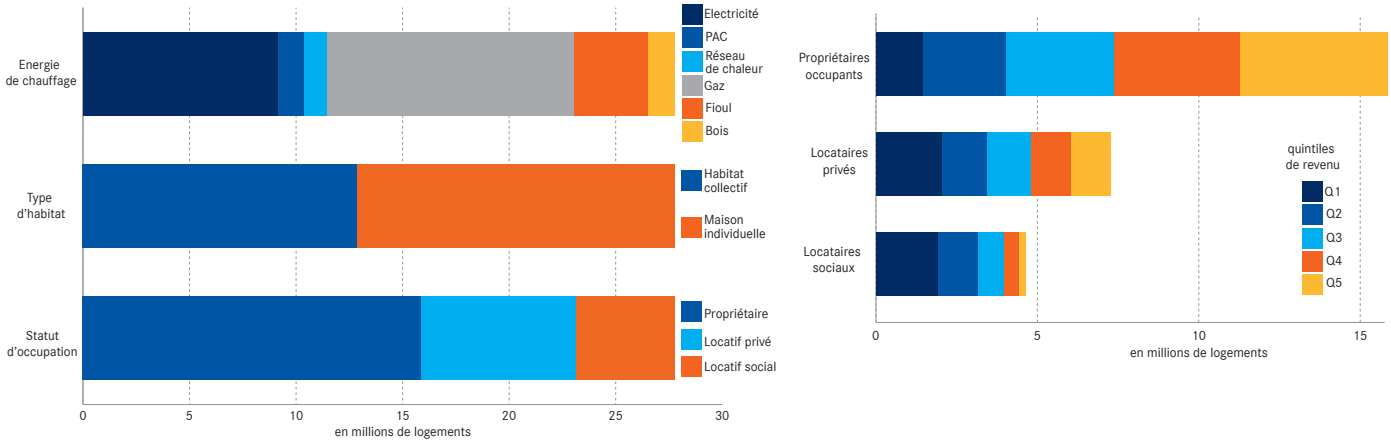
Pour notre analyse de gisement, nous nous basons sur les données fournies par le SDES pour 27 millions de résidences principales à l'année 2018. Nous croisons ces données à celles de la base DPE pour obtenir la distribution de la performance de l'isolation des quatre postes et la surface des logements. En considérant 5 systèmes de chauffage différents (gaz, fioul, bois, radiateurs électriques et PAC), 5 niveaux d'isolation pour les murs, 4 pour le toit, 4 pour le plancher et 3 pour les fenêtres, nous obtenons 1 200 archétypes techniques. En couplant ces archétypes à deux types d'habitat (individuel et collectif), 3 statuts d'occupation (propriétaires-occupants, propriétaires-bailleurs, bailleurs sociaux), 5 niveaux de revenu des propriétaires et 5 niveaux de revenu des occupants, nous obtenons un total de 180 000 triplets (logement, propriétaire, occupant), ou « segment » du parc. Nous déterminons enfin l'étiquette DPE-énergie du logement en utilisant la méthodologie 3CL.

[16] L'auteur identifie également une préférence pour le statu quo concernant l'énergie de chauffage utilisée.

[17] Les bases de données fiscales contiennent des données sur l'âge de construction du logement, qui ne fournit qu'une approximation de la performance énergétique.

La Figure 6a décrit la distribution des principales caractéristiques du parc – performance énergétique, système de chauffage, type d'habitat, statut d'occupation. La Figure 6b décrit la distribution des quintiles de revenu parmi les propriétaires et occupants.

Figure 6. Structure du parc de logements pour l'année 2018



Hypothèses

Sur chaque segment du parc, nous calculons la rentabilité des rénovations en fonction des caractéristiques physiques et socio-économiques du segment, en utilisant les paramètres introduits précédemment concernant les coûts de financement (tableau 4), les prix des énergies (tableau 5), les coûts de santé (tableau 6b), les taux de préférence pour le présent (tableau 8), les estimations des frictions locatives (18 000 €) et collectives (14 000 €) et une VSC de 200 €/tCO_2, intermédiaire entre les valeurs préconisées pour 2024 et 2030 (Quinet, 2019). Ces hypothèses sont synthétisées dans les premières lignes du Tableau 10. L'écart entre consommation d'énergie théorique et réelle est paramétré à partir des travaux de Cayla et Osso (2013). Il s'élève en moyenne à 60%, avec un effet rebond d'en moyenne 20 %.

Sur le plan technique, nous nous concentrons sur les coûts détaillés dans les tableaux 1 et 2. Nous ignorons les coûts induits, dont les estimations sont trop parcellaires, et la valeur inobservée. Nous ignorons également la VMC (dont le coût moyen s'établit à 4 000 € pour un système double flux), qui, bien qu'essentielle au bon achèvement d'une rénovation, n'impacte pas directement sa performance intrinsèque. Enfin, nous raisonnons à système énergétique constant pour évaluer spécifiquement la contribution de la demande d'énergie à la réduction des émissions. Les biais potentiels qu'impliquent ces hypothèses sont discutés dans la dernière partie du Focus.

Solution technique

En ignorant la VMC, chaque ménage fait face à un maximum de possibilités de rénovation de son logement, selon qu'il isole ou pas chacune des quatre composantes de l'enveloppe (toit, fenêtre, plancher, murs) et qu'il change ou pas son système de chauffage. Une même combinaison de gestes va générer des économies d'énergie différentes selon les niveaux d'isolation et le système de chauffage de départ. Parmi ces 32 options, il existe un optimum privé et un optimum social. Pour s'assurer que les rénovations considérées soient compatibles avec l'objectif de neutralité carbone, nous sélectionnons les optima privés et sociaux du sous-ensemble de combinaisons de gestes qui permettent d'atteindre le niveau BBC[18].

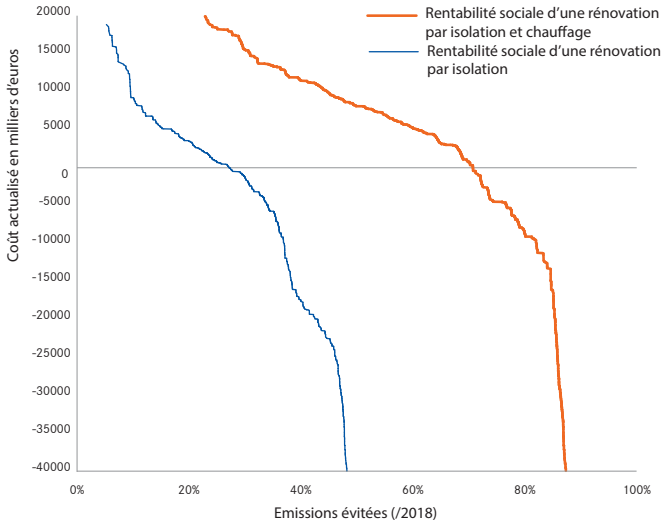
Nous considérons ensuite deux voies pour atteindre ce niveau – par l'isolation uniquement, ou en couplant isolation et adoption d'une PAC. Nous limitons les PAC aux systèmes air-eau en substitution aux chaudières au fioul ou au gaz. Nous sélectionnons, pour chaque segment, l'optimum social pour chaque voie et agrégeons les émissions évitées associées, selon une rentabilité croissante[19]. Les résultats, illustrés à la figure 7, indiquent qu'il est physiquement possible de réduire les émissions de 90 % en combinant isolation et adoption de PAC. En revanche, le gisement se borne à 50 % si les mesures portent sur l'isolation uniquement. Dit autrement, à système énergétique constant, la neutralité carbone

[18] En théorie, l'optimum social déterminé par la VSC devrait systématiquement faire partie du sous-ensemble des rénovations compatibles avec la neutralité carbone. Néanmoins, la VSC a été calculée pour atteindre la neutralité carbone sur l'ensemble de l'économie française, et obtenue avec des modèles intégrant une représentation peu détaillée du secteur résidentiel. La cohérence entre VSC et neutralité carbone n'a donc pas de raison d'être assurée avec notre approche plus restreinte mais mieux détaillée.

[19] Idéalement, nous devrions prendre en compte les règles architecturales et les problèmes de nuisance sonore qui empêchent d'appliquer la mesure à 100 % du segment. Faute de données précises sur ces contraintes, nous les ignorons.

est inatteignable sans recours aux PAC. Forts de ce résultat, nous nous concentrons dans la suite de l'analyse sur l'atteinte du niveau BBC en combinant isolation et PAC.

Figure 7. Rentabilité sociale de la rénovation BBC par isolation uniquement et isolation+PAC



Paradigmes considérés

Afin d'évaluer l'ampleur du soutien public à apporter à la rénovation énergétique, nous cherchons à comparer l'agrégat des rénovations rentables d'un point de vue privé à son homologue social. Compte tenu de la multiplicité des bénéfices et barrières à l'investissement évoqués plus haut, néanmoins, plusieurs perspectives peuvent être envisagées au sein de chaque paradigme.

Dans le paradigme social, nous prenons le point de vue d'un planificateur bienveillant ignorant les défaillances de marché et utilisant un taux de préférence pour le présent de 3,2 %. Nous déclinons ce paradigme en deux perspectives distinctes, selon que les décisions du planificateur intègrent ou pas les effets de santé en plus de la VSC (perspective "sociale totale" versus "sociale carbone").

Dans le paradigme privé, nous prenons le point de vue des propriétaires (occupants, bailleurs privés et sociaux), qui valorisent les économies financières et de confort sur l'ensemble de la durée de vie de l'investissement (en supposant ainsi une valeur verte vénale de 1). À partir de la perspective de base où les agents sont aussi clairvoyants que le planificateur (mais ignorent les externalités), nous considérons quatre perspectives dégradées, dans lesquelles nous ajoutons les frictions une à une, dans l'ordre arbitraire suivant : biais pour le présent ; impossibilité de répercuter le coût des travaux dans les loyers ; problèmes de coordination dans les logements collectifs ; et contraintes de crédit.

Dans le paradigme social comme privé, nous prenons en compte les coûts de financement. Les différentes perspectives sont synthétisées au tableau 8.

Tableau 8. Synthèse des principales hypothèses et perspectives considérées

Perspective	Bénéfices santé	Bénéfices carbone	Biais présent	Défaillance locatif	Défaillance collectif	Défaillance crédit	Coûts de financement
Estimation	7 500 €/an par logement dégradé et occupé par un ménage précaire	200 €/tCO_2	Taux d'actualisation moyen de 8,4 % (Q1 : 19 % ; Q2 : 10 % ; Q3 : 5 % ; Q4 : 5 % ; Q5 : 3.2 %)	18 000 € par logement	14 000 € par logement	Investissement impossible si le taux d'endettement excède 5 %	Taux d'intérêt moyen de 3,9 % sur 10 ans
Source	Dervaux et Rochaix (2022)	Quinet (2019)	Stolyarova (2016)	Vivier et Giraudet (2024)	Vivier et Giraudet (2024)	Dolques et al. (2022)	
Sociale totale	X	X					X
Sociale carbone		X					X
Privée							X
Privée + 1 friction			X				X
Privée + 2 frictions			X	X			X
Privée + 3 frictions			X	X	X		X
Privée + 4 frictions			X	X	X	X	X

Courbes de gisement

Les courbes de gisement consistent à ordonner les potentiels d'abattement sur chaque segment du parc selon une variable d'intérêt croissante – la valeur actuelle nette (VAN) des investissements ou le coût par émission évitée. La variable d'intérêt peut en outre être projetée dans trois référentiels différents, selon la variable utilisée pour cumuler les segments en abscisse : le nombre de logements concernés, les émissions évitées et les économies d'énergie. Si la rentabilité exprimée en part du parc rénové demeure notre représentation privilégiée, nous examinons toutes ces modalités ci-après. L'encadré 4 précise la méthodologie utilisée pour agréger les opérations.

Encadré 4. Méthodologie d'agrégation des rénovations

Les courbes de gisements permettent de visualiser l'ampleur de la rentabilité des rénovations : le gisement "rentable" se lit en abscisse à l'intersection de la courbe de rentabilité avec la valeur zéro en ordonnée ; le gisement rentable pour un certain prix du carbone correspond à l'abscisse de l'intersection de la courbe de coût d'abattement avec le prix considéré en ordonnée.

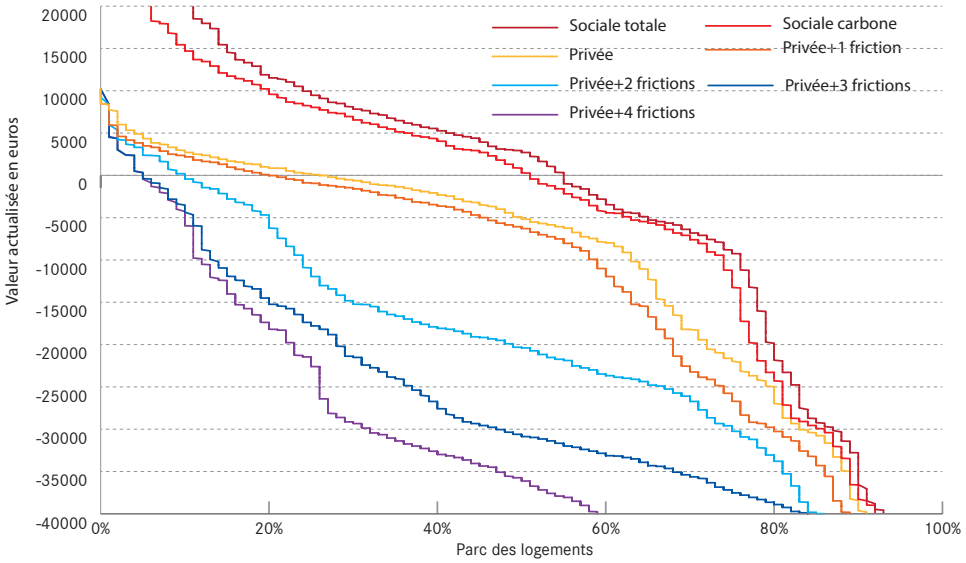
Si cette méthode offre une certaine lisibilité, elle peut s'avérer trompeuse lorsque l'on cherche à comparer des courbes correspondant à des paradigmes différents. Dans la mesure où l'écart entre rentabilité privée et sociale n'est pas systématique, la monotonie implique en effet que chaque courbe correspond à un ordonnancement différent des segments du parc. Ainsi, contrairement à ce que suggère une lecture intuitive, le segment qui figure en abscisse d'une courbe ne correspond pas nécessairement au segment qui figure à la même abscisse sur l'autre courbe. Si au contraire on force les segments du parc à coïncider en abscisse, en imposant la monotonie sur l'une des courbes, la seconde présente alors un profil en dents de scie, qui rend impossible toute lecture du gisement.

Afin de se prémunir de toute erreur d'interprétation, il peut être utile d'avoir en tête les principales sources de divergence entre les bénéfices privés et sociaux des rénovations. La première source est l'énergie utilisée pour le chauffage. La divergence est élevée pour les logements chauffés aux combustibles, dont les prix relativement bas limitent la rentabilité privée mais dont les contenus carbone élevés augmentent la rentabilité sociale. À l'inverse, l'électricité présente un prix élevé, qui augmente la rentabilité privée, et un contenu carbone faible, qui réduit la rentabilité sociale. Les effets de santé constituent une seconde source de divergence, puisqu'ils ne se produisent que sur certains segments du parc – ceux combinant précarité de l'occupant et mauvaise performance du logement.

Rentabilité unitaire

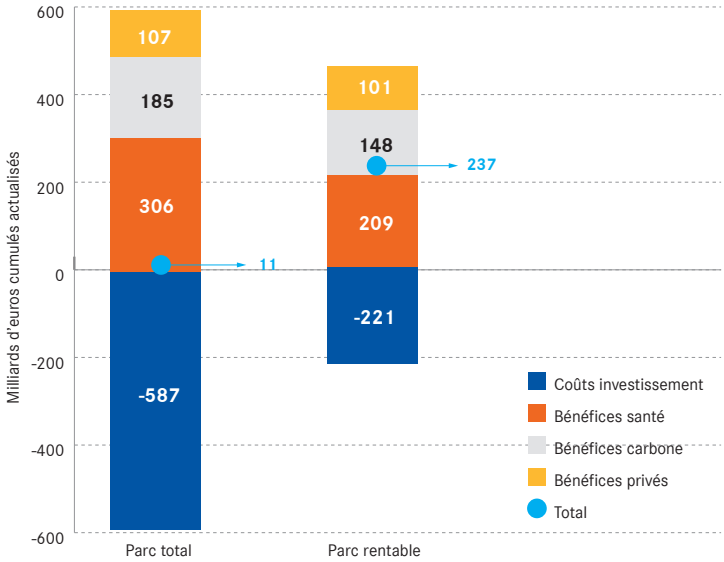
La Figure 9 décrit la VAN d'une rénovation BBC avec adoption d'une PAC pour les logements chauffés aux combustibles fossiles, ordonnée par part cumulée du parc, selon les sept perspectives considérées. Elle révèle que, sous l'hypothèse d'une VSC de 200 €/tCO_2, il est socialement rentable de rénover 58 % du parc de logements. Cette valeur n'augmente que marginalement si l'on prend en compte les bénéfices de santé, qui sont essentiellement inframarginaux, c'est-à-dire acquis sur les premiers segments du parc, là où les réductions d'émission sont également importantes. Le gisement se réduit néanmoins drastiquement à 27 % si l'on considère la perspective privée la plus favorable. Il se réduit davantage par l'ajout successif de frictions, de 7 points de pourcentage (p.p.) avec le biais pour le présent, de 10 p.p. supplémentaires avec les défaillances du parc locatif, de 5 p.p. avec les défaillances du parc collectif, de 0,2 p.p. avec les contraintes de crédit, pour tomber in fine à environ 5 % du parc.

Figure 9 : Courbe de gisement



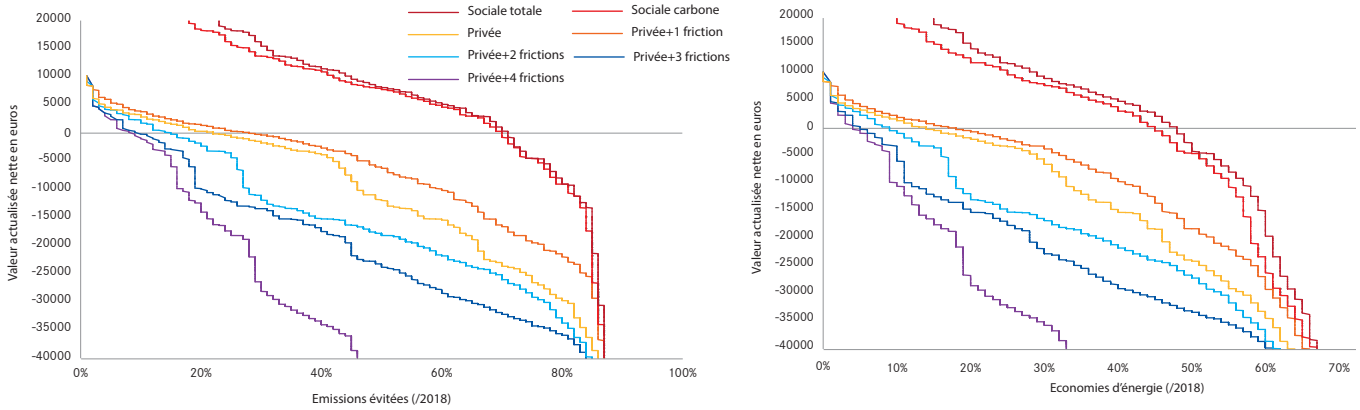
La Figure 10 présente la décomposition des bénéfices sociaux totaux cumulés (i) en généralisant la rénovation BBC avec isolation+PAC sur l'ensemble du parc et (ii) en la limitant là où elle est socialement rentable (c'est l'optimum social). On constate que la généralisation de l'isolation+PAC génère des bénéfices sociaux nets à hauteur de 11 milliards d'euros cumulés actualisés. La balance est plus nettement positive à l'optimum, avec 237 milliards d'euros, en raison de coûts d'investissement bien inférieurs pour des bénéfices comparables. Toutefois, avec un coût total de 221 milliards et des bénéfices privés nets (hors coût de santé) de 209 milliards, la rentabilité privée agrégée de cette mesure est négative. L'agrégation masque cependant de grandes différences du point de vue de la rentabilité privée, qu'il convient d'examiner en détail.

Figure 10 : Décomposition des coûts et bénéfices



La Figure 11a présente un ordonnancement différent de la rentabilité unitaire, par cumul des émissions évitées. Elle indique qu'aux paramètres considérés (notamment une VSC de 200 €/tCO_2), la généralisation des rénovations BBC permet de réduire les émissions de 70 %, niveau qui reste inférieur à la neutralité carbone. Enfin, la Figure 11b présente les mêmes résultats par économies d'énergie cumulées.

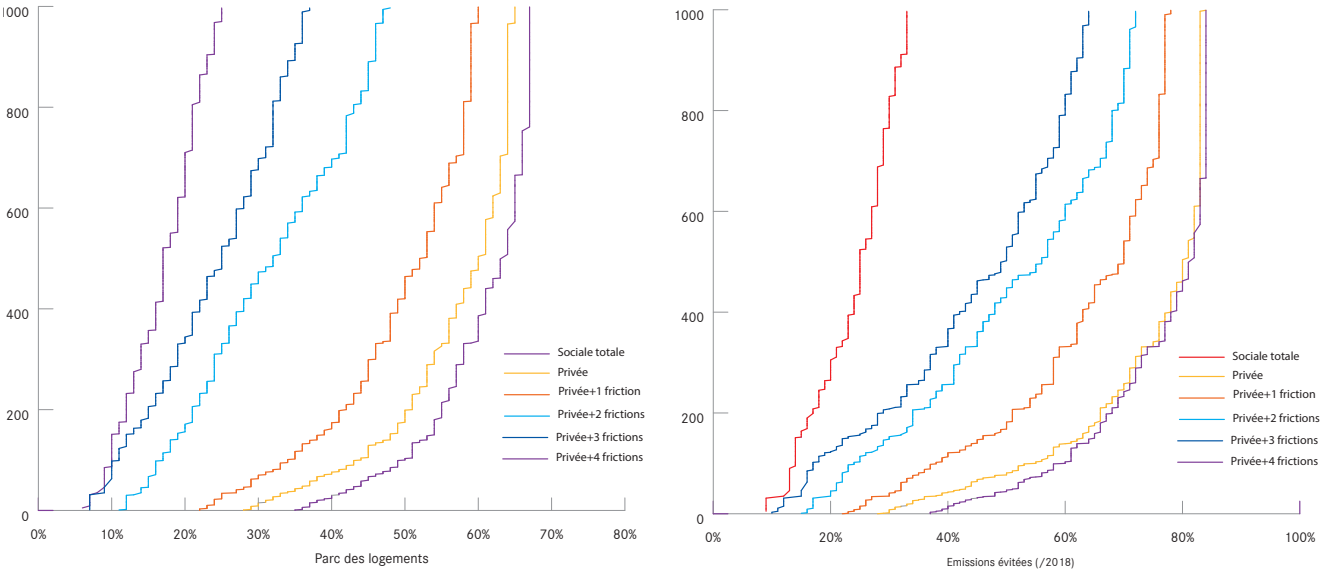
Figure 11 : Courbes de gisement par efficacité environnementale



Coûts d'abattement CO_2

La Figure 12 présente le coût des émissions évitées sur chaque segment du parc. Alors que les graphiques précédents présentaient le coût actualisé net pour chaque logement pour une VSC de 200 €/ tCO_2, on cherche ici la valeur du carbone qui annule le coût actualisé net. Par conséquent, il n'y a plus lieu de distinguer sur la figure la perspective "sociale carbone", qui prévaut en fait via une valeur du carbone endogène.

Figure 12. Courbes d'abattement



Cette visualisation permet de quantifier l'ampleur du gisement pour n'importe quelle valeur du carbone. Elle rend la rentabilité « privée » et la rentabilité « sociale totale » très proches, puisqu'elles ne diffèrent plus que par les bénéfices de santé. En revanche, elle rend plus nets les écarts liés aux différentes frictions, puisqu'on adopte ici une perspective hybride où les ménages subissent des frictions mais internalisent quand même l'externalité carbone. Le gisement qui correspond à la VSC de 200 €/tCO_2 en perspective "sociale totale" (Figure 12a) est cohérent avec celui révélé sur la figure 9, et le gisement « privé » est cohérent avec le "social carbone" de la figure 9.

La figure 12b décline le même coût d'abattement par émissions évitées cumulées. Une VSC de 500€/t est nécessaire pour atteindre 82 % de réduction d'émissions, soit un niveau proche de la neutralité carbone. Le gisement qui correspond à la valeur de la taxe carbone actuelle de 45 €/tCO_2 implique 50 % de réduction, bien loin de la neutralité carbone.

Besoins de financement

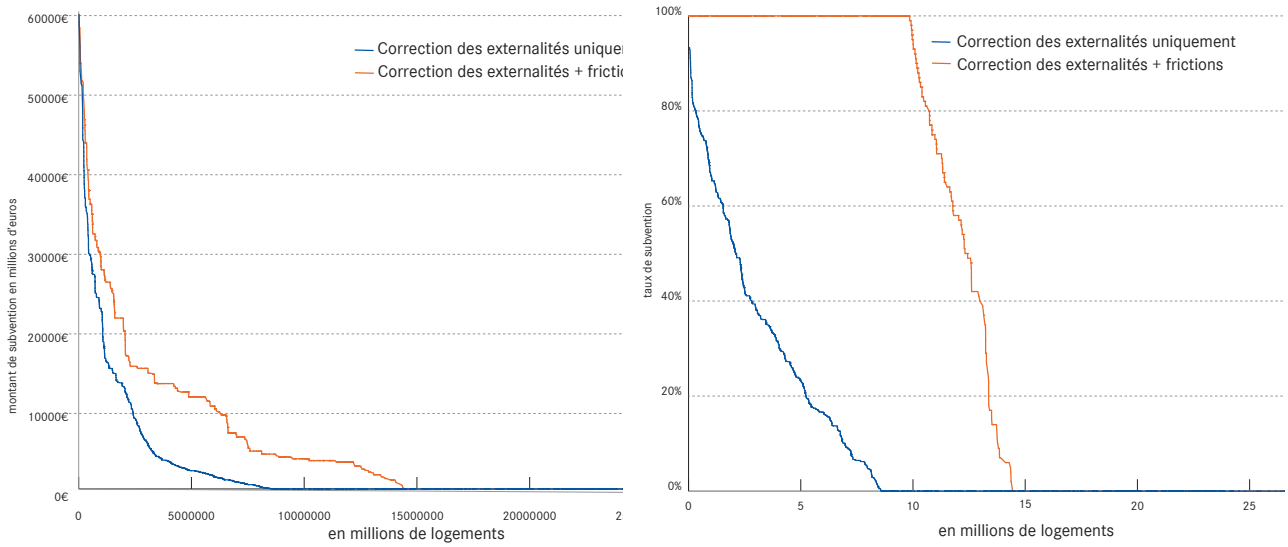
La solution la plus couramment utilisée pour encourager la rénovation énergétique est d'offrir des subventions aux ménages. Sur le plan théorique, cette option n'est pas aussi efficace que la taxe carbone pour réduire les émissions de CO_2, mais elle est plus acceptable (Giraudet et Quirion, 2008). En outre, les subventions sont bien adaptées pour surmonter certaines des barrières à l'investissement prises en compte dans notre modélisation, notamment les problèmes de coordination dans l'habitat collectif (qui s'apparentent à un problème de bien public), les contraintes de crédit (puisqu'elles limitent le taux d'endettement), et le biais pour le présent (Allcott et al., 2014 ; Chan et Globus-Harris, 2023).

Nous étudions ici les besoins en financement créés par un programme de subvention qui viserait à surmonter les barrières considérées, selon deux perspectives – minimaliste et maximaliste. Dans la perspective minimaliste, les subventions sont uniquement utilisées pour internaliser la valeur sociale des émissions de CO_2 et des effets de santé. On suppose un ciblage parfait : seuls les ménages dont la rentabilité sociale est positive et la rentabilité privée est négative reçoivent une subvention, égale au coût net de la mesure. Comme indiqué à la Figure 13a, on obtient qu'il est nécessaire de subventionner 8,6 millions ménages, avec un montant médian d'environ 2 960 €, un montant moyen de 8 032 € et un montant maximum de 59 626 €. Le total des subventions nécessaires (non actualisé) s'élève à 69 milliards d'euros, soit environ 2,7 milliards d'euros par an distribués à 342 000 ménages d'ici 2050.

Dans la perspective maximaliste, les subventions sont utilisées pour surmonter l'ensemble des barrières à l'investissement, privées comme publiques. Cette approche est excessive, puisque toutes les barrières ne justifient pas l'emploi de subventions. Le surdimensionnement qui en résulte est néanmoins compensé par un ciblage parfait des besoins, difficile à réaliser en pratique. Pour ces raisons, la perspective maximaliste nous semble être la meilleure approximation des besoins de financement réels. Elle augmente nettement le nombre de ménages à subventionner, qui s'établit à 14,4 millions, avec un montant médian de 6 557 €, un montant moyen de 10 413 € et un montant maximum de 59 626 €. Le total à débourser s'élève à 150 milliards d'euros, soit environ 6 milliards d'euros à distribuer chaque année à 578 000 ménages d'ici 2050.

La Figure 13b ramène ces montants au coût d'investissement pour décrire les taux de subvention. Dans l'approche sans frictions, le taux médian est de 29 % et le taux moyen de 33 %, avec un maximum à 93 %. Dans l'approche avec frictions, près de 10 millions de ménages (soit près de 70 % des bénéficiaires) doivent recevoir une subvention de 100 % (qui n'implique pas nécessairement des montants élevés).

Figure 13. Distribution des montants de subventions



Critères de ciblage

Ces montants, on le répète, supposent un ciblage parfait des segments présentant une rentabilité sociale positive et une rentabilité privée négative. En pratique, un tel ciblage est fastidieux, nécessitant par exemple le déploiement du dispositif MonAccompagnateurRénov'[20]. En outre, un ciblage trop spécifique peut rendre la politique illisible pour les

bénéficiaires potentiels, qui, dans l'incapacité de connaître a priori l'avantage auquel ils auront droit, peinent à s'intéresser au dispositif.

Il est donc d'usage, quand une politique nécessite un ciblage, de s'appuyer sur les critères observables – associés ici au ménage (revenu, statut d'occupation) et à son logement (performance énergétique, type d'habitat, énergie de chauffage). Le tableau 1 qui figure dans la Note n° 81 détaille comment ces caractéristiques sont distribuées parmi les bénéficiaires des subventions. Ils suggèrent qu'au-delà d'une surreprésentation des passoires thermiques et des systèmes de chauffage à combustible, les caractéristiques des bénéficiaires épousent peu ou prou celles de la population générale.

Discussion

L'analyse proposée vise principalement à établir des ordres de grandeur. Elle indique que, pour une VSC de 200 €/tCO_2 et compte tenu de l'état des connaissances sur les effets de santé, il est socialement rentable de rénover 55 % du parc, soit près de 15 millions de logements par des rénovations BBC combinant isolation et, dans les logements chauffés au gaz et au fioul, adoption d'une PAC. Cet effort permet de réduire les émissions de CO_2 de 70 % par rapport à leur niveau de 2018. Compte tenu des nombreuses barrières qui s'opposent à l'investissement, l'atteinte de cet objectif nécessite de distribuer des subventions à 14 millions de ménages, pour des montants moyens de 10 000 €. La partie qui suit évalue la robustesse des ordres de grandeur obtenus en étudiant leur sensibilité aux principaux paramètres, les sources de biais potentiels et les apports d'études complémentaires.

Analyse de sensibilité

Le tableau 9 décrit comment l'ampleur du gisement des rénovations rentables varie en fonction des principaux paramètres – la valeur sociale du carbone, le taux d'actualisation, le prix de l'énergie et le coût de rénovation – pour différentes métriques et perspectives d'évaluation. La plupart des variantes considérées induisent des variations limitées à quelques points de pourcentage. Deux variantes ont cependant un effet systématiquement très significatif : une division par deux du prix des énergies et une hausse de 50 % des coûts de rénovation. Ce résultat illustre le rôle déterminant et non linéaire joué par ces variables sur la rentabilité des rénovations. Rappelons que l'impact de la VSC est nécessairement moindre en raison de sa part minoritaire dans les prix des énergies (cf. tableau 5).

Tableau 9. Analyse de sensibilité

		Part du parc cumulé		
	Valeur	Perspective sociale totale	Perspective privée	Perspective privée + 4 frictions
Référence		58 %	27 %	6 %
Valeur du carbone	100	52 %	27 %	6 %
	500	65 %	27 %	6 %
Taux d'actualisation	2 %	61 %	27 %	6 %
	5 %	55 %	27 %	6 %
Prix de l'énergie	0,5	16 %	8 %	1 %
	1,5	54 %	41 %	9 %
	2	60 %	52 %	12 %
Coût de rénovation	0,5	62 %	52 %	14 %
	1,5	24 %	16 %	4 %

[20] Une des justifications des CEE est de s'appuyer sur les fournisseurs d'énergie pour réaliser ce ciblage. Comme discuté dans le Focus n° 107, néanmoins, rien n'indique que cet objectif soit effectivement rempli.

	Émissions évitées cumulées			
	Valeur	Perspective sociale totale	Perspective privée	Perspective privée + 4 frictions
Référence		70 %	28 %	11 %
Valeur du carbone	100	61 %	28 %	11 %
	500	82 %	28 %	11 %
Taux d'actualisation	2 %	76 %	28 %	11 %
	5 %	65 %	28 %	11 %
Prix de l'énergie	0,5	17 %	8 %	3 %
	1,5	63 %	43 %	16 %
	2	70 %	57 %	21 %
Coût de rénovation	0,5	74 %	61 %	27 %
	1,5	24 %	16 %	7 %
	Économies d'énergie cumulées			
	Valeur	Perspective sociale totale	Perspective privée	Perspective privée + 4 frictions
Référence		47 %	18 %	7 %
Valeur du carbone	100	41 %	18 %	7 %
	500	55 %	18 %	7 %
taux d'actualisation	2 %	51 %	18 %	7 %
	5 %	44 %	18 %	7 %
Prix de l'énergie	0,5	12 %	5 %	2 %
	1,5	43 %	29 %	10 %
	2	49 %	38 %	13 %
Coût de rénovation	0,5	52 %	42 %	17 %
	1,5	16 %	10 %	4 %

Note : valeur de référence : valeur du carbone = 200 ; taux d'actualisation = 3,2% ; prix de l'énergie = 1 ; coût de rénovation = 1.

Biais potentiels

Le tableau 10 discute les biais potentiels induits par les principaux choix de modélisation. L'hypothèse d'un financement à crédit à 100 %, la stabilité des prix des énergies et de la VSC, l'absence de progrès technique et de possibilité de décarbonation du système énergétique tendent à sous-estimer les gisements. À l'inverse, la non-prise en compte du surcoût induit par les rénovations par étapes, des effets inflationnistes dus à la concurrence imparfaite, des défauts de qualité et des émissions grises tendent à surestimer le gisement. Concernant les PAC, l'hypothèse optimiste d'une absence de règles architecturales et de problème de nuisance sonore s'opposant à l'installation des PAC est compensée par une restriction de cette technologie aux systèmes air-eau. En définitive, les sources de biais positifs et négatifs sont nombreuses, ce qui tend à les neutraliser.

Tableau 10. Sources de biais potentiels

Variable	Hypothèse retenue	Conséquence de cette hypothèse pour l'ampleur des gisements (privé et social, ou * social uniquement)
Coût de financement	Fixé au coût du crédit (taux d'intérêt de 3,9 % sur 10 ans) sur l'intégralité du montant, sans prendre en compte le financement sur fonds propre, qui devrait être valorisé au coût d'opportunité de l'épargne, généralement inférieur au coût du crédit.	Sous-estimation
Prix des énergies	Constants, alors qu'une tendance haussière est le scénario le plus communément admis	
Valeur sociale du carbone*	Constante à 200 €/tCO_2, alors que le rapport Quinet prévoit une trajectoire croissante atteignant 775 € en 2050	
Système énergétique*	Supposé constant, sans prise en compte de la réduction du contenu carbone des énergies liée à la pénétration des énergies renouvelables	
Progrès technique	Non pris en compte : pas de baisse des coûts de rénovation	
Coûts de rénovation	Coordination parfaite des gestes, ignorant les rénovations par étapes qui peuvent augmenter les coûts	Surestimation
Concurrence imparfaite	Non prise en compte : les prix reflètent parfaitement les coûts et la marge des entreprises est minimale	
Défauts de qualité	Non pris en compte	
Émissions grises	Non prises en compte	
Pompes à chaleur	Limitées aux systèmes air-eau en substitution aux systèmes fossiles : pas de PAC air-air en substitution au chauffage électrique. En revanche, aucune contrainte architecturale sur l'installation ni problème de nuisance sonore	Neutre

Études complémentaires

La méthodologie proposée présente enfin deux limites importantes. D'une part, elle est essentiellement statique, au sens où elle évalue le gisement de rentabilité à un instant donné. Elle est par ailleurs normative, les subventions étant idéalement calculées et parfaitement ciblées. D'autre part, elle opère à système énergétique constant, alors que la décarbonation de l'électricité et du gaz permettrait de réduire la contribution de la demande d'énergie à la réduction des émissions. Deux études récentes permettent de surmonter ces limites. Elles mobilisent toutes les deux le modèle de microsimulation Res-IRF[21], qui utilise le même niveau de détail et le même paramétrage que dans l'analyse conduite ici.

Escribe et al. (2024) évaluent la distribution optimale de l'effort de décarbonation entre investissement d'isolation, investissement dans les PAC en remplacement des énergies fossiles et investissement dans le système énergétique. L'analyse propose ainsi une vision dynamique et plus intégrée que celle adoptée plus haut. La distribution optimale est obtenue à partir d'une optimisation jointe du modèle Res-IRF avec le modèle EOLES (Shirizadeh et Quirion, 2021), qui offre une représentation détaillée du système énergétique français. Elle implique que, pour atteindre la neutralité carbone, l'isolation doit contribuer à hauteur de 19 % des réductions d'émissions, l'adoption de systèmes de chauffage bas carbone à 36 % et l'investissement dans le secteur énergétique à 45 %. La contribution combinée de l'isolation et du système de chauffage s'établit donc à 55 %, soit une part moins importante que les 70 % obtenus à système énergétique constant dans ce Focus. La contribution attendue des PAC augmente néanmoins sous des hypothèses alternatives de moindre disponibilité des ressources en biogaz. De plus, répartition optimale est obtenue grâce à des subventions aux PAC et à l'isolation parfaitement ciblées, comme dans ce Focus. Des analyses complémentaires révèlent que des subventions moins bien ciblées (et en cela plus réalistes) augmentent le coût total du système de 11 % à 15 %.

Vivier et Giraudet (2024) utilisent le modèle Res-IRF pour évaluer l'impact de long terme des différentes politiques de rénovation énergétique – MPR, les CEE, l'éco-prêt à taux zéro, la taxe carbone, l'interdiction des chaudières au fioul et l'interdiction de mise en location des passoires thermiques. L'analyse complète donc celle présentée ici par une

[21] Le code et la documentation du modèle sont disponibles à l'adresse suivante https://www.centre-cired.fr/res-irf/

approche dynamique du gisement et par une approche positive des politiques, décrites telles qu'elles sont plutôt que telles qu'elles devraient être. En l'absence de toute politique, les émissions baissent de 50 % entre 2018 et 2050. Ces gains s'expliquent par le renouvellement naturel du parc — le remplacement d'équipements arrivant en fin de vie (notamment les chaudières au fioul qui ne peuvent être conservées) et les travaux routiniers effectués par les ménages emménageant dans un nouveau logement. Les politiques existantes en 2024 induisent 25 points de pourcentage de réductions supplémentaires. L'atteinte de la neutralité carbone nécessite néanmoins d'ajouter à ces politiques une interdiction des chaudières au gaz à compter de 2030. Les montants de subvention nécessaires pour atteindre la neutralité carbone s'élèvent à 3 à 7 milliards d'euros par an. Ces montants, plus faibles que ceux obtenus plus haut, s'expliquent par les multiples interdictions considérées (sur les chaudières combustibles et la location des passoires thermiques), virtuellement sans coût pour les finances publiques mais pas nécessairement pour le bien-être des ménages.

Bibliographie

Ademe (2018) : Enquête TREMI. Travaux de rénovation énergétique des maisons individuelles. Campagne 2017.

Ademe (2019a) : *Rénovation énergétique des logements : Étude des prix. Les enseignements d'une évaluation statistique de grande ampleur*.

Ademe (2019b) : *Prospectives 2035 et 2050 de consommation de matériaux pour la construction neuve et la rénovation énergétique BBC*.

Allcott H., Mullainathan S., Taubinsky D. (2014) : « Energy policy with externalities and internalities », *Journal of Public Economics* 112, p. 72-88.

Allcott H., Greenstone M. (2017) : « Measuring the Welfare Effects of Residential Energy Efficiency Programs », *Working Paper Series*.

Allibe B. (2012) : Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel français : amélioration du réalisme comportemental et scénarios volontaristes (thèse de doctorat), EHESS.

Anderson S.T., Kellogg R. et Sallee J.M. (2013) : « What do consumers believe about future gasoline prices ? », *Journal of Environmental Economics and Management* 66, p. 383-403.

APUR (2024) : Consommations réelles d'énergie des logements parisiens. Volet 1 : Parc social et opérations Plan Climat.

Baba-Moussa W., Le Saout R. (2023) : « Le parc de logements par classe de performance énergétique au 1er janvier 2023 », CGDD-SDES.

Belaïd F., Bakaloglou S., Roubaud D. (2018) : « Direct rebound effect of residential gas demand : Empirical evidence from France », *Energy Policy* 115, 23-31.

Belaïd F., Youssef A.B., Lazaric N. (2020) : « Scrutinizing the direct rebound effect for French households using quantile regression and data from an original survey », *Ecological Economics* 176, 106755.

Blaise G., Glachant M. (2019) : « Quel est l'impact des travaux de rénovation énergétique des logements sur la consommation d'énergie ? », La Revue de l'Énergie.

Cayla J.-M., Osso D. (2013) : « Does energy efficiency reduce inequalities ? Impact of policies in residential sector on household budgets », presented at the ECEEE 2013 Summer Study, p. 1247

Chan N.W., Globus-Harris I. (2023) : « On consumer incentives for energy-efficient durables », *Journal of Environmental Economics and Management* 119, 102813.

Charlier D. (2021) : « Explaining the energy performance gap in buildings with a latent profile analysis », Energy Policy 156, 112480.

Charlier D., Legendre B. (2022.) : « Fuel Poverty and Health : A Shared Agenda for Policy », *Revue d'économie politique* 132, 245-272.

Christensen P., Francisco P., Myers E., Souza M. (2021) : « Decomposing the Wedge between Projected and Realized Returns in Energy Efficiency Programs », *The Review of Economics and Statistics* 1-46.

Cour des comptes européenne (2024) : Rapport spécial 01/2024 : Réduction des émissions de dioxyde de carbone des voitures particulières – Enfin un coup d'accélérateur, mais la route est semée d'embûches

Dervaux B., Rochaix L. (2022) : *L'évaluation socio-économique des effets de santé des projets d'investissement public*, France Stratégie

Dolques G., Ledez M., Hainaut H. (2022) : Quelles aides publiques pour la rénovation énergétique des logements ? PanelRénov', un outil pour analyser la viabilité économique des projets de rénovation.

DG Trésor (2017) : « Barrières à l'investissement dans l'efficacité énergétique : quels outils pour quelles économies ? » *Documents de travail de la DG Trésor* n° 2017/02.

Effinergie (2021) : Les maisons rénovées à basse consommation, L'observatoire BBC.

Enertech (2021a) : PerfInMind, Rénovation performante de maisons individuelles. Analyse multicritère énergie, confort, santé, satisfaction, coût

Enertech (2021b) : La rénovation performante par étapes. Étude des conditions nécessaires pour atteindre la performance BBC rénovation ou équivalent à terme en logement individuel

Eryzhenskiy I., Giraudet, L.-G., Segu M. (2023) : Success and Failure of a Zero-Interest Green Loan Program : Evidence from France.

Escribe C., Vivier L., Giraudet L.-G., Quirion P. (2024) : « How to allocate mitigation efforts between home insulation, fuel switch and fuel decarbonization ? Insights from the French residential sector », Environ. Res. Lett. 19, 054018.

Fowlie, M., Greenstone, M., Wolfram, C. (2018) : « Do Energy Efficiency Investments Deliver ? Evidence from the Weatherization Assistance Program », Q J Econ 133, p. 1597-1644.

France Stratégie (2021) : Complément opérationnel : Révision du taux d'actualisation.

France Stratégie (2022) : *Les coûts d'abattement. Partie 5. Logement*, Rapport de la commission présidée par Patrick Criqui.

Galvin R., Sunikka-Blank M (2012) : « Introducing the prebound effect : the gap between performance and actual energy consumption », Building Research & Information 40, p. 260-273.

Giraudet, L.-G., Quirion, P. (2008) : « Efficiency and distributional impacts of tradable white certificates compared to taxes, subsidies and regulations », *Revue d'économie politique* 118, p. 885-914.

Giraudet, L.-G. (2020) : « Energy efficiency as a credence good : A review of informational barriers to energy savings in the building sector », *Energy Economics* 87, 104698.

Giraudet L.-G., Houde S., Maher J. (2018) : « Moral Hazard and the Energy Efficiency Gap: Theory and Evidence », *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists* 5, p. 755-790.

Giraudet L.-G., Missemer A. (2023), « The history of energy efficiency in economics : Breakpoints and regularities », *Energy Research & Social Science* 97, 102973.

Giraudet L.-G., Vivier L. (2022) : « La difficile quantification de la place du bâtiment dans la décarbonation. Transitions », *Les nouvelles Annales des Ponts et Chaussées* 12.

Grandclément C., Tricoire A., Osso D., Nösperger S., Laurent M.-H. (2018) : Prix de la rénovation et organisation de la filière, rapport, Ademe.

Hirst E., Goeltz R. (1985) : « Estimating energy savings due to conservation programmes : The BPA residential weatherization pilot programme », *Energy Economics* 7, p. 20-28.

Lanz B., Reins E. (2021) : « Asymmetric Information on the Market for Energy Efficiency : Insights from the Credence Goods Literature », EJ 42.

Laprie V., Voia A., Giraudet L.-G., El Beze J. (2024) : « Moral hazard in the quality of building energy efficiency: Evidence from post-retrofit audits ».

Jaffe, A.B., Stavins, R.N. (1994) : « The energy-efficiency gap : What does it mean ? », *Energy Policy* 22, p. 804-810.

Joskow, P.L., Marron, D.B. (1992) : « What Does a Negawatt Really Cost ? Evidence from Utility Conservation Programs », *The Energy Journal* 13, 41-74.

Maia, I.E.N., Harringer, D., Kranzl, L. (2024) : « Household budget restrictions as reason for staged retrofits : A case study in Spain », *Energy Policy* 188, 114047.

Martin Y., Carsalade Y., Leteurtrois J.-P., Moisan F. (1998) : *La maîtrise de l'énergie : rapport d'évaluation*, La Documentation française.

Michelsen C., Rosenschon S., Schulz C. (2015.) : « Small might be beautiful, but bigger performs better : Scale economies in "green" refurbishments of apartment housing », *Energy Economics* 50, p. 240-250.

Noguès L., Grandclément C., Mallard A. (2024) : Analyse du processus parlementaire de réforme du DPE au sein de la loi Climat et Résilience, Enseignements-clés du projet PREMOCLASSE.

Osso D., Bouhi N. (2024) : Le prix de la rénovation performante : une estimation de l'amplitude des coûts pour les logements résidentiels privés, Enseignements-clés du projet PREMOCLASSE.

ONRE (2021) : *La rénovation énergétique des logements : Bilan des travaux et des aides entre 2016 et 2019.*

Quinet A. (2019), La valeur de l'action pour le climat, rapport pour France Stratégie

Shirizadeh, B., Quirion, P. (2021) : « Low-carbon options for the French power sector : What role for renewables, nuclear energy and carbon capture and storage ? », Energy Economics 95, 105004.

Sidler, O. (2021) : Les dangereuses insuffisances du plan de rénovation et de la loi Climat et Résilience. Notes techniques et réflexions.

RTE (2020) : Réduction des émissions de CO_2, impact sur le système électrique : quelle contribution du chauffage dans les bâtiments à l'horizon 2035 ?

RTE (2023) : Bilan de l'hiver 2022-2023 : Des coupures d'électricité évitées grâce à la baisse de consommation

Sorrell S., Dimitropoulos J., Sommerville M. (2009) : « Empirical estimates of the direct rebound effect : A review », *Energy Policy* 37, 1356-1371.

Stiglitz J.E., Weiss, A. (1981) : « Credit Rationing in Markets with Imperfect Information », *The American Economic Review* 71, p. 393-410.

Stolyarova, E. (2016) : Rénovation énergétique de l'habitat en France : analyse microéconométrique du choix des ménages, thèse de doctorat,. Paris Sciences et Lettres (ComUE).

Train K. (1985) : « Discount rates in consumers' energy-related decisions : A review of the literature », *Energy* 10, p. 1243-1253.

Vivier L., Giraudet L.-G. (2024) : Is France on track for decarbonizing its residential sector ? Assessing recent policy changes and the way forward.

Yvon J.-M., Yvroud M. (2021) : Évaluation quantitative d'impact sur la santé (EQIS) de la pollution de l'air ambiant en région Auvergne-Rhône-Alpes, 2016-2018, Santé publique France.

conseil d'analyse économique

Le Conseil d'analyse économique, créé auprès du Premier ministre, a pour mission d'éclairer, par la confrontation des points de vue et des analyses de ses membres, les choix du gouvernement en matière économique.

Président délégué Camille Landais

Secrétaire générale Hélène Paris

Conseillers scientifiques
Jean Beuve, Claudine Desrieux, Maxime Fajeau, Thomas Renault

Économistes/Chargés d'études
Circé Maillet, Max Molaro, Madeleine Péron, Ariane Salem

Membres Adrien Auclert, Emmanuelle Auriol, Antoine Bozio, Sylvain Chassang, Anne Epaulard, Gabrielle Fack, François Fontaine, Julien Grenet, Maria Guadalupe, Fanny Henriet, Xavier Jaravel, Sébastien Jean, Camille Landais, Isabelle Méjean, Thomas Philippon, Xavier Ragot, Alexandra Roulet, Katheline Schubert, David Sraer, Stefanie Stantcheva, Jean Tirole

Correspondants
Dominique Bureau, Anne Perrot, Aurélien Saussay, Ludovic Subran

Toutes les publications du Conseil d'analyse économique sont téléchargeables sur son site : **www.cae-eco.fr**

ISSN 2971-3560 (imprimé)
ISSN 2999-2524 (en ligne)

Contact Presse Hélène Spoladore
helene.spoladore@cae-eco.fr – Tél. : 01 42 75 77 47