

Les coûts d'abattement

Partie 5 – Logement

Rapport de la commission présidée par
Patrick Criqui



LES COÛTS D'ABATTEMENT

Partie 5 – Logement

Rapport de la commission
présidée par **Patrick Criqui**

Rapporteurs

Boris Le Hir et Alice Robinet





PRÉSENTATION

À la suite de la signature de l'accord de Paris en 2015, la France s'est engagée à atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. La Stratégie nationale bas-carbone (SNBC), révisée tous les cinq ans, constitue la feuille de route française pour lutter contre le changement climatique : elle détaille les actions à mettre en œuvre dans chaque secteur. Le présent travail vise à fournir des outils méthodologiques dans la perspective de l'élaboration de la troisième SNBC.

Les coûts d'abattement des différentes solutions de décarbonation, c'est-à-dire leur coût rapporté aux émissions évitées, sont en effet une donnée essentielle pour l'élaboration d'une stratégie climat efficace. Le recours au coût d'abattement socioéconomique permet de hiérarchiser les actions de décarbonation et d'identifier celles susceptibles de maximiser les réductions effectives d'émissions de gaz à effet de serre, à niveau d'effort donné pour la collectivité. La comparaison du coût d'abattement à la valeur de l'action pour le climat (VAC)¹ établit l'efficacité socioéconomique d'une action. Elle doit par ailleurs permettre de s'assurer que le niveau d'effort consenti reste proportionné au regard de la trajectoire nationale de réduction des émissions vers la neutralité carbone en 2050.

Après la publication du rapport de la commission Quinet sur la valeur de l'action pour le climat en février 2019, qui faisait le constat de la nécessité « de poser un cadre méthodologique clair et partagé pour pouvoir évaluer le coût d'abattement socioéconomique des différentes actions », la commission sur les coûts d'abattement des émissions de gaz à effet de serre a été installée en septembre 2019. Présidée par Patrick Criqui, directeur de recherche émérite au CNRS, elle est composée d'économistes et d'experts sectoriels.

¹ Quinet A. (2019), *La valeur de l'action pour le climat. Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques*, rapport, France Stratégie, février.

L'objectif des travaux de la commission est triple :

- préciser le (ou les) sens que l'on donne au « coût d'abattement » et définir un cadre méthodologique partagé pour les calculs de ces coûts ;
- expliquer l'interprétation qui peut être faite d'une évaluation des coûts d'abattement en fonction du mode de calcul retenu, en particulier préciser comment elle peut être comparée à la valeur de l'action pour le climat ;
- présenter les coûts d'abattement harmonisés d'une série de technologies ou d'actions pour la réduction des émissions ainsi que l'utilisation qui pourrait en être faite au service des politiques climatiques et les limites de ces utilisations.

Après une première partie méthodologique qui explicite le concept et les méthodes de calcul des coûts d'abattement socioéconomiques, des travaux sectoriels de cette commission sont publiés successivement depuis plusieurs mois : transports, électricité, hydrogène, logement – le sujet du présent rapport – et industrie (à venir).

Volets déjà publiés

1. Criqui P. (2021), *Les coûts d'abattement. Partie 1 – Méthodologie*, rapport de la commission sur les coûts d'abattement, France Stratégie, juin, 70 p.
Rapporteurs : Stéphane Crémel (Direction générale du Trésor) ; Aude Pommeret (France Stratégie)
2. Criqui P. (2021), *Les coûts d'abattement. Partie 2 – Transports*, rapport de la commission sur les coûts d'abattement, France Stratégie, juin, 92 p.
Rapporteurs : Stéphane Crémel (Direction générale du Trésor) ; Bérengère Mesqui (France Stratégie)
3. Criqui P. (2022), *Les coûts d'abattement. Partie 3 – Électricité*, rapport de la commission sur les coûts d'abattement, France Stratégie, janvier, 132 p.
Rapporteurs : Silvano Domergue, Olivier de Guibert et Emmanuel Memmi (Commissariat général au développement durable) ; Julie Corberand et Aude Pommeret (France Stratégie)
4. Criqui P. (2022), *Les coûts d'abattement. Partie 4 – Hydrogène*, rapport de la commission sur les coûts d'abattement, France Stratégie, mai, 82 p.
Rapporteur : Maxime Gérardin (France Stratégie)



SOMMAIRE

Messages clés	9
Synthèse	13
Chapitre 1 – État des lieux et objectifs	35
1. État des lieux et tendances des émissions du bâtiment	35
2. Cadre européen et Stratégie nationale bas-carbone en France	37
2.1. Le cadre européen.....	37
2.2. Les objectifs de la Stratégie nationale bas-carbone et les mesures mises en place.....	38
3. Les leviers de décarbonation dans le secteur du bâtiment	40
4. Comment éclairer les enjeux des politiques publiques avec les coûts d'abattement ?	42
4.1. Des politiques en place non optimales.....	42
4.2. Évaluer le potentiel des actions de sobriété.....	43
4.3. Considérer des actions de rénovation globale	46
4.4. Tenir compte des effets de report de la décarbonation du vecteur	52
4.5. L'apport des coûts d'abattement pour éclairer les enjeux de politique publique.....	52
Chapitre 2 – Prendre en compte les spécificités du secteur du bâtiment pour le calcul des coûts d'abattement	55
1. Une grande diversité de situations et d'acteurs	55
1.1. L'hétérogénéité des parcs de bâtiments implique des actions différenciées.....	55
1.2. Des acteurs atomisés, aux comportements hétérogènes.....	56
1.3. Des coûts cachés divers.....	58
2. Les inerties dans la transformation des parcs	59
2.1. Un enjeu sur les coûts d'abattement davantage porté sur le parc existant que sur la construction neuve.....	59
2.2. Progrès technique et fort contenu en travail rendent incertaine l'évolution des coûts.....	59

3. Des effets rebond difficiles à évaluer.....	62
3.1. Définition de l'effet rebond et fondements empiriques	62
3.2. Recommandations pour la prise en compte des effets rebond dans le calcul du coût d'abattement.....	65
3.3. Au-delà de l'effet rebond, les asymétries d'information peuvent affecter la qualité des travaux.....	66
4. Des cobénéfices pour la santé très significatifs.....	68
5. Principes méthodologiques additionnels.....	70
5.1. La mesure des émissions sur la base des étiquettes de performance énergétique et des vecteurs énergétiques.....	70
5.2. Le coût d'opportunité des fonds publics (COFP) dans le cas des rénovations énergétiques....	72
5.3. La question de l'adaptation au changement climatique.....	73
Chapitre 3 – Application à la rénovation des logements.....	75
1. Comparaison d'actions types de rénovation.....	76
2. Deux ensembles de données pour décrire le parc de logements.....	79
3. Hypothèses et méthodologie de construction des courbes de coût d'abattement.....	82
3.1. Durée des bénéfices de la rénovation	82
3.2. Facteurs d'émissions et décarbonation du vecteur énergétique.....	83
3.3. Le coût des actions sur l'enveloppe et le système énergétique.....	84
3.4. La consommation d'énergie	86
4. Les courbes de coûts marginaux d'abattement pour le parc résidentiel.....	87
4.1. Coûts d'abattement de la rénovation énergétique des logements.....	87
4.2. Des incertitudes sur les coûts d'abattement encore très importantes	99
4.3. La rentabilisation progressive des actions de rénovation par la valeur de l'action pour le climat	105
5. Pistes d'amélioration de l'évaluation des coûts d'abattement de la rénovation.....	108
5.1. Dépasser l'approche statique	108
5.2. Consolider les estimations et les hypothèses de coût d'investissement et d'efficacité des rénovations	109
5.3. Affiner la représentation des gestes de rénovation et les vecteurs énergétiques	110

Chapitre 4 – Compléments sur le tertiaire et les réseaux de chaleur	111
1. Les coûts d’abattement dans le parc tertiaire	111
2. Les coûts d’abattement dans les réseaux de chaleur	112
2.1. Les réseaux de chaleur en France : un développement conséquent mais insuffisant au regard des objectifs à atteindre	112
2.2. Les coûts d’abattement d’un réseau de chaleur : l’exemple du réseau de la métropole de Grenoble	114
Références bibliographiques	119

ANNEXES

Annexe 1 – Membres de la commission	125
Annexe 2 – Les différents périmètres des émissions	127
Annexe 3 – Comparer différents parcours types de rénovations : Ademe, Dorémi et Enertech (2021)	129
Annexe 4 – Compléments sur le calcul des coûts d’abattement des actions de rénovation énergétique avec Res-IRF	131
Annexe 5 – Analyses de sensibilité des simulations Res-IRF	143
Annexe 6 – Les coûts d’abattement du parc tertiaire (CGDD, 2020)	147
Annexe 7 – Les coûts d’abattement des réseaux de chaleur urbains : le cas de Grenoble-Alpes Métropole	151



MESSAGES CLÉS

État des lieux et objectifs

- Le secteur résidentiel-tertiaire représente 45 % de la consommation totale d'énergie finale en France (720 TWh en 2019), dont près des deux tiers dans le résidentiel.
- Les émissions directes liées à la consommation d'énergie du secteur résidentiel-tertiaire représentent 17 % des émissions territoriales de gaz à effet de serre (GES) de la France (75 MtCO₂e en 2019, dont 47 MtCO₂e dans le résidentiel et 28 MtCO₂e dans le tertiaire).
- 17 % des résidences principales, soit 5,2 millions de logements, sont des « passoires thermiques » (étiquettes DPE F et G). 18 % d'entre elles sont occupées par des ménages appartenant au 1^{er} quintile de revenu.
- 41 % des résidences principales sont chauffées au gaz naturel, 11 % au fioul et 30 % à l'électricité.
- La SNBC 2020 fixe pour 2030 un objectif de réduction des émissions du résidentiel-tertiaire à près de 50 % par rapport à 2015, soit une baisse de 40 % des émissions par rapport à 2019, et la décarbonation quasi complète à l'horizon 2050.
- Pour cela la SNBC 2020 vise un rythme de 370 000 rénovations complètes équivalentes par an dès maintenant et 700 000 à partir de 2030 afin d'atteindre une performance moyenne du parc au niveau Bâtiment basse consommation (BBC).
- Le renforcement des objectifs communautaires avec le paquet « Fit for 55 » (réduction de 55 % des émissions européennes de GES par rapport à 1990) devrait se traduire par un renforcement des objectifs dans ce secteur, avec notamment la mise en place d'un système d'échange de quotas d'émissions européen dédié (SEQE-UE).
- Les émissions du résidentiel-tertiaire ont baissé de 10 % entre 2015 et 2019 (-10 % dans le résidentiel et -11,5 % dans le tertiaire), mais cette baisse s'est révélée inférieure aux objectifs fixés par le budget carbone pour 2015-2018 qui a été dépassé de 11 %.

Principaux enseignements du rapport

- Le niveau d'ambition national visé implique d'atteindre des niveaux de performance énergétique élevés sur la plupart des logements. La capacité des rénovations par gestes successifs à atteindre les plus hautes performances n'étant pas démontrée, il apparaît préférable de raisonner directement sur des rénovations de type global. Pour cette raison, les rénovations étudiées dans le rapport sont des rénovations permettant d'atteindre en une seule étape un niveau de performance correspondant à la classe énergétique A, B ou C selon les cas. Ces rénovations regroupent en grande partie les rénovations performantes et globales telles que définies par la loi « climat et résilience ».
- Le coût d'abattement d'une rénovation de ce type est très variable selon les caractéristiques du logement sur lequel elle est appliquée. Cette forte hétérogénéité est à prendre en compte dans la conception des instruments des politiques publiques.
- Les politiques publiques doivent aussi tenir compte des freins organisationnels à l'investissement dans la rénovation, par exemple dans les situations de copropriétés, de propriétaires bailleurs ou de difficultés d'accès au crédit. Il conviendra pour cela d'identifier en priorité les barrières de marché pesant sur les rénovations les plus efficaces.
- Les coûts des actions de sobriété sont par nature difficiles à mesurer. Plus que le coût de ces actions, c'est le potentiel effectif des actions de sobriété qu'il convient d'évaluer avec réalisme. Les scénarios les plus ambitieux estiment que ce potentiel de réduction se situe entre 20 % et 30 % des émissions.
- Un peu plus de 5 % des rénovations vers un niveau BBC, représentant un potentiel d'abattement d'environ 5 % des émissions actuelles du secteur, seraient dès aujourd'hui socioéconomiquement rentables, indépendamment même de l'enjeu climatique, c'est-à-dire sans prise en compte d'une valeur du carbone.
- Il s'agit en grande partie de « passoires thermiques » occupées par des ménages à faibles revenus (situation de précarité énergétique). Leur rénovation, qui apporte avant tout un bénéfice sanitaire, devrait être la première des priorités.
- Ensuite, la priorité d'action doit se porter sur l'ensemble des logements chauffés au fioul et des logements d'étiquettes F et G chauffés au gaz. Le contexte énergétique, découlant de la guerre en Ukraine et des difficultés rencontrées sur le parc nucléaire, doit conduire en outre à ne pas négliger la rénovation des passoires thermiques chauffées à l'électricité.
- La comparaison des coûts d'abattement à la valeur de l'action pour le climat 2019 justifie l'ambition d'un rythme soutenu de rénovations pour les dix années à venir : dès

2025, il serait socioéconomiquement rentable de rénover 5,8 millions de logements vers B, dont l'essentiel des logements chauffés au fioul et un peu plus de la moitié des logements F et G chauffés au gaz. À l'horizon 2030, cela concernerait plus de 12 millions de logements (soit plus du tiers) de toutes les étiquettes.

- Malgré cela, le meilleur compromis entre gains d'efficacité énergétique et décarbonation des vecteurs reste difficile à déterminer. D'après les simulations réalisées, des rénovations vers C avec électrification du vecteur pourraient réduire significativement les coûts d'abattement en comparaison à des rénovations au niveau BBC rénovation (vers B), pour l'atteinte d'un même objectif national. Deux incertitudes jouant en sens inverse maintiennent toutefois la question en suspens :
 - la première porte sur la capacité des vecteurs décarbonés à répondre à la demande et en particulier la capacité du secteur électrique à assurer la production décarbonée nécessaire, notamment en pointe hivernale ;
 - la seconde porte sur les coûts et la performance effective des travaux de rénovation de l'enveloppe, notamment dans un contexte où des tensions existeraient sur le marché de la rénovation.
- Dans tous les cas, l'atteinte des objectifs nécessitera de pousser loin à la fois les gains d'efficacité et la décarbonation du mix énergétique, qui elle-même devra s'appuyer sur des sources diversifiées – électricité, réseaux de chaleur, bois, biogaz – du fait de la limite de potentiel de chacune de ces sources. L'électrification du parc, avec notamment des systèmes performants du type pompes à chaleur air-eau ou géothermiques, représente un potentiel d'abattement important, mais elle ne peut en aucun cas être considérée comme l'unique solution. Le rythme souhaitable d'électrification dépend notamment des anticipations d'évolution du coût et du contenu carbone de l'électricité qui est appelée marginalement pour le chauffage. Cette évolution est rendue très incertaine à court et à moyen terme par le contexte énergétique actuel.

Coûts d'abattement et rentabilité socioéconomique des rénovations vers B avec électrification du système de chauffage

Action considérée		Rénovation vers B avec électrification par un système de chauffage performant				
Caractéristique du logement avant rénovation		Coût d'abattement actuel du 1 ^{er} et du 3 ^e quartile de logement au sein de la catégorie			Part des logements dont la rénovation serait socio- économiquement rentable	
Vecteur énergétique principal pour le chauffage avant rénovation	Étiquette DPE avant rénovation	(formule 1 budget carbone)			2025	2030
		Q1		Q3		
Fioul	C	120 €	-	160 €	80 %	100 %
	D	110 €	-	150 €	80 %	98 %
	E	90 €	-	130 €	92 %	100 %
	F	-40 €	-	80 €	100 %	100 %
	G	-140 €	-	50 €	100 %	100 %
Gaz	C	180 €	-	230 €	7 %	83 %
	D	160 €	-	210 €	20 %	81 %
	E	120 €	-	180 €	43 %	94 %
	F	-50 €	-	90 €	100 %	100 %
	G	-270 €	-	50 €	100 %	100 %
Électricité	C	1 930 €	-	2 430 €	0 %	0 %
	D	1 280 €	-	1 650 €	0 %	0 %
	E	880 €	-	1 240 €	0 %	0 %
	F	-1 500 €	-	600 €	33 %	33 %
	G	-7 000 €	-	330 €	37 %	37 %

Note de lecture : au sein de l'ensemble des logements initialement chauffés au fioul et d'étiquette énergétique E, pour la moitié des logements le coût d'abattement associé à une rénovation vers B avec passage à un chauffage électrique performant est compris entre 90 €/tCO_{2e} et 130 €/tCO_{2e} (pour un quart des logements, le coût d'abattement est inférieur à 90 €/tCO_{2e}, et pour un quart le coût d'abattement est supérieur à 130 €/tCO_{2e}). En tenant compte de la valeur de l'action pour le climat (VAC), ce type de rénovation serait socioéconomiquement rentable pour 92 % des logements de cette catégorie dès 2025 et pour la totalité des logements de la catégorie en 2030.

Source : calcul des auteurs sur la base des simulations réalisées par le Cired

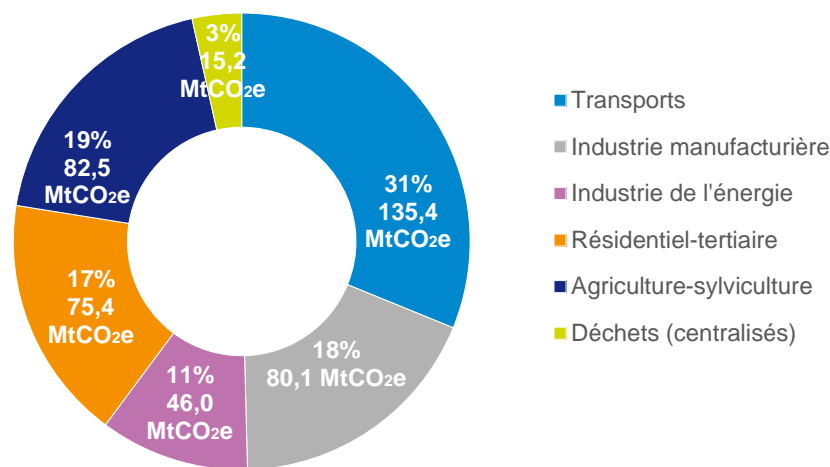


SYNTHÈSE

1. État des lieux du secteur et objectifs

Le secteur résidentiel et tertiaire est le principal consommateur d'énergie en France, avec 44 % de la consommation totale d'énergie finale du territoire¹. Les émissions directes² liées à la consommation d'énergie du secteur ne représentent que 17 % des émissions territoriales de gaz à effet de serre (GES), soit 75 Mt CO₂e en 2019, du fait du poids élevé de l'électricité dans sa consommation énergétique. Cela en fait le quatrième secteur le plus émetteur après les transports, l'industrie et l'agriculture (Graphique I).

Graphique I – Répartition des émissions de CO₂e en 2019 hors UTCATF* en France



* Utilisation des terres, changement d'affectation des sols.

Note : le périmètre couvre les émissions de la France métropolitaine et d'outre-mer (Outre-mer inclus dans l'UE : périmètre Plan climat Kyoto).

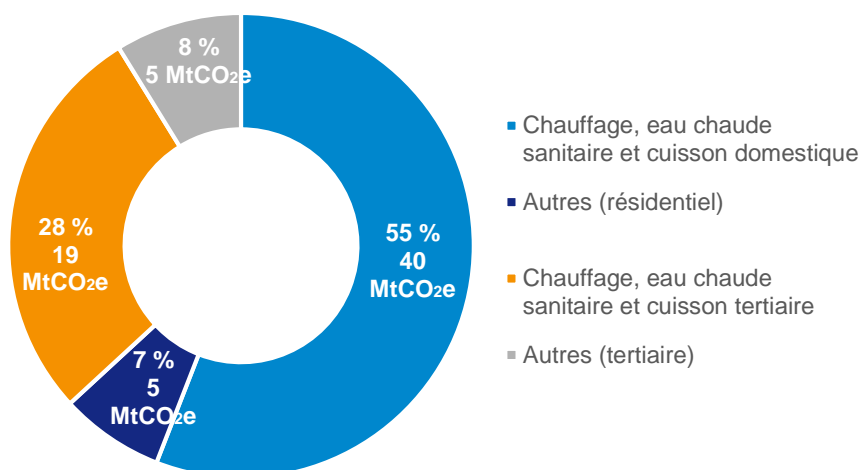
Source : à partir de l'inventaire Citepa de juin 2022 au format Secten et au périmètre Plan climat Kyoto, données non corrigées des variations climatiques, phase d'usage du bâtiment exclusivement

¹ Service des données et études statistiques (SDES) du MTE (2021), *Bilan énergétique de la France pour 2019*, Paris, janvier. Les émissions comptabilisées ici sont celles liées au fonctionnement des bâtiments et n'incluent pas celles liées à leur construction.

² Soit ce qu'on appelle le « Scope 1 », voir [Annexe 2](#). Seules sont prises en compte les émissions liées à l'usage des bâtiments, et non celles liées à la construction.

Les émissions du secteur résidentiel et tertiaire sont issues à plus de 60 % des bâtiments résidentiels et à 40 % des bâtiments tertiaires (Graphique II)¹.

**Graphique II – Répartition par usage des émissions de GES en MtCO₂e
du secteur du bâtiment en France en 2020**



e : estimation.

Note : le périmètre couvre les émissions de la France métropolitaine et d'outre-mer (Outre-mer inclus dans l'UE : périmètre Plan climat Kyoto). Les « autres » usages incluent : climatisation, réfrigération, utilisation de produits domestiques ou tertiaires, engins domestiques, déchets et brûlage domestiques, eaux usées, autres.

Source : à partir de l'inventaire Citepa de juin 2022 au format Secten et au périmètre Plan climat Kyoto, données non corrigées des variations climatiques, phase d'usage du bâtiment exclusivement

La Stratégie nationale bas-carbone (SNBC)², révisée en 2020 et visant la neutralité carbone sur le territoire à l'horizon 2050, fixe pour le secteur résidentiel-tertiaire un objectif pour 2030 équivalent à une réduction des émissions de près de 50 % par rapport à 2015³ et la décarbonation quasi complète à l'horizon 2050 (voir Graphique III). En 2019, le niveau des émissions étant déjà de 18 % inférieur à celui de 1990, il s'agit de réduire les émissions actuelles d'environ 40 % d'ici à 2030. La répartition de l'effort de décarbonation entre le résidentiel et le tertiaire n'est pas explicite dans les budgets carbones de la SNBC. Toutefois, sous l'hypothèse que cet effort serait identique, ces objectifs reviendraient à faire passer les émissions résidentielles de 45 Mt en 2020 à 27 Mt CO₂e en 2030.

Plus récemment, des objectifs communs de réduction des émissions de GES ont été fixés au niveau européen avec le paquet « Fit for 55 » qui renforce l'objectif de réduction pour

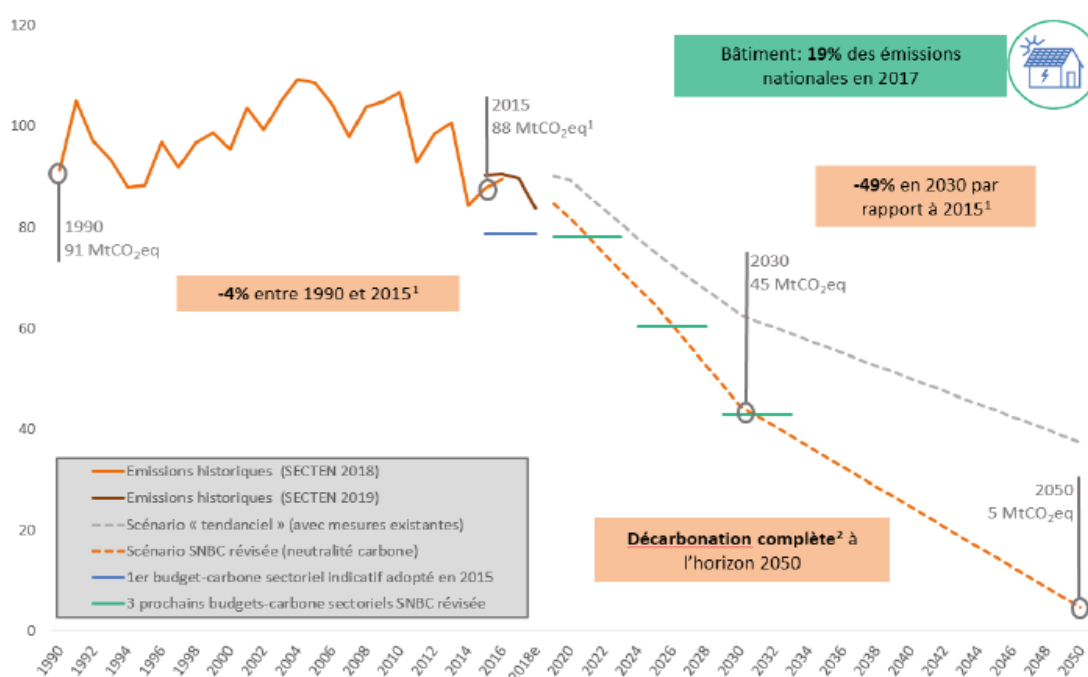
¹ Citepa (2022), *Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2021 – Format Secten*, rapport, juin.

² Ministère de la Transition écologique et solidaire – MTES (2020), *Stratégie nationale bas-carbone*, mars.

³ L'objectif est de 49 % d'ici 2030 par rapport à 2015, soit environ 51 % par rapport à 1990.

2030 à -55 % par rapport au niveau de 1990 pour l'ensemble de l'Europe (en comptant le secteur UTCATF). Ces nouveaux objectifs devraient se traduire sur les cibles d'émission du secteur résidentiel-tertiaire pour lequel est envisagée la création d'un système d'échange de quotas d'émissions européen (SEQE-UE), commun avec le secteur des transports. Les deux secteurs resteraient distincts de celui existant pour l'industrie.

Graphique III – Historique et projection des émissions du secteur des bâtiments entre 1990 et 2050 (MtCO₂eq)



¹ Les émissions utilisées pour l'année 2015 sont celles de l'inventaire Citepa d'avril 2018 au format Secten.

² Ne tient pas compte des fuites résiduelles « incompressibles » de gaz (gaz fluorés, gaz renouvelables).

e : estimation.

Sources : SNBC 2 (MTES, 2020), à partir de l'inventaire Citepa d'avril 2018 au format Secten et au périmètre Plan climat Kyoto ; scénarios AME et AMS 2018

Pour atteindre ces objectifs, trois types de leviers devront être combinés :

- **la sobriété énergétique**, qui se définit comme une démarche de réduction de la demande de services énergétiques s'opérant par des changements de comportement au niveau individuel et collectif : réduction de la surface moyenne de logement par habitant, baisse de la température de consigne de chauffage et hausse de la température de consigne de climatisation, mutualisation des équipements entre logements, développement de pratiques de cohabitation, et réduction des espaces de bureaux via le recours au télétravail, etc. ;

- **l'amélioration de l'efficacité énergétique**, permettant de consommer moins d'énergie pour le même service énergétique, grâce notamment à l'isolation de l'enveloppe des bâtiments (isolation des murs, du toit, du plancher bas, changement des fenêtres, etc.), au renforcement des normes d'efficacité pour la construction des bâtiments neufs ou encore à l'utilisation de systèmes de chauffage et d'équipements électroménagers plus économes en énergie (passage d'un radiateur électrique à une pompe à chaleur, par exemple) ;
- **la décarbonation du vecteur énergétique**, passant soit par le remplacement d'un vecteur énergétique fortement carboné (fioul, gaz) par un vecteur peu carboné (électricité, réseaux de chaleur issue d'énergies renouvelables, par exemple), soit par la réduction du contenu carbone de certains vecteurs (baisse des énergies fossiles dans la production d'électricité ou développement du biogaz, par exemple).

17 % des résidences principales, représentant 5,2 millions de logements¹, seraient des « passoires thermiques » d'après les estimations les plus récentes². Cela en fait un véritable gisement pour l'amélioration de l'efficacité énergétique. À ce titre, la SNBC ambitionne un rythme soutenu de rénovations de logements avec 370 000 rénovations « complètes équivalentes » par an dès 2022, en ciblant en priorité les « passoires énergétiques », et 700 000 rénovations à partir de 2030. L'objectif est d'atteindre à l'horizon 2050 un niveau de performance moyen sur l'ensemble du parc équivalent à la norme bâtiment basse consommation (BBC), soit une consommation énergétique par bâtiment en moyenne limitée à 50 kWh/m²/an en énergie primaire (étiquette DPE A). L'exigence plus élevée sur les performances énergétiques de la construction neuve permet une performance moyenne visée pour les rénovations légèrement en deçà de la moyenne, fixée au niveau BBC rénovation de 80 kWh/m²/an, correspondant à une classe DPE B³.

En outre, les vecteurs carbonés restent aujourd'hui majoritaires dans le bâtiment en France, puisque 41 % des résidences principales sont chauffées au gaz naturel et 11 % au fioul⁴. L'électricité (hors pompes à chaleur) est utilisée pour le chauffage dans 30 % des logements. Les pompes à chaleur restent minoritaires (7 % des résidences principales)

¹ Le parc de logements en France métropolitaine est estimé à plus de 36 millions de logements en 2021, dont 3,6 millions de résidences secondaires, 3 millions de logements vacants et 29,6 millions de résidences principales. Les estimations effectuées par le SDES, et dans la suite de cette étude, se limitent au périmètre des résidences principales en 2018 (un peu moins de 29 millions de logements).

² Le Saout R., Mesqui B. et Rathle J.-P. (2022), *Le parc de logements par classe de consommation énergétique au 1^{er} janvier 2022*, Document de travail, n° 60, Observatoire national de la rénovation énergétique, juillet.

³ Les constructions neuves de performance A+ devant représenter plus de 30 % du parc à cet horizon selon la SNBC 2, la performance moyenne visée pour les rénovations est fixée à un niveau BBC rénovation de 80 kWh/m²/an correspondant à une classe DPE B. Cette proportion devrait sans doute diminuer dans la SNBC 3.

⁴ Données Ceren pour l'année 2020, d'après le tableau de suivi de la rénovation énergétique dans le résidentiel édité par l'ONRE (voir <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/tableau-de-suivi>).

mais ont connu une progression particulièrement forte ces dernières années (+3 points entre 2016 et 2020). Le chauffage urbain est utilisé dans 10 % des logements collectifs.

Jusqu'à présent, la baisse des émissions du secteur s'est avérée inférieure aux objectifs fixés par le premier budget carbone pour 2015-2018. Dans son rapport sur l'analyse des politiques de rénovation thermique des bâtiments en 2020, le Haut Conseil pour le climat (HCC)¹ explique ce retard à la fois par l'insuffisance des dispositifs de financement – le coût des travaux pouvant peser lourdement sur les ménages – et par le fait que les mesures en place n'inciteraient pas à choisir les rénovations globales, plus performantes que les rénovations par gestes isolés. Les mesures adoptées plus récemment, avec un renforcement des moyens financiers (plan de relance 2020) et le recours accru à des obligations (loi « climat et résilience » de 2021) ont pour objectif d'accroître les efforts de réduction des émissions du secteur, mais leur efficacité reste à évaluer.

2. Recommandations pour le calcul des coûts d'abattement au regard des enjeux de politique publique et des spécificités du secteur

Le calcul des coûts d'abattement offre un éclairage indispensable pour la construction et l'évaluation des politiques publiques en apportant des éléments objectifs de hiérarchisation des actions et de comparaison des différentes stratégies d'ensemble. Néanmoins, sa mise en œuvre doit tenir compte d'un certain nombre de précautions d'usage. En premier lieu, la hiérarchisation des actions doit être considérée comme distincte de leur séquençement. L'interdépendance entre les actions de décarbonation et les délais de mise en œuvre de certaines actions peut conduire à mettre en place des actions avant d'autres, même si leur coût d'abattement est plus élevé². Ensuite, les valeurs de coût d'abattement doivent être considérées avec prudence car leur robustesse reste limitée par les informations disponibles aujourd'hui encore trop parcellaires.

Le calcul doit en outre s'adapter aux enjeux de politiques publiques spécifiques au secteur, en particulier :

- Les coûts de certaines actions sont par nature difficiles à mesurer. C'est le cas notamment des actions de sobriété. Plus que le coût de ces actions, c'est le potentiel effectif des actions de sobriété qu'il convient d'évaluer avec réalisme. Les scénarios

¹ Haut Conseil pour le climat (2020), *Rénover mieux : leçons d'Europe*, rapport, réponse à la saisine du gouvernement, novembre.

² Vogt-Schilb A., Meunier G. et Hallegatte S. (2018), « *When starting with the most expensive option makes sense: Optimal timing, cost and sectoral allocation of abatement investment* », *Journal of Environmental Economics and Management*, 88, mars, p. 210-233.

les plus ambitieux estiment que le potentiel de réduction des émissions liée à la sobriété se situe entre 20 % et 30 % des émissions.

- L'importance du coût des travaux de rénovation explique en partie que les ménages tendent à prioriser les rénovations par gestes isolés¹ ou combinés par couches successives (par exemple, en commençant par changer les fenêtres et la chaudière, puis en isolant le toit et le plancher pour, plus tard, isoler les murs). Cela pourrait inciter à chercher à calculer des coûts d'abattement par geste de sorte à les hiérarchiser. À titre d'illustration, dans nombre des cas types étudiés à l'aide d'un outil² développé par l'Institute for Climate Economics (I4CE) et paramétré pour l'évaluation socioéconomique, un euro investi dans le changement de système de chauffage (via l'installation d'une pompe à chaleur ou d'une chaudière gaz à très haute performance énergétique) permettrait de réduire davantage ses émissions qu'un euro investi dans des gestes d'isolation (murs, toiture, plancher bas).
- Néanmoins, comme l'a récemment souligné l'étude de l'Ademe, Dorémi et Enertech (2021)³, les gains de performance permis par le cumul de gestes séparés restent très en deçà de ceux permis par des rénovations globales ou en peu d'étapes. Notamment, la séparation de certains postes de travaux conduit à maintenir des ponts thermiques ; de la même manière, l'impact de l'installation d'une pompe à chaleur sur la consommation et les émissions de GES peut être très différent si elle est réalisée seule ou dans le cadre d'une rénovation d'ensemble cohérente. *In fine*, les bénéfices des gestes individuels ne s'additionnent pas, et leur réalisation successive et non coordonnée entraîne des surcoûts et limite la performance à terme par rapport à un projet de rénovation complète, c'est-à-dire réalisée en une seule ou un minimum d'étapes coordonnées et traitant l'ensemble des postes de travaux⁴.
- De ce fait, il apparaît difficile d'évaluer la pertinence des rénovations actuelles, largement constituées de rénovations par gestes, à l'aune de leurs coûts d'abattement sans indication du chemin global qui permettra d'atteindre les objectifs fixés (niveau d'efficacité énergétique moyen équivalent à BBC et décarbonation quasi complète du parc). Les objectifs de réduction des émissions nécessitant d'atteindre des niveaux de performance

¹ Entre janvier 2020 et juin 2021, 86 % des dossiers MaPrimeRénov' validés concernaient des travaux de rénovation mono-gestes. Il s'agissait, pour 98 % d'entre eux, de changement de système de chauffage (pompes à chaleur). Voir Cœuré B. (2021), *Comité d'évaluation du plan France Relance – Premier rapport*, Paris, France Stratégie, octobre.

² L'outil PanelRénov, qui permet d'étudier la viabilité économique de différents projets de rénovation et qui a été ici paramétré pour l'évaluation socioéconomique. Voir <https://www.i4ce.org/download/aides-publiques-renovation-energetique-logements/>.

³ Ademe, Dorémi et Enertech (2021), *La rénovation performante par étapes. Étude des conditions nécessaires pour atteindre la performance BBC rénovation ou équivalent à terme en logement individuel*, rapport, janvier.

⁴ Six postes sont identifiés en ce sens dans la loi « climat et résilience » : isolation des murs, des planchers bas, de la toiture, remplacement des menuiseries extérieures, ventilation, production de chauffage et d'eau chaude sanitaire et interfaces associées. Voir l'article L. 111-1 du *Code de la construction et de l'habitation*, 17°bis.

élevés, une approche consistant à considérer des coûts d'abattement d'actions de rénovation globale doit s'imposer, ou, *a minima*, de rénovation par étapes cohérentes.

- Par ailleurs, aborder la question de l'arbitrage entre efficacité énergétique et décarbonation du vecteur implique de tenir compte des effets de report des efforts vers le secteur producteur du vecteur décarboné. Il faut alors adopter une approche plus systémique que sectorielle. Ainsi, le coût d'abattement des émissions par électrification des usages doit-il intégrer le coût marginal de production de l'électricité décarbonée. À défaut, le calcul doit fournir un ordre de grandeur du volume de demande additionnelle pour le vecteur décarboné concerné afin d'en vérifier la crédibilité et intégrer des trajectoires de prix de cette énergie cohérentes avec cette nouvelle demande.

Coûts d'abattement : de quoi s'agit-il ?

À la suite de l'accord de Paris, la France s'est fixé l'objectif de zéro émission nette à l'horizon 2050. Il s'agit d'un objectif ambitieux qui implique, pour une partie des réductions d'émissions, le déploiement de technologies coûteuses. La question se pose alors du choix des technologies à mettre en œuvre, et du moment pour le faire. La réponse canonique à cette question passe par le calcul du coût associé à la réduction de chaque tonne de CO₂-équivalent d'émissions, exprimé en €/tCO₂eq et appelé *coût d'abattement* d'une action de décarbonation. Plus le coût d'abattement est faible, plus l'action sera économiquement « facile ». Pour sélectionner et hiérarchiser les actions utiles à la collectivité, il faut comparer les coûts d'abattement entre eux, mais aussi à la mesure des gains de l'action. Cette dernière est donnée par la VAC (valeur de l'action pour le climat), actuellement fixée à 120 €/tCO₂eq, et qui augmente progressivement jusqu'en 2050, en passant par 250 €/tCO₂eq en 2030.

Après avoir établi, en 2019, cette trajectoire de la VAC préconisée pour la France, la commission Quinet¹ constatait qu'« il est essentiel de poser un cadre méthodologique clair et partagé pour pouvoir évaluer le coût d'abattement socioéconomique des différentes actions ». Dans ce but a été mise en place une commission présidée par Patrick Criqui et appuyée par le CGDD, la DG Trésor et France Stratégie. Son travail s'inscrit également dans le cadre des suites à donner à la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC 2), et de la préparation de la SNBC 3. En plus d'aborder les aspects méthodologiques, cette commission recense et établit les coûts d'abattement (en €/tCO₂eq évitée) associés à différentes actions et technologies dans les secteurs du transport, de l'électricité, du bâtiment, de l'industrie, de l'hydrogène et de l'agriculture.

¹ Quinet A. (2019), *La valeur de l'action pour le climat. Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques*, rapport, France Stratégie, février.

Outre ces enjeux, le secteur du bâtiment présente des spécificités qui peuvent aussi affecter la méthodologie de calcul des coûts d'abattement :

- La grande variété des caractéristiques des bâtiments (ancienneté, contraintes architecturales, localisation, usage résidentiel ou tertiaire, etc.) appelle à des techniques de rénovation très variées et, par conséquent, une granularité fine des actions à évaluer.
- Le système décisionnel, largement décentralisé, est composé de multiples acteurs aux comportements très différents. Parmi les différentes situations, certaines engendrent des freins à l'investissement, notamment au sein de copropriétés où des problèmes de coordination peuvent apparaître, lorsque les propriétaires bailleurs ne supportant pas la facture énergétique ne voient pas d'incitations à rénover, ou encore lorsque des contraintes de crédit pèsent sur certains ménages. Ces freins relèvent de structures organisationnelles qui bloquent le financement de l'action et sont indépendants du coût de l'action. Il n'apparaît donc pas pertinent d'en tenir compte dans le coût d'abattement. En revanche, il convient de bien identifier les « barrières de marché » associées, de sorte à pouvoir lever les freins à la mobilisation des actions à faible coût. Ces barrières sont d'autant plus importantes que les actions de réduction des émissions nécessitent de lourds investissements initiaux qui ne peuvent se rentabiliser que sur un temps très long.
- Certaines situations génèrent un écart entre la performance attendue et la performance effective des solutions de décarbonation. Elles se traduisent par des économies d'énergie observées plus faibles que celles qu'on avait anticipées et sont à l'origine de ce qui est parfois qualifié de « *performance gap* ». Ces mécanismes doivent être, autant que possible, pris en compte dans le calcul des coûts d'abattement. Ces cas regroupent :
 - l'effet rebond qui recouvre des phénomènes divers dont la plupart sont excessivement difficiles à évaluer. Ce rapport préconise la seule prise en compte du rebond direct de consommation énergétique des ménages dans le calcul des coûts d'abattement. Celui-ci est principalement associé à la sous-consommation initiale des ménages (qualifié dans ce cas de *pre-bound effect*¹), particulièrement marquée dans les cas de précarité énergétique où les occupants, n'ayant pas les moyens de se chauffer correctement compte tenu des déperditions d'énergie, sous-utilisent leur système de chauffage. Ce rebond correspond en ce sens à un rattrapage du niveau de confort après privation énergétique ;
 - les erreurs d'évaluation de la performance des logements par les modèles énergétiques qui tendent probablement à surévaluer les gains potentiels² ;

¹ Par opposition aux effets rebond liés à la surconsommation après travaux, qui restent d'ampleur modérée.

² Le rapport RTE et Ademe (2020) souligne à ce titre que « l'estimation de la consommation d'électricité associée au chauffage via l'application stricte de la méthode du DPE sur le parc de bâtiments chauffés à l'électricité donnerait un volume près de deux fois plus important que celui relevé par les données de consommation nationale ». Voir

- les problèmes de qualité des travaux réalisés liés à un ensemble de facteurs (le manque de formation des artisans entre autres), et renforcés par l'existence d'une asymétrie de l'information entre le client et l'entrepreneur, qui peuvent conduire à des performances plus faibles qu'attendu.

Les travaux de Cayla et Osso (2013)¹ fournissent des estimations permettant de calibrer un taux d'utilisation du système de chauffage par les ménages en fonction de leur revenu et des caractéristiques de leur logement. Sans estimations précises, un écart de performance de l'ordre de 20 % au niveau agrégé avec des tests de sensibilité visant à couvrir une plage de 0 % à 40 % au niveau agrégé semble réaliste.

- Lorsque les occupants se trouvent en situation de précarité énergétique, les rénovations énergétiques des logements s'accompagnent de gains importants en termes sanitaires et de confort. Si les gains de confort restent difficiles à évaluer et à intégrer dans les coûts d'abattement, le groupe de travail sur l'évaluation socioéconomique des effets de santé des investissements publics² fournit une méthodologie pour l'évaluation monétaire des bénéfices de santé de la rénovation énergétique. Celle-ci peut être directement intégrée dans le calcul des coûts d'abattement.
- La transformation du secteur doit surmonter d'importantes inerties :
 - en premier lieu, il s'agit d'un secteur dans lequel le renouvellement des actifs est particulièrement lent. En 2050, 70 % du parc devrait encore être constitué d'immeubles construits avant 2012, et ne respectant donc pas la norme BBC (MTES, 2020). La plus grande partie des efforts de décarbonation du secteur passera donc par des actions de rénovation de ce parc ;
 - en second lieu, le progrès technique observé et le contenu en travail des activités de rénovation ne permettent pas d'anticiper de fortes baisses des coûts. Certes, le progrès technique pourrait faire baisser certains coûts de la rénovation mais, inversement, les tensions sur le marché du travail dans ce secteur pourraient entraîner des pressions à la hausse sur les salaires. Des tensions sur le prix de certains matériaux pourraient aussi apparaître. Les calculs de coûts d'abattement doivent de ce fait intégrer des analyses de sensibilité, en tenant compte du fait que le progrès technique observé dans le domaine est historiquement modéré.

RTE et Ademe (2020), *Réduction des émissions de CO₂, impact sur le système électrique : quelle contribution du chauffage dans les bâtiments à l'horizon 2035 ?*, rapport, décembre, p. 74.

¹ Cayla J.-M. et Osso D. (2013), *Does energy efficiency reduce inequalities? Impact of policies in Residential sector on household budget*, ECEEE Summer Study Proceedings, European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE), Toulon/Hyères, p. 1247-1257.

² CGDD, France Stratégie et SGPI (2022), *Évaluation socioéconomique des effets de santé des projets d'investissement public*, rapport, sous la direction de Benoît Dervaux et Lise Rochaix, mars.

3. Applications réalisées

Sur cette base, le rapport présente deux applications de calcul de coûts d'abattement dans le secteur résidentiel. L'analyse des coûts d'abattement dans le secteur tertiaire est renvoyée à un document de travail du ministère de la Transition écologique¹.

La première application vise à comparer des coûts d'abattement associés à des rénovations de type global appliquées à différentes catégories de logements sur la base du paramétrage du modèle Res-IRF, modèle technico-économique de simulation de la demande d'énergie pour le chauffage dans le secteur résidentiel français développé par le Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (Cired)². Compte tenu de la disponibilité des données au moment de l'étude, on fait référence ici aux anciennes étiquettes DPE sur la consommation d'énergie, telles qu'en vigueur avant la réforme de juillet 2021.

Dans cet exercice calibré à partir des données du SDES sur la répartition du parc de logements par classe énergétique en 2018, 1 680 catégories de logements³ couvrant près de 25 millions de résidences principales sont distinguées. Les rénovations globales considérées sont des rénovations permettant d'atteindre des niveaux de performance correspondant aux étiquettes DPE⁴ A, B ou C, accompagnées ou non d'une décarbonation du vecteur par électrification du système de chauffage. Les rénovations vers A ou B peuvent naturellement être considérées comme performantes au sens de la loi « climat et résilience ». Les rénovations vers C sont de moindre ambition, mais elles peuvent être qualifiées de performantes pour les logements d'étiquette initiale F ou G. La nature du système électrique de chauffage – pompe à chaleur ou convecteur – n'est pas précisée mais implicitement prise en compte dans la performance énergétique. Autrement dit, il est implicitement supposé que l'installation d'une pompe à chaleur s'accompagne d'une rénovation de l'enveloppe et l'amélioration de l'efficacité énergétique liée à l'installation de la pompe à chaleur est implicitement embarquée dans l'amélioration globale de performance énergétique du logement (voir Encadré page suivante et Encadré 1 du rapport).

¹ Vermont B. et Domergue S. (2020), *Scénarios de rénovation énergétique des bâtiments tertiaires. Quelles solutions pour quels coûts à l'horizon 2050 ?*, Document de travail, CGDD. Ce travail évalue l'atteinte des objectifs de réduction d'émissions à l'horizon 2050 à un coût d'abattement moyen compris entre 100 €/tCO₂ et 200 €/tCO₂ évitée. L'hétérogénéité des coûts d'abattement et l'ampleur des coûts marginaux d'abattement ne sont toutefois pas précisées, ce qui limite la comparaison avec les résultats obtenus dans le présent rapport sur le secteur résidentiel.

² Giraudet L.-G., Bourgeois C. et Quirion P. (2020), « Efficacité économique et effets distributifs de long terme des politiques de rénovation énergétique des logements », *Économie & prévision*, n° 217(1), p. 43-63.

³ Croisant sept classes énergétiques, quatre sources énergétiques principales de chauffage, deux types de logements, trois statuts d'occupation et dix déciles de revenus des occupants.

⁴ Les étiquettes énergétiques prennent en compte ici le coefficient d'énergie primaire de l'électricité de l'ancien DPE (2,58), soit celui en vigueur avant juillet 2021.

Encadré – Pompe à chaleur et rénovation performante

Les pompes à chaleur (PAC) sont des systèmes de chauffage alimentés en général à l'électricité, permettant d'extraire de l'énergie renouvelable de l'environnement extérieur, en particulier de l'air, du sol ou de l'eau selon le type de PAC (aérothermique air-air ou air-eau, géothermique, hydrométrique), et de la restituer sous forme de chaleur dans le bâtiment. Le coefficient de performance (COP) d'une PAC, mesuré par le rapport entre l'énergie transformée et l'énergie consommée, est supérieur à un, ce qui en fait un système de chauffage beaucoup plus performant qu'un système de convecteur électrique. La valeur du COP dépend à la fois du type de PAC et des conditions dans lesquelles celle-ci fonctionne. Notamment, certaines limites nécessitent des précautions pour assurer un rendement optimal de la PAC :

- Leur forte sensibilité aux écarts de température rend généralement nécessaire le recours à un chauffage d'appoint (convecteurs électriques, ou ancienne chaudière déjà installée), ce qui a des conséquences en période de pointe. Certaines PAC pourraient même devenir inutilisables lorsque les températures sont trop négatives. Les PAC géothermiques sont *a priori* moins sensibles à ces écarts, la température du sol étant plus constante que celle de l'air, et affichent une plus grande stabilité de leur rendement¹.
- Une forte dépendance de la performance effective aux conditions d'installation : installer une PAC dans un logement mal isolé risque de dégrader la performance et limiter le confort, la chaleur fournie par une PAC étant en général de basse température, cela d'autant plus dans une région où le climat est rude.
- Le fonctionnement en basse température implique d'adapter les équipements de diffusion de la chaleur (passer d'une haute température dans le circuit à une basse température conduit à réduire fortement la puissance des radiateurs en place).

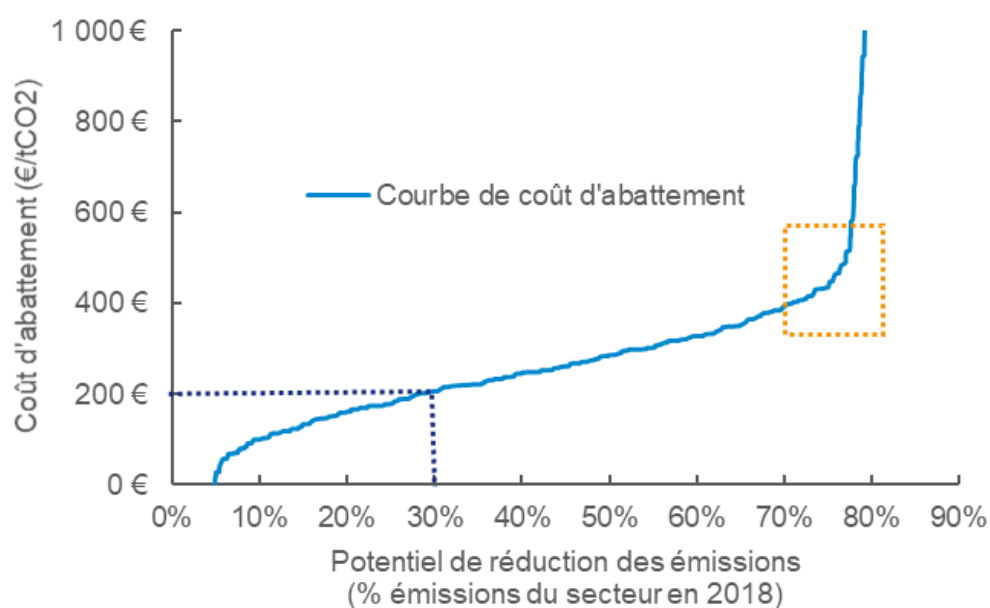
Le coût d'abattement de six types d'actions – combinant une cible d'étiquette DPE après rénovation (A, B ou C) avec une décarbonation ou non du vecteur – est calculé pour chaque logement selon ses caractéristiques (étiquettes DPE initiale et finale, vecteur énergétique initial, surface et revenu des occupants) et sur la base d'un paramétrage qui tient compte des phénomènes de rebond² et des cobénéfices de santé liés à un éventuel sous-chauffage antérieur. La comparaison de ces six types d'actions se base sur la

¹ Sur le potentiel de la géothermie de surface, voir la note du Haut-Commissariat au Plan (2022), « [Responsabilité climatique. La géothermie de surface : une arme puissante](#) », *Ouverture*, n° 12, octobre.

² Sur la base des fonctions de consommation de chauffage estimées par Cayla et Osso (2013), [Does energy efficiency reduce inequalities?...](#), *op. cit.* et du paramétrage du modèle Res-IRF.

comparaison des coûts d'abattement pour une catégorie de logement donnée et sur les courbes de coût marginal d'abattement de chaque action. Ces courbes représentent le potentiel d'abattement atteignable par la mise en œuvre de l'action considérée dans le cas où celle-ci serait mise en œuvre sur les différentes catégories de logements par ordre décroissant de rentabilité socioéconomique (ordre de mérite). Le Graphique IV présente une illustration de ce type de courbe.

Graphique IV – Exemple de courbe de coût d'abattement marginal



Lecture : pour 200 €/tCO₂, l'action considérée permet d'abattre 30 % des émissions du parc résidentiel français. Le potentiel maximal d'abattement permis par le déploiement de cette action au sein du parc de logements est atteint autour de 80 % des émissions pour un coût d'environ 500 €/tCO₂. Le rectangle orange symbolise la limite de potentiel atteignable par le déploiement de cette action au sein du parc.

Source : France Stratégie

Ces coûts d'abattement sont bien entendu sujets à de nombreuses incertitudes. Des tests de sensibilité couvrant notamment les incertitudes sur l'état du parc de logements, le coût et la qualité des rénovations, l'évolution du prix des énergies, le progrès technique ou encore les tensions sur le marché de la rénovation ont été réalisés. Le contenu carbone de l'électricité retenu pour l'usage chauffage est de 147 gCO₂/kWh ; il s'agit de la valeur précédant celle définie par la RE2020, 79 gCO₂/kWh. Cette dernière est en effet sujette à discussion¹, notamment parce qu'elle prend moins bien en compte la corrélation entre les pointes électriques et le recours au chauffage électrique. La sensibilité des

¹ Voir notamment Ademe (2020), [Positionnement de l'Ademe sur le calcul du contenu CO₂ de l'électricité, cas du chauffage électrique](#).

résultats à ce changement de contenu carbone est toutefois présentée dans le rapport. Par ailleurs, afin de tenir compte de la décarbonation du vecteur électrique et de la baisse de la part du gaz dans les moyens de chauffage d'ici 2050¹, les simulations réalisées supposent une décarbonation progressive du vecteur électrique à partir de 2030 jusqu'à la neutralité. Les vecteurs gaz et fioul sont eux supposés à contenus carbone constants sur la période dans l'hypothèse centrale. Dans la mesure où la production de gaz décarboné pourra se développer mais avec un potentiel limité, comme le prévoit la SNBC, la sensibilité des résultats à un scénario de décarbonation progressive du gaz à partir de 2030 est également considérée.

Les simulations présentées ici ont été réalisées avant le contexte de la guerre en Ukraine et ne tiennent pas compte de l'évolution du prix des énergies qui s'ensuit. La prise en compte de cette évolution conduira sans aucun doute à revaloriser significativement la rentabilité des rénovations.

Le second exercice illustre le calcul du coût d'abattement associé au raccordement de logements à un réseau de chaleur. Il a été réalisé en s'appuyant sur des données obtenues sur le projet d'extension du réseau de la métropole de Grenoble.

Ces exercices ne constituent que des illustrations de calcul de coûts d'abattement et restent largement insuffisants pour définir des stratégies opérationnelles de décarbonation du secteur au niveau national. Pour cela des travaux analysant des scénarios complets de décarbonation du parc doivent être réalisés. Les exercices présentés ici permettent néanmoins de tirer certains enseignements décrits dans la section qui suit.

4. Principaux résultats des applications

Les émissions de GES du secteur résidentiel sont relativement concentrées

En tenant compte des comportements des ménages dans les simulations de consommation de chauffage, les 25 % des logements les plus émetteurs représenteraient plus de la moitié des émissions du parc résidentiel. 20 % seulement de ces logements seraient des logements d'étiquettes énergétiques F et G et plus des trois quarts seraient des logements d'étiquettes D et E.

¹ Le scénario AMS de la SNBC 2 prévoit que la production de gaz pour le secteur résidentiel passe d'environ 150 TWh aujourd'hui à moins de 50 TWh en 2050. À noter que le contexte du conflit russo-ukrainien pourrait avoir un impact sur cette trajectoire.

Seules un peu plus de 5 % des rénovations complètes apparaissent socioéconomiquement rentables indépendamment de l'enjeu climatique (i. e. rentables sans avoir à donner une valeur au carbone)

Les rénovations à coûts d'abattement négatifs s'appliqueraient à 6 % des logements responsables de 6 % des émissions du parc sur le périmètre considéré. Les coûts d'abattement négatifs n'apparaissent pratiquement que pour les rénovations des passoires thermiques occupées par des ménages en situation de précarité énergétique et dont la rénovation engendre des gains sanitaires importants. Ces logements représentent paradoxalement un faible potentiel d'abattement de CO₂ car, bien qu'il s'agisse de passoires énergétiques, leur rénovation n'amène pas les occupants à réduire leur consommation de chauffage mais leur permet de se chauffer convenablement à un coût acceptable (*pre-bound effect* décrit plus haut). De telles rénovations relèvent donc avant tout d'un enjeu sanitaire et social du fait des gains considérables en termes de santé (voir plus bas).

Les rénovations des passoires thermiques occupées par des ménages à faibles revenus génèreraient des cobénéfices sanitaires considérables

Si l'on retient les paramètres recommandés par le rapport sur l'évaluation socioéconomique des bénéfices de santé des projets d'investissements publics¹, ces gains s'élèvent à 7 500 euros par an et par logement en moyenne pour les logements concernés, et nettement plus pour les ménages les plus précaires. Dans de nombreux cas, cet enjeu justifie à lui seul la rénovation du logement. Ces cobénéfices réduiraient les coûts d'abattement pour ces logements de 2 300 €/tCO₂ en moyenne mais avec une forte dispersion. Comme le souligne le rapport mentionné, les paramètres du calcul, fondés en grande partie sur des travaux empiriques anglais² et réajustés à la situation française par le service d'études médicales d'EDF³, mériteraient d'être confirmés. Des travaux analysant le croisement de données relatives aux caractéristiques des logements (dont le chauffage) et des occupants (les revenus) avec des données de santé seraient en ce sens très utiles. En outre, ces travaux portent uniquement sur les effets sur la santé des températures trop basses dans les logements. L'augmentation des épisodes caniculaires pourrait avoir des effets sanitaires spécifiques qu'il faudrait prendre en compte, notamment dans les passoires énergétiques.

¹ CGDD, France Stratégie et SGPI (2022), *Évaluation socioéconomique des effets de santé...*, op. cit.

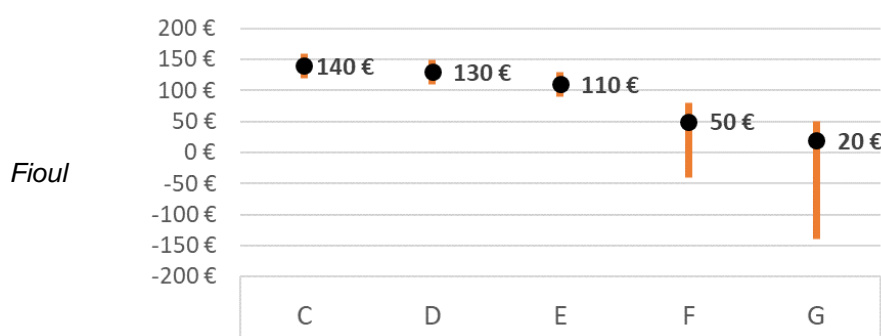
² University of Warwick London School of Hygiene et Tropical Medicine (2003), *Statistical Evidence to Support the Housing Health and Safety Rating System*, t. I, *Project Report*, Londres, Office of the Deputy Prime Minister.

³ Ezratty V., Ormandy D., Laurent M. H., Duburcq A., Lenchi C., Boutière F. et Lambrozo J. (2017), « *Fuel poverty in France: Adapting an English methodology to assess the health cost implications* », *Indoor and Built Environment*, 26(7), juin, p. 999-1008.

Les coûts d'abattement dans le secteur résidentiel témoignent d'une très grande dispersion

- La prise en compte de seulement quelques dimensions (étiquettes DPE initiale et finale, vecteur énergétique initial, surface et revenu des occupants) suffit à engendrer une palette de coûts d'abattement extrêmement large, y compris au sein d'une même étiquette DPE initiale. Cette forte hétérogénéité est à prendre en compte dans la conception des instruments des politiques publiques. En cas de recours à des normes, celles-ci devraient par exemple intégrer divers critères pour assurer une bonne efficacité économique. **Des normes fondées sur le seul critère d'étiquette DPE pourraient avoir pour résultat des trajectoires non optimales**, même si la récente refonte du DPE devrait permettre d'atténuer ce risque¹.
- D'après les critères pris en compte, **la priorité d'action devrait se porter sur l'ensemble des logements chauffés au fioul et des logements d'étiquettes F et G chauffés au gaz** – pour lesquels les rénovations très performantes (avec électrification via les pompes à chaleur et l'isolation permettant d'amener à B par exemple dans le Graphique V) affichent les coûts d'abattement les plus faibles – **ainsi que sur les logements occupés par des ménages en situation de précarité énergétique** dont beaucoup sont sur un système de chauffage électrique, ce vecteur étant surreprésenté au sein des logements d'étiquettes F et G (voir Graphique VI)².

Graphique V – Coûts d'abattement d'une rénovation vers B avec électrification du système de chauffage selon le vecteur de chauffage et l'étiquette DPE initiaux du logement (méthode budget carbone, en €/tCO₂)



¹ Désormais, l'intégration des émissions de gaz à effet de serre dans le DPE permet d'aligner la classification du parc avec la rentabilité socioéconomique et d'y concentrer les efforts de rénovation.

² La mise à jour de 2022 par le SDES des données du parc de logements par classe de consommation énergétique conduit toutefois à modifier la structure du parc telle qu'elle est décrite dans ce rapport. En particulier, la concentration des logements chauffés au fioul dans les passoires énergétiques apparaît plus élevée dans la nouvelle version.



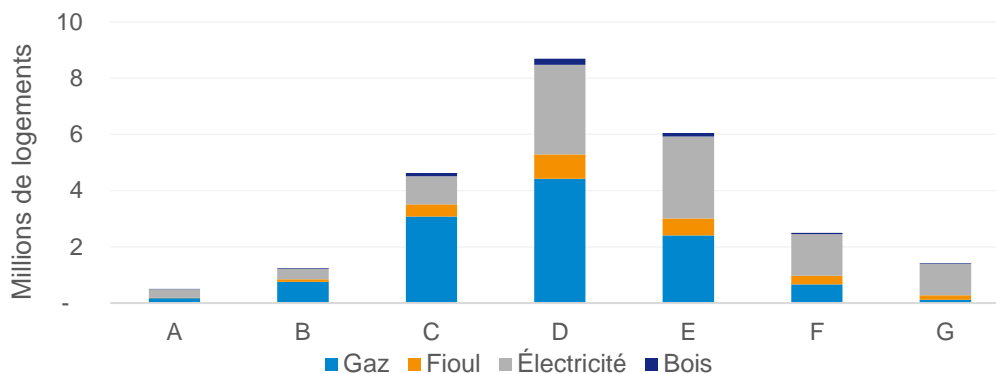
- Coût d'abattement médian de la rénovation pour les logements de la catégorie

Écart entre le premier et le troisième quartile de coûts d'abattement de la rénovation au sein de la catégorie

Lecture : sous les hypothèses retenues, le coût d'abattement médian d'une rénovation consistant à amener le logement vers une étiquette énergétique B et à électrifier son système de chauffage est de 50 €/tCO₂ pour un logement initialement chauffé au fioul et affichant une étiquette F. Au sein de cette catégorie de logements 25 % des logements afficheraient un coût d'abattement inférieur à -40 €/tCO₂ et 25 % un coût supérieur à 80 €/tCO₂. Les coûts d'abattement médians d'une rénovation vers B avec électrification iraient de 20 €/tCO₂ à 140 €/tCO₂ selon l'étiquette énergétique de départ pour les logements chauffés au fioul, de 10 €/tCO₂ à 210 €/tCO₂ pour les logements initialement chauffés au gaz et de 130 €/tCO₂ à 2 200 €/tCO₂ pour les logements initialement chauffés à l'électricité.

Source : France Stratégie, d'après Res-IRF, Cired

Graphique VI – Distribution des logements selon l'étiquette énergétique et le vecteur énergétique principal de chauffage



Lecture : les logements chauffés à l'électricité représentent 35 % des logements étiquetés D et près de la moitié des logements de classe DPE E, contre seulement 21 % des logements de classe DPE C.

Source : Cired à partir de données SDES 2018

L'atteinte des objectifs nécessitera de pousser loin à la fois les gains d'efficacité énergétique et la décarbonation des vecteurs

Comme le soulignent la plupart des travaux sur le sujet¹, l'atteinte des objectifs nécessitera de pousser loin à la fois les gains d'efficacité énergétique et la décarbonation des vecteurs car chacun de ces leviers se heurte à des limites de potentiel. En particulier, s'appuyer sur l'électrification massive sans viser de gains importants d'efficacité énergétique n'est pas envisageable pour les raisons suivantes :

- **La contrainte sur l'offre d'énergie décarbonée et sur la sécurité d'alimentation en électricité** : appuyer les efforts de réduction des émissions du secteur résidentiel sur la seule décarbonation par changement de vecteurs énergétiques – électricité, biogaz ou encore chaleur de réseau – mettrait en tension l'offre de ces vecteurs. À ce titre, le rapport RTE et Ademe (2020)² alerte sur le fait qu'un scénario d'électrification du chauffage par le déploiement massif de radiateurs électriques peu performants sans amélioration de l'enveloppe des bâtiments aurait des impacts sur la sécurité d'approvisionnement. Le déploiement de systèmes de chauffage électrique performants, comme les pompes à chaleur, minimiserait significativement ce risque mais nécessite un accompagnement de travaux d'isolation d'ampleur (voir Encadré page 23). De même, le potentiel technique disponible en biomasse sera limité, et donc la quantité de bioénergies totale qu'il sera possible de produire également, y compris à long terme.
- **L'électricité, en particulier celle utilisée pour le chauffage, reste aujourd'hui une énergie carbonée** : l'électricité utilisée pour le chauffage contribue aux pointes de demande au cours desquelles le recours aux productions d'électricité carbonées est plus important. S'ajoute à cela le fait que l'accroissement de la demande génère des effets induits sur le système électrique à l'échelle européenne, le développement des usages électriques en France conduisant à moins exporter d'électricité bas carbone et/ou à importer davantage d'électricité en moyenne plus carbonée³. En outre, d'un point de vue dynamique, la décarbonation des vecteurs ne pourra être que progressive et les réductions d'émissions rendues possibles par l'électrification des usages sur les prochaines décennies restent contraintes.

¹ Voir notamment RTE et Ademe (2020), *Réduction des émissions de CO₂...*, *op. cit.* ; Haut Conseil pour le climat (2020), *Rénover mieux : leçons d'Europe*, *op. cit.* ou encore Dolques G., Ledez M. et Hainaut H. (2022), *Quelles aides publiques pour la rénovation énergétique des logements ?*, rapport, I4CE, février.

² RTE et Ademe (2020), *Réduction des émissions de CO₂...*, *op. cit.*

³ *Ibid.*

- **Un risque de coût échoué** : viser des rénovations trop peu ambitieuses au départ fait prendre le risque de compromettre le potentiel d'abattement futur puisque rénover de nouveau les logements entraînerait un surcoût important¹.

Néanmoins le meilleur compromis reste difficile à déterminer. D'après les simulations réalisées, des rénovations avec électrification du vecteur vers C réduiraient significativement les coûts d'abattement en comparaison à des rénovations vers B correspondant au niveau BBC rénovation² (voir Graphique VII) sans nécessairement compromettre le potentiel d'abattement à terme si les vecteurs sont décarbonés. Deux incertitudes jouant en sens opposé maintiennent toutefois la question en suspens. La première porte sur le report de charge qu'une telle réduction d'ambition impliquerait sur la production électrique et sur la capacité du secteur électrique à se décarboner et à assurer la production nécessaire. À titre d'illustration, un scénario extrême consistant à électrifier en rénovant vers C l'ensemble des logements au fioul et l'ensemble des logements chauffés au gaz de classes D et inférieures conduirait à accroître la demande d'électricité annuelle pour le chauffage de l'ordre de 10 à 15 TWh par rapport à une rénovation vers B.

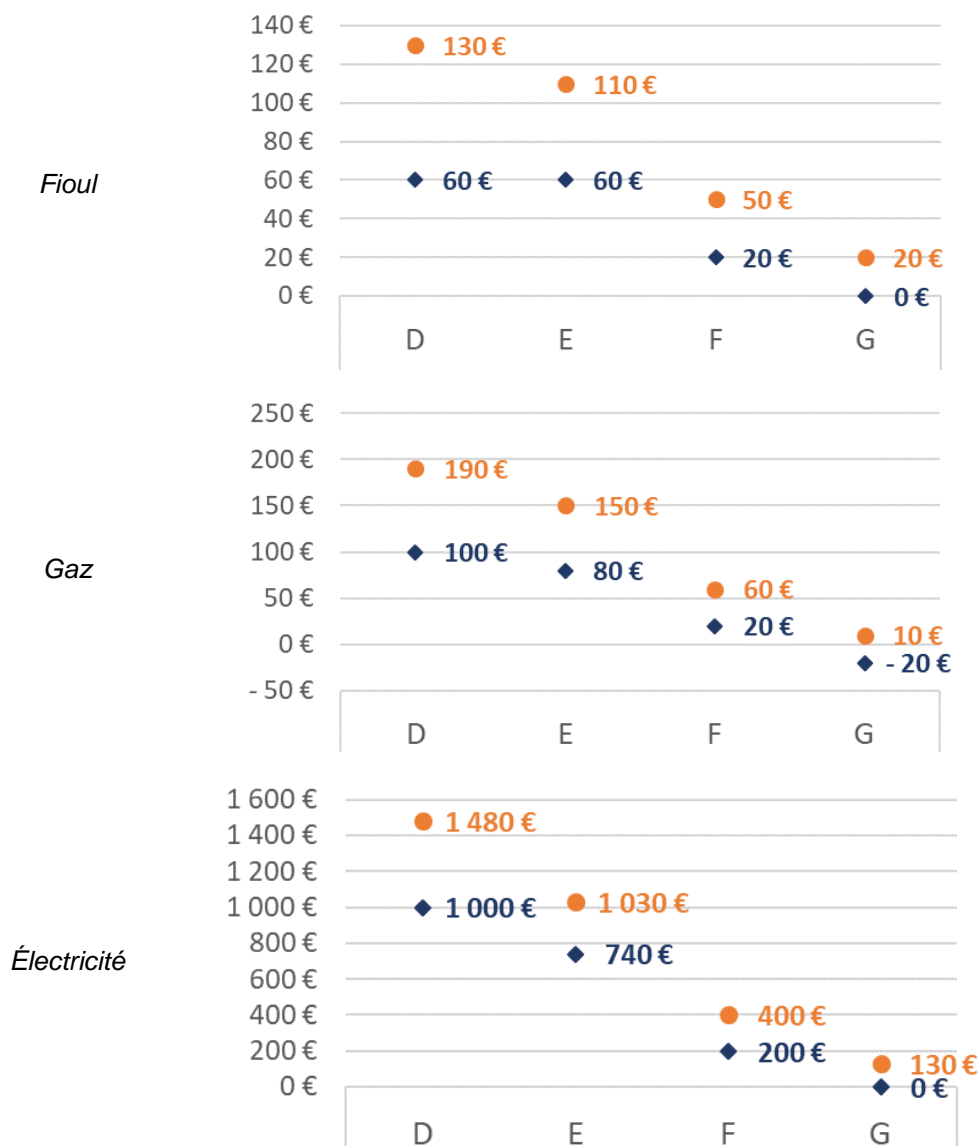
Cet ordre de grandeur reste faible au regard des quantités d'électricité nécessaires pour l'ensemble des usages et devrait être facilement absorbable. En revanche, l'effet sur la pointe hivernale pourrait être significatif et grever la capacité du secteur à se décarboner ou en accroître significativement les coûts³. La seconde incertitude tient aux coûts et à la performance des investissements sur l'efficacité énergétique de l'enveloppe, notamment dans un contexte où des tensions pourraient apparaître sur le marché de la rénovation. Ainsi, en l'absence de réponse claire sur cet arbitrage, une option sans regret consisterait à ordonnancer les travaux afin d'atteindre un niveau de consommation équivalent à une étiquette C sur une partie du parc, tout en visant des rénovations plus ambitieuses (A ou B) pour tous les cas opportuns, de manière à ne pas compromettre à terme l'atteinte des objectifs de décarbonation. L'accroissement des prix de l'énergie du fait de la guerre en Ukraine accentue la nécessité d'une telle stratégie.

¹ Voir Ademe, Dorémi et Enertech (2021), *La rénovation performante par étapes...*, *op. cit.*

² Les simulations réalisées considèrent que tous les logements sont rénovés vers B, le coût d'abattement pour un même potentiel pourrait être réduit en considérant, comme le prévoit la SNBC, la possibilité de rénovations plus performantes pour certains logements et moins pour d'autres tout en conservant une moyenne correspondant à une classe B, mais le message reste valable.

³ Le rapport RTE et Ademe (2020) cité plus haut précise, dans le cadre de scénarios à 2035 conduisant à des augmentations de consommation d'électricité comparable, que « cette augmentation de la consommation électrique, toutes choses étant égales par ailleurs, est très inférieure aux quantités d'électricité nécessaires pour la mobilité électrique et la production d'hydrogène et ne pose pas de difficulté spécifique en énergie dans le cas où le scénario de développement du mix électrique prévu par la PPE se réalise », mais il ajoute que « ces scénarios conduisent également à augmenter les pointes hivernales à horizon 2035 » (de +6 à +8 GW pour une pointe actuelle de l'ordre de 100 GW).

Graphique VII – Coûts d'abattement médians de rénovations vers B et vers C avec électrification du système de chauffage selon le vecteur de chauffage et l'étiquette DPE initiaux du logement (méthode budget carbone, en €/tCO₂)



● Coût d'abattement médian de la rénovation vers B avec électrification pour les logements de la catégorie

◆ Coût d'abattement médian de la rénovation vers C avec électrification pour les logements de la catégorie

Lecture : électrifier le chauffage et rénover vers C un logement initialement chauffé au fioul et de classe énergétique F reviendrait à un coût d'abattement de 20 €/tCO₂ contre 50 €/tCO₂ si ce logement était électrifié et rénové vers B. Rénover vers C plutôt que vers B tout en électrifiant le système de chauffage un logement initialement chauffé au gaz de classe E réduirait le coût d'abattement de 70 €/tCO₂ en le passant de 150 €/tCO₂ à 80 €/tCO₂.

Source : France Stratégie, d'après Cired

La décarbonation du mix énergétique devra mobiliser des sources diverses

Dans tous les cas, l'atteinte des objectifs nécessitera de pousser loin à la fois les gains d'efficacité et la décarbonation du mix énergétique qui, elle-même, devra s'appuyer sur des sources diverses – électricité, bois, réseaux de chaleur, biogaz – du fait de la limite de potentiel de chacune de ces sources. L'électrification du parc, avec notamment des systèmes performants de type pompe à chaleur air-eau ou géothermique¹, représente un potentiel d'abattement important mais ne peut être en aucun cas considérée comme l'unique solution. Les rénovations avec passage au bois aboutiraient à des coûts d'abattement du même ordre de grandeur qu'avec l'électrification du chauffage. L'étude de cas d'une extension d'un réseau de chaleur présentée dans le rapport aboutit à des coûts d'abattement de l'ordre de 70 € à 300 €/tCO₂ selon la densité des zones de raccordement et pour des raccordements considérés comme techniquement envisageables.

La comparaison des coûts d'abattement à la valeur de l'action pour le climat 2019² justifie l'ambition d'un rythme soutenu de rénovations pour les dix années à venir, avec notamment l'objectif prévu dans la loi de suppression des passoires thermiques à l'horizon 2028

Plus que le potentiel de rénovations rentables socioéconomiquement, c'est la capacité du secteur de la rénovation, la capacité de financement des acteurs et la capacité à orienter les ressources vers les rénovations rentables socioéconomiquement qui seront les facteurs limitants :

- **Dès 2025, une rénovation très performante vers B (type BBC rénovation) avec électrification serait socioéconomiquement rentable pour 5,8 millions de logements.** Cela concernerait la plupart des logements chauffés au fioul et un peu plus de la moitié des logements F et G chauffés au gaz (voir Graphique VIII). Parmi les logements dont les actions de rénovation sont les plus rentables, les logements occupés par des locataires du privé³ et par des ménages à bas revenu⁴ et les logements collectifs

¹ Sur le potentiel de la géothermie de surface, voir : Haut-Commissariat au Plan (2022), « [Responsabilité climatique...](#) », *op. cit.*

² Définie par le rapport Quinet A. (2019), *La valeur de l'action pour le climat*, France Stratégie, février.

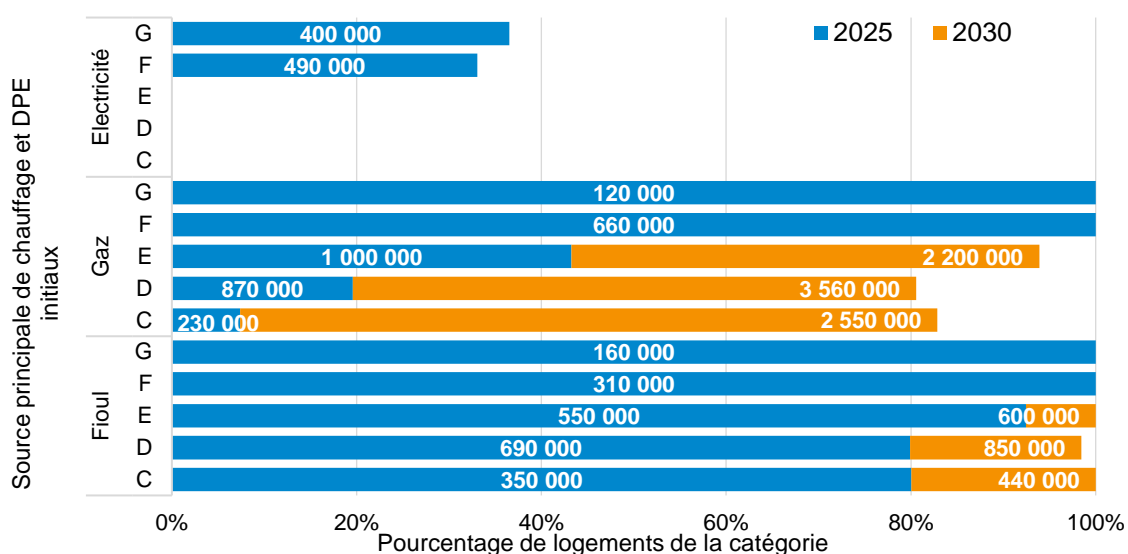
³ Parmi les logements dont la rénovation devient rentable en 2025, 32 % sont occupés par des locataires privés ; 13 % par des locataires sociaux et 55 % par des propriétaires occupants. Sur la totalité de l'échantillon du parc de logements considéré, ces parts sont respectivement de 28 %, 18 % et 54 %, ce qui est relativement proche.

⁴ 27 % des occupants des logements rentables sont des ménages appartenant aux déciles de revenu 1 à 3. Cela est proche de la part des logements occupés par des ménages à bas revenus sur l'ensemble de l'échantillon du parc considéré.

privés représentent une part importante¹. **Beaucoup de ces logements sont donc soumis à des barrières de marché** telles que décrites plus haut. La rénovation vers B des logements pour lesquels cela devient rentable en 2025 permettrait de réduire les émissions annuelles moyennes de l'ordre d'un quart sur les trente prochaines années par rapport au niveau de 2018.

- **À l'horizon 2030, c'est plus de 12 millions de logements de toutes étiquettes qu'il serait socioéconomiquement efficace de rénover vers des niveaux B avec électrification.** Ces logements représenteraient la quasi-totalité des logements chauffés au fioul et 90 % de ceux chauffés au gaz. La part des logements au gaz dépendant largement du potentiel de gaz décarboné². La distribution des statuts d'occupation (locataires du privé ou du social ; propriétaires occupants) se rapproche de la distribution moyenne. Selon les hypothèses de décarbonation du gaz retenues, la rénovation des logements rentables en 2030 permettrait de réduire les émissions annuelles moyennes sur les trente années suivantes entre un et trois quarts par rapport au niveau d'émissions 2018.

Graphique VIII – Potentiel de rénovations vers B avec électrification du chauffage socioéconomiquement rentable sur trente ans selon la VAC en 2025 et en 2030 (nombre de logements)



Lecture : sous les hypothèses retenues, il serait rentable de rénover vers B avec électrification performante du chauffage 80 % des logements de classe D chauffés au fioul dès 2025. Cela représente 690 000 logements. En 2030, il sera rentable pour près de la totalité de ces logements d'effectuer une telle rénovation.

Source : France Stratégie d'après les simulations du Cired

¹ Environ 40 % des logements dont la rénovation serait rentable en 2025 sont occupés par des locataires du privé ou des ménages à bas revenu. 45 % des logements rentables sont des logements collectifs privés (occupés par des propriétaires ou des locataires privés).

² Avec décarbonation du gaz, ce serait 3 % des logements chauffés au gaz qu'il serait rentable de rénover en 2030, contre 90 % dans le cas d'un gaz décarboné.

La connaissance des coûts et des impacts réels des actions permettant de réduire les émissions du secteur résidentiel-tertiaire est encore insuffisante

Pour cette raison, les coûts d'abattement sont sujets à des incertitudes importantes et ne permettent pas de répondre pleinement à certains besoins d'arbitrages fondamentaux dans la décision publique. Le rapport souligne deux axes d'amélioration à considérer en priorité, sachant que des travaux sont d'ores et déjà engagés :

- En premier lieu, **il apparaît indispensable d'améliorer l'information statistique**. L'amélioration des bases de données sur l'état et les principales caractéristiques des logements du parc ainsi que des bases de données permettant d'évaluer l'efficacité des travaux serait particulièrement utile. Idéalement, les données relatives aux travaux de rénovation devraient renseigner :
 - l'état et les caractéristiques des logements avant et après travaux ;
 - certaines caractéristiques du ménage (nombre d'individus ; statut d'occupation ; revenus) ;
 - la nature précise des travaux réalisés ;
 - le coût des travaux réalisés ;
 - la consommation effective d'énergie avant et après travaux ;
 - une mesure de la température intérieure avant et après travaux.

Des travaux en cours au CGDD devant aboutir en 2023 vont en ce sens.

- En second lieu, et en partie sur la base de l'amélioration des données, **les modèles devraient être empiriquement mieux fondés** et pourraient être développés de sorte à mieux tenir compte à la fois de l'interdépendance entre les gestes, afin de mieux capter l'inefficacité des rénovations par étapes, et de l'interaction entre la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel-tertiaire et les secteurs de production d'énergie, en particulier avec les secteurs d'énergie à faible contenu carbone (électricité, biogaz, etc.). Des développements en ce sens sont d'ores et déjà en cours. Une mise à jour des résultats de ce rapport intégrant ces éléments et la prise en compte de la nouvelle méthodologie des DPE pourrait constituer une première étape. En seconde étape, l'enjeu serait de déterminer une image du parc en termes de répartition par étiquette A+/A/B/C en 2050 qui serait efficace et conforme aux objectifs, et de tracer le chemin pour y parvenir.



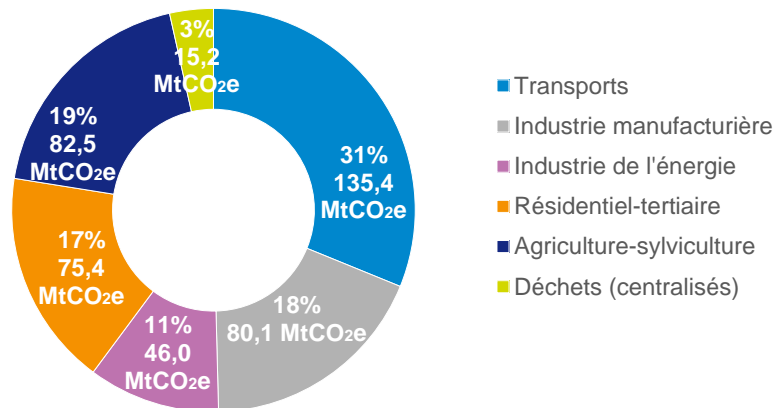
CHAPITRE 1

ÉTAT DES LIEUX ET OBJECTIFS

1. État des lieux et tendances des émissions du bâtiment

Le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) est le principal consommateur d'énergie en France, avec 44 % de la consommation totale d'énergie finale¹ et 40 % à l'échelle européenne². Les émissions directes (Scope 1, voir [Annexe 2](#)) liées à l'usage des bâtiments s'élevaient à 75 MtCO_{2e} en 2019, soit 17 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) du territoire français, ce qui en fait le quatrième secteur le plus émetteur derrière celui des transports, de l'industrie et de l'agriculture (Graphique 1)³.

Graphique 1 – Répartition des émissions de CO_{2e} en 2019 hors UTCATF* en France (MtCO_{2e})



* Utilisation des terres, changement d'affectation des sols.

Note : cette trajectoire couvre les émissions de la France métropolitaine et d'outre-mer (Outre-mer inclus dans l'UE : périmètre Plan climat Kyoto).

Source : à partir de l'inventaire Citepa de juin 2022 au format Secten et au périmètre Plan climat Kyoto, données non corrigées des variations climatiques, phase d'usage du bâtiment exclusivement

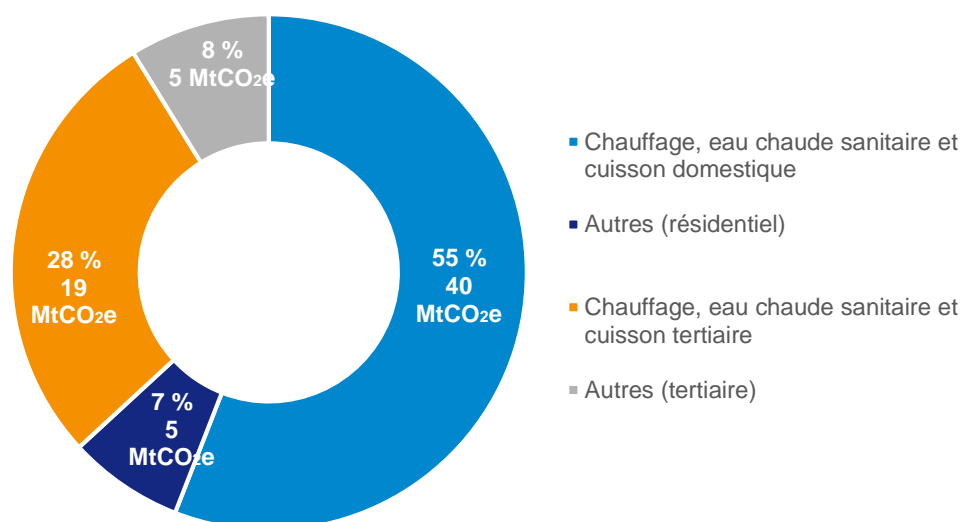
¹ Service des données et études statistiques (SDES) du MTE (2021), [Bilan énergétique de la France pour 2019](#).

² HCC (2020), [Rénover mieux : leçons d'Europe](#), réponse à la saisine du gouvernement, novembre.

³ Citepa (2022), [Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2021 – Format Secten](#), rapport, juin.

Les émissions du secteur sont issues à plus de 60 % des bâtiments résidentiels et à 40 % des bâtiments tertiaires (Graphique 2)¹. Le chauffage, l'eau chaude sanitaire et la cuisson, usages qui reposent en grande partie sur des énergies carbonées, représentent la principale source d'émissions de gaz à effet de serre liées à l'usage des bâtiments² dans le résidentiel et le tertiaire. Les vecteurs carbonés demeurent aujourd'hui majoritaires puisque 41 % des résidences principales sont chauffées au gaz naturel et 11 % au fioul³. L'électricité (hors pompes à chaleur) est utilisée pour le chauffage dans 30 % des logements. Les pompes à chaleur restent minoritaires (7 % des résidences principales) mais ont connu une progression particulièrement forte ces dernières années (+3 points entre 2016 et 2020). Le chauffage urbain est utilisé dans 10 % des logements collectifs.

Graphique 2 – Répartition par usage des émissions de GES en MtCO₂eq du secteur du bâtiment en France en 2020



e : estimation.

Note : cette trajectoire couvre les émissions de la France métropolitaine et d'outre-mer (Outre-mer inclus dans l'UE : périmètre Plan climat Kyoto).

Source : à partir de l'inventaire Citepa de juin 2022 au format Secten et au périmètre Plan climat Kyoto, données non corrigées des variations climatiques, phase d'usage du bâtiment exclusivement

¹ Citepa (2022), *Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques...*, op. cit.

² Hors émissions liées à la construction des bâtiments, comptabilisées dans une approche cycle de vie.

³ Données Ceren pour l'année 2020, d'après le tableau de suivi de la rénovation énergétique dans le résidentiel édité par l'ONRE (voir <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/tableau-de-suivi>).

Les autres émissions sont associées à la consommation d'électricité pour l'éclairage, la cuisson, l'électroménager et la climatisation, aux gaz fluorés (principalement l'hydrofluorocarbure (HFC) pour les systèmes de climatisation/refroidissement). Les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) contribuent majoritairement aux émissions de GES du secteur résidentiel-tertiaire puisqu'elles en représentent 84 %. Viennent ensuite l'HFC avec 10 % des émissions et le méthane (CH₄) avec 4 % ; le reste est constitué d'autres gaz¹.

Au total, les émissions directes de GES du secteur ont baissé de 18 % entre 1990 et 2019. La baisse des émissions dans le parc résidentiel à partir des années 2010 (-24 % en 2019 par rapport à 1990) a été en partie compensée par une hausse des émissions du parc tertiaire de 20 % entre 1990 et 2010, avant d'entamer une diminution ultérieure (-21 % entre 2010 et 2019, soit -6 % en 2019 par rapport à son niveau de 1990). Entre 2015 et 2018, les émissions des bâtiments français ont été réduites de 5,5 %, soit davantage que la moyenne observée en Europe (-2,4 %) où certains pays ont vu leurs émissions augmenter (Italie +0,8 %, Royaume-Uni +3 %), mais moins qu'en Allemagne (-6,3 %) (HCC, 2021², d'après l'Agence européenne de l'environnement³).

2. Cadre européen et Stratégie nationale bas-carbone en France

2.1. Le cadre européen

Des objectifs communs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, d'économies d'énergie et de part de ressources décarbonées ont été fixés par l'Union européenne pour l'ensemble des secteurs. Ces objectifs prévoient l'atteinte de la neutralité carbone de l'ensemble des secteurs à l'horizon 2050, et pour 2030 la réduction de 55 % des émissions totales de gaz à effet de serre par rapport au niveau de 1990 ainsi qu'une hausse de l'efficacité énergétique de 32,5 % (HCC, 2020).

La mise en œuvre des réductions d'émissions relatives au secteur du bâtiment – tout comme le secteur des transports, de l'agriculture et de la gestion des déchets – est régie par la législation relative à la répartition de l'effort entre États membres (*effort sharing agreement*). Ce cadre doit être complété par la mise en application, prévue dans le paquet « Fit for 55 », d'un second marché pour le bâtiment et les transports dans le système d'échange de quotas

¹ Autres gaz fluorés (Perfluorocarbure (PFC), hexafluorure de soufre (SF₆)) et protoxyde d'azote (N₂O).

² HCC (2021), *Renforcer l'atténuation, engager l'adaptation*, rapport annuel 2021, juin.

³ Inventaire des émissions de gaz à effet de serre européennes (voir <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>). Attention, il y a des différences de périmètre entre les émissions comptabilisées par l'AEE et celles du Citepa, expliquant des différences au niveau du montant des émissions.

d'émissions européen (SEQE-UE). Les politiques publiques nationales qui découlent de ces objectifs sont cadrées notamment par la version révisée en 2018 de la directive sur l'efficacité énergétique des bâtiments et de la directive relative à la performance énergétique du bâtiment, qui imposent aux pays membres de définir leur contribution et de publier régulièrement leurs avancées en matière de stratégie d'amélioration de l'efficacité énergétique¹.

Lancé en décembre 2019, le Pacte vert pour l'Europe établit, outre le renforcement des objectifs, la mise en œuvre de la transition bas-carbone. Par la suite, la Commission européenne a annoncé fin 2020 une nouvelle stratégie destinée à engager l'Europe dans une « vague de rénovation » en doublant le rythme annuel (actuellement de 1 % par an) de rénovation énergétique des bâtiments résidentiels et non résidentiels d'ici 2030². D'autres axes d'actions prioritaires ont été définis par le Pacte vert dans le secteur du bâtiment, notamment :

- l'évaluation des stratégies nationales de rénovation des États membres dans le but de faire appliquer plus rigoureusement la législation sur la performance énergétique des bâtiments ;
- la réglementation portant sur les produits utilisés dans la construction ;
- la mise en place du nouveau « Bauhaus européen », plateforme interdisciplinaire rassemblant des représentants des secteurs du bâtiment et de la construction – architectes, ingénieurs – et des autorités locales dans le but de mettre au point des solutions innovantes, durables et esthétiques en matière de bâtiment ;
- l'insertion du secteur du bâtiment dans le SEQE-UE, initialement dans un second marché.

2.2. Les objectifs de la Stratégie nationale bas-carbone et les mesures mises en place

En France, la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC)³, établie pour la première fois en 2015 par la loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) et révisée en 2020, a pour ambition principale la neutralité carbone sur le territoire à l'horizon 2050, ainsi que la trajectoire pour l'atteindre avec des objectifs intermédiaires et des budgets carbone déterminés par périodes de cinq ans.

¹ Haut Conseil pour le climat (2020), *Rénover mieux : leçons d'Europe*, op. cit.

² Commission européenne (2020), *Une vague de rénovations pour l'Europe : verdir nos bâtiments, créer des emplois, améliorer la qualité de vie*, Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité européen des régions, COM/2020/662, 14 octobre.

³ Ministère de la Transition écologique (2020), *Stratégie nationale bas-carbone. La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone*, mars.

Elle fixe plus particulièrement pour le secteur du bâtiment un objectif de réduction de 49 % d'ici 2030 par rapport à 2015 et de décarbonation complète à l'horizon 2050 (voir Graphique 3). En 2019, le niveau des émissions étant déjà de 18 % inférieur à celui de 1990, il s'agit de réduire les émissions actuelles d'environ 40 % d'ici à 2030. L'atteinte de ces objectifs est supposée s'opérer au travers de quatre orientations en matière de : rénovation du parc existant, réglementation pour la construction des bâtiments neufs, amélioration de l'efficacité énergétique des équipements et sobriété des usages, et décarbonation du mix énergétique.

Parmi ces orientations, la rénovation énergétique du parc existant constitue un objectif majeur pour la décarbonation du secteur. La SNBC vise pour l'ensemble du parc résidentiel un rythme de 370 000 rénovations complètes équivalentes¹ par an dès 2022, en ciblant en priorité les « passoires énergétiques » (ou thermiques)², et de 700 000 rénovations à partir de 2030, afin d'atteindre un niveau de performance bâtiment basse consommation (BBC – soit une étiquette DPE au moins à B) équivalent en moyenne sur l'ensemble du parc.

La sous-direction des études statistiques du ministère de la Transition écologique³ estime en effet à 4,8 millions le nombre de « passoires thermiques⁴ », soit 17 % du parc de résidences principales⁵, ce qui en fait un véritable gisement pour l'amélioration de l'efficacité énergétique. Cette estimation a été actualisée en 2022 à 5,2 millions de passoires thermiques sur la base de la nouvelle méthodologie du diagnostic de performance énergétique (DPE) en vigueur depuis juillet 2021⁶.

¹ Notion employée dans la SNBC pour qualifier des rénovations équivalentes à l'atteinte d'un niveau BBC pouvant être obtenues par l'addition de plusieurs gestes de rénovation distincts. Le Haut Conseil pour le climat (*Rénover mieux : leçons d'Europe*, op. cit.) met en garde sur cette notion qui suggère que la rénovation par étapes est compatible avec le niveau BBC, alors que plusieurs études ont démontré que ce n'est pas le cas – par exemple, l'enquête *Travaux de rénovation énergétique des maisons individuelles* (Trémi) de l'Ademe en 2017 qui a montré que 75 % des gestes de rénovation n'ont permis aucun saut d'étiquette DPE, ou plus récemment l'étude de l'Ademe, Dorémi et Enertech publiée en 2021 (*La rénovation performante par étapes. Étude des conditions nécessaires pour atteindre la performance BBC rénovation ou équivalent à terme en logement individuel*, rapport, janvier).

² Les logements qualifiés de passoire énergétique, ou passoire thermique, sont les logements auxquels est attribuée une étiquette F ou G du diagnostic de performance énergétique.

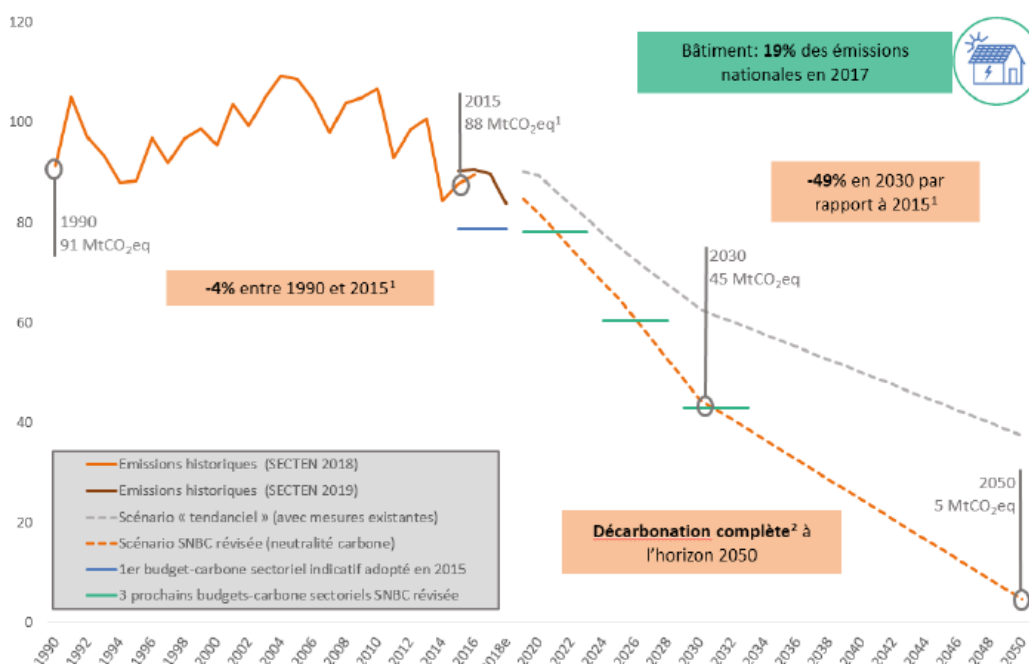
³ Merly-Alpa T., Riedinger N. et Baudry M. (2020), *Le parc de logements par classe de consommation énergétique au 1^{er} janvier 2018*, Document de travail, n° 49, Observatoire national de la rénovation énergétique, septembre.

⁴ Cette estimation est réalisée à partir des données de plus de 500 000 diagnostics de performance énergétique de 2017 et 2018 collectées par l'Ademe, soit avant la réforme des DPE en vigueur depuis juillet 2021.

⁵ Le parc de logements en France métropolitaine est estimé à plus de 36 millions de logements en 2021, dont 3,6 millions de résidences secondaires, 3 millions de logements vacants et 29,6 millions de résidences principales. Les estimations effectuées par le SDES, et dans la suite de cette étude, se limitent au périmètre des résidences principales en 2018 (un peu moins de 29 millions de logements).

⁶ Le Saout R., Mesqui B. et Rathle J.-P. (2022), *Le parc de logements par classe de consommation énergétique au 1^{er} janvier 2022*, Document de travail, n° 60, Observatoire national de la rénovation énergétique, juillet.

Graphique 3 – Historique et projection des émissions du secteur des bâtiments entre 1990 et 2050 (en MtCO₂eq)



¹ Les émissions utilisées pour l'année 2015 sont celles de l'inventaire Citepa d'avril 2018 au format Secten.

² Ne tient pas compte des fuites résiduelles « incompressibles » de gaz (gaz fluorés, gaz renouvelables).

e : estimation.

Source : SNBC 2 (MTES, 2020), à partir de l'inventaire Citepa d'avril 2018 au format Secten et au périmètre Plan climat Kyoto ; scénarios AME et AMS 2018

3. Les leviers de décarbonation dans le secteur du bâtiment

Les orientations de la SNBC définissent trois principaux leviers de décarbonation :

- **la sobriété énergétique**, qui se définit comme une démarche de réduction de la demande de services énergétiques s'opérant par des changements de comportement au niveau individuel ou collectif et qui peut prendre des formes diverses (voir Tableau 1) ;
- **l'amélioration de l'efficacité énergétique**, qui consiste à consommer moins d'énergie pour le même service énergétique. Cela passe principalement par la rénovation en profondeur de l'enveloppe des bâtiments existants, en particulier des passoires thermiques, du système de chauffage, mais aussi par le renforcement des normes d'efficacité pour la construction des bâtiments neufs ou encore par l'utilisation de systèmes de chauffage et d'équipements électroménagers plus économes en énergie (passage d'un radiateur électrique à une pompe à chaleur, par exemple) ;

- **la décarbonation des vecteurs énergétiques**, alimentant principalement les besoins en chauffage, en eau chaude sanitaire et en cuisson (principales sources d'émissions associées à la consommation d'énergie des bâtiments). Cela implique d'une part le remplacement d'un vecteur énergétique fortement carboné (fioul, gaz) par un vecteur peu carboné (électricité, réseaux de chaleur issue d'énergies renouvelables, par exemple), et d'autre part la réduction du contenu carbone de certains vecteurs (baisse des énergies fossiles dans la production d'électricité ou développement du biogaz, par exemple).

Tableau 1 – Les différents niveaux de sobriété et les actions associées dans le secteur du bâtiment

Niveau de sobriété	Exemple d'actions dans le secteur du bâtiment
<p>Sobriété structurelle</p> <p>Créer les conditions d'une modération de la consommation dans l'espace ou lors des activités</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Concevoir différemment les bâtiments, les doter d'espaces partagés (buanderie, local vélos, etc.) ou d'espaces pour faire sécher son linge dans les bâtiments. • Développement de structures de télétravail et d'espaces de travail collaboratifs. • Lutte contre l'étalement urbain en répondant aux besoins en bâtiments avec le parc existant : réinvestir les logements vacants et les résidences secondaires, transformer les bureaux vacants en logements... • Décentralisation, diversification, densification des territoires. • Développement des services (magasins de réparation, services d'accompagnement aux démarches collectives, etc.). • Construction « réversible ». • Recherche et développement, appui à l'innovation.
<p>Sobriété dimensionnelle</p> <p>Adapter le dimensionnement des équipements à leurs conditions d'usage</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ajustement de la taille des équipements à l'usage (réfrigérateur, ballon d'eau chaude, etc.). • Réduction de la surface moyenne des logements par personne. • Construction de logements collectifs plutôt que de maisons individuelles.
<p>Sobriété d'usage</p> <p>Adapter l'utilisation des équipements pour en réduire la consommation</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Réévaluation des normes de confort (ex. : réduction de la température de chauffage ou augmentation de la température consigne de climatisation). • Limiter l'usage de la climatisation par le recours, hors période caniculaire, à des brasseurs d'air (ventilateurs). • Réduction de l'usage des équipements pour en réduire la consommation (télévision, sèche-linge, etc.).
<p>Sobriété conviviale</p> <p>Mutualiser les équipements et leur utilisation</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pratiques de cohabitation (colocations, etc.). • Échanges de logements entre particuliers. • Mutualisation des espaces et des équipements entre logements. • Augmentation de la part de logements collectifs en construction neuve.

Source : d'après négaWatt¹

¹ négaWatt (2016), « Qu'est-ce que la sobriété ? », *Fil d'argent*, n° 5, hiver, p. 11-13.

4. Comment éclairer les enjeux des politiques publiques avec les coûts d'abattement ?

4.1. Des politiques en place non optimales

Depuis l'adoption de la première SNBC, la baisse des émissions dans le secteur du bâtiment demeure insuffisante au regard des objectifs. Le budget carbone pour 2015-2018 a été dépassé avec des émissions supérieures d'environ 11 % (HCC, 2020). La rénovation énergétique dans le parc résidentiel, notamment, connaît un retard important. Dans son rapport sur l'analyse des politiques de rénovation thermique des bâtiments en 2020, le HCC a identifié un certain nombre d'obstacles pouvant expliquer ce retard dans les objectifs. Les dispositifs de subvention (par exemple, MaPrimeRénov', TVA à 5,5 %) et les offres de prêt (éco-PTZ) existant jusque-là apparaissaient insuffisants face au montant des travaux et à la faible capacité de financement des ménages, en particulier ceux en situation de précarité énergétique. Ces dispositifs apparaissent trop focalisés sur des gestes isolés souvent peu efficaces et incitent insuffisamment à se tourner vers les rénovations performantes (aux normes BBC)¹. L'obtention des aides n'est par ailleurs pas systématiquement conditionnée à une obligation de résultat en termes de gain de performance énergétique. Au-delà de la question du financement, un déficit d'accès à l'information et d'accompagnement dans le résidentiel comme dans le tertiaire, les délais de réalisation des travaux, ou encore la nécessité de changement structurel de la filière (montée en compétences des artisans) sont autant de blocages à la rénovation énergétique.

En 2019, un objectif relatif aux passoires thermiques a été défini par la loi relative à l'énergie et au climat visant leur rénovation à l'horizon 2028. Dernièrement, la loi « climat et résilience » prévoit, dès 2025, l'interdiction de la mise en location des logements d'étiquette G du DPE², F en 2028 et E à partir de 2034. Le plan de relance de 2020 prévoit un renforcement des moyens sur des mesures comme MaPrimeRénov' et met en place des mesures additionnelles.

D'autres instruments politiques ciblent la décarbonation des bâtiments tertiaires. En plus des réglementations thermiques portant sur les bâtiments neufs (RE2020) et existants, la loi évolution du logement, de l'aménagement et du numérique (Elan) de 2018 instaure également

¹ Dolques G., Ledez M. et Hainaut H. (2022), *Quelles aides publiques pour la rénovation énergétique des logements ?*, rapport, I4CE, février.

² Le diagnostic de performance énergétique (DPE) classe un logement ou un bâtiment à l'aide d'étiquettes attribuées selon sa performance énergétique, en évaluant sa consommation d'énergie et son impact en termes d'émissions de gaz à effet de serre (ministère de la Transition écologique). Les logements étiquetés A sont les plus efficaces et les logements G sont les moins performants.

une obligation de réduction de la consommation d'énergie. Cette obligation est concrétisée par le « décret tertiaire », paru en juillet 2019¹, et par le dispositif Éco-énergie tertiaire.

Concernant la construction des bâtiments neufs, la réglementation environnementale 2020 (RE2020) succède aux réglementations thermiques mises en place depuis 1974, la dernière datant de 2012 (RT2012). Ce nouveau cadre réglementaire a pour ambition de renforcer les exigences de performance énergétique et de baisse de consommation des bâtiments neufs ; d'adapter le bâti au changement climatique (confort d'été, résistance aux canicules) ; et de réduire son impact environnemental sur l'ensemble du cycle de vie.

Depuis juillet 2022, l'interdiction de l'installation ou du remplacement des chaudières fonctionnant au fioul répond par ailleurs aux exigences de décarbonation des vecteurs énergétiques.

Si les dernières mesures mises en place permettront de renforcer l'effort de décarbonation dans le secteur, il n'y a toutefois pas de garantie qu'elles soient pleinement suffisantes et adaptées. Le renforcement de dispositifs tels que MaPrimeRénov' ne semble en outre pas complètement répondre à la nécessité de soutenir davantage les rénovations globales.

La bonne évaluation des dispositifs en place et la bonne élaboration des mesures futures ne pourront se faire que si les principaux enjeux sont suffisamment éclairés et étayés. En particulier, la façon de mobiliser les trois leviers de décarbonation décrits plus haut doit être davantage documentée par des données et des travaux empiriques. L'approche par les coûts d'abattement peut apporter des éclairages utiles à la définition et à la priorisation des mesures à mettre en œuvre, à condition de bien intégrer ces enjeux.

4.2. Évaluer le potentiel des actions de sobriété

Les coûts de mise en œuvre des différentes actions de sobriété énergétique ne sont pas aisés à identifier dans la mesure où celles-ci relèvent en grande partie de choix de société impliquant un changement plus ou moins profond des modes de vie. Il est par exemple difficile d'établir les coûts et les bénéfices socioéconomiques que l'on doit associer au développement des pratiques de cohabitation ou du télétravail. Même lorsque ces coûts sont identifiés, des difficultés peuvent se présenter pour les mesurer et pour mesurer l'impact potentiel sur l'abattement des émissions.

¹ Décret n° 2019-771 du 23 juillet 2019 relatif aux obligations d'actions de réduction de la consommation d'énergie finale dans des bâtiments à usage tertiaire.

Pour ces raisons, et par manque de travaux disponibles sur le sujet, il semble à l'heure actuelle peu envisageable d'associer des coûts d'abattement aux actions de sobriété. Pour cela, ce rapport se focalise largement sur les actions d'efficacité énergétique et de décarbonation du vecteur.

Pour autant, ces actions de sobriété ne peuvent être totalement ignorées dans le calcul des coûts d'abattement. Le potentiel de ces actions permettrait en effet de réduire le coût d'abattement global : plus ce potentiel est important, moins il sera nécessaire de mobiliser les actions d'efficacité et de décarbonation les plus coûteuses.

Différentes études fournissent des ordres de grandeur du potentiel d'abattement envisageable par des actions de sobriété. Dans son scénario 2022-2050, négaWatt¹ aboutit à une division par deux de la consommation d'énergie finale tous secteurs confondus d'ici 2050 par rapport à 2020, dont 31 % de l'effort total serait dû à des actions de sobriété². Dans le secteur du résidentiel-tertiaire, la consommation est également divisée par deux entre 2020 et 2050. 17 % de cet effort proviendrait d'actions de sobriété, soit principalement de la maîtrise des surfaces bâties (stabilisation de la surface et du nombre de personnes par logement, réduction des résidences individuelles, secondaires et vacantes, mutualisation des espaces, etc.), de l'usage des services de chaleur et de froid, ainsi que de l'usage de l'éclairage et des autres équipements électriques.



L'étude *Futurs énergétiques 2050* de RTE³ analyse l'évolution de la consommation finale d'électricité en France sous différents scénarios cohérents avec l'atteinte de la neutralité carbone à l'horizon 2050. La trajectoire de référence, largement fondée sur le renforcement de l'efficacité énergétique et la substitution de l'électricité aux énergies fossiles, prévoit une hausse de la consommation électrique qui passerait de 475 TWh en 2019 à 645 TWh en 2050 (tous secteurs confondus). Elle diminuerait cependant de 18 % dans le résidentiel et de 16 % dans le tertiaire. Un scénario tourné sur l'activation des gisements de sobriété (scénario « sobriété ») aboutirait à une consommation de 555 TWh en 2050, soit un gain total de 90 TWh (soit 14 %) par rapport à la trajectoire de référence. Dans le secteur du bâtiment, 23 TWh seraient ainsi évités dans le résidentiel et 18 TWh dans le tertiaire. Différents leviers de sobriété expliquant ces économies d'énergie sont quantifiés (voir Figure 1 pour les leviers du secteur du bâtiment).

¹ négaWatt (2021), *Scénario négaWatt 2022*, association négaWatt.

² Autrement dit, en 2050, la sobriété permet une réduction supplémentaire de la consommation d'énergie finale de 19 % par rapport à une situation sans sobriété. Voir notamment Toulouse E. et Gaspard A. (2022), *The Rise of Sufficiency in the French Energy Debate: a Comparative Analysis of Scenarios*, ECEEE 2022 Summer Study on energy efficiency 6–11 June, Presqu'île de Giens, Hyères, France.

³ RTE (2021), *Futurs énergétiques 2050. Les scénarios de mix de production à l'étude permettant d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050*, octobre.

Figure 1 – Décomposition des leviers de sobriété électrique dans le résidentiel et le tertiaire

Leviers de sobriété	Effet en TWh évités	
 Résidentiel	Habitat à espaces partagés et légère augmentation de la taille unitaire des ménages	11,9 TWh ◀
	Limitation de la consommation de chauffage résidentiel	4,0 TWh ◀
	Limitation de la consommation en eau chaude résidentielle	4,7 TWh ◀
	Moindre taux d'équipement en climatisation résidentielle	1,1 TWh
	Limitation de la consommation des autres usages résidentiels	0,7 TWh
 Tertiaire	Recours au télétravail (impact sur la consommation dans les bureaux)	9,1 TWh ◀
	Limitation des besoins énergétiques sur le lieu de travail	4,7 TWh ◀
	Limitation de la consommation de chauffage, climatisation et eau chaude sanitaire tertiaires	1,8 TWh
	Réduction de la surface des commerces	1,1 TWh
	Réduction des écrans publicitaires	0,5 TWh
	Limitation de la consommation des autres usages tertiaires	0,8 TWh

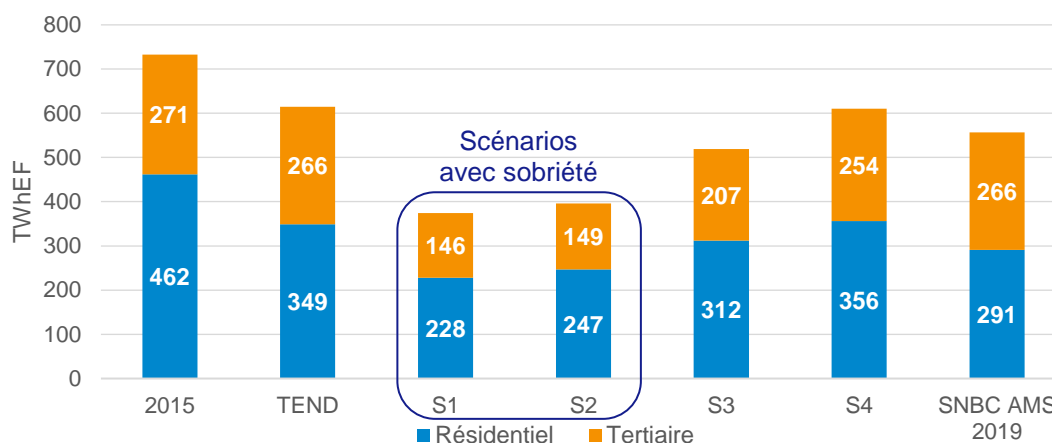
Source : RTE (2021), [Futurs énergétiques 2050](#), op. cit., chapitre 3, « La consommation », p. 120

Enfin, l'étude prospective *Transition(s) 2050* élaborée par l'Ademe (2021)¹ présente quatre récits contrastés d'évolution de la société à l'horizon 2050. Les deux premiers scénarios (« génération frugale » et « coordinations territoriales ») accordent une place importante à la sobriété, tandis que les deux autres (« technologies vertes » et « pari réparateur ») privilégient l'apport du progrès technologique.

Dans le résidentiel et le tertiaire, lorsque la sobriété est le principal vecteur de la transition écologique (scénario 1), la consommation d'énergie finale pour l'usage des bâtiments diminue de moitié par rapport à 2015 et de 40 % par rapport au scénario tendanciel (voir Graphique 4). Ce choix de société implique une transition profonde des modes de vie vers une baisse de l'usage de biens matériels et un renforcement des liens sociaux. Il permet d'atteindre la neutralité carbone grâce à la réduction rapide de la consommation d'énergie et aux puits naturels, mais implique de passer par des contraintes réglementaires, voire du rationnement (quotas), et peut se heurter à des problèmes d'acceptabilité. Le second scénario s'appuie davantage sur la recherche d'un « consensus social », qui ralentit le rythme de la transition.

¹ Ademe (2021), *Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat*, rapport, novembre.

Graphique 4 – Consommation d'énergie finale en 2050 pour l'usage des bâtiments résidentiels et tertiaires dans les scénarios *Transition(s)* 2050 de l'Ademe



Note : TEND = scénario tendanciel ; S1 = scénario « génération frugale » ; S2 = scénario « coordinations territoriales » ; S3 = scénario « technologies vertes » ; S4 = scénario « pari réparateur » ; SNBC AMS : scénario SNBC avec mesures supplémentaires.

Lecture : dans le scénario tendanciel (TEND), la consommation d'énergie finale en 2050 est estimée à 349 TWh pour les bâtiments résidentiels et à 266 TWh pour les bâtiments tertiaires.

Source : d'après Ademe (2021), *Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat, rapport, novembre, tableau 42, p. 156*

Finalement, dans les scénarios les plus ambitieux sur cet aspect, le potentiel estimé des actions de sobriété est de l'ordre de 20 % à 30 % d'émissions du secteur résidentiel-tertiaire. Elles représentent donc un potentiel important mais dont le degré de mobilisation possible reste incertain.

4.3. Considérer des actions de rénovation globale

Sur le levier de l'efficacité énergétique, la SNBC fixe comme objectif que le parc résidentiel atteigne en moyenne un niveau de performance BBC en 2050. Or, les actions de rénovation entreprises dans les logements se résument aujourd'hui principalement à des gestes isolés ou combinés par couches successives (par exemple, en commençant par changer les fenêtres et la chaudière, puis en isolant le toit et le plancher pour, plus tard, isoler les murs). Entre janvier 2020 et juin 2021, 86 % des dossiers MaPrimeRénov' validés concernaient des travaux de rénovation mono-gestes¹. Il s'agissait, pour 98 % d'entre eux, de changement de système de chauffage (majoritairement des pompes à chaleur, qui, installées dans des logements peu isolés, soulèvent des questions en termes de pointe électrique lors des journées très froides).

¹ Cœuré B. (2021), *Comité d'évaluation du plan France Relance – Premier rapport*, Paris, France Stratégie, octobre.

L'importance du coût des travaux de rénovation et le faible calibrage des aides et dispositifs de financement sur la rénovation globale, malgré les aides existantes, expliquent en partie que les ménages privilégient encore aujourd'hui les mono-gestes aux rénovations globales tenant compte de l'ensemble des postes de travaux. Cela pourrait inciter à chercher à calculer des coûts d'abattement par geste, de sorte à les hiérarchiser. À titre d'illustration, dans nombre de cas types étudiés par l'Institute for Climate Economics (I4CE) à l'aide de son outil PanelRénov¹ paramétré, dans notre cas, pour l'évaluation socioéconomique, un euro investi dans le changement de système de chauffage (via l'installation d'une pompe à chaleur ou d'une chaudière gaz à très haute performance énergétique) permettrait de réduire davantage les émissions qu'un euro investi dans des gestes d'isolation (murs, toiture, plancher bas) (Tableau 2).

Tableau 2 – Exemples de coûts d'abattement calculés à partir de l'outil PanelRénov, selon différents parcours de rénovation proposés

	Maison individuelle DPE E, gaz, 1950 (150 m²)	Maison individuelle mitoyenne, DPE G, convecteur électrique, 1960 (100 m²)
Parcours « geste isolé »	Chaudière gaz à très haute performance énergétique : 100 €/tCO ₂	Isolation toiture (rampants) : 510 €/tCO ₂
Parcours « intermédiaire »	Isolation murs (intérieur, extérieur), toiture (combles perdus) : 380 €/tCO ₂	Isolation murs (intérieur, extérieur) : 1 220 €/tCO ₂
Parcours « chauffage bas-carbone »	Pompe à chaleur air-eau : 100 €/tCO ₂	Pompe à chaleur air-eau, plancher chauffant : 590 €/tCO ₂

Note : l'outil permet de configurer les paramètres afin d'obtenir des coûts d'abattement sans aides, une durée des bénéfices de la rénovation fixée à trente ans et un taux de TVA à 0 % (pour obtenir des coûts hors taxes). Le taux d'actualisation de 4,5 % est retenu par défaut.

Source : France Stratégie, d'après PanelRénov (I4CE)

¹ L'outil PanelRénov permet d'étudier la viabilité économique de différents projets de rénovation. Voir Dolques G., Ledez M. et Hainaut H. (2022), *Quelles aides publiques...*, op. cit.

Pourtant, les opérations de rénovation complète en une seule étape (ou très peu d'étapes) sont souvent mises en avant comme condition nécessaire à l'atteinte d'un niveau équivalent à BBC. Une étude de l'Ademe, Dorémi et Enertech (2021)¹ s'est penchée sur les conditions de réussite d'une rénovation performante. Celle-ci permet d'atteindre *a minima* le niveau BBC-rénovation ou équivalent, soit un seuil de 80 kWhEP/m²_{SRT}² par an sur un périmètre de cinq usages. À partir de l'observation des résultats moyens effectivement atteints par cinq parcours types de rénovation (voir Tableau A2 en [Annexe 3](#)), variables selon le nombre d'étapes réalisées, de gestes et de postes de travaux intégrés³, l'étude montre que seuls les parcours de rénovation d'au plus deux étapes et incluant les six postes identifiés ont permis de passer sous le seuil de consommation équivalent au niveau BBC en moyenne. Les autres parcours, qui entraînent des risques de maintenir des ponts thermiques lorsque certains postes de travaux sont traités séparément, n'atteignent de tels résultats que dans certains cas, en partie en fonction de la typologie du logement. De la même manière, l'impact de l'installation d'un système de chauffage faiblement carboné comme une pompe à chaleur sur la consommation et les émissions de GES peut être très différent si elle est réalisée seule ou dans le cadre d'une rénovation d'ensemble cohérente (voir Encadré 1)⁴.

Dans les cas où il apparaît peu réaliste d'envisager une rénovation globale, le rapport énonce un certain nombre de conditions pour que la rénovation par étapes réussisse, telles que s'assurer du bon traitement de l'ensemble des postes de travaux et des interfaces, anticiper un plan de financement sur l'ensemble du parcours, limiter à deux ou trois étapes le parcours de rénovation en maximisant le nombre de postes dès la première étape, et enfin assurer une bonne coordination des différents corps de métiers (interfaces et interactions).

¹ Ademe, Dorémi et Enertech (2021), *La rénovation performante par étapes...*, *op. cit.*

² Surface thermique au sens de la réglementation thermique.

³ Isolation des murs, des planchers bas et de la toiture, remplacement des menuiseries extérieures, ventilation et production de chauffage/eau chaude sanitaire. Leur traitement doit tenir compte des interfaces entre postes (jonctions physiques) qui assurent l'étanchéité de l'air et la continuité de l'isolation, et des interactions entre postes (bon dimensionnement des systèmes).

⁴ Sidler O. (2022), *Du bon usage des pompes à chaleur*, rapport, Enertech, juillet.

Encadré 1 – Pompe à chaleur et rénovation performante

Les pompes à chaleur (PAC) sont des systèmes de chauffage alimentés en général à l'électricité, permettant d'extraire de l'énergie renouvelable de l'environnement extérieur, en particulier de l'air, du sol ou de l'eau selon le type de PAC, et de la restituer sous forme de chaleur dans le bâtiment. La quantité de chaleur restituée représente alors une quantité d'énergie supérieure à l'électricité consommée. Le coefficient de performance (COP) d'une PAC, mesuré par le rapport entre l'énergie transformée et l'énergie consommée, est alors supérieur à un, ce qui en fait un système de chauffage beaucoup plus performant qu'un système de convecteur électrique. Cette grande performance énergétique des PAC présente toutefois certaines limites.

Le COP d'une PAC dépend à la fois du type de pompe à chaleur et des conditions dans lesquelles celle-ci fonctionne. Il existe principalement quatre types de PAC :

- la PAC aérothermique, qui transforme l'énergie présente dans l'air extérieur :
 - soit en air chaud dans le logement dans le cas d'une PAC air-air ;
 - soit en eau chaude diffusant la chaleur par le biais d'un plancher chauffant ou de radiateurs dans le cas d'une PAC air-eau. Ce type de PAC peut faire l'objet d'une combinaison chauffage et eau chaude sanitaire (ECS) ;
- la PAC géothermique, qui diffuse dans le logement par un plancher chauffant ou des radiateurs de la chaleur prélevée par des capteurs dans les sols. Ces installations peuvent fournir de la chaleur ou du froid, et de l'eau chaude sanitaire. Les PAC géothermiques peuvent aussi être distinguées selon le type de capteurs, horizontaux (enterrés à quelques dizaines de centimètres de profondeur mais nécessitant une emprise au sol importante) ou verticaux (plus coûteuse mais plus efficace, descendant jusqu'à moins 200 mètres de profondeur¹) ;
- la PAC hydrothermique (eau-eau), qui prélève l'énergie dans un cours d'eau ou une nappe phréatique.

Les COP moyens des pompes à chaleur sont associés à deux indications de températures : la température extérieure et la température de l'eau des radiateurs ou de l'air soufflé à l'intérieur. Ces températures sont généralement de 7 °C pour l'air extérieur et de 27 °C pour l'air soufflé ou 35 °C pour l'eau des radiateurs.

¹ Les systèmes à géothermie profonde relèvent d'installations beaucoup plus lourdes et ne peuvent être mis en œuvre que dans un cadre industriel (réseau de chaleur ; production d'électricité par exemple), et non dans le cadre de logements individuels.

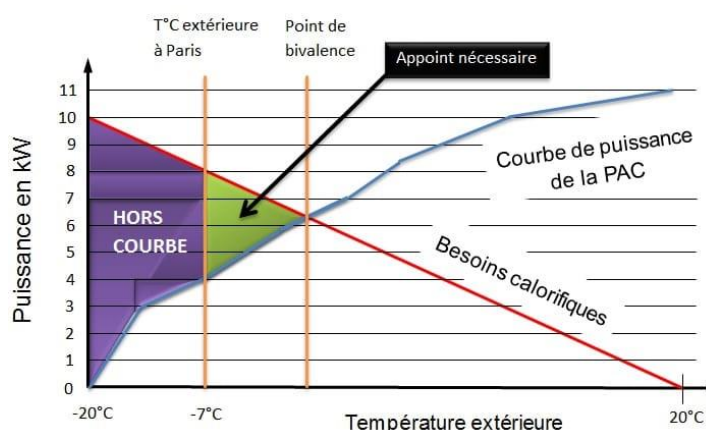
Tableau 3 – Coefficients de performance moyens selon le type de pompe à chaleur

	Air-air	Air-eau	Eau-eau	Géothermique
COP moyen	2,6	2,9	3 – 3,5	4

Source : d'après RTE et Ademe (2020), Réduction des émissions de CO₂, impact sur le système électrique : quelle contribution du chauffage dans les bâtiments à l'horizon 2035 ?, rapport, décembre ; upenergie.com

La puissance de la PAC est fortement sensible aux écarts de température : en dessous de 0 °C, il est généralement nécessaire d'avoir recours à un système de chauffage d'appoint ; certains types de PAC pourraient même devenir inutilisables lorsque les températures sont trop négatives, comme le montre la Figure 2. Les PAC géothermiques sont *a priori* moins sensibles à ces écarts, la température du sol étant plus constante que celle de l'air, et affichent une plus grande stabilité de leur rendement.

Figure 2 – Illustration pour le cas d'une PAC air-eau



Source : <https://www.quelleenergie.fr/magazine/comment-dimensionner-pac-air-eau>

Enfin, la performance effective des pompes à chaleur dépendra aussi largement des conditions d'installation. Installer une pompe à chaleur dans un logement mal isolé aboutira à la fois à un faible confort, la chaleur fournie par une PAC étant en général de basse température, et à des performances largement dégradées, cela d'autant plus que l'on se situe dans une région où le climat est rude. Outre le niveau d'isolation, les pompes à chaleur fonctionnant à basse température, les équipements de diffusion de la chaleur doivent aussi être adaptés (passer d'une haute température dans le circuit à une basse température conduit à réduire fortement la puissance des radiateurs en place). Des pompes à chaleur « haute température » existent également, mais elles sont nettement plus coûteuses et moins efficaces. De plus, la sensibilité aux températures extérieures rend généralement nécessaire l'installation de systèmes d'appoint en complément. Le type de PAC, son dimensionnement et la combinaison avec un système d'appoint sont alors à adapter selon la situation.

Elle peut se substituer complètement au système de chauffage existant, avec le recours à des convecteurs électriques (ce qui a néanmoins des conséquences en période de pointe électrique), ou venir en complément de l'ancienne chaudière (gaz par exemple).

La forte dépendance des performances des pompes à chaleur aux conditions de fonctionnement souligne la nécessité d'accompagner leur installation de travaux de rénovation de l'enveloppe pour les logements mal isolés, et le cas échéant d'adapter les besoins d'appoint, afin d'assurer un rendement optimal de la PAC. Si un surdimensionnement peut engendrer des surcoûts importants (de raccordement, du prix de l'abonnement ou de la consommation, maintenance), un sous-dimensionnement ne permettra pas de chauffer suffisamment et expose à des problèmes¹.

Aujourd'hui, les PAC les plus vendues en France sont les PAC individuelles air-air (75 % des ventes de PAC en 2021), alors même qu'elles ne bénéficient pas des aides MaPrimeRénov', suivies des PAC air-eau (23 % des ventes en 2020)². Les ventes de PAC géothermiques demeurent marginales, notamment du fait de leur prix bien plus élevé par rapport aux autres types de PAC (en moyenne 18 500 euros contre 12 000 euros pour une PAC air-eau par exemple³). Le soutien au déploiement des PAC les plus efficaces dans les meilleures conditions semble donc un enjeu prioritaire.

Le constat selon lequel les potentiels d'abattement de gestes séparés ne s'additionnent pas et les rénovations trop segmentées ne permettent pas d'atteindre l'objectif visé réduit fortement la pertinence du calcul des coûts d'abattement par geste. En ce sens, il paraît difficile d'évaluer la pertinence des rénovations actuelles, largement constituées de rénovations par geste, à l'aune de leurs coûts d'abattement, sans indication du chemin global qui permettra d'atteindre les objectifs fixés (niveau d'efficacité énergétique moyen équivalent à BBC et décarbonation quasi complète du parc). Une approche consistant à considérer des coûts d'abattement d'actions de rénovation globale doit ainsi s'imposer, ou *a minima* de rénovations par étapes cohérentes, dans la mesure où les objectifs de réduction des émissions nécessitent d'atteindre des niveaux de performance élevés. Cela est nécessaire notamment pour aborder la question de l'arbitrage entre isolation et décarbonation du système de chauffage dans une stratégie nationale ambitieuse.

¹ Tels que des problèmes de dégivrage ou de sursollicitation du compresseur de la pompe, réduisant sa durée de vie. Cedeo (2021), « [Tout savoir sur le dimensionnement d'une pompe à chaleur air/eau](#) ».

² Ministère de la Transition écologique (2022), [Chiffres clés des énergies renouvelables – Édition 2022](#), septembre, p. 50.

³ Haut-Commissariat au Plan (2022), « [Responsabilité climatique. La géothermie de surface : une arme puissante](#) », *Ouverture*, n° 12, octobre.

4.4. Tenir compte des effets de report de la décarbonation du vecteur

De façon similaire au secteur des transports ou de l'industrie, une partie de la décarbonation du secteur du bâtiment passera par des « transferts d'usage », au profit de vecteurs moins carbonés et dont le contenu carbone peut être réduit. Ce changement de source énergétique aura donc pour conséquence potentielle de reporter une partie des émissions du secteur du bâtiment vers les secteurs de production d'énergie, en particulier les secteurs de production d'électricité ou de chaleur.

Cela implique deux points de vigilance :

- le premier est la manière dont les émissions évitées sont comptabilisées dans les coûts d'abattement et allouées entre les secteurs. Le choix de la méthode de mesure des émissions doit être cohérent entre tous les secteurs (voir [Annexe 2](#)) ;
- le second est le volume de la demande d'énergie reporté sur les secteurs de production d'énergie décarbonée. Déterminer jusqu'où il est pertinent de réduire la consommation d'énergie par la rénovation profonde, et jusqu'où il est possible de décarboner la consommation d'énergie résiduelle à un coût raisonnable, ne peut se faire sans considération de l'offre des énergies décarbonées.

La prise en compte de cet effet de report appelle à une approche plus systémique des coûts d'abattement. Des approches sectorielles partielles peuvent toutefois rester pertinentes à condition d'intégrer des effets de retour sur les prix ou de fournir des ordres de grandeur de ces reports et de les mettre en regard des potentiels d'offre des énergies décarbonées (électricité, biogaz, chaleur).

4.5. L'apport des coûts d'abattement pour éclairer les enjeux de politique publique

À l'heure actuelle, les données disponibles ne permettent pas de mettre en place un calcul complet. Dans le cadre de ce rapport, seule la méthodologie peut être établie ainsi que quelques tentatives de chiffrage, en partie fondées sur les dires d'experts.

Pour cette raison, il faut appeler à la constitution et à la mise à disposition de bases de données permettant l'application des calculs de coût sur des fondements empiriques robustes. La constitution de telles bases de données impliquerait un suivi et une remontée des informations des travaux de rénovation réalisés sur l'ensemble du territoire. Cela avec une bonne connaissance des actions menées (nature et coût), ainsi que de la situation réelle avant et après travaux (vecteur énergétique, consommation d'énergie et température).

Par ailleurs, dans ce rapport, la stratégie de calcul et l'analyse des coûts d'abattement du secteur du bâtiment portent essentiellement sur la rénovation et le changement de vecteur dans le parc résidentiel. Quelques éléments issus d'une étude réalisée par le CGDD seront présentés sur le parc tertiaire, ainsi que sur le déploiement des réseaux de chaleur urbains à partir d'un cas d'étude (voir Chapitre 4).

Sur la question de l'arbitrage entre rénovation par gestes et rénovation globale, le présent rapport adopte une approche des calculs des coûts d'abattement qui considère en priorité des actions de rénovation globale permettant l'atteinte des étiquettes A, B ou C. Compte tenu de la part importante que représente encore aujourd'hui la rénovation par geste dans les actions réalisées, des travaux ultérieurs pourront compléter l'analyse en apportant des éléments de calcul de coûts d'abattement par geste. Néanmoins, ces résultats devront être interprétés avec précaution et l'évaluation des combinaisons de gestes devra être priorisée.

Concernant l'arbitrage entre performance des rénovations et décarbonation du vecteur, on procède à un exercice de comparaison des coûts d'abattement en fonction du niveau de réduction des émissions de CO₂ atteint entre deux scénarios contrastés, l'un où chaque logement rénové serait systématiquement électrifié et l'autre où seul le fioul serait substitué (voir Chapitre 3). Toutefois, là aussi les résultats reposent sur des hypothèses encore simplistes, qui devront être validées par des évaluations empiriques.

Les coûts d'abattement permettent d'identifier les mesures qu'il serait théoriquement socialement rentable de réaliser à un moment donné, par comparaison avec la valeur de l'action pour le climat. Ils ne peuvent pas, en revanche, être utilisés directement pour calibrer le niveau des instruments comme le montant d'une taxe carbone ou d'une subvention pour une action donnée. Une telle évaluation devrait aussi tenir compte des éléments de la rentabilité privée de l'action¹.

¹ Le calcul de la rentabilité de la rénovation énergétique n'entre pas dans le périmètre du rapport. Elle a fait l'objet d'un travail à part entière restitué dans une note d'analyse de France Stratégie : Aussilloux V., Chabrol F., Giraudet L.-G. et Vivier L. (2021), « [Quelle rentabilité économique pour les rénovations énergétiques des logements ?](#) », *La Note d'analyse*, n° 104, France Stratégie, décembre.



CHAPITRE 2

PRENDRE EN COMPTE LES SPÉCIFICITÉS DU SECTEUR DU BÂTIMENT POUR LE CALCUL DES COÛTS D'ABATTEMENT

Le secteur des bâtiments résidentiels est caractérisé par des contraintes qui lui sont propres. Ces spécificités sont à la fois techniques et liées à l'organisation économique du secteur.

1. Une grande diversité de situations et d'acteurs

1.1. L'hétérogénéité des parcs de bâtiments implique des actions différenciées

En premier lieu, le parc en lui-même est constitué d'une grande diversité de types de bâtiments impliquant des contraintes techniques, des gisements et des solutions de décarbonation différents. Ainsi, les bâtiments de bureau et d'habitation n'ont pas les mêmes contraintes et leur décarbonation n'appelle pas les mêmes types d'actions. Au sein des logements, les immeubles collectifs et les maisons individuelles ont également des caractéristiques distinctes. En outre, les immeubles construits avant les premières réglementations environnementales en 1974 sont nettement moins performants énergétiquement que des immeubles comparables construits dans les années 2000. Les premiers représentent en ce sens un potentiel de réduction d'émissions de GES beaucoup plus grand que les seconds, même si l'atteinte de la neutralité carbone à 2050 implique tout de même une décarbonation du chauffage des seconds.

La localisation dans des zones denses ou encore les caractéristiques architecturales ajoutent des contraintes fortes sur les possibilités de rénovation thermique. En outre, les émissions sont largement réparties entre les différentes catégories de bâtiments et il n'y a pas une catégorie qui représenterait la grande majorité des émissions ou constituerait

le gisement principal sur lequel concentrer l'effort. Par conséquent, l'enjeu stratégique de l'arbitrage entre efficacité énergétique et décarbonation des vecteurs se joue autant à l'échelle du parc dans son ensemble qu'au niveau de chaque bâtiment, en fonction de ses caractéristiques.

L'hétérogénéité des situations implique donc une granularité fine des actions à évaluer. En théorie, l'indépendance relative de ces actions (hors effets d'échelle), qui permet l'additivité des coûts et des réductions d'émissions, autorise le calcul des coûts d'abattement d'actions individuelles à un niveau fin¹. En pratique, en revanche, les données disponibles actuellement limitent fortement la granularité envisageable.

1.2. Des acteurs atomisés, aux comportements hétérogènes

La diversité des acteurs² constitue la seconde dimension de l'hétérogénéité du secteur. Des acteurs aux comportements et capacités à investir diversifiés, s'inscrivant dans des écosystèmes variés, sont amenés à intervenir dans la décarbonation. En particulier, de nombreuses situations génèrent des freins à l'investissement bas-carbone, induisent des coûts de transaction (ou des coûts cachés non monétisés) ou encore réduisent les effets escomptés des actions.

Les problèmes de coordination de cette multiplicité d'acteurs, les freins liés à l'organisation de l'écosystème des entreprises ou les effets rebond potentiels induisent des coûts implicites qui doivent être pris en compte, soit dans le calcul du coût d'abattement, soit dans l'interprétation et l'usage qui en est fait. Cela peut être illustré par quelques exemples présentés ci-dessous.

Les freins à la décision collective dans les copropriétés

Pour toute action au sein d'un immeuble géré par une copropriété, la nécessité d'un accord entre l'ensemble des copropriétaires implique des coûts de coordination très importants et peut constituer une source de blocage de certaines décisions d'investissement.

Ces freins à la décision relèvent avant tout d'un problème organisationnel qu'il n'est *a priori* pas pertinent d'inclure dans le coût d'abattement de sorte à révéler le coût social de ces obstacles : des options d'abattement à coût faible dans des logements en copropriété, bloquées par ce type de freins, révéleraient l'importance de la mise en place de leviers législatifs ou incitatifs permettant de résoudre ces problèmes pour atteindre les objectifs de décarbonation du secteur à moindre coût.

¹ Contrairement au cas du secteur de production d'électricité où les coûts systèmes sont élevés.

² L'atomicité renvoie à la multiplicité des acteurs sur un marché.

Les problèmes d'incitation pour les propriétaires bailleurs

Les décisions de rénovation sont caractérisées par des incitations à investir divergentes entre un propriétaire bailleur, qui met un bien immobilier à disposition sur le marché de la location, et un propriétaire occupant son bien. Le propriétaire bailleur qui investit dans la rénovation supporte les coûts mais ne bénéficie pas directement des gains d'efficacité énergétique et des économies d'énergie réalisées, qui profitent au locataire. Là encore, il n'apparaît pas pertinent d'inclure ce frein dans le calcul des coûts d'abattement, dans la mesure où il relève, comme pour les copropriétés, d'un problème organisationnel dont les coûts d'abattement doivent révéler l'ampleur.

Le rationnement des ménages sous contrainte de crédit

Face à l'ampleur du coût d'investissement dans des travaux de rénovation, la capacité d'un ménage à accéder à un financement s'avère déterminante dans sa décision d'investir dans la rénovation énergétique de son logement. Gillingham et Palmer (2013)¹ expliquent cependant que l'existence d'asymétries d'information entre prêteur et emprunteur amène souvent les prêteurs à ne pas financer des investissements qui seraient rentables à terme (et pour lesquels le risque de défaut est faible), car ils ne peuvent distinguer emprunteurs solvables et « à risque ». Les ménages sont alors susceptibles de faire face à un rationnement du crédit. Pour des acteurs privés, les coûts d'abattement dans la rénovation des bâtiments seront donc en partie dépendants de la nature du financement des investissements, notamment si ces derniers nécessitent un emprunt. Les coûts d'abattement définis dans ce rapport sont calculés du point de vue de la collectivité et ne tiennent pas compte de cette dimension. Ils sont donc indépendants de la source de financement.

Les ménages en situation de précarité énergétique

Selon la loi du 12 juillet 2010 portant sur l'engagement national pour l'environnement, « est en situation de précarité énergétique toute personne qui éprouve dans son logement des difficultés particulières à disposer de la fourniture d'énergie nécessaire à la satisfaction de ses besoins élémentaires, en raison de l'inadaptation de ses ressources ou de ses conditions d'habitat ». Lorsqu'un ménage consacre plus de 8 % de son revenu aux dépenses d'énergie et que son revenu par unité de consommation appartient aux trois premiers déciles, il est considéré comme étant en situation de précarité énergétique. En 2020, cette situation concernait 3,5 millions de ménages en France (ONPE, 2020).

¹ Gillingham K. T. et Palmer K. L. (2013), « [Bridging the energy efficiency gap: insights for policy from economic theory and empirical analysis](#) », *Review of Environmental Economics and Policy*, 8, octobre, p. 18-38.

Ces ménages, en particulier ceux vivant dans une passoire thermique, sont le plus souvent financièrement contraints de limiter leur consommation d'énergie et de sous-utiliser leur système de chauffage (voir notamment Allibe, 2012¹ et Cayla et Osso, 2013²). Dans ce cas, un écart est le plus souvent constaté entre les économies d'énergie attendues par la rénovation et celles effectivement réalisées du fait d'un effet rebond, quand la rénovation rend possible une amélioration significative du confort thermique, avec souvent des impacts notables sur la santé. Cette notion d'effet rebond, développée à la Section 3, est essentielle à prendre en compte dans le calcul des coûts d'abattement effectifs.

1.3. Des coûts cachés divers

Les investissements à réaliser pour atteindre les objectifs de rénovation énergétique des bâtiments ne sont en général évalués qu'à partir des coûts directs en travaux. Néanmoins, les chantiers de rénovation induisent des coûts additionnels dont l'importance potentielle justifierait qu'ils soient pris en compte dans le calcul des coûts d'abattement. Ces coûts additionnels, qu'on appelle ici des coûts « cachés », peuvent être relatifs :

- aux besoins d'information, par exemple concernant les opérations de rénovation à réaliser, d'accompagnement (maîtrise d'œuvre) pour assurer la qualité des travaux, les dispositifs de financement, ou encore le temps de réalisation des travaux ;
- à l'immobilisation du bien, ou plus précisément à la perception de perte de temps ou de confort du résident pendant la durée des travaux (qui peut être associée à un coût d'opportunité) ;
- à certains coûts annexes qui ne seraient pas déjà pris en compte dans le coût des travaux, par exemple les déplacements induits des conduites ou circuits électriques.

Ces coûts cachés sont très difficiles à mesurer et encore davantage à allouer aux différentes actions, étant donné leur nature et leur forte variabilité. Ne pas en tenir compte du fait de l'absence de données pourrait cependant conduire à sous-évaluer significativement les coûts d'abattement. Si ces coûts ne peuvent pas être évalués avec précision, il reste souhaitable d'en estimer un ordre de grandeur (en fonction du coût des travaux, par exemple) et de définir un champ d'incertitudes sur ces coûts intangibles³.

¹ Allibe B. (2012), *Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel français à long terme. Amélioration du réalisme comportemental et scénarios volontaristes*, thèse, École des hautes études en sciences sociales.

² Cayla J.-M. et Osso D. (2013), *Does energy efficiency reduce inequalities? Impact of policies in Residential sector on household budget*, ECEEE Summer Study Proceedings, European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE), Toulon/Hyères, France, p. 1247-1257.

³ Dans certaines approches, telles que dans le modèle Res-IRF, ces coûts sont assimilés aux résidus ou aux variables de calage ajoutées aux coûts financiers permettant aux fonctions de décision de reproduire les comportements observés.

2. Les inerties dans la transformation des parcs

2.1. Un enjeu sur les coûts d'abattement davantage porté sur le parc existant que sur la construction neuve

En 2050, 70 % du parc devrait être constitué d'immeubles construits avant 2012 et qui ne respectaient donc pas la norme BBC au moment de leur construction (MTES, 2020¹). La grande partie des efforts de décarbonation du secteur passera donc par des actions de rénovation de ce parc. Cette forte inertie rend d'autant plus nécessaire la mise en cohérence des actions dans le temps. Le niveau d'ambition de décarbonation du secteur implique qu'à terme le parc soit rénové en profondeur dans sa globalité. Ce sont sur ces types d'actions que se concentre le rapport.

Du côté de la construction neuve, il existe un enjeu autour du surcoût de la construction d'un bâtiment performant relativement à un bâtiment peu performant. D'après une étude du CGDD (2015)², le coût d'une construction aux normes BBC est entre 9 % (pour les bâtiments collectifs) et 11 % (pour les logements individuels) plus élevé que le coût d'une construction respectant la réglementation thermique 2005 (RT2005). Ce surcoût peut s'élever jusqu'à 17 % dans l'individuel pour des normes plus exigeantes encore que la norme BBC (par exemple, Bepos : bâtiment à énergie positive). Or, l'évolution de la réglementation vers un parc en moyenne au niveau BBC implique une amélioration tendancielle de la performance moyenne des bâtiments neufs sur l'ensemble du parc qui conduira à réduire l'écart de coût de construction avec les bâtiments peu performants. En outre, ce surcoût initial peut être compensé par les économies liées à la performance du bâtiment (réflexion en coût global). La prise en compte de l'évolution du coût de la construction neuve performante relève donc davantage d'un enjeu lié aux normes de construction que d'un enjeu sur les coûts d'abattement.

2.2. Progrès technique et fort contenu en travail rendent incertaine l'évolution des coûts

Les coûts de rénovation énergétique évoluent relativement peu en tendanciel. Les gains de productivité sont nuls depuis 1995 et la productivité du travail a chuté de 20 % depuis 2001³. En parallèle, les différents indices mis à disposition par l'Insee et appréciant l'évolution des coûts dans le secteur de la construction (voir Graphique 5) mettent en exergue une hausse tendancielle des coûts depuis 2000. À l'avenir, la massification des

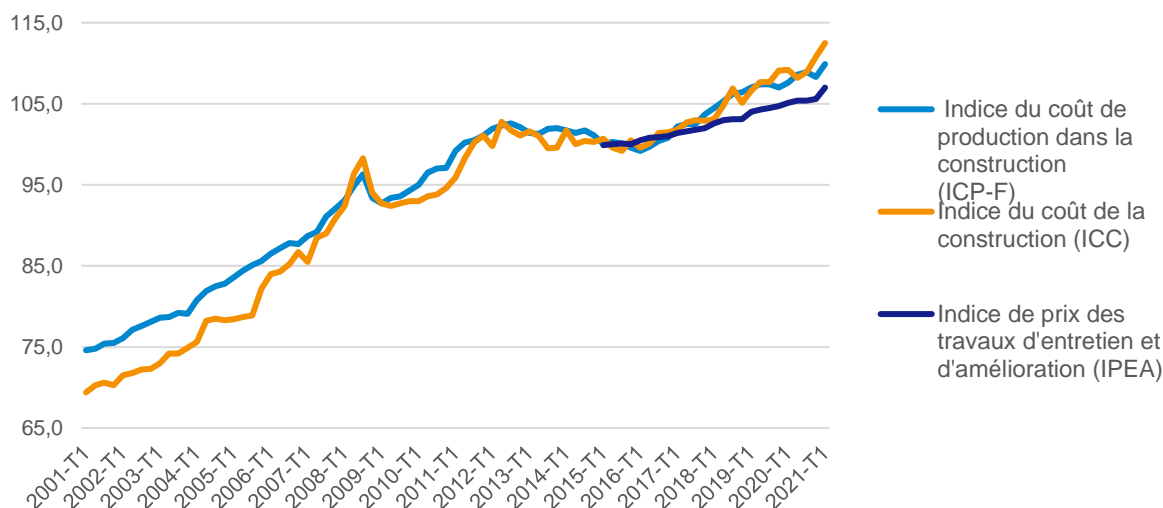
¹ Ministère de la Transition écologique et solidaire (2020), *Stratégie nationale bas-carbone*, mars.

² CGDD (2015), *Un habitat plus compact et moins énergivore : pour quels coûts de construction ?*, *Études & Documents*, n° 135, Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable, décembre.

³ Voir <https://lehub.bpifrance.fr/transformation-digitale-productivite-constructi/>

rénovations et l'augmentation des contraintes environnementales sur le secteur pourraient affecter l'évolution de ces coûts par deux canaux jouant en sens opposé.

**Graphique 5 – Indice de coût et de prix dans la construction
(données mensuelles brutes, référence 100 en 2015)**



Champ : France pour ICP-F et Ipea et France métropolitaine pour ICC.

Lecture : au premier trimestre 2021, l'Ipea augmente de 7,0 % par rapport au premier trimestre 2015.

Source : Insee

Tout d'abord, les progrès technologiques pourraient s'accélérer et tendre à réduire les coûts d'abattement. La transition numérique du secteur, portée notamment en France par le développement du Building Information Modeling (BIM) avec le plan BIM 2022 (lancé en 2019), doit permettre de générer des gains de productivité et de qualité sur l'ensemble de la durée de vie du bâtiment, c'est-à-dire dès la conception et la construction, mais également lors de sa rénovation. Des approches d'industrialisation de la rénovation énergétique performante à l'image d'EnergySprong¹ sont également développées pour améliorer l'efficacité des travaux tout en réduisant leur durée et leur coût. Ce procédé est rendu possible par le ciblage préalable des logements aux besoins semblables, l'achat des matériaux en grandes quantités (et donc à des prix plus bas) auprès des industriels et la conception d'éléments préfabriqués.

Des améliorations peuvent également s'opérer au niveau de la fabrication des composants des bâtiments, avec, par exemple, les matériaux de construction biosourcés

¹ Voir <http://www.planbatimentdurable.fr/energiesprong-le-defi-de-la-renovation-energetique-a1082.html>

ou la filière « sèche » pour le ciment¹. Le recours à des matériaux autres que le béton ou le ciment (biomasse, bois, etc.), en plus d'avoir un impact environnemental moindre (capacité de stockage de carbone, issus de matériaux de proximité), facilite les opérations de construction sur le chantier en réduisant sa durée totale. Un certain nombre de freins au déploiement de ces filières ont été identifiés, à la fois d'ordre technique (manque de compétences quant à l'usage de ces matériaux par les professionnels du bâtiment), culturel, réglementaire, normatif ou assurantiel², et ceux-ci pourraient être levés.

Au-delà des progrès technologiques identifiés, l'amélioration de la coordination entre acteurs, par l'intervention d'un maître d'œuvre ou d'un groupement d'artisans, a un rôle à jouer dans l'optimisation du déroulé du chantier pour en limiter le coût.

Néanmoins, l'accroissement des objectifs de rénovation pourrait accentuer les tensions sur le marché des matériaux et sur le marché du travail, et augmenter les coûts. Sur le marché du travail, des difficultés de recrutement dans le secteur sont déjà présentes en France (80 % des entreprises du secteur déclarent peiner à recruter, d'après l'Observatoire des métiers du BTP³). Le nécessaire renforcement de la qualification des travailleurs (et donc de leur salaire) entraîne un risque de saturation des compétences et de friction sur le marché de la rénovation. Dans cette configuration, l'offre de main-d'œuvre qualifiée peut devenir insuffisante par rapport à la demande découlant des objectifs nationaux. L'adaptation des offres de formation à la massification de la rénovation et au déploiement des matériaux faiblement carbonés, répondant à la montée en compétences requise pour les artisans du bâtiment (en particulier dans les TPE et PME), fait partie des orientations de la SNBC pour les politiques d'urbanisme et d'aménagement. Enfin, la nature moins productive des petits chantiers de rénovation, par rapport à la construction neuve ou à la réhabilitation d'ampleur, est susceptible de ralentir la massification de la rénovation. La moindre rentabilité du secteur pour les artisans du bâtiment pourrait diminuer l'offre et ralentir le rythme de la rénovation.

D'un côté, le progrès technique peut faire espérer une baisse des coûts, de l'autre, les contraintes découlant de la nécessaire massification des chantiers de rénovation font craindre des tensions sur le marché. En somme, la résultante sur l'évolution des coûts reste très incertaine. Pour cette raison, des tests de sensibilité sont réalisés dans les deux sens dans ce rapport.

¹ La filière « sèche » consiste à ne pas utiliser d'eau dans la construction d'un bâtiment, en mobilisant des matériaux de construction autres que le béton et le ciment, tels que le bois ou l'acier.

² À titre d'illustration, la filière chanvre a bénéficié en 2018 d'un programme de rédaction de nouvelles règles professionnelles, d'amélioration de sa prise en compte dans la réglementation thermique, d'essais de résistance au feu ou encore de rédaction de guides pédagogiques : ministère de la Transition écologique (2021), *Matériaux de construction biosourcés et géosourcés*.

³ Observatoire des métiers du BTP (2021), *Les métiers en tension dans le secteur du bâtiment*.

3. Des effets rebond difficiles à évaluer

3.1. Définition de l'effet rebond et fondements empiriques

L'effet rebond soulève de nombreux débats autour des impacts potentiels des politiques d'efficacité énergétique. Conventionnellement, il se définit comme la différence entre la réduction de consommation d'énergie effective et la réduction de consommation d'énergie théorique anticipée exprimée en pourcentage de cette dernière. En 1865, Jevons¹ faisait le constat dans ses travaux que les gains d'efficacité énergétique conduisaient à accroître la consommation de charbon au lieu de la réduire. Cet effet rebond, qualifié de « *backfire* », ferait plus que compenser les gains d'efficacité et rendrait donc les politiques d'efficacité énergétique potentiellement contreproductives. Ce phénomène recouvre cependant une pluralité de mécanismes et il est alimenté par différents canaux directs à l'échelle individuelle (microéconomique), comme indirects à l'échelle du système économique global (macroéconomique).

L'effet rebond direct se mesure à l'échelle du consommateur. L'amélioration de l'efficacité d'un service énergétique permet une diminution de son prix (il devient moins cher de se chauffer à une température donnée). L'effet rebond direct est alors la combinaison :

- d'une redirection de la consommation vers le service énergétique devenu moins coûteux, qualifié d'effet de substitution, ainsi que vers des produits complémentaires à celui-ci au détriment de biens et services substituables ;
- et d'une hausse du pouvoir d'achat, permettant un accroissement du niveau de consommation globale, qualifié d'effet revenu.

À titre d'illustration, un système de chauffage plus efficace incite à se chauffer davantage car il permet d'atteindre une température supérieure pour un même niveau de consommation d'énergie. Ainsi, l'effet rebond direct peut se traduire par une augmentation de la température intérieure du logement.

Au niveau macroéconomique, l'accumulation des effets individuels est susceptible d'entraîner des rétroactions sur le système économique, là encore par divers canaux :

- en premier lieu, l'amélioration de l'efficacité énergétique entraîne une baisse du prix et de la demande d'énergie. En retour, la baisse du prix tend à accroître la demande d'énergie, ce qui amortit la réduction initiale (ainsi que la baisse du prix). Cet effet de

¹ Stanley Jevons W. (1865), *The Coal Question: An Inquiry Concerning the Progress of the Nation and the Probable Exhaustion of Our Coal Mines*, Londres, MacMillan, p. 140.

marché (ou effet prix) dépend des comportements d'offre et de demande : plus l'offre est inélastique et plus la demande est élastique, plus l'effet rebond est important ;

- en parallèle, l'amélioration de l'efficacité énergétique du système productif encourage la substitution entre facteurs au profit des facteurs consommateurs d'énergie. Elle conduit de plus à accroître la productivité globale et à stimuler la croissance par des mécanismes de réallocation sectorielle (hausse des rendements relatifs du secteur concerné), d'innovation induite (gains d'efficacité dans d'autres secteurs du fait des externalités) et de multiplicateur keynésien (gains réinvestis dans d'autres activités consommatrices d'énergie et d'autres ressources). La combinaison de ces trois mécanismes forme un effet croissance qui contribue à renforcer *in fine* la demande d'énergie, ce qui tend à amortir l'effet prix initial.

Malgré le nombre de travaux sur le sujet, l'ampleur de l'effet rebond en général et de ses différentes composantes reste à ce jour encore mal évaluée empiriquement, avec des estimations très contrastées. Cette forte hétérogénéité des résultats tient à la fois à la définition du concept même, parfois variable d'une étude à l'autre, à la qualité des données et aux méthodologies empiriques mobilisées pour les mesurer. Les principaux travaux académiques repris ici sont ceux décrits dans un article de référence de Gillingham, Rapson et Wagner (2016)¹.

Les évaluations empiriques de l'effet rebond direct sont les mieux documentées, au travers d'estimations de l'élasticité prix de la consommation d'énergie. Pour autant, elles aboutissent à des estimations variables d'une étude à l'autre. D'après Gillingham *et al.* (2016), les élasticités à court et moyen terme mesurées pour la consommation d'essence et d'électricité sont généralement comprises entre -0,05 et -0,4, soit un effet de rebond direct moyen de l'ordre de 5 % à 40 % de la consommation attendue (de 5 % à 25 % dans la plupart des études). Autrement dit, la consommation d'énergie serait, *in fine*, entre 5 % et 40 % plus élevée qu'attendue. Dans le cas des consommations d'énergie de chauffage, des effets rebond pouvant atteindre 60 % sont mesurés². Néanmoins, les considérations méthodologiques conduisent à penser que les estimations les plus robustes de l'effet rebond direct se situeraient autour de 20 % de la consommation attendue en moyenne³.

¹ Gillingham K., Rapson D. et Wagner G. (2016), « [The rebound effect and energy efficiency policy](#) », *Review of Environmental Economics and Policy*, 10(1), p. 68-88.

² Belaïd F., Bakaloglou S. et Roubaud D. (2018), « [Direct rebound effect of residential gas demand: Empirical evidence from France](#) », *Energy Policy*, 115, avril, p. 23-31.

³ Sorrell S., Dimitropoulos J. et Sommerville M. (2009), « [Empirical Estimates of the Direct Rebound Effect: A Review](#) », *Energy Policy*, 37(4), 2009, p. 1356-1371.

D'un individu à l'autre, l'effet rebond direct peut varier fortement selon le revenu ou la performance du logement¹. En tout état de cause, les effets rebond les plus élevés concernent essentiellement les ménages en sortie de précarité énergétique, lorsque les gains d'efficacité thermique permettent un relâchement de la contrainte de budget et une amélioration du confort (voir Section 1.2). L'effet est *a priori* de moins grande ampleur chez les ménages à hauts revenus, initialement non limités par une contrainte de budget.

Peu d'études sont consacrées aux effets indirects. En outre, la quantification des effets macro-économiques est particulièrement délicate du fait de la complexité et de l'intrication des mécanismes en jeu avec le reste du système économique. Une partie d'entre elles vise à refléter l'impact de la diminution du prix du service énergétique sur la consommation d'autres biens², or les résultats dépendent fortement des hypothèses sur la composition de la consommation d'une source additionnelle de revenu. Celle-ci est le plus souvent considérée comme étant égale au contenu énergétique ou carbone de la consommation moyenne. Les mesures de l'effet de marché, fondées sur l'estimation des élasticités de l'offre et de la demande, sont, elles aussi, d'une fiabilité limitée et seules des plages de valeur peuvent être proposées en analyses de sensibilité³. Enfin, l'estimation empirique de l'effet croissance, bien qu'il ne constitue pas la principale composante d'un éventuel *backfire*, est rendue quasiment impossible par l'imbrication des mécanismes économiques et la complexité du système économique. Là encore, seuls quelques travaux peuvent être utilisés pour alimenter des analyses de sensibilité (de 11 % à 21 % selon Barker *et al.*, 2007⁴ et 2009⁵).

Les évaluations des composantes de l'effet rebond ne sont pas additives et l'effet cumulatif global dépend des situations. En fin de compte, Gillingham *et al.* (2016) estiment que l'effet rebond agrégé ne devrait vraisemblablement pas être supérieur à 60 %⁶. Malgré les incertitudes, cela reste loin d'un effet *backfire*, dans lequel la consommation serait, *in fine*, supérieure.

¹ Cayla J.-M. et Osso D. (2013), *Does energy efficiency reduce inequalities?...*, *op. cit.*

² Par exemple, acheter un billet d'avion avec les gains pécuniaires issus de l'amélioration d'efficacité : voir Daumas L. (2020), « *Is the transition doomed to fail due to a rebound effect?* », *Regards croisés sur l'économie*, n° 25(1), janvier, p. 189-197.

³ L'offre est contrainte à court terme par des contraintes de capacité, mais plus élastique à long terme, portée par les innovations constatées dans l'extraction du pétrole ou la production d'électricité d'origine renouvelable.

⁴ Barker T., Ekins P. et Foxon T. (2007), « *The macro-economic rebound effect and the UK economy* », *Energy Policy*, 35(10), octobre, p. 4935-4946.

⁵ Barker T., Dagoumas A. et Rubin J. (2009), « *The macroeconomic rebound effect and the world economy* », *Energy Efficiency*, 2(4), mai, p. 411-427.

⁶ Cette estimation de 60 % est basée sur un rebond microéconomique à long terme de 30 %, un effet prix macroéconomique de 25 % et un effet sur la croissance macroéconomique de 5 % (compte tenu des estimations de l'effet des autres rebonds), mais la répartition peut varier selon le contexte.

3.2. Recommandations pour la prise en compte des effets rebond dans le calcul du coût d'abattement

Si le phénomène de *backfire* n'est pas démontré, les niveaux estimés de l'effet rebond montrent que celui-ci est susceptible d'affecter significativement les coûts d'abattement des travaux de rénovation. Il est donc indispensable d'en tenir compte, avec précaution.

Premièrement, l'effet rebond n'agit pas sur les mêmes variables du calcul selon le canal. Ainsi, l'effet rebond direct viendrait réduire les gains de facture énergétique au numérateur et les émissions évitées de GES au dénominateur du ratio des coûts d'abattement (€/tCO₂), tandis que l'effet rebond indirect agirait sur d'autres variables de dépenses (consommation générale) en plus de réduire le niveau d'émissions au dénominateur.

Deuxièmement, la prise en compte d'un effet rebond ne peut se dissocier de la prise en compte des autres changements qui l'accompagnent, comme les cobénéfices. Le coût d'abattement doit en effet refléter l'efficacité socioéconomique globale de l'action de décarbonation, et intégrer l'effet rebond sans ses contreparties biaiserait fondamentalement le calcul.

En particulier, dans la plupart des cas, l'effet rebond conduit à des gains de bien-être (*i. e.* de confort ou de santé) qu'il est nécessaire d'intégrer. De la même façon, l'innovation et la croissance économique engendrées par les gains d'efficacité doivent être prises en compte car elles peuvent réduire l'effet négatif du rebond macroéconomique. Les politiques d'atténuation de l'effet rebond ne seraient alors pas justifiées économiquement et pourraient même réduire le bien-être, dès lors que les gains privés sont supérieurs aux coûts externes associés¹.

Troisièmement, les calculs des coûts d'abattement sont réalisés dans le cadre d'un scénario de référence supposé intégrer les changements liés aux rétroactions macroéconomiques. En particulier, les trajectoires de prix des énergies sont supposées compatibles avec la trajectoire de décarbonation souhaitée. Si ces trajectoires sont la résultante du cumul des actions dont on cherche à évaluer le coût, intégrer les effets de retour macroéconomique dans le coût d'abattement dans un champ donné doit être fait en cohérence avec le calcul des coûts d'abattement dans les autres. Néanmoins, dans une approche dite « ingénieure », négliger ces effets de retours macroéconomiques associés à une action peut rester une approximation raisonnable.

Sur la base de ces considérations, il apparaît pertinent de tenir compte, dans le calcul du coût d'abattement, des effets rebond directs associés à la sous-consommation initiale des

¹ Cet effet contre-productif conduit Gillingham *et al.* (2016) à conclure « *Don't mitigate rebound, maximize welfare* » (« [The rebound effect and energy efficiency policy](#) », *op. cit.*).

ménages (*pre-bound effect*) et des cobénéfices associés, en particulier ceux sur la santé (dont l'intégration est présentée *infra* dans la Section 4). Les estimations de Cayla et Osso (2013)¹ permettent de calibrer un taux d'utilisation du système de chauffage par les ménages en fonction de leur revenu et des caractéristiques de leur logement. En l'absence d'estimations précises, un écart de performance de l'ordre de 20 % au niveau agrégé semble réaliste (assimilable à un effet rebond global de 20 %). Si ces effets rebond peuvent varier fortement à l'échelle d'une action, des tests de sensibilité peuvent être réalisés de sorte à couvrir une plage de 0 % à 40 % au niveau agrégé.

Ces constats confortent le choix d'une approche par une estimation des effets de premier ordre, ne tenant pas compte des canaux macroéconomiques indirects de l'effet rebond dans le calcul du coût d'abattement.

3.3. Au-delà de l'effet rebond, les asymétries d'information peuvent affecter la qualité des travaux

Au-delà de l'effet rebond, la littérature ne conclut pas systématiquement que la rénovation aboutit à une réduction significative des consommations d'énergie et des émissions de CO₂, ou en tout cas pas autant qu'escompté.

Des évaluations économétriques *ex post* des résultats obtenus de la rénovation ont estimé une différence parfois importante entre les résultats anticipés *ex ante* par les modèles d'ingénierie et les résultats effectivement observés. Un « essai randomisé contrôlé » réalisé aux États-Unis (Fowlie *et al.*, 2018²) portant sur un programme de financement de la rénovation des logements de ménages modestes, a montré que le coût de la rénovation est en moyenne deux fois supérieur aux bénéfices actualisés³ cumulés en termes de réduction de facture énergétique. La baisse de la consommation énergétique équivaut à environ 40 dollars par an pour 1 000 dollars investis, ce qui ne représente que la moitié de l'effet de la rénovation anticipé *ex ante*. L'effet rebond direct pourrait expliquer les écarts de performance mesurés, toutefois cela n'a pas pu être mis en évidence par l'étude de Fowlie *et al.*, qui ne trouve pas d'effet significatif en contrôlant la température du logement. L'étude conclut que la surestimation des économies d'énergie anticipées par les modèles d'ingénierie est une explication probable de ces écarts. Il convient toutefois de préciser que cette étude base son analyse sur des travaux dont les montants (en moyenne 5 000 dollars par ménage), sont financés entièrement via le programme. Cela laisse à penser qu'il s'agit d'une rénovation partielle, d'un ou quelques gestes. L'efficacité de la rénovation peut par conséquent s'en

¹ Cayla J.-M. et Osso D. (2013), *Does energy efficiency reduce inequalities?...*, *op. cit.*

² Fowlie M., Greenstone M. et Wolfram C. (2018), « *Do energy efficiency investments deliver? Evidence from the Weatherization Assistance Program* », *The Quarterly Journal of Economics*, 133(3), août, p. 1597-1644.

³ Au taux de 3 % en analyse principale.

retrouver amoindrie¹. À ce titre, l'étude du projet « *Perf in Mind* » financé par l'Ademe² a montré que les rénovations complètes et performantes conduisent à des consommations d'énergie finale en moyenne de 45 kWh/m²/an, soit similaires au niveau BBC attendu.

Blaise et Glachant (2019)³ et Glachant *et al.* (2020)⁴ montrent de leur côté que les effets des travaux sur la facture énergétique sont très modestes. Glachant *et al.* (2020) estiment que celle-ci ne diminue en moyenne que de 12 % (soit 160 euros par an) pour 12 000 euros investis, et les réductions d'émissions de CO₂ évitées qui en découlent sont évaluées à hauteur de 22 %, soit 760 kg par an. Ce montant d'investissement correspond toutefois à la dépense moyenne par logement dans la rénovation énergétique d'après l'enquête *Travaux de rénovation énergétique des maisons individuelles* (Trémi) de 2017, soit des rénovations de petite ampleur dont le résultat en termes d'économies d'énergie est de fait limité.

Un autre facteur d'écart entre résultats attendus et observés, prenant une place de plus en plus importante dans le débat public, est l'existence de problèmes de qualité de la rénovation. L'« effet qualité » implique que l'efficacité de la rénovation est surestimée, du fait de la qualité insuffisante des travaux réalisés par les artisans ou les entreprises.

Le secteur de la rénovation est sujet à une imperfection de marché importante liée à l'asymétrie d'information entre le client et l'entrepreneur sur la qualité des travaux réalisés⁵. Cette imperfection de marché conduit à un processus concurrentiel inefficace diminuant la qualité offerte sur le marché⁶ : le client fait son choix sur la base du prix mais n'a pas l'information suffisante pour tenir compte de la qualité. Cela a un impact direct sur le niveau des économies d'énergie effectives (potentiellement moins importantes qu'anticipé, si les travaux menés sont de mauvaise qualité) et donc sur les coûts d'abattement. Cette défaillance de marché peut être prise en compte en considérant directement les réductions effectives

¹ Ademe, Dorémi et Enertech (2021), *La rénovation performante par étapes. Étude des conditions nécessaires pour atteindre la performance BBC rénovation ou équivalent à terme en logement individuel*, rapport, janvier, p. 8.

² Étude coordonnée par Enertech, avec Effinergie, Médiéco et l'Institut négaWatt. Pour consulter le rapport final (2021), voir <https://www.effinergie.org/web/perfinmind>.

³ Blaise G. et Glachant M. (2019), « Quel est l'impact des travaux de rénovation énergétique des logements sur la consommation d'énergie ? Une évaluation *ex post* sur données de panel », *Revue de l'Énergie*, n° 646, septembre-octobre, p. 46-60.

⁴ Glachant M., Kahn V. et Lévêque F. (2020), *Une estimation économétrique de l'impact des travaux de rénovation énergétique sur la consommation d'énergie et les émissions de carbone*, Résultats du module 2 de l'étude « Analyse économique et économétrique du dispositif des Certificats d'économies d'énergie », Mines Paris Tech – PSL, octobre.

⁵ Voir par exemple le cas d'étude appliqué en Floride dans Giraudet L.-G., Houde S. et Maher J. (2018), « *Moral hazard and the energy efficiency gap: Theory and evidence* », *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 5(4), p. 755-790.

⁶ Akerlof G. (1970), « *The market for "lemons": Quality uncertainty and the market mechanism* », *Quarterly Journal of Economics*, vol. 84(3), p. 488-500.

observées (et non théoriques) de l'action considérée. Un coût attribué à la formation des artisans réalisant les travaux de meilleure qualité ou encore un coût lié au contrôle de la réalisation des travaux pourraient en outre être ajoutés. Les données et les travaux empiriques sont à l'heure actuelle encore trop peu nombreux et ne permettent pas d'évaluer un ordre de grandeur robuste de l'impact de ce phénomène sur les coûts d'abattement.

4. Des cobénéfices pour la santé très significatifs

Les bénéfices des rénovations ne se limitent pas aux économies de facture énergétique. Ils s'accompagnent en premier lieu de gains de confort et de bien-être qui restent toutefois difficiles à monétiser. Ces gains peuvent, dans une certaine mesure, être reflétés par une plus-value sur le marché de l'immobilier, par rapport à d'autres biens aux caractéristiques communes mais moins performants. Cependant, cette « valeur verte », telle que définie par la dernière étude des Notaires de France (2021)¹, ne constitue pas un cobénéfice social en tant que tel, dans la mesure où le gain perçu par le vendeur du bien est répercuté comme un coût monétaire supplémentaire pour l'acheteur (hausse du prix d'achat). Cette valeur verte constitue en quelque sorte un transfert de coûts équivalents de rénovation.

Au-delà d'un gain de confort, des gains sanitaires peuvent être observés lorsque l'état initial du logement est à l'origine d'effets négatifs sur la santé. Ces gains doivent être pris en compte dans le coût d'abattement. Un certain nombre de risques pour la santé sont associés aux conditions de logement et de chauffage. La mauvaise qualité thermique des logements peut être responsable de problèmes de température trop basse ou trop élevée, d'humidité, de moisissures, ou encore de baisse de la qualité de l'air intérieur. Une exposition prolongée à ces risques est susceptible d'entraîner diverses pathologies (maladie coronarienne, maladies respiratoires, troubles de la santé mentale), se révélant parfois fatales pour les occupants : 30 % de la surmortalité hivernale serait ainsi due à l'inefficacité énergétique des logements².

Les conditions de logement et les risques sur la santé qui en résultent dépendent de la capacité des ménages à financer leurs dépenses énergétiques. Les ménages occupant des logements particulièrement inefficaces doivent assumer des dépenses plus importantes pour subvenir à leurs besoins énergétiques. Or, la contrainte financière à laquelle font face les ménages les plus modestes ne leur permet pas de satisfaire ces besoins et donc de se chauffer suffisamment en hiver. Pour les personnes en situation de précarité énergétique, la contrainte peut se répercuter sur d'autres besoins comme l'accès à une alimentation saine ou à des soins, accentuant les effets néfastes sur leur santé. Les rénovations énergétiques

¹ Notaires de France (2021), *Performance énergétique : la valeur verte des logements*.

² Rudge J. (2011), « Indoor cold and mortality », in Braubach M., Jacob D. E. et Ormandy D. (dir.), *Environmental Burden of Disease Associated with Inadequate Housing*, WHO European Office, p. 81-95.

constituent dans ce cas un véritable levier d'action face à ces risques sanitaires et les bénéfices associés doivent être intégrés dans le calcul des coûts d'abattement.

Le rapport du groupe de travail sur l'évaluation socioéconomique des effets de santé des investissements publics (CGDD, France Stratégie et SGPI, 2022¹) fournit une méthodologie pour l'évaluation monétaire des bénéfices de santé de la rénovation énergétique des logements (voir section 2.3. de l'[Annexe 4](#)). Elle est largement fondée sur des travaux menés en Angleterre ayant conduit à l'élaboration de la méthode *Housing Health and Safety Rating System* (HHSRS)², et sur la réplique sur des données françaises faite par le service des études médicales d'EDF³. Selon cette méthodologie, seul l'impact sur la santé associé à l'amélioration de la performance thermique du logement est pris en compte, et uniquement sur les risques associés aux températures intérieures trop basses⁴.

Sur cette base, 1,3 million de logements⁵ (4,6 % du parc total) seraient concernés par un risque significatif sur la santé lié à l'inefficacité énergétique. D'après les travaux anglais HHSRS, 1/18 de ces logements seraient effectivement concernés par un événement de santé chaque année, et même plus lorsque les occupants ont des revenus faibles⁶ (voir Tableau A8 en [Annexe 4](#)).

En moyenne, à partir des hypothèses décrites en annexe, le groupe de travail estime que chaque logement inefficace énergétiquement coûterait en moyenne 7 500 euros par an, réparti en 400 euros de coûts médicaux, 1 400 euros de perte de bien-être liée à la maladie et 5 700 euros de coût social de mortalité. Ce coût serait particulièrement élevé chez les ménages les plus précaires (33 000 euros). Toujours selon ce groupe de travail, les cobénéfices de santé apportés par la rénovation ambitieuse de 1,3 million des logements les plus énergivores représenteraient chaque année 525 millions d'euros de coûts de santé économisés par la sécurité sociale, 1,7 milliard d'euros de gains en bien-être pour les occupants de ces logements, et 2 100 décès évités, soit un coût social de mortalité évité de 7,4 milliards d'euros.

¹ CGDD, France Stratégie et SGPI (2022), *Évaluation socioéconomique des effets de santé des projets d'investissement public*, sous la direction de Benoît Dervaux et Lise Rochaix, mars.

² University of Warwick London School of Hygiene et Tropical Medicine (2003), *Statistical Evidence to Support the Housing Health and Safety Rating System*, t. 1, *Project Report*, Londres, Office of the Deputy Prime Minister.

³ Cette méthodologie est largement fondée sur des travaux menés en Angleterre ayant conduit à l'élaboration de la méthode HHSRS et sur sa réplique sur des données françaises. Voir Ezratty V., Ormandy D., Laurent M.-H., Duburcq A., Lenchi C., Boutière F. et Lambrozo J. (2017), « *Fuel poverty in France: Adapting an English methodology to assess the health cost implications* », *Indoor and Built Environment*, 26(7), juin, p. 999-1008.

⁴ Les effets sur la santé associés à l'humidité et aux moisissures, bien que concomitants aux températures intérieures basses, ne sont pas pris en compte ici, tout comme les risques associés aux températures particulièrement hautes.

⁵ En se basant sur les 4,8 millions de passoires énergétiques en 2018 estimées par Merly-Alpa T., Riedinger N. et Baudry M. (2020), *Le parc de logements par classe de consommation énergétique au 1^{er} juillet 2018*, Document de travail, n° 49, Observatoire national de la rénovation énergétique, septembre.

⁶ Ezratty V. et al. (2017), « *Fuel poverty in France...* », *op. cit.*

Ces résultats représentent des premiers ordres de grandeur des bénéfices de santé permis par la rénovation énergétique. Ils sont toutefois à considérer avec précaution, les preuves empiriques restant fragiles. Pour gagner en précision, des évaluations empiriques sur des données françaises robustes sont nécessaires. Des travaux analysant le croisement de données relatives aux caractéristiques des logements (dont le chauffage) et des occupants (les revenus) avec des données de santé seraient en ce sens très utiles. En outre, ces travaux portent uniquement sur les effets sur la santé liés aux températures trop basses dans les logements. L'augmentation des épisodes caniculaires pourrait avoir des effets sanitaires spécifiques qu'il faudrait prendre en compte, notamment dans les passoires énergétiques.

5. Principes méthodologiques additionnels

5.1. La mesure des émissions sur la base des étiquettes de performance énergétique et des vecteurs énergétiques

En France, la performance énergétique d'un bâtiment est appréciée par sept étiquettes, établies par un DPE : de A pour les bâtiments les plus efficaces, à G pour les moins efficaces. L'élaboration d'un DPE repose sur une méthodologie définie depuis 2006 et réformée en 2021 (voir Encadré 2).

Les étiquettes de performance énergétique des DPE renvoient à des fourchettes de consommation énergétique pour un certain nombre d'usages. Avant la réforme, l'évaluation de cette consommation énergétique globale était établie selon la méthode de calcul de la consommation conventionnelle des logements (3CL) pour tous les logements construits après 1948¹ et sur la base des factures énergétiques pour les logements construits antérieurement, et elle se limitait à trois usages (chauffage, eau chaude sanitaire (ECS), électricité spécifique). Depuis la réforme, la méthode 3CL s'applique désormais à l'ensemble des logements et l'évaluation porte sur cinq usages (chauffage, ECS, électricité spécifique, ainsi que la climatisation et l'éclairage).

La consommation moyenne d'énergie définie par cette méthode est appelée « consommation conventionnelle ». Elle représente le niveau de consommation prédit par des modèles de simulation thermique pour répondre à un certain niveau de confort². La consommation conventionnelle peut être très différente de la consommation réelle (ou effective) observée sur les factures énergétiques et peut être à l'origine d'écarts entre

¹ Pour les logements construits avant 1948, l'établissement des étiquettes DPE se base sur la consommation effective obtenue avec les factures énergétiques.

² Sauf pour les DPE de logement datant d'avant 1948.

les économies d'énergie prédites et les économies effectives à la suite des travaux de rénovation, phénomène souvent désigné sous le nom de *performance gap*.

Pour le calcul des coûts d'abattement, il est donc nécessaire de s'approcher le plus possible des consommations réelles en intégrant notamment dans le calcul les différentes sources de ce *performance gap*, comme, par exemple, un taux d'utilisation du système de chauffage.

La consommation donnée par le DPE est exprimée en énergie primaire, c'est-à-dire l'énergie mobilisée à l'entrée dans le système énergétique. L'énergie finale correspond quant à elle à la quantité d'énergie consommée par l'utilisateur final, après transformation par le système énergétique. Pour obtenir une équivalence entre énergie primaire et finale, il est nécessaire d'appliquer un coefficient de conversion. Le gaz, le fioul et le bois étant des énergies primaires, leur coefficient est égal ou proche de 1. En revanche, l'électricité n'est obtenue qu'après un processus de transformation et d'acheminement d'une ressource primaire. Afin de tenir compte de la totalité de l'énergie consommée en amont, un coefficient doit être appliqué à la consommation d'électricité¹. Ce coefficient était de 2,58 et, depuis la réforme, il est désormais établi à 2,3.

La réforme du DPE, prévue dans la loi Elan de 2018, est entrée en vigueur le 1^{er} juillet 2021 et tous les nouveaux DPE doivent être établis selon la nouvelle méthodologie. Néanmoins, à l'heure actuelle, les données disponibles sont encore fondées sur l'ancienne définition.

Pour convertir une quantité d'énergie entrant dans un bâtiment en quantité de gaz à effet de serre, on applique un facteur d'émissions ou contenu carbone². Le contenu carbone d'un vecteur énergétique englobe les émissions émises à deux niveaux : en amont lors de la phase de production et de transport du combustible, et d'autre part lors de la combustion du combustible.

Les valeurs de référence du contenu carbone des vecteurs énergétiques qui servent de base à la réglementation, exprimées en gCO₂/kWh, sont notamment recensées dans la Base Carbone® mise à disposition par l'Ademe³. La méthode de référence de calcul des facteurs d'émissions pour l'électricité est récemment passée d'une approche « saisonnalisée par usage » à une approche « mensualisée par usage ». C'est cette méthode qui a été retenue dans le cadre de la RE2020, qui amène à réviser dans une certaine mesure le contenu carbone de l'électricité pour l'usage du chauffage.

¹ À noter que l'application de ce coefficient a pour conséquence de « pénaliser » les logements chauffés à l'électricité dans l'établissement des étiquettes DPE, dont la consommation est exprimée en énergie primaire. Ce coefficient est revu à la baisse dans la RE2020 à 2,3.

² Voir https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article_jo/JORFARTI000043936500.

³ Voir <https://www.bilans-ges.ademe.fr/fr/accueil/contenu/index/page/presentation/siGras/0>.

Encadré 2 – La réforme du diagnostic de performance énergétique (DPE)

Depuis le 1^{er} juillet 2021 :

- l'établissement des étiquettes intègre, en plus de la composante en termes de consommation d'énergie (exprimée en kWh d'énergie primaire/m²/an), une composante climatique relative aux émissions de gaz à effet de serre (exprimée en kg CO₂eq /m²/an) ;
- la mesure de la consommation d'énergie est basée sur cinq usages et non plus trois : chauffage, eau chaude sanitaire (ECS), électricité spécifique, ainsi que la climatisation et l'éclairage ;
- la durée d'un DPE a été abaissée à dix ans ;
- la méthode de calcul 3CL s'applique désormais à l'ensemble des logements ;
- le DPE devient juridiquement opposable ;
- le DPE intègre des propositions de scénarii de travaux de rénovation, en donnant la facture énergétique théorique atteinte grâce à ces travaux (à partir de janvier 2022) ;
- le coefficient de conversion de l'électricité en énergie primaire passe de 2,58 à 2,3.

Source : <https://www.ecologie.gouv.fr/diagnostic-performance-energetique-dpe>

5.2. Le coût d'opportunité des fonds publics (COFP) dans le cas des rénovations énergétiques

Le coût marginal d'opportunité des fonds publics (COFP) vise à quantifier les distorsions économiques causées par la dépense publique mobilisée pour les investissements publics, elle-même généralement financée par des prélèvements fiscaux¹. Ce prélèvement par l'impôt modifie les prix relatifs et est coûteux du point de vue de l'efficacité socioéconomique. Ainsi, pour chaque euro prélevé par la puissance publique, l'impact potentiellement négatif sur le bien-être socioéconomique qui en découle est de $(1 + \gamma)$, montant qui correspond au COFP. La commission Quinet recommande d'appliquer un COFP de 1,2. Pour le calculer, il faut évaluer la variation des dépenses nettes de l'État, et multiplier ce montant par un coefficient de 20 %.

Des difficultés peuvent toutefois être relevées quant à la prise en compte du COFP dans le coût d'abattement d'une action de décarbonation telle que la rénovation énergétique. En effet, le COFP dépend du niveau de sollicitation des finances publiques, qui dépend lui-même des

¹ Quinet É. (2013), *L'évaluation socioéconomique des investissements publics*, Rapports & Documents, France Stratégie, septembre.

mesures qui seront prises pour déclencher les investissements nécessaires. Ces mesures concernent la fiscalité, les subventions directes, les obligations, les normes... Ces différents leviers d'action publique ont un impact très différent sur les finances publiques. L'évaluation du coût d'abattement se place ici en amont de la décision publique et ne peut donc pas préjuger des mesures qui seront prises. En revanche, il est possible de mesurer l'impact des investissements de rénovation sur les consommations d'énergie et donc sur les niveaux de recette des taxes appliquées à l'énergie (en supposant celles-ci constantes au cours du temps). Le choix a été fait de n'évaluer que le COFP associé à l'impact sur les taxes énergétiques en cohérence avec la méthodologie retenue pour les autres secteurs.

5.3. La question de l'adaptation au changement climatique

Si les opérations de rénovation énergétique répondent au besoin de réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ des bâtiments, elles doivent également répondre aux autres enjeux du changement climatique. L'amélioration du bâti doit répondre à une logique d'adaptation du confort en toute saison (périodes de froid, de forte chaleur ou d'humidité), mais aussi à l'environnement en tenant compte de l'exposition aux risques naturels (par exemple, renforcement des fondations pour cause de retrait-gonflement des argiles¹). L'adaptation du bâti et de la ventilation doit notamment permettre d'anticiper la demande déjà croissante pour les systèmes de climatisation, dont l'utilisation en période de canicule entraîne des pics de consommation d'énergie. La prise en compte de cette dimension dans les coûts d'abattement doit être réalisée à la fois dans le scénario contrefactuel (par exemple, accroissement tendanciel des besoins de climatisation) et dans la nature des actions de rénovation.

¹ 55 % des maisons individuelles sont en zone d'exposition moyenne ou forte. Voir Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durable (2008), *Le retrait-gonflement des argiles. Comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel ?*.



CHAPITRE 3

APPLICATION À LA RÉNOVATION DES LOGEMENTS

Ce chapitre permet une première approche de la distribution des coûts d'abattement de rénovations globales de logements du parc résidentiel français, à partir du modèle Res-IRF¹ du Cired, un modèle technico-économique de simulation de la demande d'énergie pour le chauffage dans le secteur résidentiel français². Ce modèle couple des informations sur la performance énergétique des logements, répartie selon l'ancienne étiquette DPE, et sur les caractéristiques socioéconomiques des ménages. Il permet en cela d'intégrer les effets comportementaux décrits dans les sections précédentes. Giraudet *et al.* (2020)³ et l'[Annexe 4](#) fournissent des descriptions détaillées du modèle.

Les trois premières sous-sections décrivent les actions de rénovation globale considérées, les données utilisées sur le parc de logements et la méthodologie de calcul des coûts d'abattement. Elles précisent aussi les avantages et les limites de cette approche. Les résultats sont ensuite présentés avec une description des courbes de coût marginal d'abattement et une analyse du potentiel d'abattement rentabilisé par la valeur de l'action pour le climat (VAC). Des tests de sensibilité aux paramètres clés accompagnent la présentation des résultats afin de caractériser l'importance des incertitudes, et les chiffrages sont comparés aux résultats disponibles dans la littérature.

¹ Module résidentiel du modèle d'équilibre général IMACLIM-R France, également développé au Cired.

² Le détail de paramétrisation du modèle est disponible [en ligne](#). Le code est également disponible en Open source [ici](#).

³ Giraudet L.-G., Bourgeois C. et Quirion P. (2020), « [Efficacité économique et effets distributifs de long terme des politiques de rénovation énergétique des logements](#) », *Économie & prévision*, n° 217(1), p. 43-63. Voir aussi Giraudet L.-G., Bourgeois C., Quirion P. et Glotin D. (2018), [Évaluation prospective des politiques de réduction de la demande d'énergie pour le chauffage résidentiel](#), rapport pour Ademe, MTES et ATEE, Cired, décembre.

1. Comparaison d'actions types de rénovation

Les coûts d'abattement calculés ici se limitent à des actions de rénovation énergétique de type global permettant d'atteindre l'étiquette DPE A, B ou C.

Ces trois options de rénovation sont alternativement couplées à deux hypothèses contrastées sur le changement ou non de vecteur énergétique :

- soit le saut d'étiquette est réalisé en association avec une électrification du système de chauffage (la nature du système électrique – pompe à chaleur ou convecteur – n'est pas précisée mais implicitement prise en compte dans la performance énergétique¹). Ces scénarios correspondent aux scénarios *A-elec*, *B-elec* et *C-elec* ;
- soit le vecteur énergétique reste inchangé, à l'exclusion du fioul qui est remplacé par le vecteur permettant de minimiser le coût d'abattement hors considération du potentiel d'abattement. Ces scénarios sont nommés A, B et C.

Les rénovations vers A ou B peuvent naturellement être considérées comme performantes au sens où elles aboutissent à des niveaux élevés de performance énergétique. Les rénovations vers C sont de moindre ambition. Elles peuvent toutefois être qualifiées de performantes pour les logements d'étiquette initiale F ou G d'après la loi « climat et résilience ».

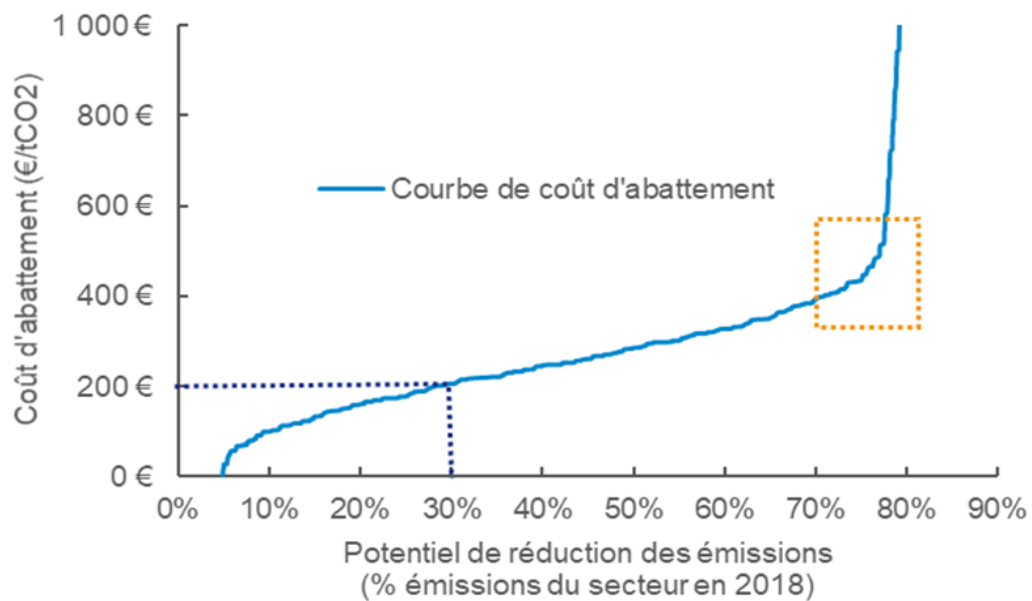
Par simplification, l'analyse se focalise sur une décarbonation du vecteur par électrification du chauffage, mais d'autres vecteurs pourront jouer un rôle important, notamment le bois ou encore les réseaux de chaleur. En outre, des combinaisons de vecteurs énergétiques de chauffage seront probablement nécessaires dans nombre de cas (pompe à chaleur avec poêle à bois par exemple). Des cas types sont réalisés avec un changement de vecteur fossile vers le bois afin d'illustrer les différences de résultats liées au choix du vecteur énergétique final de chauffage. Par ailleurs, le calcul du coût d'abattement associé au raccordement de logements à un réseau de chaleur est illustré dans le chapitre 4 de ce rapport à partir d'un cas d'étude s'appuyant sur des données obtenues sur le projet d'extension du réseau de la métropole de Grenoble.

L'exercice présenté ici consiste à établir les courbes de coût d'abattement marginal de chacune de ces six actions à mesure que celles-ci seraient déployées au sein du parc résidentiel par ordre de mérite décroissant (voir Graphique 6). Chaque type d'action permet des économies d'énergie, une réduction des émissions de CO₂, avec des coûts et des bénéfices privés et sociaux par rapport au contrefactuel. Chaque courbe met en relation, pour l'action considérée, le gisement potentiel des émissions que l'on pourrait abattre en déployant cette action au sein du parc à un instant donné, avec le coût

¹ Les limites de cette modélisation sont abordées plus bas.

d'abattement. Elles sont construites ici selon une approche statique, c'est-à-dire en considérant que le logement est rénové à la date initiale (ici, en 2018) et pour un horizon temporel fixé (ici, trente ans). Le calcul du coût d'abattement est en outre réalisé par rapport à un contrefactuel défini par l'absence de toute action et qui ne suppose pas ici d'amélioration spontanée des performances énergétiques.

Graphique 6 – Exemple de courbe de coût d'abattement marginal



Lecture : pour 200 €/tCO₂, l'action considérée permet d'abattre 29 % des émissions du parc résidentiel français. Le potentiel maximal d'abattement est atteint autour de 80 % des émissions pour un coût d'environ 500 €/tCO₂.

Source : France Stratégie

Pour chaque action, au-delà d'un certain seuil (rectangle pointillé orange sur le Graphique 6), les rendements deviennent fortement décroissants, de telle sorte que réduire légèrement plus les émissions implique de fortement augmenter le coût d'abattement (la courbe devient presque verticale). On considère alors qu'un seuil de potentiel d'abattement maximal est atteint.

Les différentes actions considérées reflètent des représentations simplifiées. L'approche retenue vise à identifier les types de logements sur lesquels il serait pertinent de prioriser les rénovations profondes mais ne permet pas de définir une stratégie globale de rénovation du parc. En particulier, elle ne permet pas de préciser les mix optimaux de rénovations.

La variabilité du coût d'abattement pour une même action tient à l'hétérogénéité des caractéristiques des logements et de leurs occupants. L'analyse distingue quatre sources d'hétérogénéité, dont les distributions sont connues¹ :

- **la performance énergétique** : les logements construits avant 2012 sont segmentés selon l'ancienne étiquette DPE ; après 2012, ils sont également segmentés entre labels BBC et BEPOS ;
- **le vecteur énergétique utilisé pour le chauffage** (électricité, gaz naturel, fioul domestique et bois-énergie) ;
- **la surface**, en fonction du statut d'occupation (propriétaire occupant, bailleur, ou occupant de logement social) et du type de logement (collectif ou individuel) ;
- **le revenu** des occupants.

Les deux premières catégories de caractéristiques sont celles identifiées par les actions de rénovation. Cette segmentation permet de refléter à la fois l'hétérogénéité des caractéristiques des logements et celle des comportements de consommation énergétique des ménages. Elle reste bien entendu incomplète (les caractéristiques architecturales ne sont pas prises en compte, par exemple), mais, malgré sa simplicité, cette segmentation permet de mettre en évidence la variabilité du coût d'une action donnée.

Les coûts d'abattement sont dans un premier temps calculés en « budget carbone », puis sont ajustés à la valeur de l'action pour le climat (VAC) afin d'évaluer la rentabilité des actions dans le temps. Cette comparaison permet de mettre en évidence les actions de rénovation les plus efficaces du point de vue de la collectivité.

Remarque : les simulations réalisées ici l'ont été avant le contexte de la guerre en Ukraine et ne tiennent pas compte de l'évolution du prix des énergies qui s'est ensuivi, ni de l'inflation (qui impacte le revenu des ménages et le prix des travaux). La prise en compte de l'évolution du prix des énergies conduira sans aucun doute à revaloriser significativement la rentabilité des rénovations, mais l'inflation pourrait compenser cet effet si le coût des travaux augmente lui aussi fortement.

¹ Voir [Annexe 4](#) pour plus de détails sur ces quatre dimensions.

2. Deux ensembles de données pour décrire le parc de logements

Deux sources de données distinctes mises à disposition par le Service de la donnée et des études statistiques (SDES) du ministère de la Transition écologique sont mobilisées :

- Les **données de l'enquête Phébus**¹ réalisée courant 2013² (François, 2014³) sont produites à partir d'un échantillonnage stratifié d'environ 2 000 ménages ayant participé à l'enquête qui ont systématiquement bénéficié d'un DPE réalisé selon une même méthode (méthode 3CL). Ces données font état d'un nombre de passoires énergétiques élevé : 31 % des résidences principales en France métropolitaine, ce qui équivaldrait à 8,5 millions de logements F et G en 2012. Ces données ont l'avantage d'être représentatives et fondées sur des diagnostics énergétiques rigoureux, systématiquement réalisés selon la méthode 3CL. Elles portent cependant sur un échantillon restreint, et datent désormais de plusieurs années au cours desquelles de nombreux travaux de rénovation de constructions neuves ont pu être réalisés. Une « projection » des données de cette base a été effectuée pour construire une image probable du parc actuel.
- Les **données du SDES** sur la répartition du parc de logements par classe énergétique en 2018⁴ sont produites à partir d'une base de plus de 500 000 DPE collectés par l'Ademe. Elles font état d'un nombre de passoires énergétiques nettement plus faible que dans la base Phébus, en estimant à 4,8 millions les logements F et G. Cette base de données, plus récente, porte sur un nombre nettement plus important de logements. Dans la mesure où les DPE sont essentiellement produits lors des achats (y compris de logements neufs) et des mises en location, la collecte des données ne permet pas de garantir la représentativité de la distribution des caractéristiques des logements. Ce biais est corrigé par le SDES à partir d'une modélisation mobilisant les données du répertoire Fidéli (Fichiers démographiques sur les logements et les individus)⁵, géré par l'Insee. De plus, les diagnostics sont établis selon une méthode différente pour les logements construits avant (sur la base des factures énergétiques) et après 1948 (méthode 3CL). Les estimations du SDES sont alors établies autour d'un « calcul composite » intégrant la

¹ Enquête *Performance de l'habitat, équipements, besoins et usages de l'énergie*.

² Voir <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/enquete-performance-de-lhabitat-equipements-besoins-et-usages-de-lenergie-phebus>

³ François D. (2014), « Le parc des logements en France métropolitaine, en 2012 : plus de la moitié des résidences principales ont une étiquette énergie D ou E », *Chiffres & statistiques*, n° 534, juillet.

⁴ Merly-Alpa T., Riedinger N. et Baudry M. (2020), *Le parc de logements par classe de consommation énergétique au 1^{er} juillet 2018*, Document de travail, n° 49, Observatoire national de la rénovation énergétique, septembre.

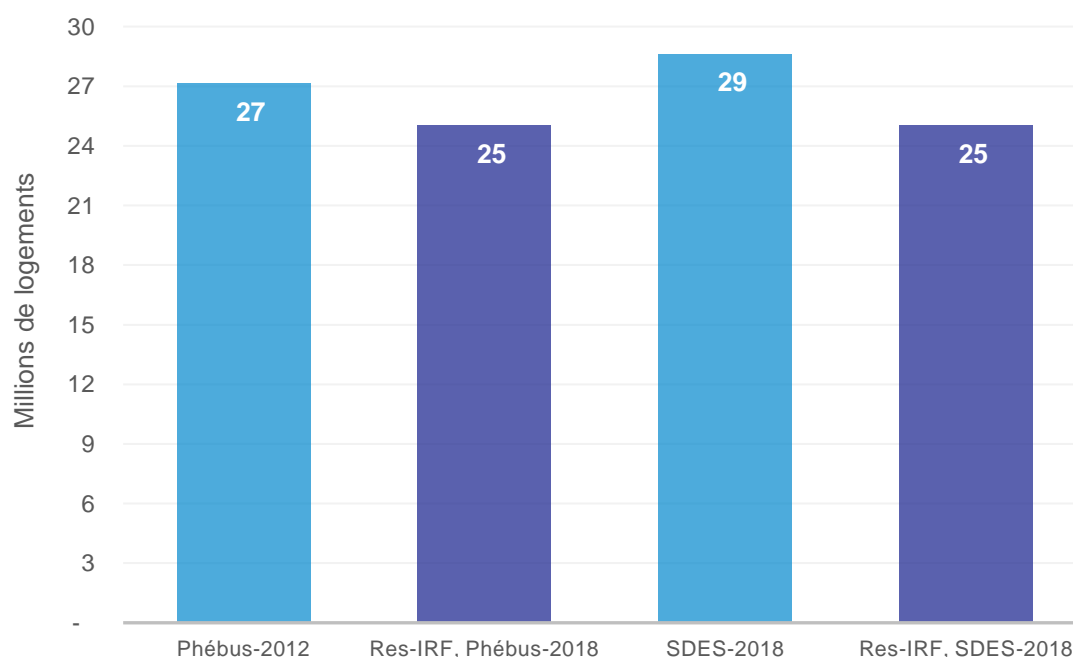
⁵ Données rassemblant des informations fiscales issues de différentes taxes (taxe d'habitation, taxe foncière, impôt sur le revenu).

base de l'Ademe extrapolée pour les logements ultérieurs à 1948 et la mobilisation du modèle Enerter d'Énergies Demain pour les logements construits avant 1948.

Compte tenu des spécificités de chaque source de données, l'analyse a été réalisée à la fois sur les données Phébus, extrapolées à l'état du parc en 2018 (Giraudet *et al.*, 2018), et sur les données du SDES pour 2018. La différence entre les deux définit le champ d'incertitude relatif à la structure du parc.

La segmentation des logements décrite ci-dessus ne permet pas de représenter l'intégralité des logements du parc résidentiel, notamment ceux dont la source principale d'énergie de chauffage est autre que l'une des quatre retenues. Le nombre de logements ainsi exclus de l'analyse varie en fonction de l'image du parc utilisée : il y a plus de logements exploitables dans la base SDES-2018 (près de 27 millions) que dans la base Phébus extrapolée à 2018 (environ 25,5 millions) (Graphique 7).

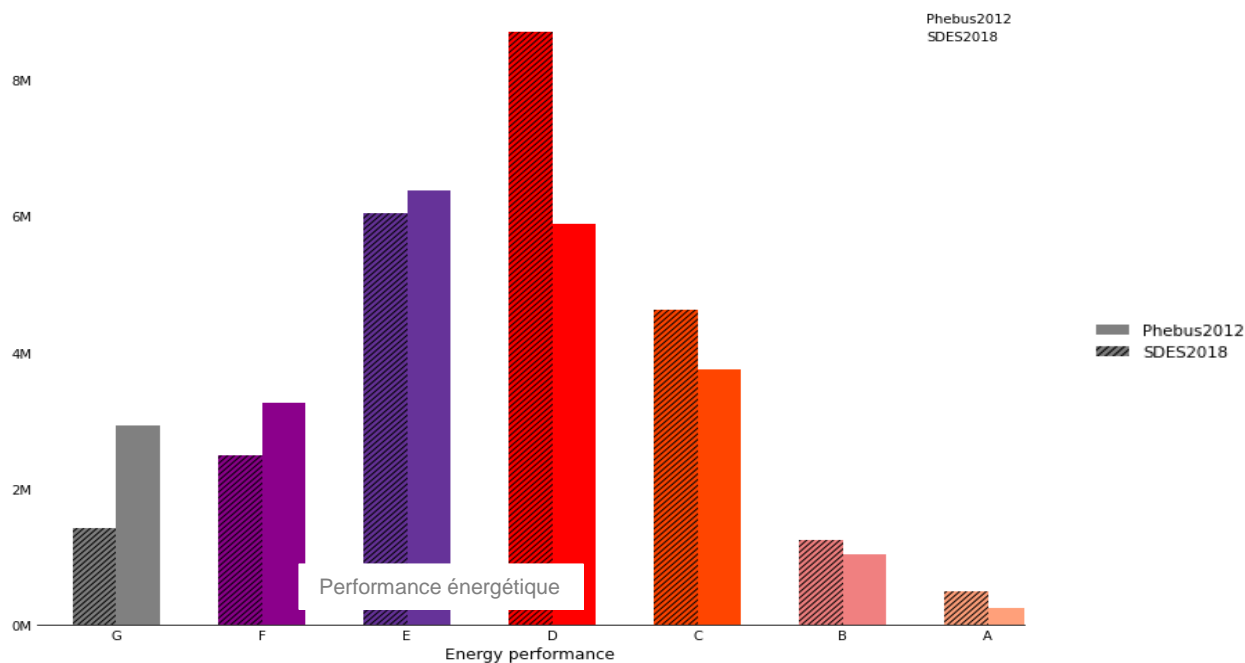
Graphique 7 – Données exploitables de la base SDES et de la base Phébus ajustée



Source : d'après le Cired

Les deux images du parc varient également en termes de performance énergétique. D'après le Graphique 8 (page suivante), comparant les distributions de logements selon la performance énergétique (étiquette DPE), il y a moins de passoires énergétiques dans l'image SDES-2018 que dans l'image Phébus projetée en 2018.

Graphique 8 – Distribution des logements par étiquette selon Phébus et SDES-2018 exploités dans Res-IRF



Source : Cired

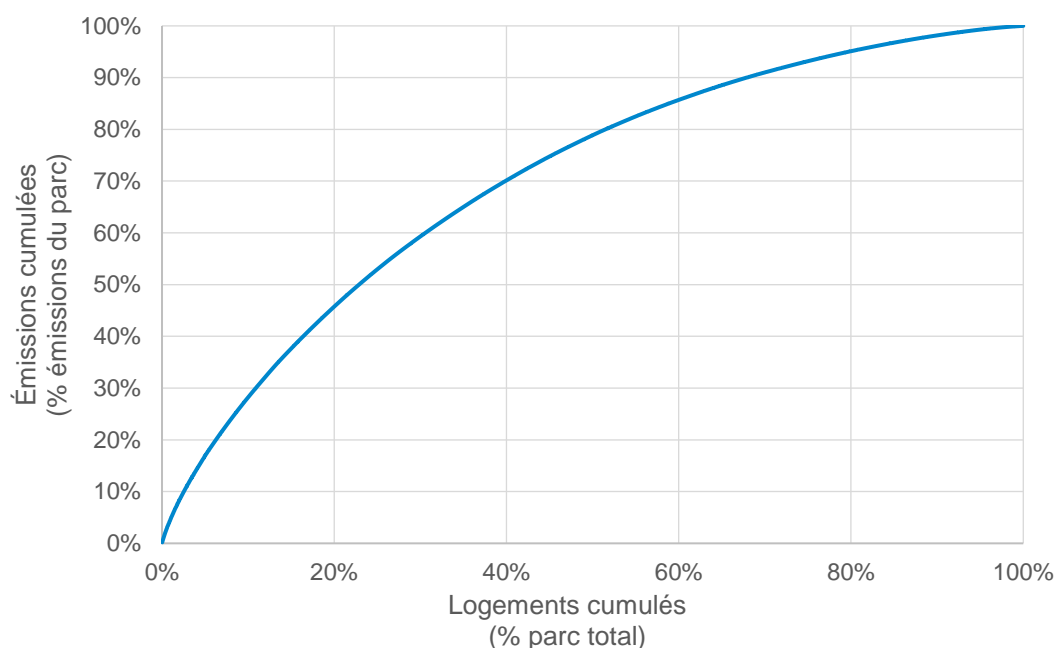
L'extrapolation des données Phébus en 2018 conduit le modèle à estimer que 1,2 million de passoires thermiques ont pu être rénovées entre 2012 et 2018, portant le nombre de passoires à 7,3 millions en 2018. Cet ordre de grandeur est comparable aux 6,7 millions de passoires thermiques estimées en 2018 par le collectif Rénovons (2020¹), mais supérieur aux 4,8 millions évaluées par le SDES. Cet écart suggère que le décalage temporel de 2012 à 2018 ne peut expliquer à lui seul la différence entre les effectifs recensés dans Phébus et par le SDES. L'écart résiduel est plus probablement lié aux différences d'approche de l'échantillonnage et d'exécution du DPE entre les deux sources de données².

Concernant les émissions de GES au sein du parc résidentiel, elles sont relativement concentrées (voir Graphique 9). En tenant compte des comportements des ménages dans les simulations de consommation de chauffage, les 25 % des logements les plus émetteurs représenteraient plus de la moitié des émissions du parc résidentiel ; 20 % seulement de ces logements seraient des logements d'étiquette énergétique F et G et plus des trois quarts seraient des logements d'étiquettes D et E.

¹ Rénovons (2020), *Coûts et bénéfices d'un plan de rénovation des passoires énergétiques en 10 ans*, Scénario Rénovons 2020.

² Merly-Alpa T., Riedinger N. et Baudry M. (2020), *Le parc de logements...*, op. cit.

Graphique 9 – Part des émissions cumulées par quantile de logements classés des plus émetteurs au moins émetteurs de GES (2018)



Lecture : les 10 % de logements les plus émetteurs en 2018 sont responsables de près de 30 % des émissions ; les 25 % de logements les plus émetteurs représentent plus de 50 % des émissions et la moitié des logements sont responsables d'environ 80 % des émissions du parc résidentiel.

Source : modèle Res-IRF à partir des données SDES 2018

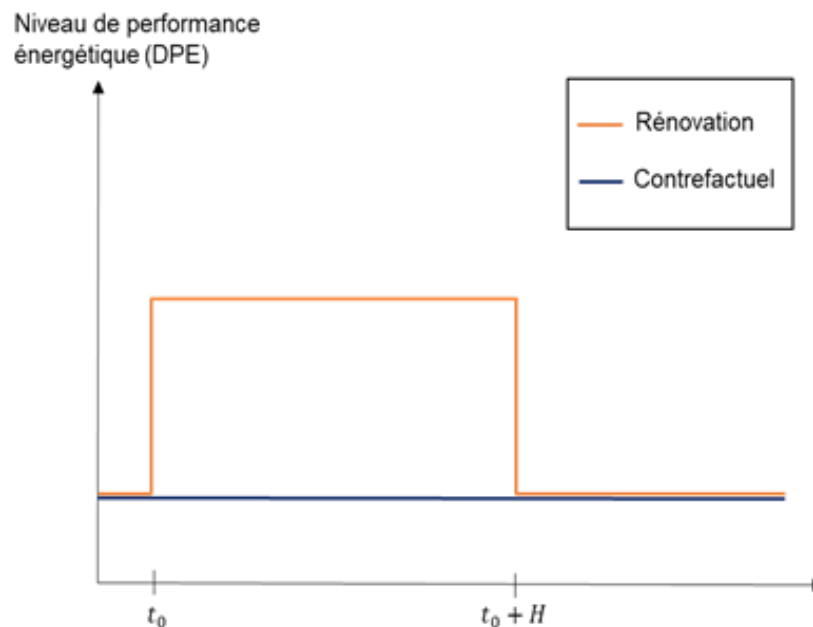
3. Hypothèses et méthodologie de construction des courbes de coût d'abattement

Cette section présente les principales hypothèses structurantes sur lesquelles s'appuie le calcul des coûts d'abattement. Des détails complémentaires sont fournis en [Annexe 4](#).

3.1. Durée des bénéfices de la rénovation

Chaque action permet au logement d'atteindre un niveau supérieur de performance énergétique, qu'il est supposé maintenir trente ans avant de revenir à son niveau initial, en supposant qu'il n'y a pas de baisse progressive de l'efficacité de la rénovation. Cet horizon, qui correspond à la durée des bénéfices de la rénovation, est soumis à une analyse de sensibilité (voir Graphique 10).

Graphique 10 – Maintien des bénéfices de la rénovation dans le temps



Source : Cired

3.2. Facteurs d'émissions et décarbonation du vecteur énergétique

Le calcul des émissions évitées par les actions de rénovation tient compte de la décarbonation progressive du vecteur électrique. Celle-ci s'opère en supposant un contenu carbone de l'électricité pour le chauffage constant jusqu'à 2030, puis décroissant linéairement jusqu'à la neutralité en 2050¹. La décarbonation concomitante du secteur de production d'électricité est supposée réduire ce contenu au fil des ans ; en réalité, cette décroissance sera probablement non linéaire. En outre, la capacité du secteur électrique à faire décroître ses émissions dépendra de la demande qui lui sera adressée et donc en partie des actions menées dans la rénovation énergétique des bâtiments. Cet effet d'interdépendance n'est pas pris en compte ici.

Le contenu carbone de l'électricité pour l'usage chauffage retenu correspond à la valeur définie dans le cadre de la RT2012 à 147 gCO₂/kWh. Celle-ci a récemment été révisée dans la RE2020 à 79 gCO₂/kWh² mais reste sujette à discussion, notamment parce qu'elle prend

¹ Les contenus en cycle de vie n'étant *a priori* pas complètement nuls en 2050, il s'agit là d'une approximation de premier ordre.

² Cette révision fait suite à un changement de méthode de calcul des contenus carbone pour la réalisation de bilans d'émissions de GES dans la Base Carbone® de l'Ademe. La méthode « saisonnalisée par usage » a été remplacée par une méthode moyenne « mensualisée par usage ». C'est l'application de cette dernière méthode qui aboutit à la valeur de 79 gCO₂/kWh.

moins bien en compte le fait que les pointes électriques sont causées par le chauffage électrique. L'Ademe préconise de considérer cette valeur comme une valeur minimale pour les années à venir¹. Face à cette incertitude, l'ancienne valeur est retenue de manière conservatrice, mais la sensibilité des résultats au changement de valeur et à l'évolution du contenu carbone des vecteurs énergétiques est présentée dans le rapport.

En parallèle, il est fait l'hypothèse que la décarbonation des vecteurs énergétiques est limitée au vecteur électrique. La production de gaz décarboné (biogaz) pourra être amenée à se développer comme le prévoit la SNBC 2, mais avec un potentiel limité, et la part du gaz dans les moyens de chauffage est amenée à diminuer fortement d'ici 2050². Ainsi, on suppose que le contenu carbone du gaz pour le chauffage est maintenu constant (à 227 gCO₂/kWh) au même titre que le fioul (à 325 gCO₂/kWh) sur toute la période considérée. Le déploiement du biogaz est considéré à travers une hypothèse alternative de décarbonation progressive des deux vecteurs, gaz et électricité, entre 2030 et 2050. Les coûts d'abattement évalués sous cette hypothèse sont valables à l'échelle micro, mais l'évaluation à l'échelle macro doit tenir compte d'un potentiel réaliste de déploiement du biogaz.

3.3. Le coût des actions sur l'enveloppe et le système énergétique

Le calcul des coûts d'abattement repose principalement sur le coût d'investissement dans la rénovation. Ces coûts se définissent comme les coûts de transition entre un état initial avant travaux et un état final après travaux.

Ces coûts de transition distinguent deux dimensions de la transition énergétique d'un logement :

- **l'amélioration de la performance de l'enveloppe et du système énergétique** : le modèle Res-IRF retient une matrice triangulaire de coût unitaire de passage d'une étiquette DPE à une autre, en euros par mètre carré (voir Tableau 4). Cette matrice constitue une représentation abstraite de combinaisons d'actions concrètes sur l'enveloppe et le système de chauffage qui aboutissent à des sauts d'étiquettes³. À noter que le coût d'un saut d'étiquette réalisé en une seule fois est inférieur au coût d'un saut réalisé en plusieurs fois. Cela traduit la prise en compte du surcoût de la rénovation par étapes dans le modèle ;

¹ Ademe (2020), *Positionnement de l'Ademe sur le calcul du contenu CO₂ de l'électricité dans le cas du chauffage électrique*.

² Le scénario AMS de la SNBC 2 prévoit que la consommation de gaz pour le secteur résidentiel passe d'environ 150 TWh aujourd'hui à moins de 50 TWh en 2050.

³ « Elle est construite à partir d'observations parcellaires, complétées par des données interpolées à partir des règles économiques standards de rendements décroissants [...] et d'économies d'échelle » (Giraudet *et al.* (2020), « *Efficacité économique et effets distributifs...* », *op. cit.*).

- **le changement de vecteur énergétique** : le modèle s’appuie sur une matrice de passage d’un vecteur à un autre, indépendamment de la performance du système énergétique (voir Tableau 5).

**Tableau 4 – Matrice de coût unitaire de transition sur la performance énergétique
(en €/m² TTC, hors subventions, et après TVA à 5,5 %)**

		Étiquette énergie après rénovation					
		F	E	D	C	B	A
Étiquette énergie avant rénovation	G	76	136	201	271	351	442
	F		63	130	204	287	382
	E			70	146	232	331
	D				79	169	271
	C					93	199
	B						110

Note : pondérer ces coûts par la part de marché de chaque transition d’étiquette (données dans Giraudet *et al.* (2018), *Évaluation prospective des politiques de réduction de la demande d’énergie...*, *op. cit.*, paramétrées à partir de données du Plan urbanisme construction architecture - Puca) permet d’estimer un coût moyen de rénovation de 112 €/m². Un coût moyen de 83 €/MWh cumac est également estimé en rapportant ces valeurs aux économies d’énergie cumulées réalisées. D’après les auteurs, ces ordres de grandeur sont cohérents avec les résultats de l’enquête Open (Observatoire permanent de l’amélioration énergétique) en 2015¹ et de la DG Trésor².

Lecture : une rénovation énergétique d’un logement G permettant de le faire passer au niveau C coûte 271 €/ m².

Source : Giraudet *et al.* (2020), « *Efficacité économique et effets distributifs...* », *op. cit.*, Cired, modèle Res-IRF

Ces coûts étant établis sur le dire d’experts, leur validité empirique reste limitée³. La collecte et la mise à disposition de données permettant d’estimer ces paramètres avec une meilleure prise en compte des changements de vecteurs énergétiques – en distinguant notamment les pompes à chaleur dans les systèmes électriques – permettraient d’améliorer significativement le paramétrage de cette modélisation.

¹ Ademe (2015), *Observatoire permanent de l’amélioration énergétique du logement*.

² DG Trésor (2017), *Barrières à l’investissement dans l’efficacité énergétique : quels outils pour quelles économies ?*, Document de travail de la DG Trésor n° 2017/02, mars, Tableau 1.

³ Les coûts intangibles permettant de caler le modèle de sorte à ce qu’il puisse répliquer les comportements d’investissement des agents doivent capter en partie une sous-estimation probable des montants.

**Tableau 5 – Matrice de coût unitaire de changement de vecteur énergétique
(en €/m², hors subventions, et après TVA à 5,5 %)**

		Vecteur énergétique après rénovation			
		Électricité	Gaz naturel	Fioul domestique	Bois
Vecteur énergétique avant rénovation	Électricité	0	70	100	120
	Gaz naturel	55	0	80	100
	Fioul domestique	55	50	0	100
	Bois	55	50	80	0

Lecture : le passage d'un chauffage au fioul domestique à un système électrique coûte 55 €/m².

Source : Giraudet et al. (2020), « *Efficacité économique et effets distributifs...* », op. cit., Cired, modèle Res-IRF

3.4. La consommation d'énergie

Le coût d'abattement est fondé sur une estimation de la consommation réelle d'énergie du logement avant et après rénovation (voir Section 5), déterminée selon les caractéristiques du logement et de son occupant. Elle se base en premier lieu sur la consommation conventionnelle moyenne de l'étiquette DPE du logement. Ces calculs ne traitant que de la partie chauffage, des coefficients correctifs, issus des données Phébus 2012 ajustées en 2018, sont appliqués dans Res-IRF pour définir la consommation conventionnelle dédiée au chauffage.

La consommation d'énergie réelle est ensuite calculée en appliquant un coefficient d'intensité d'utilisation des infrastructures de chauffage par les occupants (ratio entre consommation réelle et conventionnelle). Celui-ci évolue sous l'influence de la part budgétaire allouée aux dépenses de chauffage, qui dépend du prix de l'énergie, du revenu du ménage occupant, de la consommation conventionnelle et de la surface. Parmi les causes du *performance gap*, seul l'effet rebond direct est intégré, via une augmentation de l'intensité d'utilisation de chauffage après amélioration de l'efficacité énergétique. Les effets liés à d'éventuels problèmes de qualité sont intégrés sous forme de variantes décrites plus bas. Ce processus traduit les élasticités prix et revenu de la demande d'énergie (Aydin *et al.*, 2017¹).

Les hypothèses de prix hors taxes des énergies retenues pour le calcul de la facture énergétique dédiée au chauffage, payée par les ménages en 2018, sont les suivantes : 12 centimes d'euros par kWh pour l'électricité et un peu plus de 6 centimes d'euros par kWh

¹ Aydin E., Kok N. et Brounen D. (2017), « [Energy efficiency and household behavior: The rebound effect in the residential sector](#) », *The RAND Journal of Economics*, 48(3), p. 749-782.

pour le gaz naturel et le fioul. En scénario central, ces prix sont supposés évoluer à un taux annuel de 1,10 % pour l'électricité, de 1,42 % pour le prix du gaz naturel et de 2,2 % pour le fioul. Compte tenu de la forte incertitude sur l'évolution de ces prix, des tests de sensibilité des résultats à une variation de ces hypothèses ont été réalisés (voir [Annexe 5](#)).

4. Les courbes de coûts marginaux d'abattement pour le parc résidentiel

Cette section présente les principaux résultats pour les six actions de rénovation globale considérées, en se concentrant sur les hypothèses centrales (optimistes). Les courbes de coûts marginaux d'abattement sont construites dans une approche statique, c'est-à-dire en faisant l'hypothèse que toutes les rénovations sont effectuées à la date initiale (soit 2018). La sensibilité de ces résultats aux hypothèses et l'ampleur des incertitudes seront abordées dans la section suivante.

4.1. Coûts d'abattement de la rénovation énergétique des logements

Pour chacune des six actions types (rénovation vers A, B, C, avec électrification ou sans changement de vecteur, excepté le fioul), le potentiel d'abattement atteint un seuil au-delà duquel les coûts associés s'accroissent très rapidement (voir Graphique 11). Les ordres de grandeur des coûts d'abattement pour différents potentiels atteints sont indiqués dans le Tableau 6 ci-dessous. Les seuils et les montants sont définis sur la base de ces courbes et restent indicatifs.

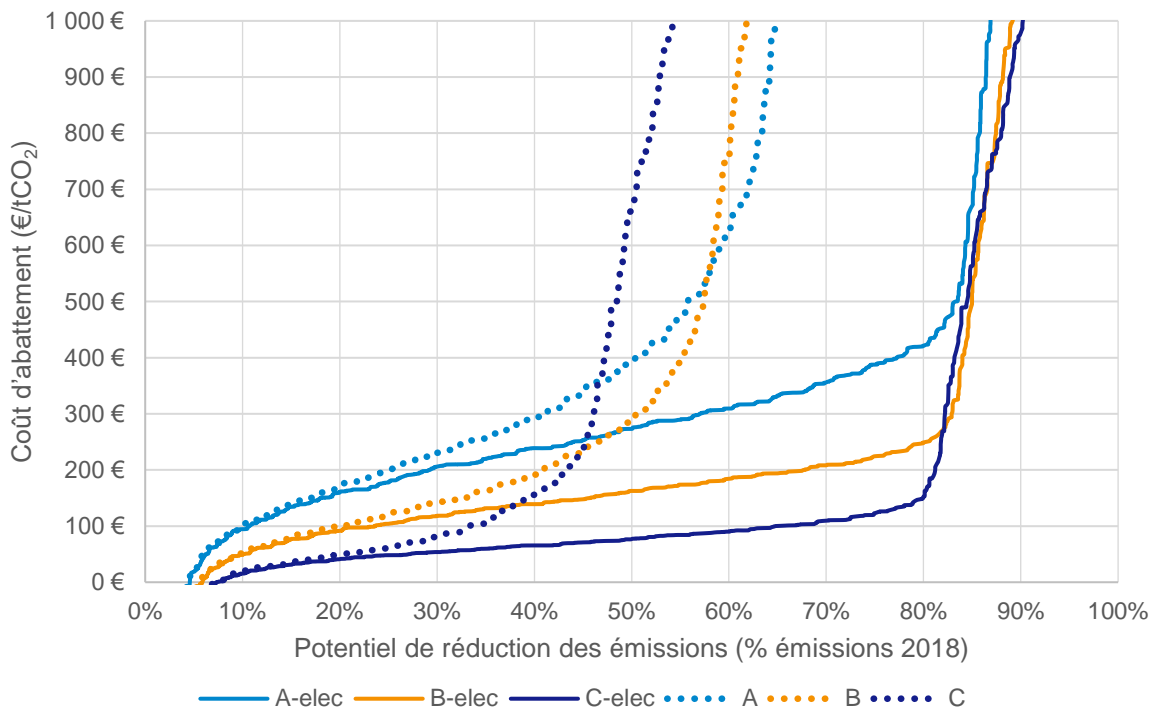
Tableau 6 – Coût d'abattement social en bilan carbone de la rénovation des logements vers A, B ou C, avec électrification du vecteur ou optimisation hors fioul, pour lequel le potentiel d'abattement est maximal

Potentiel (part des émissions 2018)	Coût d'abattement (€/tCO ₂)					
	A-elec	B-elec	C-elec	A	B	C
1/3	210	125	60	250	150	90
1/2	270	160	75	400	290	640
2/3	330	200	100	1 200	1 400	-
3/4	390	220	120	3 000	-	-

Note : les émissions de référence sont fondées sur 2018 (48 MtCO₂). Les zones grisées sont liées à l'absence de données (lorsque les coûts d'abattement deviennent prohibitifs pour les potentiels affichés).

Source : modèle Res-IRF, Cired

Graphique 11 – Comparaison des coûts d'abattement selon l'étiquette et le choix de vecteur énergétique post-rénovation



Note : chaque courbe de coût d'abattement est associée à un type d'action de rénovation :

- courbes en pointillé : rénovation vers l'étiquette DPE A, B ou C sans changement de vecteur énergétique, à l'exception des logements chauffés au fioul ;
- courbes en trait plein (*A-elec*, *B-elec* et *C-elec*) : rénovation vers l'étiquette DPE A, B ou C avec électrification systématique du vecteur énergétique.

Lecture : pour 200 €/tCO₂, rénover vers A en électrifiant le vecteur (courbe bleu clair en trait plein – *A-elec*) permet d'abattre 30 % des émissions du parc résidentiel français de 2018.

Source : modèle Res-IRF, Cired

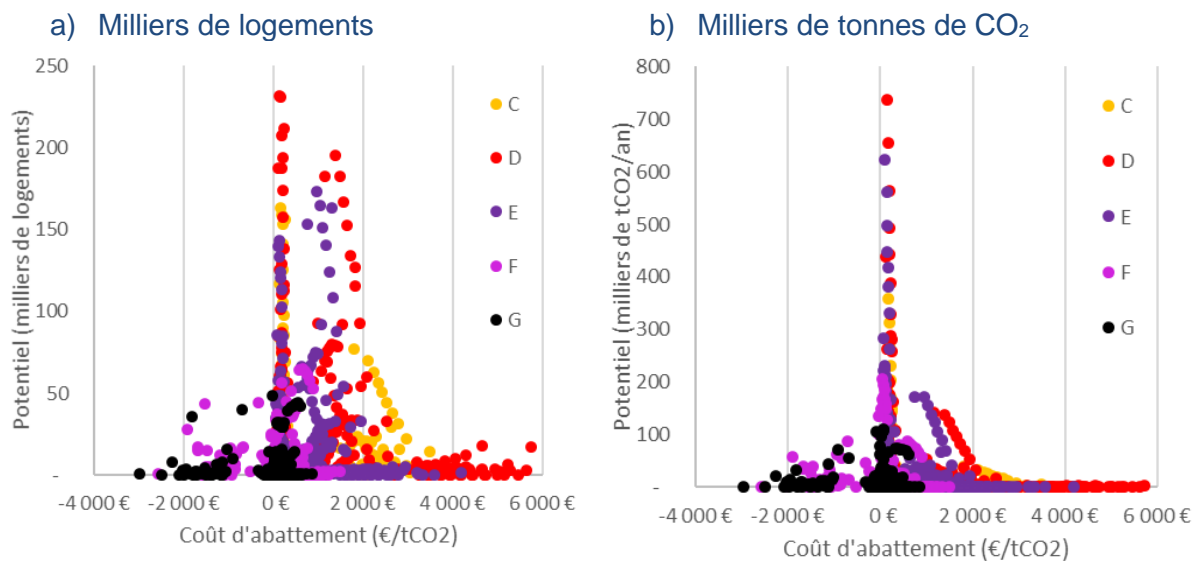
Des coûts d'abattement caractérisés par une forte hétérogénéité, selon plusieurs dimensions

La prise en compte dans le modèle de seulement quelques dimensions de différenciation des logements (étiquettes DPE initiale et finale, vecteur énergétique initial, statut d'occupation et revenu des occupants) suffit à engendrer une palette de coûts d'abattement extrêmement large.

À titre d'illustration, la distribution des coûts d'abattement des actions *B-elec* selon leur performance énergétique (étiquette DPE) avant rénovation, représentée dans le Graphique 12, témoigne de cette grande dispersion, y compris pour des logements appartenant à la même classe DPE.

On observe une relation inverse entre performance initiale du logement et rentabilité spontanée de l'action : plus le logement est performant au départ (étiquettes B, C, D), plus les coûts d'abattement sont élevés en moyenne (plus de logements B et C que de logements E, F ou G sont situés à droite du spectre). Néanmoins, la variabilité des caractéristiques des logements amène à observer des situations où la rénovation de certains logements F pourrait s'avérer moins rentable que certains logements C.

Graphique 12 – Coût d'abattement selon le DPE initial de l'action B-elec, en fonction du potentiel d'abattement sur le parc résidentiel



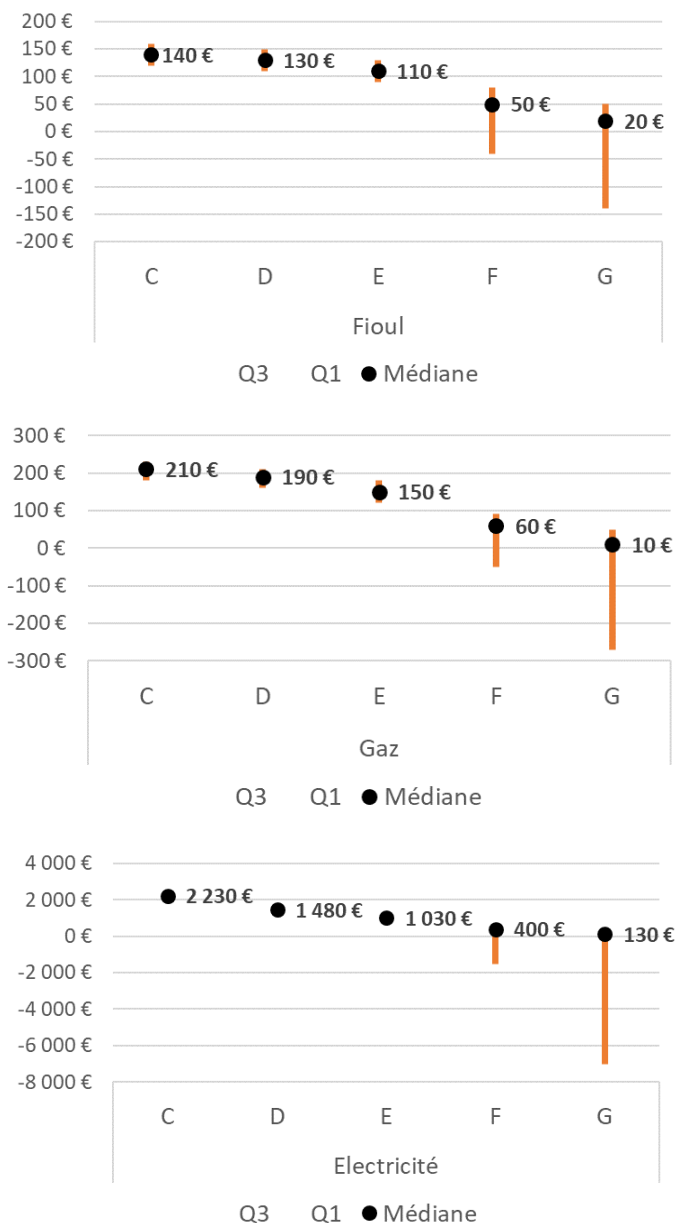
Note : les valeurs sont tronquées à -4 000 € et +6 000 €.

Lecture : chaque point correspond à un type de logement dont la rénovation s'opère à un certain coût d'abattement. La couleur détermine l'étiquette avant rénovation. Sur le Graphique 12a, chaque point décrit le coût d'abattement (en abscisse) permettant de rénover un nombre de logements correspondant (en ordonnée) au sein du parc. Le Graphique 12b donne le coût d'abattement (en abscisse) permettant d'abattre une certaine quantité de CO₂ (en ordonnée) émise par le parc.

Source : modèle Res-IRF, Cired

Le Graphique 13, qui représente la distribution des coûts d'abattement par quartile au sein de chaque étiquette et chaque vecteur, illustre cette hétérogénéité d'une autre façon. Il montre que les coûts ont tendance à décroître et à se concentrer de moins en moins autour de la médiane dans le cas des logements les plus énergivores. Il montre également que les coûts d'abattement des logements chauffés à l'électricité sont nettement plus élevés que ceux des logements chauffés au fioul ou au gaz – le vecteur électrique est largement moins carboné et continue de se décarboner, alors que le gaz, dans cette modélisation, ne se décarbonne pas.

Graphique 13 – Coûts d'abattement d'une rénovation vers B avec électrification du système de chauffage selon le vecteur de chauffage et l'étiquette DPE initiaux du logement (méthode budget carbone, en €/tCO₂)



- Coût d'abattement médian de la rénovation pour les logements de la catégorie

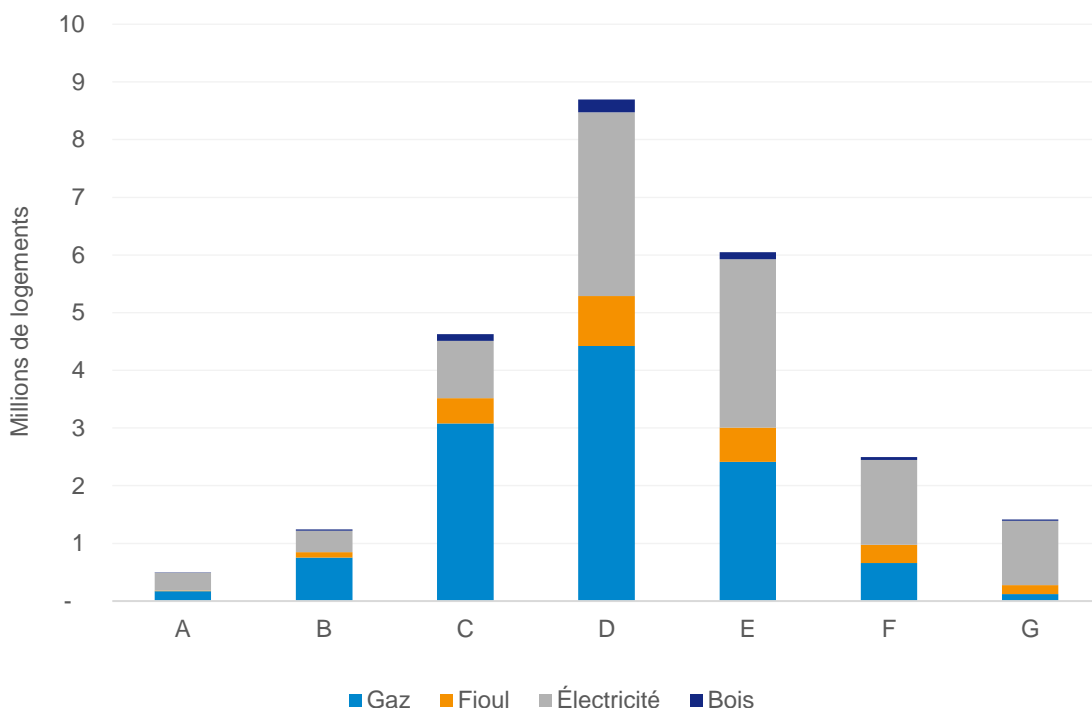
Écart entre le premier et le troisième quartile de coûts d'abattement de la rénovation au sein de la catégorie

Lecture : sous les hypothèses retenues, le coût d'abattement médian d'une rénovation consistant à amener le logement vers une étiquette énergétique B et à électrifier son système de chauffage est de 50 €/tCO₂ pour un logement initialement chauffé au fioul et affichant une étiquette F. Au sein de cette catégorie de logement, 25 % des logements afficheraient un coût d'abattement inférieur à -40 €/tCO₂ et 25 % un coût supérieur à 80 €/tCO₂. Les coûts d'abattement médians d'une rénovation vers B avec électrification iraient de 20 €/tCO₂ à 140 €/tCO₂ selon l'étiquette énergétique de départ pour les logements chauffés au fioul, de 10 €/tCO₂ à 210 €/tCO₂ pour les logements initialement chauffés au gaz et de 130 €/tCO₂ à 2 230 €/tCO₂ pour les logements initialement chauffés à l'électricité.

Source : France Stratégie, d'après Res-IRF, Cired

Remarque : les logements de classe D et E ont au total des coûts médians plus élevés que les logements de classe C du fait de la plus grande proportion de logements chauffés à l'électricité, dont le coût d'abattement est en moyenne plus élevé que celui des autres vecteurs (Graphique 14). Pour un logement de classe D chauffé à l'électricité, le coût moyen est de 1 500 €/tCO₂ (avec des coûts compris entre 1 000 € et 2 600 €/tCO₂).

Graphique 14 – Distribution des logements selon l'étiquette énergétique et le vecteur énergétique principal de chauffage

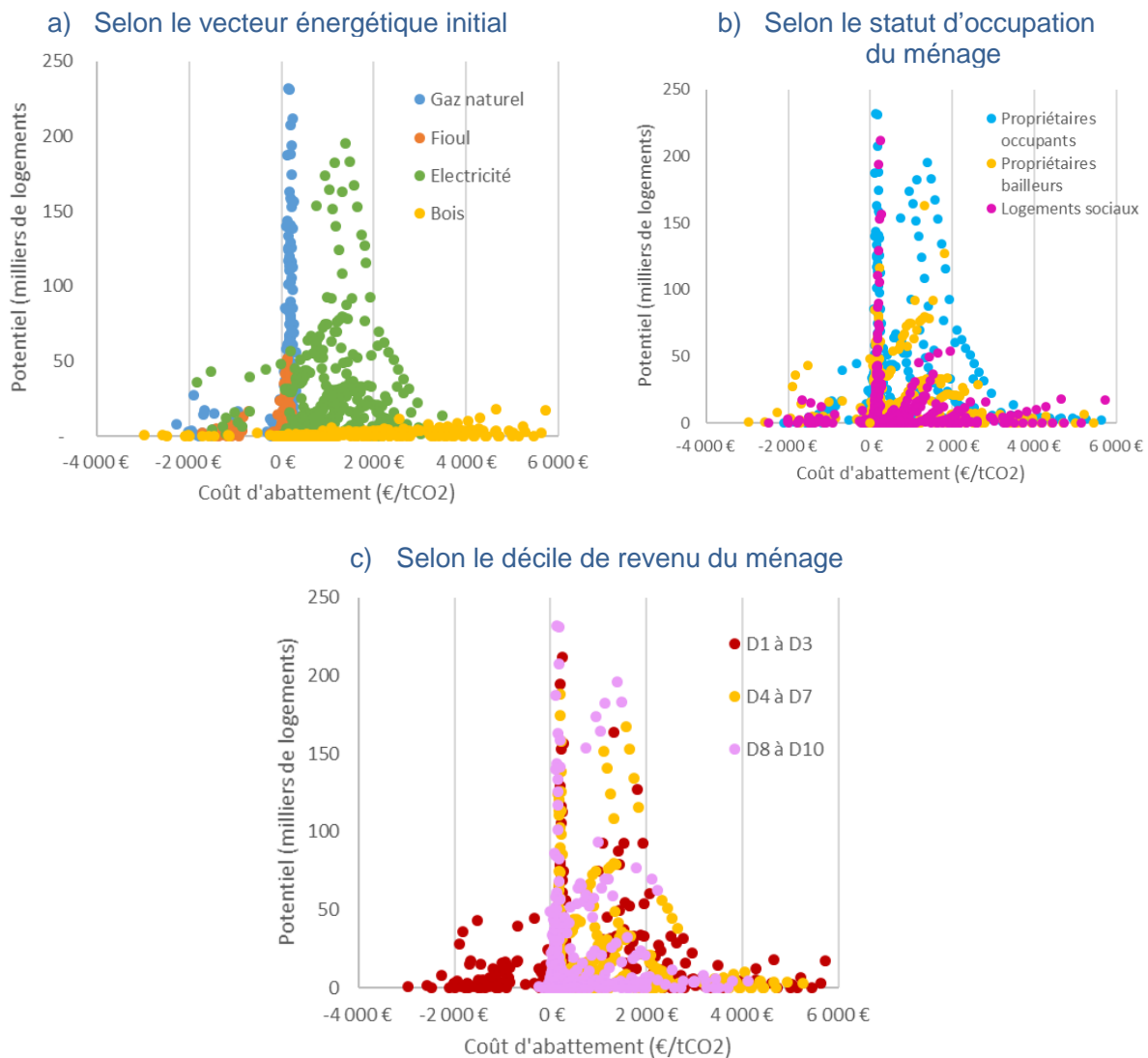


Lecture : les logements chauffés à l'électricité représentent 37 % des logements étiquetés D et près de la moitié des logements de classe DPE E, contre seulement 21 % des logements de classe DPE C.

Source : Cired à partir de données SDES

Ces hétérogénéités se retrouvent lorsque l'on considère d'autres critères que la performance énergétique (voir Graphiques 15a, b et c). D'après ces critères, la priorité d'action combinant rénovation BBC et décarbonation du vecteur via des électrifications performantes (pompes à chaleur) devrait se porter sur les logements occupés par des ménages en situation de précarité énergétique, dont beaucoup sont déjà sur un vecteur électrique mais sur des systèmes peu performants (coûts d'abattement négatifs du fait des cobénéfices de santé), ainsi que sur les passoires énergétiques chauffées au fioul et au gaz, dont les coûts d'abattement moyens pondérés sont respectivement estimés à -150 €/tCO₂ et -270 €/tCO₂.

Graphique 15 – Coût d'abattement de l'action B-elec en fonction du potentiel d'abattement sur le parc résidentiel (en milliers de logements)



Note : les valeurs sont tronquées à -4 000 € et +6 000 €.

Source : modèle Res-IRF, Cired

Comparaison des coûts d'abattement des différentes options de rénovation

Sous les hypothèses centrales retenues, trois quarts des émissions liées au chauffage des logements pourraient aujourd'hui être évitées par des rénovations vers A avec électrification à un coût maximal de l'ordre de 390 €/tCO₂ (voir Graphique 11 et Tableau 6 *supra*). En revanche, abattre des émissions au-delà de ce potentiel conduirait à des coûts d'abattement largement plus élevés. Les logements responsables des émissions résiduelles sont les plus performants aujourd'hui et leur rénovation impliquerait de mobiliser des investissements importants pour des réductions d'émissions modérées

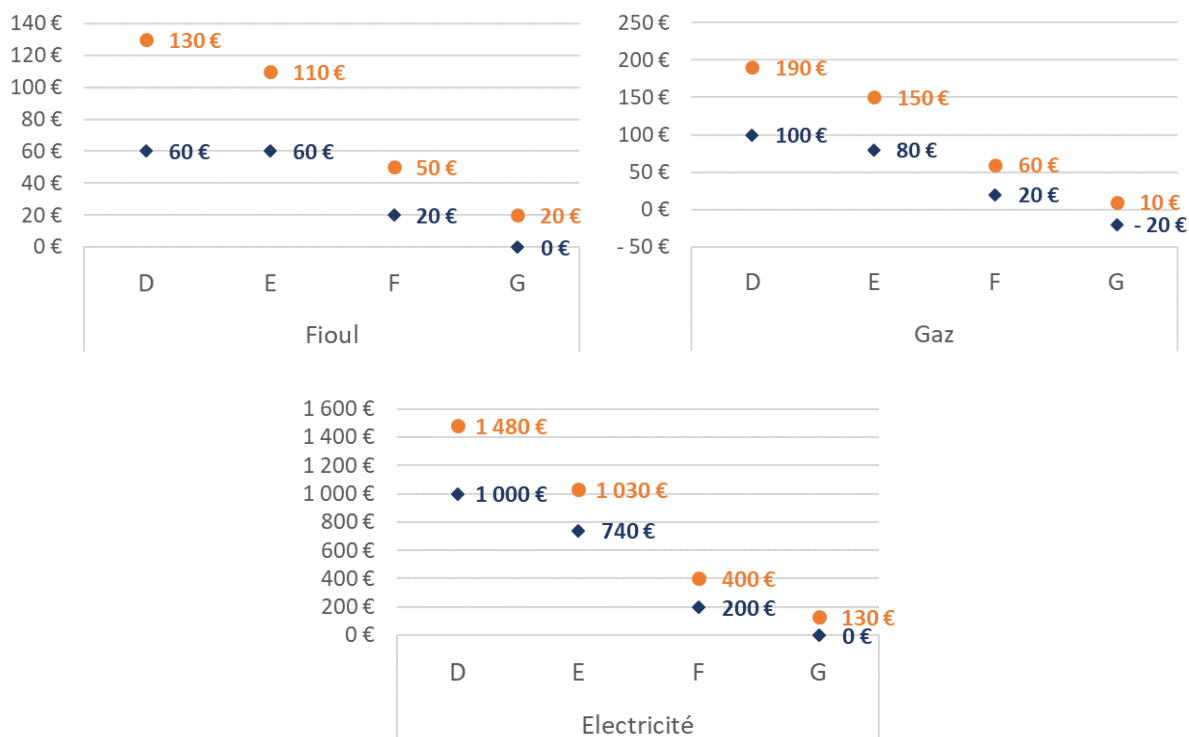
(logements déjà électrifiés avec des étiquettes performantes, notamment). Ces émissions évitées, au dénominateur du coût d'abattement, tendent vers zéro et les coûts par unité croissent très vite. La faiblesse apparente du potentiel d'abattement pour des rénovations vers A avec électrification des logements, malgré la décarbonation du vecteur, tient au fait que l'on comptabilise ici toutes les émissions sur la durée de vie de la rénovation (trente ans). À terme (en 2050), les émissions indirectes liées à la consommation d'électricité sont considérées comme nulles, mais celles-ci restent significatives sur les trente prochaines années.

Rénover sans contrainte de décarbonation sur le vecteur ne permettrait pas de réduire les émissions au-delà de 50 % sans mettre en œuvre des actions au coût prohibitif. Par comparaison, on estime qu'en électrifiant le vecteur énergétique, 50 % des émissions pourraient être abattues à moins de 300 €/tCO₂ en rénovant vers A, 160 €/tCO₂ en rénovant vers B et 75 €/tCO₂ en rénovant vers C.

L'option de rénovation vers C avec électrification tend vers un potentiel de réduction des émissions très proche de celui d'une transition vers A ou B (correspondant au niveau BBC rénovation), autour de 80 %, mais pour un coût significativement moins élevé (150 €/tCO₂ au lieu de 420 €/tCO₂ vers A et 250 €/tCO₂ vers B).

Le moindre coût de cette option s'apprécie également en comparant les coûts médians de chaque option répartis selon le vecteur de chauffage et l'étiquette DPE initiaux (voir Graphique 16). Électrifier le chauffage et rénover vers C un logement initialement chauffé au fioul et de classe énergétique F reviendrait ainsi à un coût d'abattement de 20 €/tCO₂, contre 50 €/tCO₂ si ce logement était électrifié et rénové vers B. Rénover vers C plutôt que vers B un logement initialement de classe E chauffé au gaz tout en électrifiant le système de chauffage réduirait le coût d'abattement de 70 €/tCO₂ – en le passant de 150 €/tCO₂ à 80 €/tCO₂.

Graphique 16 – Coûts d'abattement médians de rénovations vers B et vers C avec électrification du système de chauffage selon le vecteur de chauffage et l'étiquette DPE initiaux du logement (méthode budget carbone, en €/tCO₂)



● Coût d'abattement médian de la rénovation vers B avec électrification pour les logements de la catégorie

◆ Coût d'abattement médian de la rénovation vers C avec électrification pour les logements de la catégorie

Source : France Stratégie, d'après Cired

Atteinte des objectifs et contrainte sur la sécurité d'alimentation en électricité

Concentrer les efforts de réduction des émissions du secteur résidentiel sur la seule décarbonation des vecteurs énergétiques en se reportant vers des vecteurs qui peuvent être décarbonés, tels que l'électricité ou encore le biogaz, se heurterait à des limites de potentiel et mettrait fortement en tension l'offre de ces sources énergétiques. À ce titre, le rapport RTE et Ademe (2020)¹ alerte sur le fait qu'un scénario d'électrification du chauffage par le déploiement massif de radiateurs électriques peu performants sans amélioration de l'enveloppe des bâtiments conduirait à un risque élevé de sécurité d'approvisionnement. Le déploiement de systèmes de chauffage électrique performants, comme les pompes à

¹ RTE et Ademe (2020), *Réduction des émissions de CO₂, impact sur le système électrique : quelle contribution du chauffage dans les bâtiments à l'horizon 2035 ?*, rapport, décembre.

chaleur, minimiserait significativement ce risque mais resterait sous-optimal sans accompagnement de travaux d'isolation. En effet, la substitution d'une chaudière gaz ou fioul par l'installation d'une pompe à chaleur sans rénovation performante (niveau BBC) en parallèle nécessite dans la plupart des cas d'y associer un système de chauffage d'appoint, soit par le biais d'une chaudière (par exemple gaz), soit par le recours à des convecteurs électriques. Dans le premier cas, cela ne permet pas de réduire les émissions de manière significative ; dans le second cas, le niveau de pointe électrique pouvant être atteint est incompatible avec les capacités de l'offre¹.

Enfin, l'électricité, en particulier celle utilisée pour le chauffage, reste une énergie carbonée, car cet usage contribue aux pointes de demande au cours desquelles le recours aux productions d'électricité carbonées est plus important. L'accroissement de la demande génère des effets induits sur le système électrique à l'échelle européenne (le développement des usages électriques en France conduit à moins exporter d'électricité bas-carbone et/ou à importer davantage d'électricité en moyenne plus carbonée). D'un point de vue dynamique, la décarbonation des vecteurs ne pourra être que progressive et les réductions d'émissions possibles par la seule électrification des usages sur les prochaines décennies restent limitées.

À l'inverse, la rénovation du parc de logements au niveau moyen BBC n'implique pas de rénover tous les logements à ce niveau de performance, comme en atteste l'étude de Pouget Consultant et Carbone 4². D'après cette étude, le potentiel d'abattement d'un logement est fortement lié à sa typologie. Si certaines contraintes techniques (contraintes architecturales des immeubles collectifs haussmanniens, par exemple) ou économiques (coût trop élevé) rendent irréaliste la rénovation de certains types de logements au niveau BBC, d'autres présentent au contraire la capacité d'être rénovés au-delà de ce niveau. Au sein même d'une typologie de bâti, les disparités peuvent être importantes. Ainsi, l'étude conclut que la neutralité carbone des logements peut être atteinte en fixant un seuil minimal d'isolation, tout en modulant l'exigence des rénovations en fonction des caractéristiques initiales du bâtiment. Elle doit par ailleurs s'accompagner d'une transition vers des vecteurs énergétiques non carbonés (sortie complète du fioul et réduction de 80 % de l'usage de gaz dans le résidentiel).

In fine, le meilleur compromis reste difficile à déterminer et dépend en partie de l'ampleur du report de charge sur la production électrique, qu'une réduction de l'ambition des rénovations impliquerait. D'après les simulations réalisées, et avec les incertitudes associées, rénover vers C en électrifiant le vecteur ne compromettrait pas nécessairement le potentiel

¹ Sidler O. (2022), *Du bon usage des pompes à chaleur*, rapport, Enertech, juillet.

² Pouget Consultant et Carbone 4 (2020), *Neutralité et logements : à quelles conditions le secteur résidentiel peut-il atteindre la neutralité carbone telle que définie dans la SNBC ?*

d'abattement à terme et ne devrait pas remettre en cause la capacité du secteur électrique à se décarboner et à assurer la production nécessaire. À titre d'illustration, électrifier en rénovant vers C l'ensemble des logements au fioul et l'ensemble des logements chauffés au gaz de classes D et inférieures conduirait à accroître la demande d'électricité annuelle pour le chauffage de l'ordre de 10 à 15 TWh par rapport à une rénovation vers B (voir Encadré 3). Cette estimation représente un scénario haut dans le sens où, en réalité, seule une partie de la décarbonation du chauffage procéderait par l'électrification. Reste en revanche à considérer les effets sur la pointe de la demande, non pris en compte ici, qui peuvent être non négligeables dans le cas d'un scénario à forte électrification.

Encadré 3 – Report de charge sur la production d'électricité d'une rénovation en profondeur du parc résidentiel

Compte tenu de la structure du parc par étiquette DPE et par vecteur décrite par les simulations Res-IRF, on étudie le cas dans lequel les logements chauffés au fioul d'étiquette C à G et ceux chauffés au gaz d'étiquette D à G sont électrifiés et rénovés :

- a) vers B ;
- b) vers C.

À partir de la consommation conventionnelle moyenne par étiquette dédiée au chauffage (en kWh/m²/an), de la surface moyenne pondérée par logement (estimée à 83 m² à partir des hypothèses du modèle sur la surface moyenne par catégorie de logement du modèle, détaillées en [Annexe 4](#)), et du coefficient de conversion entre énergie primaire et énergie finale pour l'électricité (de 2,58), on peut calculer la consommation finale d'électricité additionnelle induite par ces rénovations.

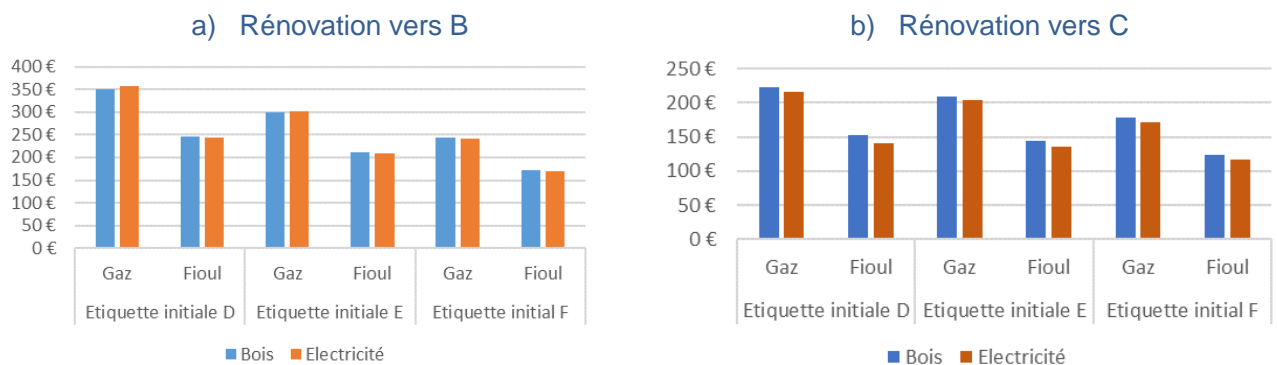
Le surplus de demande d'électricité annuelle est alors de 19 TWh dans le cas a), et de 29 TWh dans le cas b).

En parallèle, dans chaque cas, les passoires énergétiques initialement chauffées à l'électricité sont rénovées respectivement soit vers B soit vers C. L'amélioration de la performance énergétique permettrait de réduire la consommation de l'ensemble de ces logements de 28 TWh dans le cas a) et 26 TWh dans le cas b), en l'absence d'effet rebond. Sous l'hypothèse d'un prérebond de 50 % pour les ménages occupant ces logements, la réduction de demande d'électricité est abaissée à respectivement 12 TWh et 9 TWh.

Comparaison avec le recours au bois de chauffage comme vecteur principal

Les contraintes potentielles liées à une électrification à grande échelle des moyens de chauffage et la non-pertinence du système de pompe à chaleur pour certains types de logements peuvent amener à considérer d'autres vecteurs peu carbonés parmi les options de décarbonation, notamment le bois de chauffage. Des cas types réalisés à partir des hypothèses de calcul du modèle Res-IRF permettent d'illustrer que le passage d'une énergie fossile au bois est possible pour des coûts d'abattement semblables à ceux correspondant à une électrification du vecteur (Graphique 17).

Graphique 17 – Comparaison des coûts d'abattement pour un ménage type d'une rénovation vers B (à gauche) ou vers C (à droite) selon le vecteur final de chauffage principal (bois ou électricité)



Note : on considère pour ces cas types un logement de 100 m² habité par un ménage appartenant au 4^e décile de revenu. Des coûts d'abattement en budget carbone pour l'année 2022 sont calculés ; aucun bénéfice de santé n'est pris en compte dans les résultats. Le contenu carbone retenu pour le bois est celui issu de la RE2020 (3 gCO₂/kWh¹).

Lecture : le coût d'abattement d'une rénovation vers B du logement type considéré initialement d'étiquette E et chauffé au gaz est de 350 euros par tonne de CO₂ environ, que le vecteur final soit du bois ou de l'électricité.

Source : France Stratégie, d'après Cired

Des résultats très incertains mais dans la fourchette des autres études

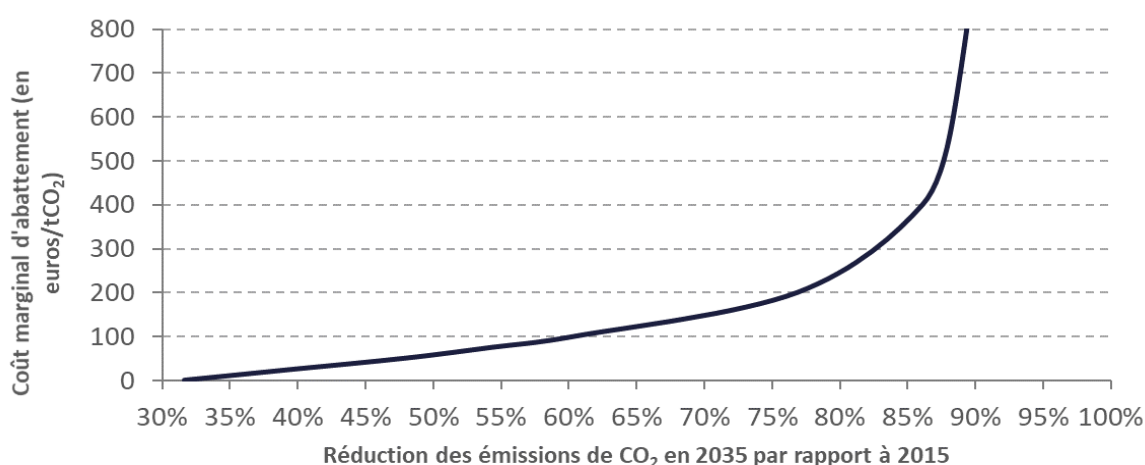
Les résultats obtenus apparaissent très sensibles aux hypothèses retenues. C'est un élément qui se retrouve dans l'hétérogénéité des coûts d'abattement obtenus dans les diverses évaluations pour ce type d'actions (voir ci-dessous).

¹ Bûche, granulés (pellets) ou briquettes.

L'étude de RTE et de l'Ademe (2020)¹ estime le coût d'abattement d'un scénario de rénovation du parc au niveau des objectifs SNBC incluant une électrification importante avec des systèmes performants (pompes à chaleur) à 430 €/tCO₂.

Le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), dans son estimation des coûts d'abattement dans le secteur résidentiel en France à partir du modèle Zephyr-Chaleur², aboutit à des coûts de 190 €/tCO₂ pour une réduction de 75 % des émissions à l'horizon 2035 par rapport à 2015, principalement via une décarbonation du vecteur. En outre, il estime que 30 % des émissions peuvent être abattues à coût d'abattement négatif, et jusqu'à 85 % à moins de 300 €/tCO₂ (Graphique 18). Cette évaluation n'intègre toutefois ni les effets de comportement (*prebound effect* notamment), ni les effets de retour sur les prix de l'électricité.

Graphique 18 – Coûts d'abattement dans le secteur résidentiel en France d'après le modèle Zephyr-Chaleur (CSTB)



Lecture : 60 % des émissions en 2035 par rapport à 2015 peuvent être réduites à un coût marginal d'abattement de moins de 100 €/tCO₂.

Source : audition de Jérémy El Beze, 5 novembre 2019

¹ RTE et Ademe (2020), *Réduction des émissions de CO₂...*, op. cit.

² À partir des travaux de la thèse de J. El Beze (2018), *Les rôles de la substitution et de l'efficacité énergétiques dans la décarbonation du parc de logements en France*, université Paris-Dauphine.

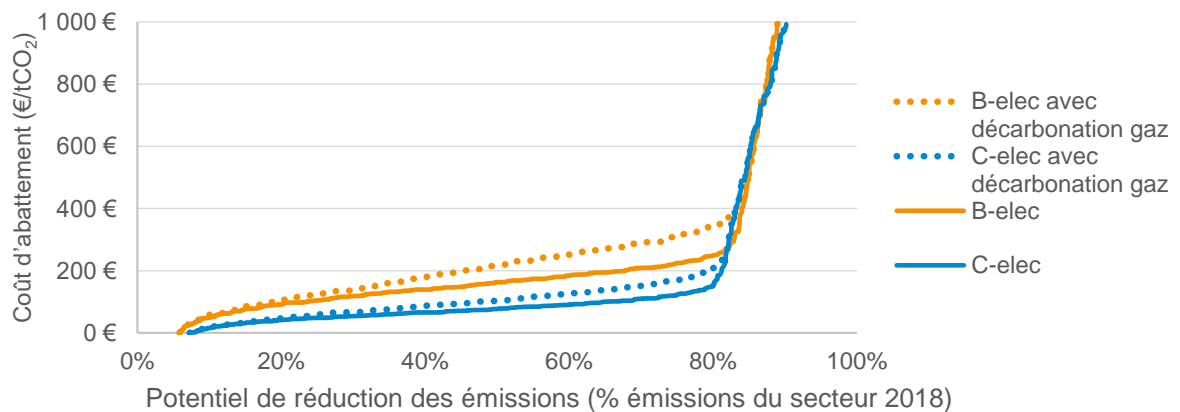
4.2. Des incertitudes sur les coûts d'abattement encore très importantes

L'impact d'une décarbonation poussée du gaz

L'analyse des coûts d'abattement présentée ci-dessus repose sur des hypothèses dans lesquelles un seul vecteur énergétique se décarbone dans le temps (l'électricité).

Tenir compte de la décarbonation du gaz par l'introduction progressive du biogaz dans le mix énergétique réduit les gains potentiels à l'électrification du chauffage. Le Graphique 19 montre en effet des coûts d'abattement des options avec électrification plus importants que sous les hypothèses précédentes et un gain de potentiel lié à l'électrification plus modéré. La décarbonation concomitante d'un autre vecteur que l'électricité – le gaz – permettrait ainsi de modérer les besoins d'électrification.

Graphique 19 – Sensibilité des coûts d'abattement à l'hypothèse de décarbonation du gaz et de l'électricité – exemples des actions « rénovation avec électrification » vers B et vers C



Note : les courbes de coûts d'abattement marginal des actions de rénovation vers B ou vers C avec électrification du vecteur, lorsque le gaz et l'électricité se décarbontent à l'horizon 2050, apparaissent en pointillé.

Source : modèle Res-IRF, Cired

En fin de compte, sous ces hypothèses, rénover le parc vers C en électrifiant le vecteur constituerait l'option la moins coûteuse (170 €/tCO₂ pour atteindre 75 % de réduction des émissions sur le parc actuel). Ce résultat est toutefois à prendre avec précaution puisque la capacité à maintenir une électricité décarbonée reste largement dépendante du niveau de production, dépendance qui n'est pas prise en compte ici. La surconsommation électrique des logements risquerait de compromettre la décarbonation de l'électricité, si les niveaux de performance étaient insuffisants¹.

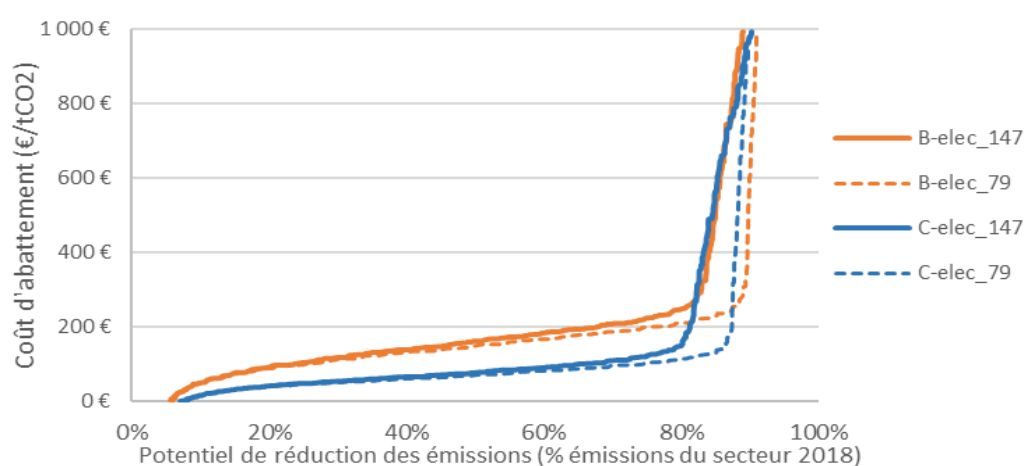
¹ Sans compter le fait que des systèmes de chauffage électrique performants de type PAC ne peuvent fonctionner correctement que dans le cas de logements avec enveloppes performantes.

Des résultats sensibles à l'hypothèse de contenu carbone de l'électricité pour les logements initialement chauffés à l'électricité

Si le choix de considérer un vecteur électrique moins carboné avant 2030 semble renforcer légèrement l'intérêt des rénovations plus complètes (Graphique 20), l'effet varie selon le vecteur initial des logements. Plus précisément, avoir un vecteur électrique moins carboné augmente l'intérêt de l'électrification des logements chauffés au gaz ou au fioul, et donc diminue les coûts d'abattement de ces logements (puisque les émissions évitées par l'électrification augmentent). Ces coûts restent néanmoins peu sensibles au contenu carbone de l'électricité retenu. L'incertitude relative à cette valeur joue moins que son écart avec le contenu carbone des énergies fossiles et les gains d'émissions liés à l'amélioration de l'efficacité énergétique.

En revanche, retenir un contenu carbone du vecteur électrique moins élevé conduit à augmenter le coût d'abattement associé à l'isolation des logements initialement chauffés à l'électricité d'un facteur égal au rapport entre l'ancien et le nouveau contenu carbone ($147/79 \approx 1,9$), puisque les gains d'émissions attribués au changement de vecteur sont moindres (voir Graphique 21). En conséquence, considérer un contenu carbone de l'électricité plus faible rend socioéconomiquement non pertinente la rénovation profonde d'un certain nombre de logements initialement chauffés à l'électricité mais affecte peu la pertinence de rénovation des autres types de logements.

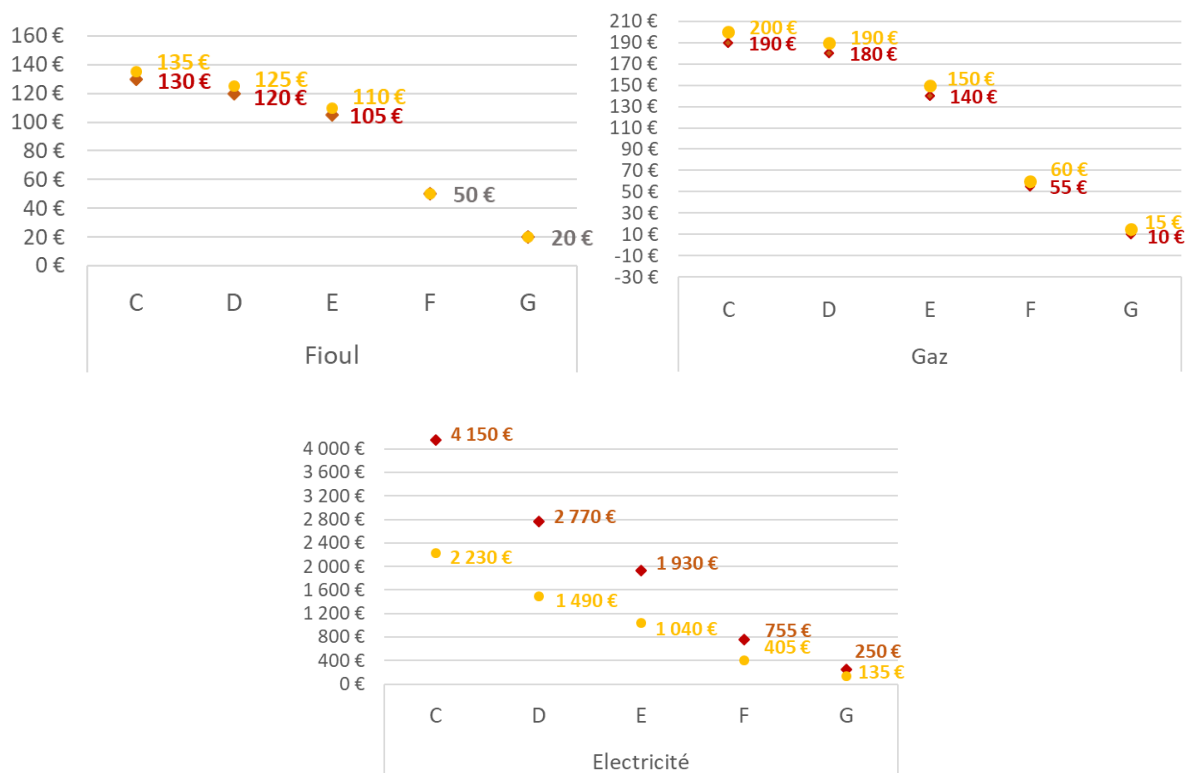
Graphique 20 – Sensibilité des coûts d'abattement à la valeur du contenu carbone du vecteur électrique – exemples des actions de « rénovation avec électrification » vers B et vers C



Note : les courbes de coûts d'abattement marginal des actions de rénovation vers B ou vers C avec électrification du vecteur, lorsque la valeur du contenu carbone de l'électricité retenue est de 147 gCO₂/kWh, apparaissent en pointillé sur le graphique.

Source : modèle Res-IRF, Cired

Graphique 21 – Sensibilité des coûts d’abattement médians au contenu carbone de l’électricité – exemples des actions de « rénovation avec électrification » vers B



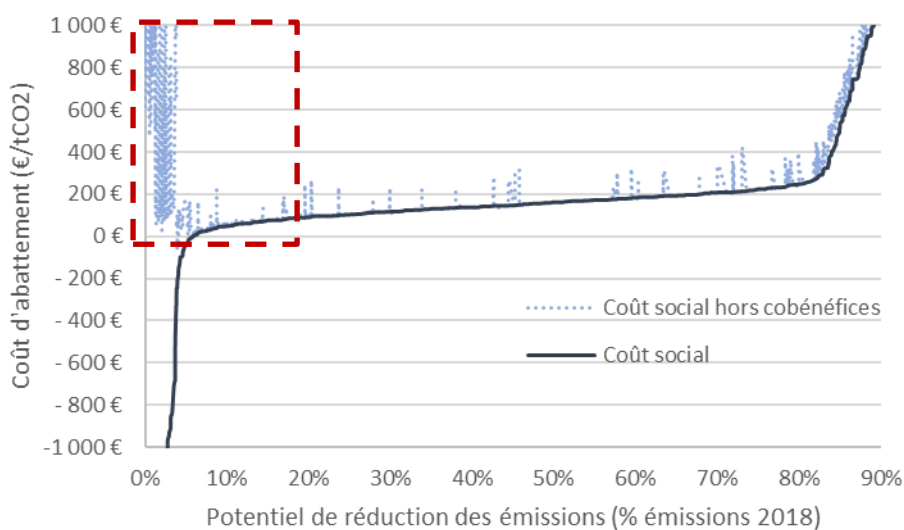
- Coût d’abattement médian de la rénovation vers B avec électrification pour les logements de la catégorie, avec contenu carbone de l’électricité à 147 gCO₂/kWh
- ◆ Coût d’abattement médian de la rénovation vers B avec électrification pour les logements de la catégorie, avec contenu carbone de l’électricité à 79 gCO₂/kWh
- Coût d’abattement médian de la rénovation vers C avec électrification pour les logements de la catégorie, avec contenu carbone de l’électricité à 147 gCO₂/kWh
- ◆ Coût d’abattement médian de la rénovation vers C avec électrification pour les logements de la catégorie, avec contenu carbone de l’électricité à 79 gCO₂/kWh

Source : France Stratégie, d’après Cired

Le poids significatif des enjeux sanitaires dans la rénovation des passoires thermiques

La prise en compte des cobénéfices de santé attribuables à la rénovation aboutit à des coûts d'abattement négatifs pour une partie des logements occupés par des ménages en situation de précarité énergétique, rendant leur rénovation rentable en dehors des considérations climatiques (Graphique 22). Ces logements étant pour beaucoup des passoires énergétiques, on pourrait s'attendre à une forte réduction des émissions. Paradoxalement, elles ne représenteraient qu'un faible potentiel d'abattement, inférieur à 6 % dans le cas d'un scénario de rénovation du parc vers B avec électrification du vecteur. La situation de précarité énergétique des ménages occupant ces logements les amène en effet à sous-utiliser la capacité de leur système de chauffage (voir section 3 du Chapitre 2). La rénovation conduit alors à un effet rebond qui limite fortement les réductions d'émissions effectives *ex post*, si bien que ces logements ne pèsent que faiblement dans le potentiel de réduction des émissions sur le parc. Les coûts d'abattement de ces logements seraient particulièrement élevés si les gains de santé n'étaient pas pris en compte.

Graphique 22 – Courbes de coûts d'abattement social, avec et sans cobénéfices sanitaires, d'une rénovation vers B avec électrification



Note : le coût social inclut des composantes purement monétaires liées aux coûts d'investissement et aux économies de facture énergétique, et d'autres liées aux bénéfices de santé et aux coûts d'opportunité des fonds publics. Le graphique a été tronqué à -1 000 €/tCO₂ et +1 000 €/tCO₂ et à 30 % de potentiel.

Lecture : les logements sur la courbe grise sont classés par ordre de mérite. Chaque point de la courbe bleue représente leur équivalent hors prise en compte des cobénéfices, ceux-ci ne sont donc pas classés par ordre de mérite.

Source : modèle Res-IRF, Cired

Ces résultats restent soumis à une forte incertitude, inhérente à la méthode d'évaluation des gains sanitaires ; c'est pourquoi il est nécessaire de rester prudent quant à leur interprétation. Malgré cela, ils mettent en exergue l'enjeu significatif que représente la prise en compte de la santé des occupants dans les politiques de rénovation énergétique des logements, qui justifierait à elle seule la priorisation de la rénovation des passoires thermiques.

Un ensemble de paramètres déterminants dans les estimations de coûts d'abattement

Une analyse de sensibilité des résultats à cinq paramètres clés – l'évolution du prix de l'énergie, la durée d'efficacité des rénovations (qui peut traduire l'effet de la qualité des travaux¹), les coûts d'investissement, le progrès technique et l'image du parc – est présentée ici. Le Tableau 7 résume les variations d'hypothèses considérées entre le scénario de référence et les analyses de sensibilité.

Tableau 7 – Variation d'hypothèses entre scénario de référence et analyses d'incertitude

Source d'incertitude	Scénario de référence	Analyses d'incertitude
Données de l'image du parc	SDES-2018	Phébus-2018
Taux de croissance annuel du prix de l'énergie	« Référence » : Électricité : +1,1 % Gaz : +1,4 % Fioul : +2,2 % Bois-énergie : +1,2 %	« Power + » : hausse du taux de croissance du prix de l'électricité de 1 % et baisse de la croissance des prix du gaz naturel et du fioul domestique de 0,5 %. « Gaz et Fioul + » : hausse du taux de croissance des prix du gaz naturel et du fioul domestique de 1 % et baisse de la croissance du prix de l'électricité de 0,5 %.
Durée des bénéfices de l'investissement (qualité de la rénovation)	30 ans	20 ans
Coût d'investissement de la rénovation	Dire d'experts (matrice des coûts Res-IRF)	+10 %
Progrès technique vs saturation sur le marché du travail	0	+2 % vs -2 %

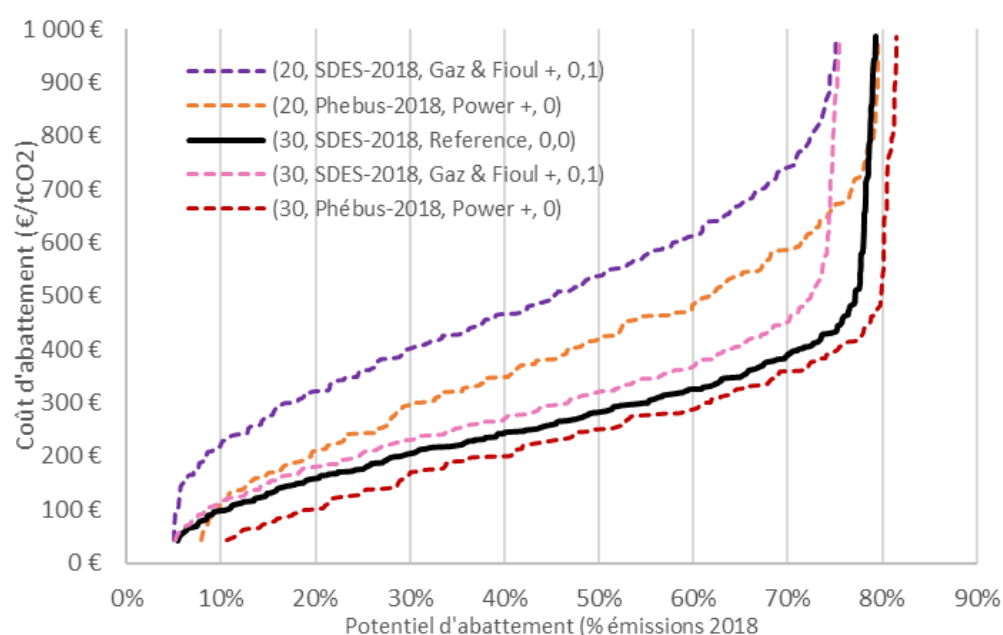
Source : Cired

¹ L'effet qualité aurait pu être alternativement pris en compte par une moindre efficacité. En ajustant le calibrage, le résultat peut être strictement identique.

Le Graphique 23, représentant les différentes courbes de coût d'abattement de l'action A-*elec* sous les différentes combinaisons d'hypothèses, met en avant des écarts de résultats significatifs. La borne supérieure des coûts se fonde sur les données Phébus projetées à 2018, et considère un scénario d'accélération de l'augmentation des prix de l'électricité et de ralentissement de celle des prix des énergies fossiles. La borne inférieure réduit la durée des bénéfices de la rénovation à vingt ans, se fonde sur les données Phébus-2018, retient le scénario de hausse des prix Gaz et Fioul + et considère une hausse des coûts de la rénovation de 10 %.

À coût d'abattement donné, la borne supérieure du potentiel de réduction des émissions de CO₂ peut être jusqu'à quatre à cinq fois plus élevée que la borne inférieure. Inversement, pour un potentiel d'abattement fixé à 50 %, les coûts d'abattement correspondants peuvent varier de 200 euros à plus de 500 euros/tCO₂.

Graphique 23 – Potentiel d'abattement d'une rénovation du parc vers l'étiquette A dans un scénario « tout vers électricité » en fonction du coût d'abattement par tonne de CO₂, avec prise en compte des sources d'incertitude



Note : la courbe noire correspond à la situation de référence. Les quatre autres courbes combinent différentes variations d'hypothèses (voir Tableau 7 *supra*). Il s'agit plus précisément des bornes hautes et basses des résultats obtenus en considérant une durée de la rénovation de trente ans, puis une durée de vingt ans. Au total, 24 combinaisons d'hypothèses sont possibles.

Lecture : la rénovation des logements dont le coût d'abattement est de 200 €/tCO₂ permet de réduire de 5 % à 25 % les émissions du parc résidentiel français en rénovant les logements vers l'étiquette A.

Source : modèle Res-IRF, Cired

Des analyses de sensibilité spécifiques à chaque source d'incertitude ont également été menées afin de déterminer quels paramètres influent le plus sur les résultats. L'effet qualité, associé ici à la durée des bénéfices liés à la rénovation, apparaît comme la plus forte source d'incertitude sur les résultats. Ce résultat est aussi lié au fait que c'est le paramètre sur lequel la variation appliquée a été la plus forte (voir [Annexe 5](#) pour plus de détails sur les analyses de sensibilité).

4.3. La rentabilisation progressive des actions de rénovation par la valeur de l'action pour le climat

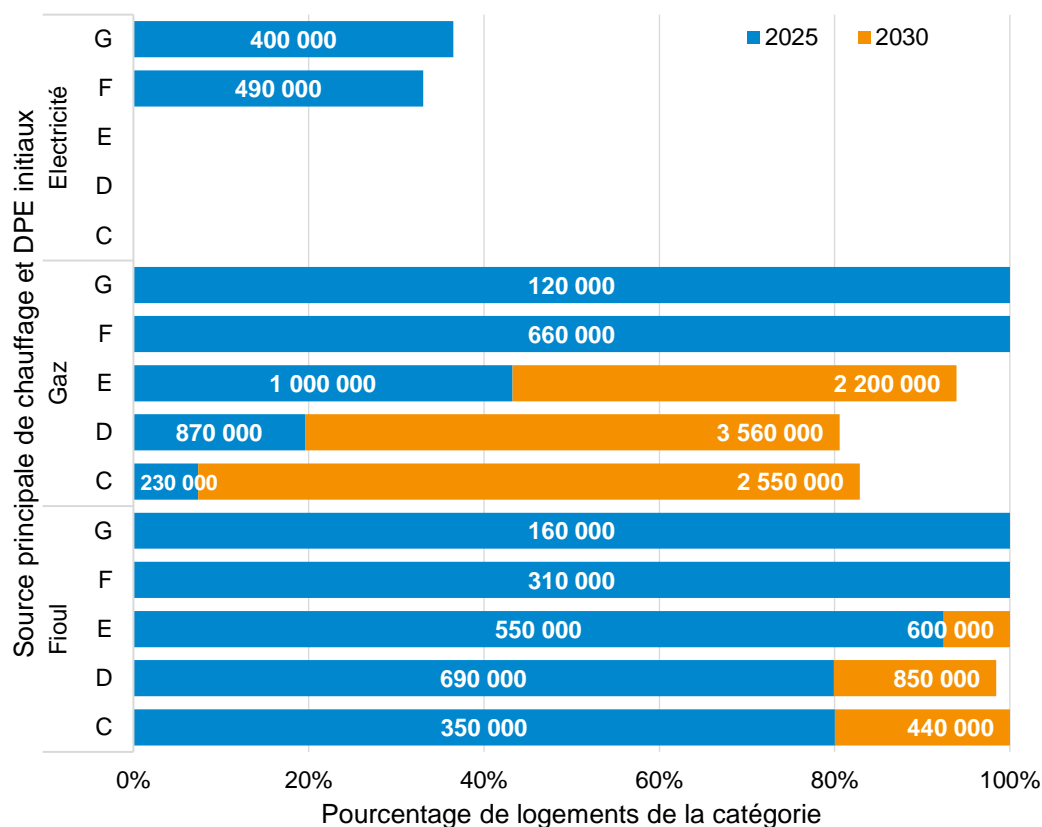
La valeur de l'action pour le climat (VAC) définit l'effort que la société est prête à consacrer à la réduction des émissions de GES. La rentabilité socioéconomique d'un projet peut s'apprécier en comparant cette valeur à la date de l'investissement au coût d'abattement lorsque celui-ci est « ajusté à la VAC¹ ». Toutes les actions dont le coût d'abattement est inférieur à la VAC à la date de l'investissement (250 €/tCO₂ pour les actions ayant lieu en 2030, par exemple) devraient en principe être déployées pour respecter la trajectoire de décarbonation française.

Le Graphique 24 page suivante montre le potentiel de rénovations rentables d'une rénovation très performante vers B (type BBC rénovation) couplée à l'électrification du vecteur (impliquant une électrification performante type PAC) « rentabilisé » par la valeur de l'action pour le climat en 2025 et 2030. Dès 2025, cette action serait socioéconomiquement rentable pour 5,8 millions de logements. À l'horizon 2030, c'est 12,4 millions de logements de toutes étiquettes qu'il serait socioéconomiquement rentable de rénover vers des niveaux B et d'électrifier.

Le niveau de performance des logements conditionne en partie la rentabilisation progressive des investissements. Ainsi, la VAC rentabiliserait avant tout la rénovation des passoires énergétiques, dont beaucoup sont caractérisées par des cobénéfices importants en termes de santé. Plus précisément, en 2025 cela concernerait parmi les logements F et G la quasi-totalité de ceux chauffés au fioul et la moitié de ceux chauffés au gaz. À mesure que le parc serait rénové et que la VAC augmenterait, il deviendrait également rentable de rénover les logements gaz et fioul plus performants (étiquettes E et D, C). Parmi les logements déjà électrifiés, les rénovations rentables concerneraient uniquement les passoires.

¹ Voir le volet méthodologique du rapport : Criqui P. (2021), *Les coûts d'abattement. Partie 1 – Méthodologie*, rapport de la commission sur les coûts d'abattement, France Stratégie, juin.

Graphique 24 – Évolution du potentiel de logements dont la rénovation vers B avec électrification du vecteur se fait à coût d'abattement ajusté à la VAC inférieur à la VAC en 2025 et 2030



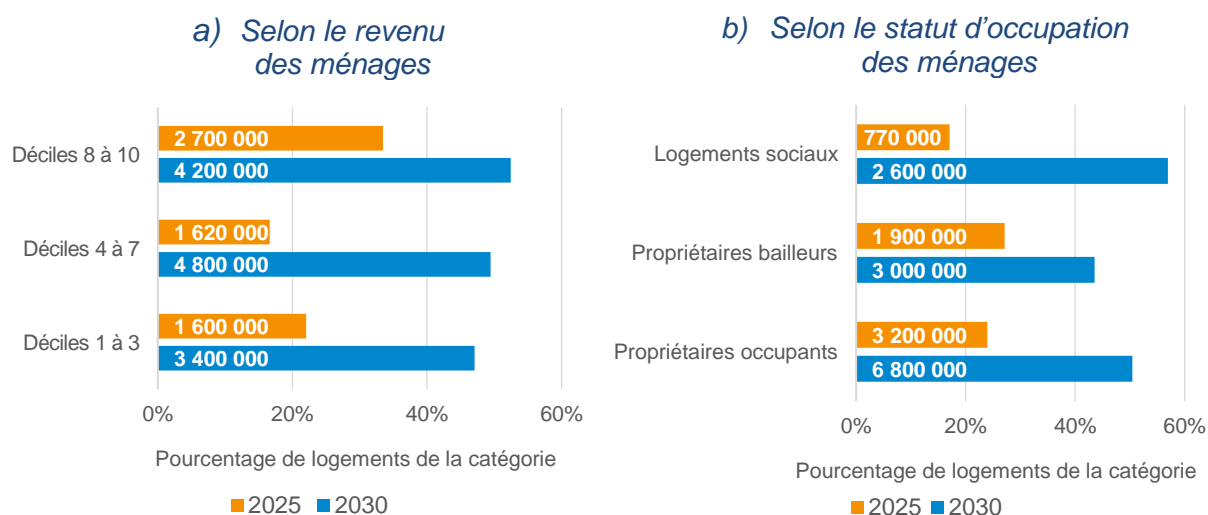
Lecture : sous les hypothèses retenues, il serait rentable de rénover vers B avec électrification performante du chauffage 80 % des logements de classe D chauffés au fioul dès 2025. Cela représente 690 000 logements. En 2030, il sera rentable pour près de la totalité de ces logements d'effectuer une telle rénovation. Ce type de rénovation serait aussi rentable pour 50 % des logements de classe F chauffés au gaz, soit 330 000 logements. Ce potentiel pourrait atteindre la totalité de cette catégorie de logements en 2030 dans le cas où la décarbonation du gaz serait limitée.

Source : France Stratégie d'après Res-IRF, Cired

Parmi les logements rentables en 2025, 32 % sont occupés par des locataires privés ; 13 % par des locataires sociaux et 55 % par des propriétaires occupants (voir Graphique 25). Ces parts sont relativement proches de celles observées sur la totalité de l'échantillon du parc de logements considéré, qui sont respectivement de 28 %, 18 % et 54 %. 27 % des occupants des logements rentables sont des ménages appartenant aux déciles de revenu 1 à 3, ce qui est également proche de la part des logements occupés par des ménages à bas revenus sur le parc. Au total, parmi les logements rentables en 2025, 40 % sont occupés par des locataires du privé ou des ménages à bas revenus. Par ailleurs, il s'agit pour 45 % de logements collectifs privés (propriétaires occupants et locataires). Beaucoup de ces logements sont donc sujets à des barrières de marché telles

que décrites plus haut. En 2030, la distribution des statuts d'occupation (locataires du privé ou du social ; propriétaires occupants) et des déciles de revenu parmi les logements rentables se rapproche encore davantage de la distribution moyenne.

Graphique 25 – Nombre de logements pour lesquels une rénovation vers B est rentabilisée par la VAC en 2025 et 2030



Source : modèle Res-IRF, Cired

Retenir un contenu carbone initial pour l'électricité plus faible (*i. e.* celui de la RE2020 au lieu de celui retenu précédemment par la RT2012) ne modifie pas significativement le volume de rénovations rentables au regard de la VAC. Le nombre de logements chauffés au gaz et au fioul pour lesquels la rénovation vers B avec électrification est rentable en 2030 augmente légèrement puisque la baisse du contenu carbone de l'électricité contribue à augmenter les gains d'émissions des rénovations des logements chauffés aux vecteurs fossiles. À l'inverse, ce type de rénovation reste rentable pour moins de logements initialement chauffés à l'électricité.

La rentabilité des logements chauffés au gaz et à l'électricité dépend aussi largement du potentiel de décarbonation de ces vecteurs. L'intégration d'une trajectoire de décarbonation complète du gaz à l'horizon 2050 aboutirait en effet à ce que le nombre de rénovations rentables sur le parc décroisse significativement, jusqu'à 3,5 millions de logements en 2025 et 2030. Supposer une décarbonation complète du gaz pour les logements aujourd'hui chauffés au gaz limite en effet fortement la pertinence de leur rénovation. Il serait alors rentable en 2030 de rénover au niveau BBC seulement 3 % de ces logements, contre 92 % dans le cas d'un gaz non décarboné. Ces rénovations permettraient alors de réduire les émissions annuelles moyennes de l'ordre d'un quart en 2030 sur les trente années suivantes par rapport au niveau d'émissions de 2018, contre trois quarts en retenant un gaz non décarboné.

5. Pistes d'amélioration de l'évaluation des coûts d'abattement de la rénovation

L'exercice présenté ici nous a permis d'énoncer de premiers messages tirés de l'analyse des coûts d'abattement dans le bâtiment résidentiel. Certaines hypothèses sont formulées dans un souci de simplification, quand d'autres s'expliquent plus largement par les limites des informations disponibles et des modèles. Au bout du compte, la connaissance des coûts et des impacts réels des actions de réduction des émissions dans le résidentiel est aujourd'hui encore insuffisante et ne permet pas de répondre pleinement à certains besoins d'arbitrages fondamentaux dans la décision publique. Quelques pistes d'amélioration sont proposées ici afin de renforcer, à l'avenir, la robustesse des résultats.

Au-delà de ces pistes d'amélioration, un dialogue entre modélisateurs, thermiciens et praticiens de la rénovation sur la manière d'appréhender ces paramètres clés permettrait à moyen terme une amélioration nette des évaluations.

5.1. Dépasser l'approche statique

Les coûts d'abattement présentés ici ont été calculés dans une perspective statique, se traduisant par un scénario contrefactuel qui prolonge à l'identique la situation de référence. En particulier, cette approche ne permet pas de tenir compte du vieillissement ni de l'amélioration spontanée des logements au sein du parc.

Apprécier l'interaction entre l'électrification des usages et la décarbonation de l'électricité

Massifier l'électrification des logements implique de tenir compte de l'effet de retour sur la capacité de décarbonation du vecteur électrique et sur le prix de ce vecteur. Intégrer les interactions entre l'électrification des usages et les contraintes sur la production d'électricité permettrait de mieux appréhender les potentiels de décarbonation permis par l'électrification.

Affiner les hypothèses de projection sur lesquelles reposent les calculs

Le coût d'abattement associé à une action de rénovation réalisée aujourd'hui est largement dépendant :

- de la trajectoire future des prix des différents vecteurs énergétiques (électricité, gaz, etc.), faisant peser une forte incertitude même dans le cas où les coûts d'investissement seraient parfaitement connus ;
- de la qualité de réalisation de l'action, qui conditionne la performance atteinte ou la durée de l'efficacité de la rénovation dans le temps ;

- du progrès technique, soumis à l'incertitude mais qui conditionne l'évolution du coût d'actions futures ;
- des hypothèses de décarbonation des vecteurs énergétiques.

S'il restera difficile de prévoir avec plus de certitude les évolutions des prix des énergies et les technologies à venir, des travaux empiriques permettant d'estimer les paramètres de qualité des rénovations permettraient d'améliorer largement l'évaluation des coûts d'abattement.

5.2. Consolider les estimations et les hypothèses de coût d'investissement et d'efficacité des rénovations

Certaines données importantes pour le paramétrage du modèle sont encore mal connues, dans le sens où elles sont encore parcellaires, fondées sur le dire d'experts ou non systématiquement renseignées dans des bases de données consolidées.

C'est le cas notamment des données de coût d'investissement dans la rénovation. Ces données de coût sont intrinsèquement difficiles à obtenir et il n'existe pas, à ce jour, d'évaluation statistique fiable et suffisamment complète pour définir une évaluation précise du coût optimisé des actions de rénovation. Les montants définis dans Res-IRF se fondent ainsi principalement sur le dire d'experts. La création de bases de données consolidées et le renforcement de la littérature empirique sur ce sujet seraient indispensables pour valider les montants définis dans le modèle.

Par ailleurs, il convient de lever l'hypothèse de séparation entre le coût des actions de changement de vecteur énergétique et le coût des actions sur la performance énergétique. Cette hypothèse rend le coût de changement de vecteur uniquement dépendant de la surface du logement, mais pas du besoin réel en puissance pour chauffer le logement à une température donnée. Cela permettrait de rendre compte de la décroissance du coût de changement de vecteur avec la hausse de la performance initiale du logement. Autrement dit, cela amènerait, par exemple, à différencier le coût d'un changement du gaz vers l'électricité d'un logement F sans rénover l'enveloppe d'un même changement de vecteur effectué dans le cadre d'une rénovation permettant d'atteindre le niveau BBC. Cela refléterait la baisse du besoin en puissance énergétique à mesure que le bâti s'améliore, ce qui rendrait le changement de vecteur d'autant moins coûteux.

Enfin, l'efficacité réelle des rénovations mériterait d'être beaucoup mieux documentée par des travaux empiriques et son évaluation nécessiterait la collecte de données sur l'état et les caractéristiques précis des logements avant et après travaux, incluant notamment les informations sur la consommation conventionnelle et effective, le détail des travaux mis en œuvre, les caractéristiques des occupants ou encore une mesure de la température intérieure avant et après travaux. Des travaux en cours au CGDD devant aboutir en 2023 vont en ce sens.

5.3. Affiner la représentation des gestes de rénovation et les vecteurs énergétiques

L'absence de distinction explicite entre les systèmes de chauffage pour un même vecteur dans le modèle utilisé, notamment entre les convecteurs à effet joule ou les pompes à chaleur pour le vecteur électrique, ne permet pas de tenir compte de la forte variabilité de coûts et d'efficacité qui les caractérise. Ainsi, les coûts d'abattement des solutions avec transition vers le vecteur électrique sont estimés indépendamment de la manière dont est opérée l'électrification, qui est pourtant susceptible d'affecter significativement le résultat sur les émissions.

Ces hypothèses et leurs limites ne permettent d'aborder que partiellement la question de l'arbitrage entre performance énergétique du bâti et décarbonation par changement de vecteur, et appellent à des travaux additionnels.

De même, les modèles devraient être empiriquement mieux fondés et pourraient être développés de sorte à mieux tenir compte à la fois de l'interdépendance entre les gestes, afin de davantage capter l'inefficacité des rénovations par étapes, et de l'interaction entre la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel et les secteurs de production d'énergie, en particulier avec les secteurs d'énergie à faible contenu carbone (électricité, biogaz, etc.). Une nouvelle version du modèle Res-IRF du Cired incluant une description plus fine des gestes de rénovation et un calibrage des coûts empiriquement mieux fondé sera bientôt disponible.



CHAPITRE 4

COMPLÉMENTS SUR LE TERTIAIRE ET LES RÉSEAUX DE CHALEUR

1. Les coûts d'abattement dans le parc tertiaire

Le parc tertiaire a également un rôle important à jouer dans la décarbonation du secteur du bâtiment. Les branches d'activité tertiaire (commerces, bureaux, hébergement-restauration, établissements de santé, d'enseignement, de sport ou de loisirs, etc.) consommaient en France 15 % de la consommation totale d'énergie finale (plan Bâtiment durable, 2017¹) et émettaient 8 % des émissions directes totales de CO₂ en 2015, ce qui en fait un gisement de décarbonation significatif.

Une étude du CGDD publiée en 2020² propose une évaluation des coûts d'abattement des actions permettant d'atteindre les objectifs fixés par la SNBC dans le parc tertiaire existant en 2015 à partir de simulations du modèle ENERTER Tertiaire développé par Énergies demain et le Centre énergétique et procédés de l'École des mines de Paris (voir [Annexe 6](#)).

Ces coûts d'abattement considèrent à la fois des actions de réduction de la consommation d'énergie et une décarbonation du mix énergétique. Les simulations retiennent comme hypothèse une diminution tendancielle de la consommation unitaire de chauffage, qui serait divisée par deux entre 2015 et 2050. Le poids du chauffage dans la consommation d'énergie et dans les émissions du secteur étant plus faible que pour le résidentiel, le potentiel d'abattement est aussi associé aux autres usages énergétiques (électricité spécifique, en particulier).

D'après ces simulations, les coûts d'abattement moyens estimés liés au renforcement des mesures pour atteindre les objectifs fixés varient entre 100 € et 200 €/tCO₂. Ces résultats doivent être considérés comme des ordres de grandeur estimés sur la base des données

¹ Plan Bâtiment durable (2017), *Rapport d'activité 2017*, rapport technique.

² Vermont B. et Domergue S. (2020), *Scénarios de rénovation énergétique des bâtiments tertiaires. Quelles solutions pour quels coûts à l'horizon 2050 ?*, Document de travail, CGDD.

disponibles et des hypothèses et, ces coûts d'abattement correspondant à des coûts moyens, ils ne permettent pas de révéler l'hétérogénéité des situations, et en particulier les coûts marginaux les plus élevés permettant d'atteindre la neutralité carbone.

2. Les coûts d'abattement dans les réseaux de chaleur

Un réseau de chaleur est un système de distribution de chaleur produite de manière centralisée et permettant de desservir un grand nombre d'usagers (logements collectifs, regroupements de logements individuels, bâtiments publics ou bureaux) sur un territoire donné. Chaque réseau est composé¹ :

- d'une ou plusieurs unités de production de chaleur, à partir de combustion d'énergies fossiles (gaz ou fioul), de renouvelables (biomasse, géothermie), ou par récupération de chaleur (incinération des déchets, eaux usées, etc.) ;
- de canalisations pour le transport de la chaleur par fluide caloporteur (vapeur ou eau chaude) qui constituent le réseau de distribution primaire ;
- de sous-stations d'échange de chaleur entre le réseau de distribution primaire et le réseau de distribution secondaire (géré au niveau du bâtiment) à proximité des bâtiments desservis.

Le développement des réseaux de chaleur doit répondre aujourd'hui à un triple enjeu : l'extension des infrastructures actuelles, la création de nouveaux réseaux, et l'accroissement de l'approvisionnement de ces réseaux en chaleur renouvelable et de récupération.

2.1. Les réseaux de chaleur en France : un développement conséquent mais insuffisant au regard des objectifs à atteindre

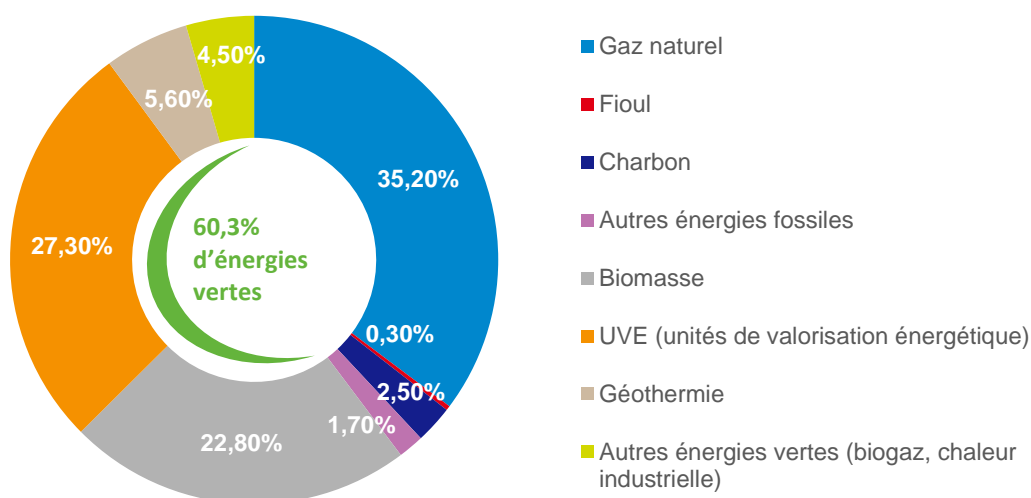
En 2020, le Syndicat national du chauffage urbain dénombre 833 réseaux de chaleur sur le territoire français², qui s'étendent sur 6 200 kilomètres, soit presque deux fois plus qu'en 2009, et livrent 25,4 TWh à plus de 43 000 bâtiments. En 2020, 60 % des énergies utilisées pour la production de chaleur en France étaient renouvelables ou de récupération (ENR & R) (voir Graphique 26), contre 31 % en 2009. Le gaz naturel représente quant à lui une part encore importante de 35 %. La mise en place du Fonds chaleur³ de l'Ademe en 2009 a significativement contribué à cette évolution, en assurant un soutien financier.

¹ D'après Cerema et MTE : voir <https://www.ecologie.gouv.fr/reseaux-chaleur> et <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/reseaux-de-chaleur-couts-et-aides-publicques>.

² SNCU (2021), *Enquête nationale sur les réseaux de chaleur et de froid*, enquête annuelle, décembre.

³ Dispositif de soutien financier des projets de production de chaleur renouvelable et de récupération, mis en place par l'Ademe en 2009.

Graphique 26 – Bouquet énergétique des réseaux de chaleur en France en 2020



Source : enquête nationale du Syndicat national de chauffage urbain (SNCU) sur les réseaux de chaleur et de froid, édition 2021

Sous les effets conjoints du verdissement des réseaux existants, à la fois par la baisse du recours aux énergies fossiles et la création de nouveaux réseaux valorisant au moins 50 % d'ENR & R (biomasse, géothermique, pompes à chaleur, etc.), le contenu carbone moyen des réseaux de chaleur a diminué de 46 % entre 2009 et 2020, en passant de 190 gCO₂/kWh à 101 gCO₂/kWh. Même en incluant les pertes d'énergie dans la distribution, ce contenu carbone le rend nettement moins émissif que le gaz naturel (234 g/kWh) ou le fioul domestique (300 gCO₂/kWh). Les réseaux les plus décarbonés ont un contenu moyen en CO₂ de 90 gCO₂/kWh (SNCU, 2020¹). Les réseaux de chaleur constituent donc un gisement potentiel significatif de réduction des émissions.

Ces dernières années ont été marquées par un accroissement du nombre de réseaux de chaleur décarbonés, c'est-à-dire fonctionnant avec au moins 50 % d'ENR & R (+11 % depuis 2017). Malgré une avancée significative dans le développement de ces réseaux et le remplacement des énergies carbonées par des ENR & R, le taux de raccordement actuel des bâtiments résidentiels et tertiaires à un réseau de chaleur en France ne s'élève qu'à 6 %, ce qui demeure nettement en deçà de la moyenne européenne (13 %) (HCC, 2021).

De plus, le rythme de croissance actuel de livraison d'ENR & R par les réseaux est insuffisant au regard des objectifs fixés dans la LTECV. Celle-ci vise 39,5 TWh de production de chaleur renouvelable en 2030, avec des objectifs intermédiaires fixés dans la trajectoire prévue par la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) de 2020 à 24,4 TWh en 2023 et entre

¹ SNCU (2021), *Enquête nationale sur les réseaux de chaleur et de froid*, op. cit.

31 TWh et 36 TWh en 2028. Au rythme actuel, 5,8 TWh manqueraient par rapport à l'objectif de 2023. Une multiplication par trois, *a minima*, du rythme de verdissement du réseau serait nécessaire à l'atteinte des objectifs de 2023 de la PPE.

2.2. Les coûts d'abattement d'un réseau de chaleur : l'exemple du réseau de la métropole de Grenoble

Cette section illustre le calcul du coût d'abattement associé à l'extension d'un réseau de chaleur existant en s'appuyant sur des données qui ont pu être obtenues sur le projet d'extension du réseau de la métropole de Grenoble. Dans le cadre de l'élaboration de son schéma directeur énergie pour 2030, Grenoble-Alpes Métropole a réalisé, avec le bureau d'études Artelys, une étude pour la construction de la transition énergétique à l'horizon 2030 comparant trois scénarios d'évolution du réseau de chauffage urbain. Les calculs présentés ici s'appuient sur cette étude. Néanmoins, toutes les valeurs nécessaires aux calculs n'étant pas disponibles, des hypothèses additionnelles ont dû être retenues et les résultats présentés ne peuvent donc pas être considérés comme une évaluation exacte du coût d'abattement associé au réseau de chaleur de Grenoble-Alpes Métropole.

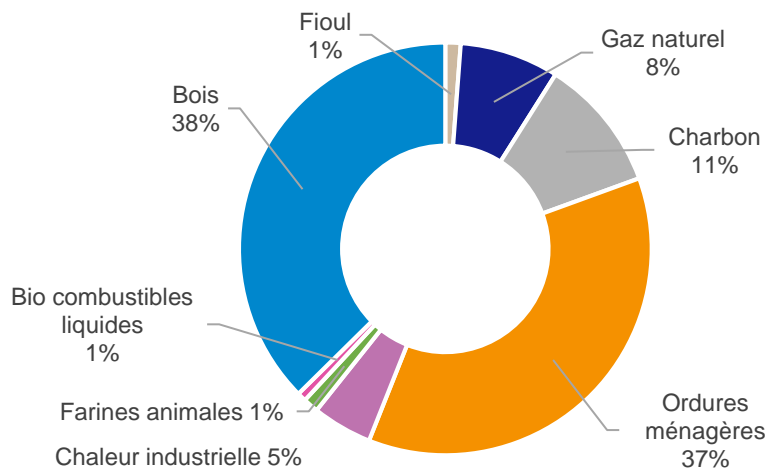
Le réseau principal de Grenoble-Alpes Métropole est particulièrement développé puisqu'il s'agit du deuxième plus gros en France. Créé en 1960, il s'étend aujourd'hui sur 170 kilomètres et 99 IRIS¹, et raccorde 100 000 équivalents-logements. La gestion du réseau de la métropole est assurée par la compagnie de chauffage intercommunale de l'agglomération grenobloise (CCIAG). En 2020, 80 % du mix énergétique du réseau grenoblois est constitué d'énergies renouvelables et de récupération (voir Graphique 27).

Au moment de l'étude en 2017, le réseau central est composé de trois principales unités de production de chaleur :

- l'unité d'incinération et de valorisation énergétique Athanor (principaux combustibles : déchets, gaz). Il est prévu que la production de cette centrale diminue d'ici 2030 ;
- la chaufferie de la Poterne (mix charbon, bois, fioul, farines animales, gaz) ;
- la chaufferie de Villeneuve (mix fioul, charbon, bois). La fin de vie de cette centrale est prévue pour 2030. Selon le scénario retenu, elle sera soit fermée soit rénovée pour devenir une centrale alimentée à 100 % en bois.

¹ Découpage d'un territoire en mailles de taille homogène, appelées « îlots » – regroupés pour l'information statistique (IRIS) – selon des critères démographiques ou géographiques.

Graphique 27 – Mix énergétique du réseau de chauffage urbain de Grenoble en 2020-2021



Source : [Compagnie de chauffage du réseau urbain de Grenoble-Alpes Métropole](#)

Par ailleurs, une nouvelle unité de production biomasse (bois, avec fioul en appoint) en remplacement d'une chaufferie au fioul était en cours de construction au moment de l'étude et a depuis été mise en service sur la saison de chauffe 2020-2021. Une installation de récupération de chaleur fatale sur le site industriel chimique de Pont-de-Claix a également été mise en route à l'automne 2018.

L'étude de cas présentée ici consiste à évaluer les coûts d'abattement associés à l'élargissement du réseau de chauffage urbain existant.

Deux projets alternatifs qui se différencient principalement par le niveau de raccordement atteint en 2030 (autrement dit, le nombre de clients raccordés) et par le niveau de décarbonation du réseau sont évalués en les comparant à un scénario contrefactuel de référence (voir Encadré 4¹).

Le coût d'abattement associé à chacun de ces projets est évalué par rapport à un même scénario contrefactuel selon lequel le réseau serait maintenu à sa taille initiale. La démarche de construction des scénarios pour le réseau de chaleur urbain en 2030, d'estimation des coûts complets de chaque option et de calcul des coûts d'abattement est détaillée en [Annexe 7](#).

¹ Voir [Annexe 7](#) pour la manière dont les scénarios ont été définis par Artelys et la métropole de Grenoble.

Encadré 4 – Scénarios d'élargissement du réseau de chaleur de Grenoble

Scénario 1 : raccordement de tout le potentiel

Dans ce premier scénario, l'extension du réseau raccorderait l'ensemble des usagers de chaleur urbaine situés dans une zone de densité supérieure à 1,5 MWh par mètre linéaire.

L'augmentation des capacités du réseau inclut la rénovation de la centrale Villeneuve en 100 % bois ainsi que la mise en place d'un projet de récupération de chaleur de la plateforme chimique du Pont-de-Claix (+ de 50 % ENR, - de 50 % gaz).

Sous ces hypothèses, le potentiel raccordable maximal serait atteint, soit 542 GWh en 2030 de plus qu'en l'absence d'extension du réseau.

Le nombre d'usagers et la consommation de chaleur augmenterait significativement pour atteindre 1 100 GWh en énergie finale desservis aux usagers en 2030.

Scénario 2 : raccordement limité à un seuil de la densité du réseau

Dans ce scénario, l'extension du réseau raccorderait dans ce scénario l'ensemble des usagers de chaleur urbaine situés dans une zone de densité supérieure à 4,5 MWh par mètre linéaire. L'augmentation des capacités du réseau inclut la rénovation de la centrale Villeneuve en 100 % bois.

Sous ces hypothèses, le potentiel raccordable atteint serait en 2030 de 300 GWh de plus qu'en l'absence d'extension du réseau.

Le nombre d'usagers et la consommation de chaleur augmenteraient pour atteindre 810 GWh en énergie finale desservis aux usagers en 2030.

Scénario de référence : pas de nouveaux raccordements du réseau

Sous le scénario contrefactuel de référence, le réseau ne serait pas étendu, il n'y a donc pas de nouveaux usagers.

Ce scénario intègre néanmoins une décarbonation tendancielle du réseau sous l'effet de la fermeture de la centrale Villeneuve en 2030 et la mise en service de la centrale Biomax, et considère une diminution de la consommation des clients actuels du chauffage urbain de 28 % (soit 222 GWh) d'ici 2030 (selon le scénario de demande énergétique du schéma directeur énergie de la métropole).

Sous ces hypothèses, la consommation globale des bâtiments raccordés aujourd'hui au réseau de chaleur diminuerait tendanciellement pour passer de 790 GWh à 568 GWh en 2030.

Les principaux résultats sont les suivants :

- L'extension du réseau de chauffage urbain couplée à la hausse du recours aux énergies renouvelables pour la production du réseau permet de réduire significativement les émissions liées au chauffage sur le territoire (entre 1,2 et 1,4 million tCO₂ cumulées sur trente ans d'après les hypothèses retenues). Du fait de la moindre part d'ENR & R intégrée dans le mix énergétique du réseau du premier projet (scénario 1), son contenu carbone est plus élevé, ce qui explique le faible écart des émissions évitées cumulées entre les deux scénarios.
- L'option consistant à raccorder l'ensemble du potentiel (scénario 1) affiche un coût d'abattement de l'ordre de 260 €/tCO₂, contre 70 €/tCO₂ pour l'option consistant à limiter l'extension du réseau aux zones les plus denses, du fait des coûts marginaux croissants des raccordements et d'un contenu carbone de la chaleur plus important dans le cas d'une production plus importante.
- L'option consistant à limiter l'extension du réseau aux zones les plus denses (scénario 2) est rentable par rapport à la trajectoire de la VAC dès 2020 ; celle consistant à raccorder l'ensemble du potentiel (scénario 1) ne le serait qu'à partir de 2027 en considérant une durée de l'investissement de trente ans, mais sa VAN socioéconomique ne rattraperait pas celle de l'autre option. Malgré sa moindre rentabilité en comparaison du scénario 2, on voit donc que le scénario 1 reste pertinent à moyen terme dans l'optique d'atteindre une décarbonation plus profonde.



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ademe (2015), *Observatoire permanent de l'amélioration énergétique du logement*.
- Ademe (2020), *Positionnement de l'Ademe sur le calcul du contenu CO₂ de l'électricité, cas du chauffage électrique*.
- Ademe (2021), *Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat*, rapport, novembre, 686 p.
- Ademe, Dorémi et Enertech (2021), *La rénovation performante par étapes. Étude des conditions nécessaires pour atteindre la performance BBC rénovation ou équivalent à terme en logement individuel*, rapport, janvier.
- Akerlof G. (1970), « *The market for "lemons": Quality uncertainty and the market mechanism* », *Quarterly Journal of Economics*, vol. 84(3), p. 488-500.
- Allibe B. (2012), *Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel français à long terme. Amélioration du réalisme comportemental et scénarios volontaristes*, thèse, École des hautes études en sciences sociales.
- Aussilloux V., Chabrol F., Giraudet L.-G. et Vivier L. (2021), « *Quelle rentabilité économique pour les rénovations énergétiques des logements ?* », *La Note d'analyse*, n° 104, France Stratégie, décembre.
- Aydin E., Kok N. et Brounen D. (2017), « *Energy efficiency and household behavior: The rebound effect in the residential sector* », *The RAND Journal of Economics*, 48(3), p. 749-782.
- Barker T., Dagoumas A. et Rubin J. (2009), « *The macroeconomic rebound effect and the world economy* », *Energy Efficiency*, 2(4), mai, p. 411-427.
- Barker T., Ekins P. et Foxon T. (2007), « *The macro-economic rebound effect and the UK economy* », *Energy Policy*, 35(10), octobre, p. 4935-4946.
- Belaïd F., Bakaloglou S. et Roubaud D. (2018), « *Direct rebound effect of residential gas demand: Empirical evidence from France* », *Energy Policy*, 115, avril, p. 23-31.
- Blaise G. et Glachant M. (2019), « *Quel est l'impact des travaux de rénovation énergétique des logements sur la consommation d'énergie ? Une évaluation ex post sur données de panel* », *Revue de l'Énergie*, n° 646, septembre-octobre, p. 46-60.
- Commission européenne (2020), *Une vague de rénovations pour l'Europe : verdir nos bâtiments, créer des emplois, améliorer la qualité de vie*, Communication de la commission au

Parlement européen, au conseil, au comité économique et social européen et au comité des régions, COM/2020/662, 14 octobre.

- Criqui P. (2021), *Les coûts d'abattement. Partie 1 – Méthodologie*, rapport de la commission sur les coûts d'abattement, France Stratégie, juin, 70 p.
- Cayla J.-M. et Osso D. (2013), *Does energy efficiency reduce inequalities? Impact of policies in Residential sector on household budget*, ECEEE Summer Study Proceedings, European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE), Toulon/Hyères, France, p. 1247-1257.
- CGDD, France Stratégie et SGPI (2022), *Évaluation socioéconomique des effets de santé des projets d'investissement public*, sous la direction de Benoît Dervaux et Lise Rochoaix, mars.
- CGDD (2015), *Un habitat plus compact et moins énergivore : pour quels coûts de construction ?*, *Études & Documents*, n° 135, Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable, décembre.
- Citepa (2022), *Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2021 – Format Secten*, rapport, juin.
- Cœuré B. (2021), *Comité d'évaluation du plan France Relance – Premier rapport*, Paris, France Stratégie, octobre, 455 p.
- Daumas L. (2020), « *Is the transition doomed to fail due to a rebound effect?* », *Regards croisés sur l'économie*, n° 25(1), janvier, p. 189-197.
- DG Trésor (2017), *Barrières à l'investissement dans l'efficacité énergétique : quels outils pour quelles économies ?*, Document de travail de la DG Trésor n° 2017/02, mars.
- Dolques G., Ledez M. et Hainaut H. (2022), *Quelles aides publiques pour la rénovation énergétique des logements ?*, rapport, I4CE, février.
- El Beze J. (2018), *Les rôles de la substitution et de l'efficacité énergétiques dans la décarbonation du parc de logements en France*, université Paris-Dauphine.
- Ezratty V., Ormandy D., Laurent M.-H., Duburcq A., Lenchi C., Boutière F. et Lambrozo J. (2017), « *Fuel poverty in France: Adapting an English methodology to assess the health cost implications* », *Indoor and Built Environment*, 26(7), juin, p. 999-1008.
- Fowlie M., Greenstone M. et Wolfram C. (2018), « *Do energy efficiency investments deliver? Evidence from the weatherization assistance program* », *The Quarterly Journal of Economics*, 133(3), août, p. 1597-1644.
- François D. (2014), « *Le parc des logements en France métropolitaine, en 2012 : plus de la moitié des résidences principales ont une étiquette énergie D ou E* », *Chiffres & statistiques*, n° 534, juillet.
- Gillingham K. T. et Palmer K. L. (2013), « *Bridging the energy efficiency gap: insights for policy from economic theory and empirical analysis* », *Review of Environmental Economics and Policy*, 8, octobre, p. 18-38.
- Gillingham K., Rapson D. et Wagner G. (2016), « *The rebound effect and energy efficiency policy* », *Review of Environmental Economics and Policy*, 10(1), p. 68-88.

- Giraudet L.-G., Bourgeois C., Quirion P. et Glotin D. (2018), *Évaluation prospective des politiques de réduction de la demande d'énergie pour le chauffage résidentiel*, rapport pour Ademe, MTES et ATEE, Cired, décembre.
- Giraudet L.-G., Houde S. et Maher J. (2018), « *Moral hazard and the energy efficiency gap: Theory and evidence* », *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 5(4), p. 755-790.
- Giraudet L.-G., Bourgeois C. et Quirion P. (2020), « *Efficacité économique et effets distributifs de long terme des politiques de rénovation énergétique des logements* », *Économie & prévision*, n° 217(1), p. 43-63.
- Glachant M., Kahn V. et Lévêque F. (2020), *Une estimation économétrique de l'impact des travaux de rénovation énergétique sur la consommation d'énergie et les émissions de carbone*, Résultats du module 2 de l'étude « Analyse économique et économétrique du dispositif des Certificats d'économies d'énergie », Mines Paris Tech – PSL, octobre.
- Haut-Commissariat au Plan (2022), « *Responsabilité climatique. La géothermie de surface : une arme puissante* », *Ouverture*, n° 12, octobre.
- Haut Conseil pour le climat (2020), *Rénover mieux : leçons d'Europe*, rapport, réponse à la saisine du gouvernement, novembre, 90 p.
- Haut Conseil pour le climat (2021), *Renforcer l'atténuation, engager l'adaptation*, rapport annuel 2021, juin, 183 p.
- Jevons S. W. (1865), *The Coal Question: An Inquiry Concerning the Progress of the Nation and the Probable Exhaustion of Our Coal Mines*, Londres, MacMillan, p. 140.
- Le Saout R., Mesqui B. et Rathle J.-P. (2022), *Le parc de logements par classe de consommation énergétique au 1^{er} janvier 2022*, Document de travail, n° 60, Observatoire national de la rénovation énergétique, juillet.
- Marmot M., Geddes I., Bloomer E., Allen J. et Goldblatt P. (2011), *The Health Impacts of Cold Homes and Fuel Poverty*, Londres, Friends of the Earth & the Marmot Review Team.
- Merly-Alpa T., Riedinger N. et Baudry M. (2020), *Le parc de logements par classe de consommation énergétique au 1^{er} janvier 2018*, Document de travail, n° 49, Observatoire national de la rénovation énergétique, septembre.
- Ministère de l'Écologie, du développement et de l'aménagement durable (2008), *Le retrait-gonflement des argiles. Comment prévenir les désordres dans l'habitat individuel ?*
- Ministère de la Transition écologique (2020), *Stratégie nationale bas-carbone. La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone*, Stratégie nationale bas-carbone, mars, 192 p.
- négaWatt (2020), *Concertation sur la réforme du DPE*, note d'analyse de l'association négaWatt, novembre, 8 p.
- négaWatt (2016), « *Qu'est-ce que la sobriété ?* », *Fil d'argent*, n° 5, hiver, p. 11-13.
- négaWatt (2021), *Scénario négaWatt 2022*, association négaWatt.

- Notaires de France (2021), *Performance énergétique : la valeur verte des logements*.
- Observatoire des métiers du BTP (2021), *Les métiers en tension dans le secteur du bâtiment*.
- Plan Bâtiment durable (2017), *Rapport d'activité 2017*, rapport technique.
- Pouget Consultant et Carbone 4 (2020), *Neutralité et logements : à quelles conditions le secteur résidentiel peut-il atteindre la neutralité carbone telle que définie dans la SNBC ?*
- Quinet A. (2019), *La valeur de l'action pour le climat. Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques*, rapport, France Stratégie, février.
- Quinet É. (2013), *L'évaluation socioéconomique des investissements publics*, Rapports & Documents, France Stratégie, septembre.
- Rénovons (2020), *Coûts et bénéfices d'un plan de rénovation des passoires énergétiques en 10 ans*, scénario Rénovons 2020, 64 p.
- RTE (2021), *Futurs énergétiques 2050. Les scénarios de mix de production à l'étude permettant d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050*, octobre.
- RTE et Ademe (2020), *Réduction des émissions de CO₂, impact sur le système électrique : quelle contribution du chauffage dans les bâtiments à l'horizon 2035 ?*, rapport, décembre, 266 p.
- Rudge J. (2011), « Indoor cold and mortality », in Braubach M., Jacob D. E. et Ormandy D. (dir.), *Environmental Burden of Disease Associated with Inadequate Housing*, WHO European Office, p. 81-95.
- Service des données et études statistiques (SDES) du MTE (2021), *Bilan énergétique de la France pour 2019*, Paris, SDES, janvier.
- Sidler O. (2022), *Du bon usage des pompes à chaleur*, rapport, Enertech, juillet.
- Syndicat national du chauffage urbain (2021), *Enquête nationale sur les réseaux de chaleur et de froid*, enquête annuelle, décembre.
- Sorrell S., Dimitropoulos J. et Sommerville M. (2009), « Empirical Estimates of the Direct Rebound Effect: A Review », *Energy Policy*, 37(4), 2009, p. 1356-1371.
- Toulouse E. et Gaspard A. (2022), *The Rise of Sufficiency in the French Energy Debate: a Comparative Analysis of Scenarios*, eceee 2022 Summer Study on energy efficiency 6 – 11 June, Presqu'île de Giens, Hyères, France.
- University of Warwick London School of Hygiene et Tropical Medicine (2003), *Statistical Evidence to Support the Housing Health and Safety Rating System*, t. I, Project Report, Londres, Office of the Deputy Prime Minister, 33 p.
- Vermont B. et Domergue S. (2020) *Scénarios de rénovation énergétique des bâtiments tertiaires. Quelles solutions pour quels coûts à l'horizon 2050 ?*, Document de travail, CGDD, 105 p.
- Vogt-Schilb A., Meunier G. et Hallegate S. (2018), « When starting with the most expensive option makes sense: Optimal timing, cost and sectoral allocation of abatement investment », *Journal of Environmental Economics and Management*, 88, mars, p. 210-233.



ANNEXES



ANNEXE 1

MEMBRES DE LA COMMISSION

Président

Patrick Criqui, directeur de recherche émérite CNRS, UMR GAEL, université Grenoble Alpes

Secrétariat

Bérengère Mesqui, coordinatrice, France Stratégie

Stéphane Crémel, Direction générale du Trésor

Maxime Gérardin, France Stratégie

Olivier de Guibert, Commissariat général au développement durable

Silvano Domergue, Commissariat général au développement durable

Boris Le Hir, France Stratégie

Aude Pommeret, France Stratégie

Alice Robinet, France Stratégie

Membres

Émilie Alberola, directrice Innovation et Recherche, Eco'Act

Yasmine Arsalane, Agence internationale de l'énergie

Emmanuel Combet, Ademe

Dominique Bureau, délégué général, Conseil économique pour le développement durable (CEDD)

Antoine Dechezleprêtre, OCDE

Jean-Guy Devezeaux de Lavergne, Institut I-tesé, CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives)

Matthieu Glachant, professeur d'économie, Mines Paristech

Joseph Hajjar, Direction générale de l'Énergie et du Climat

Jan Horst Keppler, professeur d'économie, université Paris-Dauphine

David Marchal, Ademe

Yves Marignac, association négaWatt

Andrew Prag, Agence internationale de l'énergie (AIE)

Yannick Pérez, CentraleSupélec

Cédric Philibert, université Paris-Dauphine

Philippe Quirion, CNRS-Cired



ANNEXE 2

LES DIFFÉRENTS PÉRIMÈTRES DES ÉMISSIONS

Les standards internationaux classent les bilans d'émissions de GES des bâtiments, selon leur origine (directe ou indirecte), en trois catégories appelées « scope¹ » (Tableau A1).

Tableau A1 – Les sources d'émissions par scope dans le secteur du bâtiment

Scope 1 Émissions directes issues de l'exploitation des bâtiments	Scope 2 Émissions indirectes associées à l'énergie	Scope 3 Autres émissions indirectes
<ul style="list-style-type: none">• Combustion d'énergie fossile dans les bâtiments• Fuites de fluides frigorigènes au sein des bâtiments	<ul style="list-style-type: none">• Production de l'énergie utilisée dans les bâtiments (électricité)• Production de chaud/froid via des réseaux de chaleur	<ul style="list-style-type: none">• Construction des bâtiments• Fabrication des matériaux pour la construction ou la rénovation

Source : France Stratégie

Dans les approches sectorielles, il est nécessaire de bien définir les émissions prises en compte dans chaque secteur et d'assurer la cohérence de la comptabilité de ces émissions entre les secteurs pour ne pas compter certaines émissions plusieurs fois ou, à l'inverse, ne pas en omettre. Par exemple, si l'on retient le Scope 1 uniquement, les émissions liées à la production d'électricité utilisée dans les bâtiments résidentiels et tertiaires ne sont pas comptabilisées dans le secteur « bâtiment » mais elles doivent l'être dans le secteur « production d'énergie ». Dans ce cas, les émissions sont comptabilisées selon une approche « lieu de combustion/d'émission ». Comptabiliser l'intégralité des GES émis par l'usage et la production des bâtiments (*i. e.* Scopes 1, 2 et 3) constitue une approche « cycle de vie ».

¹ Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol).

Le Scope 1 est l'approche traditionnellement retenue pour comptabiliser à l'instant t les émissions du secteur du bâtiment, et c'est sur ce périmètre que sont fixés les objectifs de réduction d'émissions de la SNBC. Pour suivre le budget carbone du secteur, le Scope 1 constitue donc un périmètre adéquat de comptabilisation des émissions, dans le sens où ce choix comptable est réalisé en cohérence avec les autres secteurs (*i. e.* les émissions des Scopes 2 et 3 sont bien comptabilisées dans les autres secteurs).

En revanche, ce périmètre est trop restrictif pour le calcul du coût d'abattement, puisque l'impact d'une action donnée sur les émissions peut s'étendre au-delà du périmètre du secteur. Il est ainsi important de tenir compte des variations d'émissions induites dans les Scopes 2 voire 3 dans le calcul du coût d'abattement des actions de réduction d'émissions de GES. Par exemple, un changement de vecteur énergétique peut entraîner des émissions supplémentaires via un éventuel report des émissions sur le secteur de production de la nouvelle source énergétique. Plus précisément, si on s'intéresse au cas de l'électrification d'un usage, les émissions liées au surplus de production d'électricité doivent être prises en compte dans le coût d'abattement, au risque sinon de surévaluer les réductions réelles d'émissions liées à l'action.

Enfin, les émissions de GES des phases de construction et de démolition sont, à ce jour, plus difficilement mesurées. Comme pour la question de l'interdépendance avec le secteur producteur d'énergie, le choix du périmètre des émissions (usage ou cycle de vie) doit être cohérent entre tous les secteurs.



ANNEXE 3

COMPARER DIFFÉRENTS PARCOURS TYPES DE RÉNOVATIONS : ADEME, DORÉMI ET ENERTECH (2021)

L'étude de l'Ademe, Dorémi et Enertech (2021) compare le niveau de consommation *ex post* atteint par cinq parcours de rénovation : partielle, partielle renforcée, semi-globale, quasi complète, complète et performante. Seuls les deux derniers parcours types permettent de passer sous le seuil de 80 kWhEP/m²_{SRT}/an du niveau BBC rénovation.

Tableau A2 – Niveau de consommation atteint après rénovation du parc selon le parcours de rénovation

Rénovation	Principales caractéristiques	Niveau de consommation post-rénovation (moyenne sur le parc < 1982)
Partielle	<ul style="list-style-type: none"> • 5 étapes successives de travaux unitaires (gestes) • Les 6 postes ne sont pas tous traités • Ne prend pas en compte l'objectif de performance à terme (logique d'entretien ou de remplacement) • N'anticipe pas les interfaces et interactions, ni le financement des travaux ultérieurs 	215,9 kWhEP/m ² shab.an (115 à 312 kWhEP/m ² shab.an)
Partielle renforcée	<ul style="list-style-type: none"> • Plusieurs étapes traitant les 6 postes de travaux • Gestes • N'anticipe pas les contraintes techniques ou financières liées aux travaux ultérieurs • Vise un niveau BBC pour chaque poste 	113,5 kWhEP/m ² shab.an (69 à 142 kWhEP/m ² shab.an)
Semi-globale	<ul style="list-style-type: none"> • 3 ou 4 étapes au maximum • Feuille de route • Vise le niveau BBC • La première étape regroupe le plus de postes de rénovation (prise en compte des interfaces et interactions), un poste par étape suivante 	91,7 kWhEP/m ² shab.an (61 à 135 kWhEP/m ² shab.an)

Rénovation	Principales caractéristiques	Niveau de consommation post-rénovation (moyenne sur le parc < 1982)
Quasi complète	<ul style="list-style-type: none">• 2 étapes• 1 poste de travaux est reporté dans le temps• Feuille de route : prise en compte des interfaces et interactions• Vise le niveau BBC	75,6 kWhEP/m ² shab.an (54 à 97 kWhEP/m ² shab.an)
Complète et performante	<ul style="list-style-type: none">• 1 seule étape• Vise le niveau BBC• Feuille de route : traite les 6 postes de travaux en tenant compte des interfaces et interactions entre ces postes	71 kWhEP/m ² shab.an (43 à 97 kWhEP/m ² shab.an)

Note : shab = surface habitable.

Source : Ademe, Dorémi et Enertech (2021), [La rénovation performante par étapes. Étude des conditions nécessaires pour atteindre la performance BBC rénovation ou équivalent à terme en logement individuel](#), rapport, janvier



ANNEXE 4

COMPLÉMENTS SUR LE CALCUL DES COÛTS D'ABATTEMENT DES ACTIONS DE RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE AVEC RES-IRF

1. Hypothèses structurantes

1.1. Segmentation du parc dans Res-IRF

Chaque logement est caractérisé par un quadruplet (q, e, d, r) avec :

- **q la performance énergétique** : $(q_i$ avant rénovation, q_f après rénovation) ;
- **e l'énergie de chauffage principale** : $(e_i$ avant rénovation, e_f après rénovation) ;
- **s la surface** : elle est prise en compte comme une fonction de d , définie comme le produit entre la surface moyenne observée pour chaque statut d'occupation et le type de logement :

Tableau A3 – Surface moyenne observée selon le statut d'occupation du ménage et le type de logement retenu dans Res-IRF

Statut d'occupation	Type de logement	Surface s (m ²)
Propriétaire occupant	Individuel	109,5
	Collectif	74,3
Propriétaire bailleur	Individuel	87,1
	Collectif	53,5
Occupant de logement social	Individuel	77,8
	Collectif	63,3

Champ : France métropolitaine.

Source : Fidéli 2018

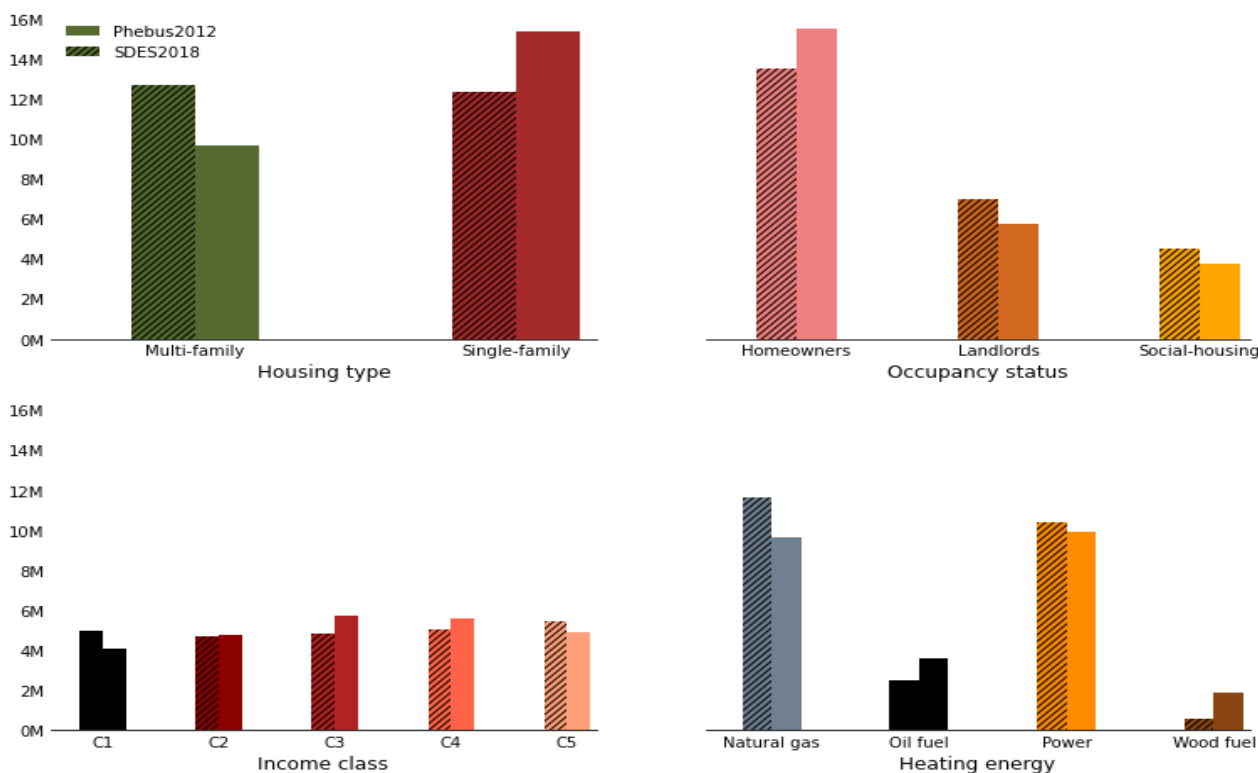
- r la classe de revenu des occupants, différenciée par décile de revenu de l'Insee :

Tableau A4 – Revenu disponible moyen des ménages (€/an) retenu dans Res-IRF

Décile	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
Revenu	13,628	20,391	24,194	27,426	31,139	35,178	39,888	454	54,309	92,735

Source : Fidéli 2018/Périmètre : France Métropolitaine

Graphique A1 – Répartition des effectifs des logements selon l'image du parc en fonction du statut d'occupation, le type de logement, l'énergie de chauffage et le revenu des ménages (2018)



Source : Cired

1.2. Les coûts de la rénovation

Tableau A5 – Matrices de coût unitaire de transition sur la performance énergétique (gauche) et de changement de vecteur énergétique (en €/m² TTC, hors subventions, et après TVA à 5,5 %)

		DPE final					
		F	E	D	C	B	A
DPE initial	G	76	136	201	271	351	442
	F		63	130	204	287	382
	E			70	146	232	331
	D				79	169	271
	C					93	199
	B						110

		Vecteur final			
		Élect.	Gaz naturel	Fioul domestique	Bois
Vecteur initial	Élect.	0	70	100	120
	Gaz	55	0	80	100
	Fioul	55	59	0	100
	Bois	55	50	80	0

Source : Giraudet et al. (2020), « *Efficacité économique et effets distributifs...* », op. cit., modèle Res-IRF

Les coûts intangibles, ou « résidus », sont ajoutés au coût financier dans Res-IRF par le biais d'un paramètre de calage qui confronte la décision des agents dans le modèle aux choix de rénovation observés. Ce paramètre reflète ainsi l'écart entre la décision qui devrait être prise et la décision effectivement observée dans la réalité. Dans ces travaux de calibrage du modèle Res-IRF, le Cired abouti à une estimation des coûts intangibles de l'ordre de 50 % à 60 % des coûts d'investissement.

1.3. La consommation d'énergie

La consommation d'énergie réelle (telle qu'indiquée sur les factures d'énergie) est calculée en appliquant un coefficient d'intensité d'utilisation des infrastructures de chauffage par les occupants (*IU*). Celui-ci désigne le ratio entre consommation réelle et conventionnelle. Il évolue sous l'influence de la part budgétaire allouée aux dépenses de chauffage :

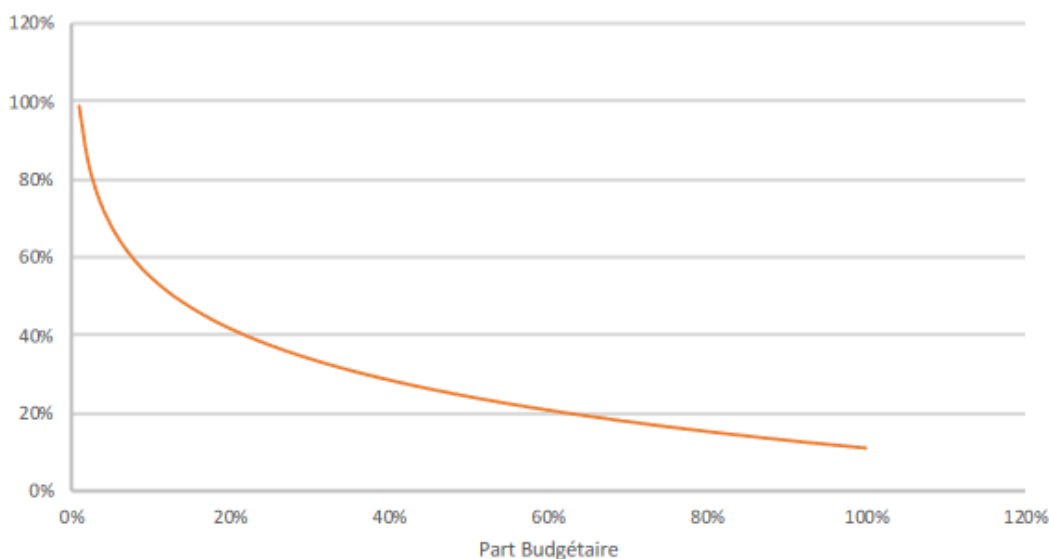
$$Part\ budgétaire = \frac{Prix\ énergie\ TTC * Surface * Consommation\ conventionnelle}{Revenu}$$

L'intensité d'utilisation est définie dans Res-IRF comme une fonction iso-élastique négative de la part budgétaire consacrée au chauffage. Elle est fondée sur l'estimation de Cayla et Osso (2013)¹ :

$$IU = -0,191 \times \log(Part\ budgétaire) + 0,1105$$

¹ Cayla J.-M. et Osso D. (2013), *Does energy efficiency reduce inequalities? Impact of policies in Residential sector on household budget*, ECEEE Summer Study Proceedings, European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE), Toulon/Hyères, p. 1247-1257.

Graphique A2 – Intensité d'utilisation des équipements de chauffage en fonction de la part budgétaire allouée au chauffage par le ménage



Source : hypothèses Cired

1.4. Contenu carbone des vecteurs énergétiques

Tableau A6 – Contenu carbone des vecteurs énergétiques (jusqu'à 2030)

Contenu carbone des énergies (g/CO ₂ /kWh)			
Électricité	Gaz naturel	Fioul	Bois
147	227	325	3

Source : hypothèses Cired, d'après la Base Carbone® de l'Ademe

Le contenu carbone de l'électricité est supposé constant jusqu'à 2030 puis décroissant linéairement jusqu'à devenir nul en 2050.

1.5. Trajectoires des prix de l'énergie

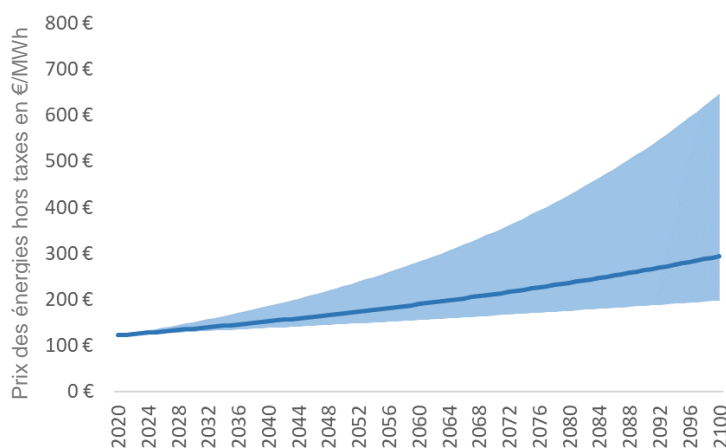
Compte tenu de la forte incertitude sur l'évolution de ces prix, des plages autour des hypothèses centrales ont été retenues pour les tests de sensibilité des résultats. Pour chacune de ces plages, la borne inférieure est définie par un taux de croissance annuel inférieur de 0,5 point au scénario central et la borne supérieure par un taux de croissance annuel supérieur de 1 point au scénario central (voir Graphiques A3, A4 et A5).

Tableau A7 – Prix des énergies et taux de croissance annuel

Énergie	Prix TTC 2018 (€/kWh)	Prix HT 2018 (€/kWh)	Taux de croissance prix HT (%/an)
Électricité	0.182	0.120	1.10 %
Gaz naturel	0.085	0.061	1.42 %
Fioul	0.091	0.061	2.2 %
Bois-énergie	0.067	0.056	1.20 %

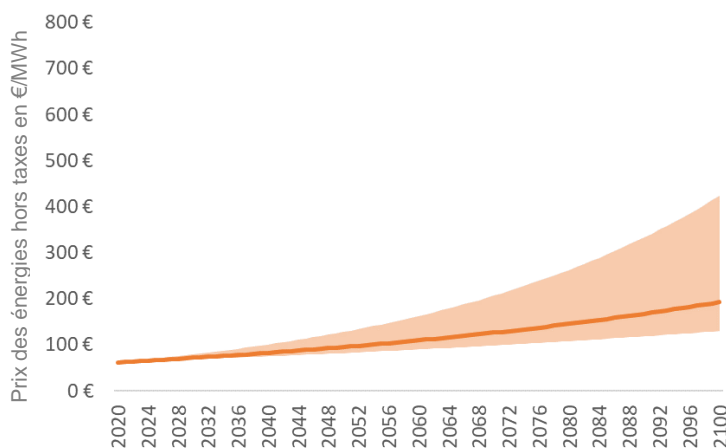
Sources : hypothèses du Cired à partir de données CRE, Ademe, Cired

Graphique A3 – Prix de l'électricité (HT)



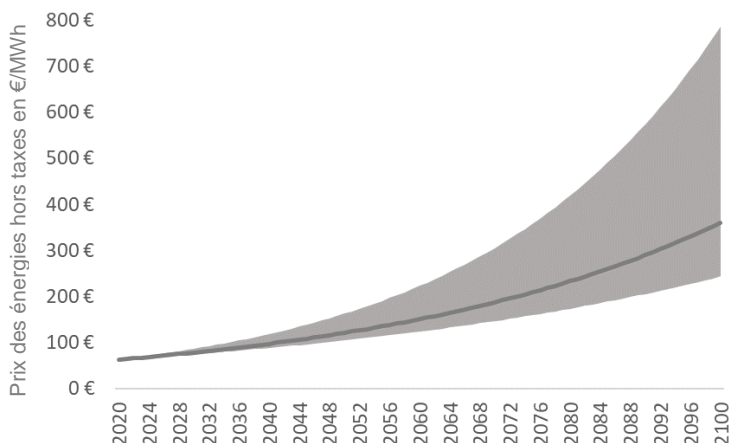
Source : Cired

Graphique A4 – Prix du gaz naturel (HT)



Source : Cired

Graphique A5 – Prix du fioul domestique (HT)



Source : Cired

1.6. Progrès technique

Dans le scénario central, les coûts de la rénovation sont considérés constants (*i. e.* taux de croissance de 0 %). Des hypothèses assez larges sur leur évolution sont en revanche réalisées en analyse de sensibilité :

- dans un scénario optimiste, il est supposé que le déploiement à grande échelle des travaux de rénovation conduise à une sorte « d'industrialisation » de ceux-ci et à un progrès technique engendrant une décroissance des coûts de l'ordre de 1 % par an ;
- à l'inverse, dans un scénario pessimiste, il est supposé que la massification des chantiers de rénovation aboutisse à des goulots d'étranglement se manifestant par un manque de compétences disponibles croissant ainsi que par des tensions de plus en plus fortes sur le marché du travail se traduisant par une croissance du coût de 1 % par an.

Le modèle Res-IRF considère un progrès technique de 10 % sur les rénovations et de 25 % sur les constructions neuves à chaque doublement des volumes.

2. Calcul des coûts d'abattement

Pour rappel, les coûts d'abattement en budget carbone sont calculés selon la formule :

$$CA_t = \frac{CINV_0 + \sum_{i=t}^{t+H} \frac{(Coûts_i - Bénéfices_i)}{(1+r)^i}}{\sum_{i=t}^{t+H} \Delta E_i}$$

avec :

- r le taux d'actualisation social, fixé à 4,5 % ;

- H la durée de vie d'une rénovation ;
- $CINV_0$ le coût d'investissement initial ;
- ΔE_i les émissions de CO₂ évitées en i .

Les coûts d'abattement sont composés : du coût de la rénovation, de coûts intangibles susceptibles d'augmenter le coût de la rénovation, du coût du changement de vecteur énergétique, d'éventuels frais de maintenance, d'économies de facture énergétique, du coût d'opportunité des fonds publics (COFP) et de cobénéfices sanitaires. Ces coûts sont rapportés à un volume d'émissions de CO₂ évitées.

La formule du coût d'abattement ajusté à la VAC est la suivante :

$$CA_i = - \frac{CINV_0 + \sum_{t=0}^{N-1} \frac{Coûts_{i,t} - Bénéfices_{i,t}}{(1+r)^t}}{\frac{\sum_{t=0}^{N-1} \frac{\Delta E_{i,t} \times VAC_t}{(1+r)^t}}{VAC_0}}$$

Le coût d'abattement ajusté à la VAC est inférieur au coût d'abattement en bilan carbone.

2.1. Économies sur la facture énergétique

Lors d'une transition, le changement de DPE et d'énergie principale de chauffage modifie à la fois la consommation conventionnelle et l'intensité d'utilisation du ménage concerné. La consommation d'énergie physique après rénovation diminue par rapport à l'état initial :

Consommation d'énergie en t , état initial : $E_t^i(q_i, e_i, d, r) = Conv(q_i) * IU_t(q_i, e_i, d, r)$

Consommation d'énergie en t , état final : $E_t^f(q_f, e_f, d, r) = Conv(q_f) * IU_t(q_f, e_f, d, r)$

On en déduit directement les économies de facture énergétique à partir des économies d'énergie physiques :

Économies de facture énergétique en t : $\Delta FactureEner_t^{i,f}(q_i, q_f, e_i, e_f, d, r) = E_t^i(q_i, e_i, d, r) * P_t(e_i) - E_t^f(q_f, e_f, d, r) * P_t(e_f)$

2.2. Coût d'opportunité des fonds publics

Les coûts et bénéfices sont valorisés hors taxes et subventions. La variation des recettes et des dépenses fiscales est uniquement prise en compte via le COFP.

Sans indication particulière sur la mise en œuvre d'une politique de rénovation du parc résidentiel, seule la variation de TVA collectée sur l'investissement de rénovation et de

taxes énergétiques (hors taxe carbone) perçues par l'État est prise en compte dans le calcul du COFP. On a alors :

$$\text{Différence de taxes payées en } t : \Delta Taxes_t^{i,f}(q_i, q_f, e_i, e_f, d, r) = E_t^i(q_i, e_i, d, r) * Taxes_t(e_i) - E_t^f(q_f, e_f, d, r) * Taxes_t(e_f)$$

$$\text{COFP en } t : COFP_t^{i,f}(q_i, q_f, e_i, e_f, d, r) = \Delta Taxes_t^{i,f}(q_i, q_f, e_i, e_f, d, r) * 20 \%$$

À l'année de rénovation, la variation des recettes de TVA sur l'opération de rénovation par rapport au scénario contrefactuel est également ajoutée.

2.3. Cobénéfices de santé

L'estimation des bénéfices de santé permis par la rénovation énergétique se fonde sur la méthodologie développée dans CGDD, France Stratégie et SGPI (2022), présentée dans l'Encadré A1.

Encadré A1 – Méthode d'évaluation des bénéfices de santé des programmes de rénovation énergétique (CGDD, France Stratégie et SGPI, 2022)

La première étape de la méthode consiste à identifier les logements dont les occupants sont susceptibles de souffrir de problèmes de santé liés à l'inefficacité énergétique. Le groupe de travail recommande de retenir tout logement ayant une consommation finale théorique supérieure à un seuil fixé à 378 kWh/m²/an¹ pour les trois usages pris en compte dans l'ancien DPE (chauffage, ECS, climatisation). Ces logements représenteraient 22 % des logements étiquetés F et 34 % des logements étiquetés G², soit 1,3 million de logements en France.

L'étape suivante détermine le nombre annuel de logements qui seraient effectivement concernés par un événement de santé en l'absence de rénovation. Elle se base sur l'application d'une probabilité annuelle qu'un occupant subisse un événement de santé. Les travaux anglais à l'origine du système HHSRS l'estiment à 1/18 dans les logements ayant une consommation d'énergie finale supérieure à 378 kWhEF/m²/an³. Elle est obtenue en associant des données sur les conditions

¹ En énergie finale (EF).

² D'après les calculs du MTE/SDES pour le groupe de travail, à partir de la base DPE (ancienne définition) de l'Ademe.

³ Marmot M., Geddes I., Bloomer E., Allen J. et Goldblatt P. (2011), *The Health Impacts of Cold Homes and Fuel Poverty*, Londres, Friends of the Earth & the Marmot Review Team.

de logement à des données sur la santé des occupants. Les travaux d'Ezratty *et al.* (2018)¹ ont proposé de différencier cette probabilité en fonction du revenu des occupants. À ce titre, il est recommandé, lorsque l'information est disponible, de différencier les probabilités par décile de revenu comme dans le Tableau A8.

Tableau A8 – Probabilité de survenue, dans les douze mois, d'une maladie causée par l'inefficacité énergétique du logement, selon le revenu du ménage occupant

Revenu des ménages		Probabilité de survenue d'un événement délétère		
Déciles 1 à 3	En dessous du seuil de pauvreté	1/4	1/7	1/18
	Au-dessus du seuil de pauvreté	1/20		
Déciles 4 à 10		1/320		

Note : pour rappel, les niveaux du seuil de pauvreté et de décile 3 pour les ménages occupants sont respectivement de 12 756 €/an et 21 670 €/an pour l'année 2018.

Sources : CGDD, France Stratégie et SGPI (2022) adapté d'Ezratty *et al.* (2018) par A. Duburcq

Ces événements de santé sont ensuite répartis par types de pathologies (à partir d'Ezratty *et al.*, 2018) – 3 % constituent des décès (*i. e.* un syndrome coronaire aigu suivi du décès), 17 % des syndromes coronaires aigus non suivis de décès, 30 % des infections sévères de l'appareil respiratoire et 50 % des pneumonies traitées en ville.

En troisième étape, trois types de coûts sont associés à ces événements de santé² :

- Les **coûts médicaux** (coûts marchands) sont obtenus à partir du coût moyen annuel des cas prévalents³ issu de la cartographie des pathologies et des dépenses de l'Assurance maladie⁴ par la durée de la maladie estimée par le groupe de travail.

¹ Travaux du service des études médicales d'EDF réalisés avec la R&D d'EDF, l'université de Warwick et Cemka.

² La durée de chaque maladie est estimée par le groupe de travail à partir du ratio entre la somme des cas prévalents (nombre de malades à une date donnée) et la somme des cas incidents (nombre de cas nouvellement atteints à une date donnée) (tous âges confondus) qui sont directement fournis par les données du Global Burden of Disease (GBD) 2018 pour la France mises à disposition par l'OMS.

³ On parle de cas « prévalents » pour référer au nombre total de malades à une date donnée au sein d'une population.

⁴ Voir <https://assurance-maladie.ameli.fr/etudes-et-donnees/cartographie-depenses-remboursees-par-pathologie-2018>

- Les **pertes de bien-être associées à la morbidité** (coûts non marchands) sont estimées en valorisant des années de vie perdues à cause d'une incapacité par la valeur tutélaire d'une année de vie égale à 131 000 euros₂₀₁₈ (Quinet, 2013¹).
- Celles-ci sont obtenues à partir des données du Global Burden of Disease (GBD) pour la France, qui permettent de calculer la durée de la maladie et un coefficient d'incapacité reflétant sa sévérité (compris entre 0, en cas de parfaite santé, et 1, en cas de décès).
- Le **coût social de mortalité** (coût non marchand) est égal à la valeur tutélaire d'une vie statistique de 3,43 millions d'euros₂₀₁₈ (Quinet, 2013).

Pondérer ces coûts par les parts d'occurrence de chaque pathologie permet d'estimer un coût moyen théorique d'un effet de santé attribuable aux températures intérieures basses. En multipliant ce coût par la probabilité d'un événement de santé dans un logement, on obtient finalement un coût annuel moyen de santé par logement.

Dès lors que la rénovation est suffisamment significative et permet au logement d'atteindre un niveau de performance énergétique correspondant au moins à l'étiquette C, il est admis que les effets sur la santé sont nuls. Le coût de santé est alors annulé.

Source : CGDD, France Stratégie et SGPI (2022), *Évaluation socioéconomique des effets de santé des projets d'investissement public*, rapport, sous la direction de Benoît Dervaux et Lise Rochaix, mars

Les principaux coûts et paramètres retenus dans les simulations sont recensés dans le Tableau A9 page suivante.

¹ Quinet É. (2013), *L'évaluation socioéconomique des investissements publics*, Rapports & Documents, France Stratégie, septembre.

Tableau A9 – Paramètres retenus pour l'estimation des gains de santé

Étiquette DPE	Part des logements présentant un risque pour la santé, tous vecteurs énergétiques confondus ($p_{logement}$)
F	34 %
G	22 %
Décile de revenu	Probabilité d'occurrence d'un événement de santé ($prob_sante$)
1 à 3 (*)	1/7
4 à 10	1/320
Coûts moyens de santé (**) ($coût_moy_sante$) :	134 622 €

dont : coût social lié à la mortalité : 102 840 €
coûts médicaux : 7 275 €
pertes de bien-être liées à la maladie : 24 507 €

(*) L'application des probabilités d'occurrence d'un événement de santé ne différencie pas les ménages appartenant aux déciles 1 à 3 et ceux dont le revenu est situé sous le seuil de pauvreté.

(**) Correspond à la moyenne des coûts par cas pour chaque pathologie retenue dans CGDD, France Stratégie et SGPI (2022), pondérés par leur part d'occurrence respective (pour rappel : 3 % de décès, 17 % de syndromes coronaires aigus non suivis du décès, 30 % d'infections sévères de l'appareil respiratoire et 50 % de pneumonies traitées en ville).

Source : à partir de CGDD, France Stratégie et SGPI (2022), [Évaluation socioéconomique des effets de santé...](#), op. cit.

Les gains de santé permis par les rénovations sont finalement obtenus par la différence entre les coûts de santé espérés avant ($t - 1$) et après rénovation (t). On considère que la rénovation aboutit à l'annulation du risque d'événement de santé (*i. e.* la probabilité devient nulle).

$$\text{Gains de santé en } t = p_{logement}_{t-1} \times prob_sante_{t-1} \times coût_moy_sante$$

Les coûts médicaux et la valeur statistique de la vie humaine sont donnés pour 2018. Il est supposé qu'ils croissent annuellement au même taux que le PIB/hab, soit 1 %.

2.4. Émissions de CO₂ évitées

Les émissions de CO₂ évitées se calculent de la façon suivante :

$$\text{Émissions de CO}_2 \text{ évitées en } t : \Delta CO2_t^{i,f}(q_i, q_f, e_i, e_f, d, r) = E_t^i(q_i, e_i, d, r) * \text{ContenuCO2}_t(e_i) - E_t^f(q_f, e_f, d, r) * \text{ContenuCO2}_t(e_f)$$

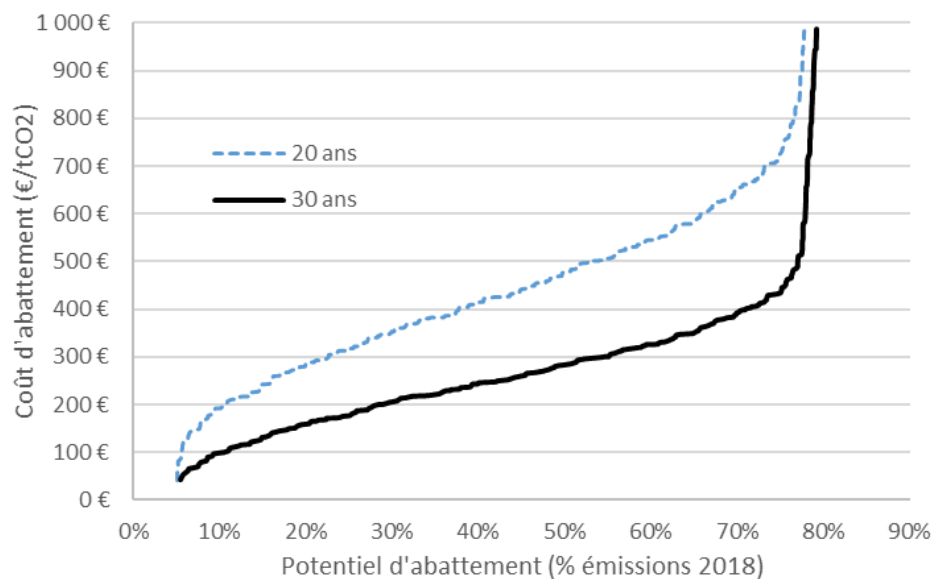


ANNEXE 5

ANALYSES DE SENSIBILITÉ DES SIMULATIONS RES-IRF

L'effet qualité, associé ici à la durée des bénéfices liés à la rénovation, apparaît comme la plus forte source d'incertitude sur les résultats. Ce résultat est aussi lié au fait que c'est le paramètre sur lequel la variation appliquée a été la plus forte (Graphique A6).

Graphique A6 – Sensibilité du coût d'abattement à la durée de vie d'une rénovation vers A

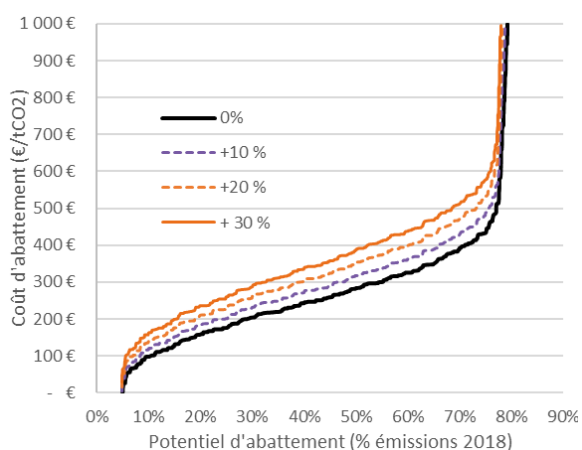


Source : modèle Res-IRF, Cired

Afin de tenir compte des incertitudes sur les coûts de rénovation, les calculs des coûts d'abattement sont réalisés sur la base d'une plage de coûts compris entre les montants retenus pour le modèle Res-IRF et des montants jusqu'à 30 % supérieurs (voir Graphique A7). L'effet sur le coût d'abattement qui en résulte est relativement important. Dans certains cas, des analyses de sensibilité pourraient aussi être réalisées sur l'intégration de différentiels de coûts de maintenance suite à un changement de vecteur énergétique.

L'anticipation d'un progrès technique futur dans le secteur du bâtiment est susceptible d'impacter le coût d'abattement futur d'une action, bien que ces progrès soient en pratique restés faibles ces dernières années. Des gains de productivité permettraient une diminution du CAPEX et donc une diminution du coût marginal social associé à un certain potentiel d'abattement des émissions de CO₂ (Graphique A8). Ces effets peuvent cependant être contrecarrés par l'apparition de tensions sur le marché du travail en cas de pénurie de main-d'œuvre, ou encore à la suite d'une hausse des prix des matériaux.

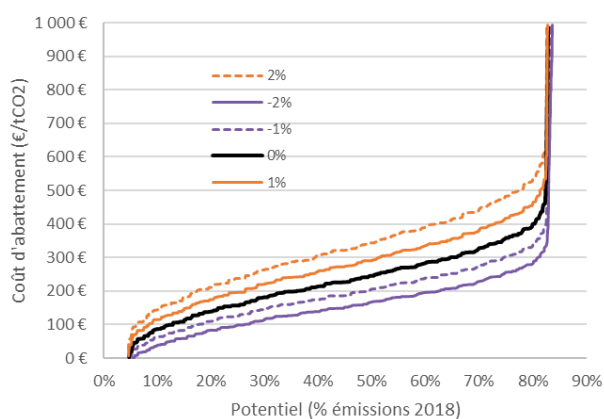
Graphique A7 – Sensibilité du coût d'abattement au coût de rénovation de l'enveloppe vers A



Note : le coût de rénovation de l'enveloppe est multiplié par un facteur d'augmentation de 10 %, 20 % ou 30 %, de sorte à prendre en compte l'incertitude sur les coûts cachés.

Source : Res-IRF, Cired

Graphique A8 – Sensibilité du coût d'abattement au progrès technique ou à l'apparition de tensions sur le marché du travail

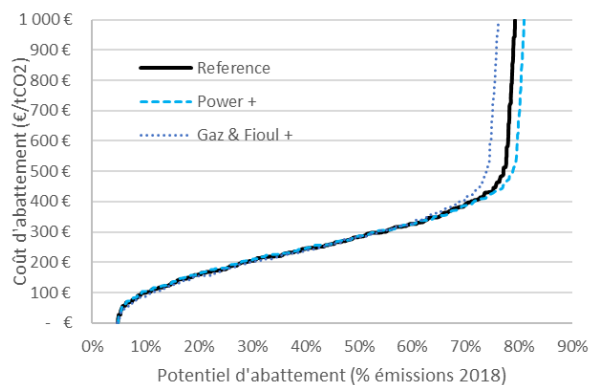


Note : les coûts d'investissement évoluent entre -2 % (en cas de progrès technique) et +2 % (en cas de tensions sur le marché du travail) par an.

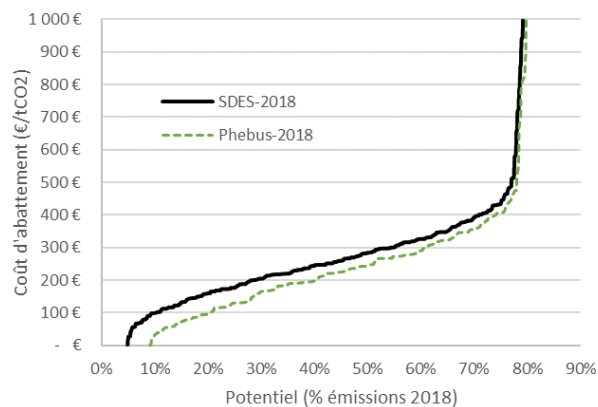
Source : Res-IRF, Cired

Le coût d'abattement semble moins impacté par les autres sources d'incertitude. Les coûts situés en queue de distribution (au-delà de 500 €/tCO₂ dans le cas d'une transition vers le DPE final A) sont cependant sensibles aux différentes trajectoires étudiées des prix de l'énergie (voir Graphique A9). Concernant l'image du parc, le stock de logements peu performants, qui apparaît plus important dans les données de l'enquête Phébus, tire les coûts d'abattement à la baisse, par rapport aux coûts obtenus avec les données du SDES (voir Graphique A10).

Graphique A9 – Sensibilité du coût d'abattement aux prix des énergies pour la rénovation vers A



Graphique A10 – Sensibilité du coût d'abattement à l'image du parc en 2018 pour la rénovation vers A



Note : le prix du bois de chauffage demeure constant dans les deux cas.

Source : Res-IRF, Cired

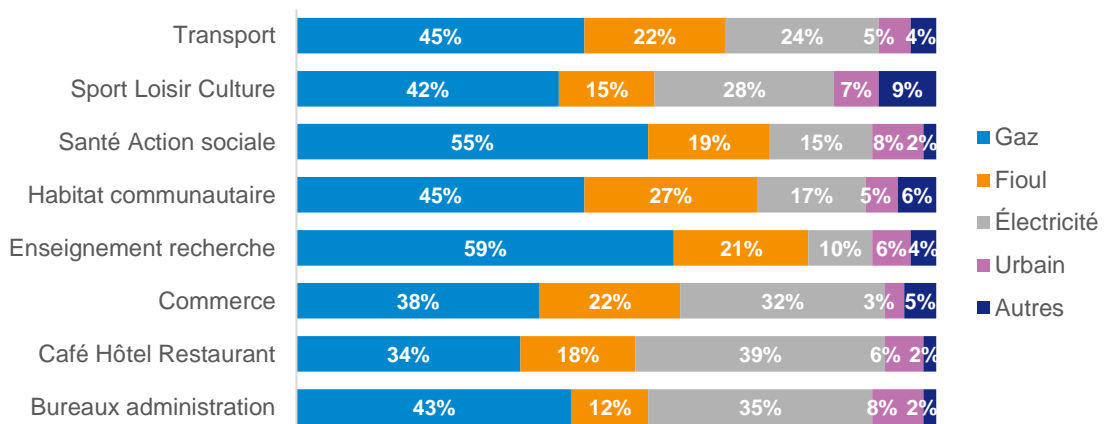


ANNEXE 6

LES COÛTS D'ABATTEMENT DU PARC TERTIAIRE (CGDD, 2020)

Une étude du CGDD¹ consacrée à la rénovation énergétique des bâtiments tertiaires se fonde sur une reconstitution statistique du parc tertiaire français, opérée à partir du modèle de simulation ENERTER Tertiaire développé par Énergies demain et le Centre énergétique et procédés de l'École des mines de Paris. Cette modélisation révèle des disparités dans la répartition de la consommation d'énergie de chauffage du parc tertiaire selon le vecteur énergétique (gaz, fioul, électricité, réseaux de chaleur urbains) et la branche d'activité (bureaux, commerces, santé et action sociale, par exemple) (Graphique A11).

Graphique A11 – Parts de marchés surfaciques des énergies par branche d'activité du parc tertiaire en 2010



Note : les « autres » sources d'énergie regroupent le GPL, la biomasse, l'énergie solaire et le charbon.

Source : France Stratégie, d'après CGDD, 2020

¹ Vermont B. et Domergue S. (2020), *Scénarios de rénovation énergétique des bâtiments tertiaires. Quelles solutions pour quels coûts à l'horizon 2050 ?*, Document de travail, CGDD, 105 p.

Chaque branche est désagrégée en différents « bâtiments types », selon l'activité, la taille et la date de construction, ce qui permet une analyse fine des gisements d'économies d'énergie. Le modèle de simulation est centré autour d'une fonction de « passage à l'acte », qui identifie chaque action possible en fonction des possibilités de travaux sur l'enveloppe ou les systèmes de chauffage dans le parc tertiaire.

L'évaluation compare, pour chaque « bâtiment type », l'impact d'un scénario de rénovation du parc à partir des mesures de politique publique envisagées en 2018 (AME¹) à des scénarios dans lesquels ces mesures seraient renforcées (AMS²) dans un objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050, par rapport à un scénario de référence sans mesures. Les scénarios avec mesures supplémentaires diffèrent selon qu'une hypothèse de décarbonation des énergies à l'horizon 2050 soit intégrée (AMS1 et AMS2) ou non (AMSDec0). Selon les scénarios, le coût de la décarbonation du mix est supporté soit par l'État (subventions) (AMS2), soit par l'utilisateur (gestionnaires des bâtiments) (AMS1). Enfin, une « composante énergie » est intégrée sous la forme d'une taxe sur toutes les énergies (dont électricité) entre 2040 et 2050 (AMS2 et AMSDec0).

Parmi les mesures analysées figurent : le prolongement au-delà de 2020 et le renforcement des objectifs fixés par la directive européenne « Patrimoine de l'État » (rénovation de 5 % du parc par an dans les cas AMS, maintien à 3 % par an pour AME) ; le prolongement du dispositif de certificats d'économies d'énergie (CEE) jusqu'à 2050 (vs arrêt après la 4^e période dans les scénarios AME), avec l'augmentation progressive du niveau de subvention jusqu'à 2050 ; le renforcement de l'obligation de rénovation du parc (vs maintien des obligations existantes) ; la mise en place de prêts bonifiés à destination des collectivités pour des gestes de rénovation au niveau BBC jusqu'en 2050, etc.

Principaux résultats des simulations

- Les perspectives de réduction de la consommation totale sont limitées (à 30 %) lorsque les efforts ciblent exclusivement le chauffage, qui ne représente que 50 % de la consommation du tertiaire. La consommation diminue entre 45 % et 47 % en AMS entre 2015 et 2050, si d'autres mesures que l'action sur le chauffage sont prises en compte.
- Jusqu'à 52 % de la consommation unitaire de chauffage sur l'ensemble du parc entre 2015 et 2050 serait liée à une réduction « autonome » de la consommation, sous les effets conjoints des rénovations tendanciennes, du renouvellement des systèmes de chauffage et des bâtiments, de la hausse des prix des énergies et de la

¹ « Avec mesures existantes ».

² « Avec mesures supplémentaires ».

baisse du besoin de chauffage du fait du changement climatique. La consommation unitaire de chauffage pourrait être divisée par quatre en 2050 par rapport à 2015 (35 % dès 2030) sous l'effet du prolongement ou du renforcement des mesures envisagées en 2018 et des mesures supplémentaires jusqu'en 2050, agissant à la fois sur l'isolation du bâti et le système de chauffage, avec notamment une forte pénétration des pompes à chaleur.

- Les émissions cumulées entre 2015 et 2060¹ sont jusqu'à deux fois inférieures avec mesures supplémentaires qu'avec les mesures existantes, lorsque celles-ci incluent la décarbonation du mix énergétique (1 000 MtCO₂ pour le scénario AME et environ 500 MtCO₂ pour les scénarios AMS1 et AMS2).
- L'atteinte des objectifs fixés dans les scénarios AMS implique un investissement de plus de 100 milliards d'euros cumulés (non actualisés) entre 2015 et 2050 dans la rénovation du bâti et les changements de système de chauffage (dont 78 milliards en AME).
- Le surcoût total pour les usagers (qui intègre le montant des factures énergétiques en plus des investissements) de la mise en place de mesures supplémentaires s'élèverait à au moins 12 milliards d'euros par rapport au scénario AME, et jusqu'à 28 milliards d'euros dans le cas où le coût complet est supporté par l'utilisateur (ce qui se traduit par une forte hausse des prix de l'énergie) (AMS1). Toutefois, jusqu'à 53 % de ce surcoût pourrait être compensé par la redistribution des recettes fiscales issues des taxes sur les énergies.
- Des coûts d'abattement socioéconomiques sont calculés pour chaque scénario en prenant pour référence le scénario AME. Ils intègrent, en plus des montants investis, les factures d'énergies et l'impact sur les recettes fiscales (COFP). Les coûts d'abattement du renforcement des mesures couplées à la décarbonation du mix énergétique (AMS1 et AMS2) varient entre 100 (AMS1) et 200 €/tCO₂ (AMS2), selon l'acteur qui supporte ce coût. La solution de décarbonation par subvention de l'État (AMS2) apparaît comme la plus coûteuse socioéconomiquement car les prix des énergies qui en découlent pour les usagers sont faibles (car fortement subventionnés par l'État), ce qui les incite moins à rénover et à réduire leur consommation. Les coûts de ces énergies sont en revanche élevés car il est supposé que l'ensemble des énergies sont décarbonées à 100 %. *In fine*, les coûts totaux sont plus élevés et les émissions évitées plus faibles que dans le scénario où les coûts complets sont supportés par les usagers.

¹ Le calcul des émissions cumulées est prolongé de dix ans en 2050 pour tenir compte des gains des rénovations réalisées en fin de période.

- Des coûts d'abattement associés à l'impact spécifique de différentes mesures (composante carbone, obligation de rénovation et CEE) sont enfin calculés par rapport à un scénario sans aucune mesure. Les différences de coûts d'abattement varient selon l'incitation de chaque mesure à investir dans des rénovations rentables, le montant des recettes fiscales collectées et l'impact sur les économies d'énergie. La mise en place d'une « composante carbone » serait l'instrument le plus efficient du point de vue de la collectivité, pour un coût d'abattement moyen faible, voire négatif lorsque son assiette est étendue à l'ensemble des énergies de chauffage (gaz, fioul, électricité, chauffage urbain).



ANNEXE 7

LES COÛTS D'ABATTEMENT DES RÉSEAUX DE CHALEUR URBAINS : LE CAS DE GRENOBLE-ALPES MÉTROPOLE

1. Scénarios

La construction des scénarios se base sur l'estimation du « potentiel raccordable » du territoire au réseau de chaleur, c'est-à-dire le gisement de consommation de chaleur du résidentiel et du tertiaire atteignable par le réseau de chaleur, à l'horizon 2030. Ces besoins ont été évalués dans l'étude uniquement pour les bâtiments considérés comme raccordables, soit les immeubles neufs (RT2012 ou plus) et les immeubles existants, au chauffage collectif (gaz, fioul, propane) et dont la chaudière doit être renouvelée avant 2030, résidentiels ou tertiaires. Ils tiennent compte d'hypothèses d'amélioration de l'efficacité énergétique.

Les zones raccordables au réseau ont été sélectionnées à la maille IRIS, en fonction de la densité moyenne potentielle du réseau pour chaque IRIS, c'est-à-dire la quantité de chaleur en MWh livrée par mètre linéaire du réseau (MWh/ml), en tenant compte des clients actuels et de l'extension du réseau. Le calcul de la densité est basé sur la calibration d'un modèle statistique estimant le nombre de mètres linéaires du réseau à la maille IRIS, à partir de la projection de la consommation du réseau (qui varie selon la taille des bâtiments et entre neuf et existant).

Les zones intégrées dans le potentiel raccordable du réseau ont finalement été sélectionnées en définissant un seuil de densité à l'IRIS du réseau en 2030, qui diffère selon le scénario considéré. En plus du réseau actuel, on définit des zones de densité supérieure à 1,5 MWh/ml et des zones de densité supérieure à 4,5 MWh/ml en 2030.

Par la suite, la détermination des quantités produites par la centrale permettant de répondre à la demande de chaleur a été effectuée par Artelys à partir d'un modèle de simulation de l'appel des moyens de production à pas de temps horaire.

Scénario 1 – Raccordement de tout le potentiel

Dans ce premier scénario, l'extension du réseau raccorderait l'ensemble des usagers de chaleur urbaine situés dans une zone de **densité supérieure à 1,5 MWh par mètre linéaire**.

L'augmentation des capacités du réseau inclut la rénovation de la centrale Villeneuve en 100 % bois ainsi que la mise en place d'un projet de récupération de chaleur de la plateforme chimique du Pont-de-Claix (+ de 50 % ENR, - de 50 % gaz).

Sous ces hypothèses, le **potentiel raccordable maximal serait atteint, soit 542 GWh en 2030** de plus qu'en l'absence d'extension du réseau.

Le nombre d'usagers et la consommation de chaleur augmenterait significativement pour atteindre **1 100 GWh en énergie finale desservis aux usagers en 2030**.

Scénario 2 – Raccordement permettant de maximiser la densité du réseau

Dans ce scénario, l'extension du réseau raccorderait dans ce scénario l'ensemble des usagers de chaleur urbaine situés dans une zone de densité supérieure à **4,5 MWh par mètre linéaire**. L'augmentation des capacités du réseau inclut la rénovation de la centrale Villeneuve en 100 % bois.

Sous ces hypothèses, le **potentiel raccordable** atteint serait de **300 GWh en 2030** de plus qu'en l'absence d'extension du réseau.

Le nombre d'usagers et la consommation de chaleur augmenteraient pour atteindre **810 GWh en énergie finale desservis aux usagers en 2030**.

Scénario de référence – Pas de nouveaux raccordements du réseau

Sous le scénario **contrefactuel de référence, le réseau ne serait pas étendu**, il n'y a donc pas de nouveaux usagers.

Ce scénario intègre néanmoins une **décarbonation tendancielle du réseau** sous l'effet de la fermeture de la centrale Villeneuve en 2030 et la mise en service de la centrale Biomax, et considère une diminution de la consommation des clients actuels du chauffage urbain de 28 % (soit 222 GWh) d'ici 2030 (selon le scénario de demande énergétique du schéma directeur énergie de la métropole).

Sous ces hypothèses, la consommation globale des bâtiments raccordés aujourd'hui au réseau de chaleur diminuerait tendanciellement pour passer de 790 GWh à **568 GWh en 2030**.

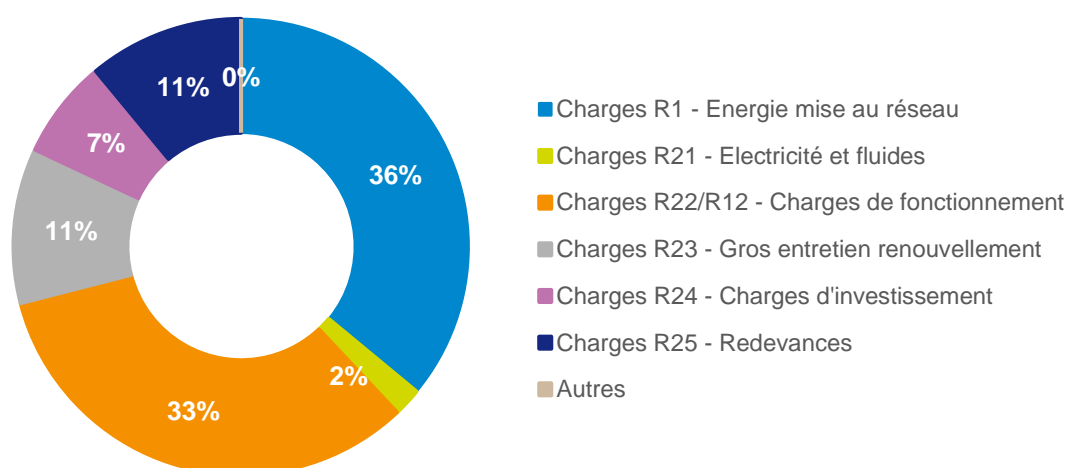
2. Coûts complets du réseau

Estimer les coûts du réseau de chaleur nécessite de prendre en considération un ensemble de composantes, notamment le coût des sous-stations et des mètres linéaires, ainsi qu'un surcoût associé à l'augmentation de la pointe de consommation dans le scénario 1. Des hypothèses sont également faites sur les dépenses d'investissement et d'exploitation des équipements de production (dans le cas de Grenoble-Alpes Métropole, la nouvelle centrale Biomax, la rénovation de la centrale Villeneuve et le raccordement du site industriel de Pont-de-Claix).

Le coût de production de la chaleur est estimé à partir de la production de chaleur simulée (dont le mix énergétique minimise le coût) et des hypothèses de prix par MWh des combustibles (électricité, gaz naturel, bois, fioul, etc.) pour lesquels des projections pour 2020 et 2030 sont données.

Pour chacun des scénarios, un coût complet a pu être calculé en sommant la facture énergétique annuelle totale liée à la consommation des combustibles pour la chaleur urbaine, les coûts annuels d'entretien et de maintenance des systèmes de production de chauffage et d'eau chaude sanitaire et les coûts d'investissement. À noter que ce coût complet intègre, en plus des coûts du réseau de chaleur urbain, les coûts liés aux systèmes de chauffage et aux combustibles qui auraient été utilisés en l'absence du réseau. À titre d'illustration, les charges du service étaient réparties comme suit en 2019-2020 (Graphique A12).

**Graphique A12 – Répartition des charges du service
sur le territoire de la métropole de Grenoble en 2017-2020**



R1 : achats de combustibles ; R21 : fluides et électricité ; R22/R12 : fonctionnement, entretien, maintenance ; R23 : GER ; R24 investissements ; R25 : redevance au concédant pour utilisation des moyens de production.

Source : Grenoble-Alpes métropole

Ces derniers ont été annualisés avec la durée de vie de chaque système et au taux d'actualisation de 4,5 %.

Par ailleurs, le montant total des émissions de CO₂ émises par le réseau pour chaque scénario a été obtenu à partir du niveau de consommation et du contenu carbone moyen du réseau estimé par Artelys (Tableau A10). De manière similaire au coût de production, celui-ci est estimé sur la base de la simulation de l'appel aux différents moyens de production et des hypothèses de contenu carbone des énergies de fourniture du réseau projetés à 2030.

La décarbonation du réseau par l'utilisation croissante d'ENR & R permet de réduire le contenu carbone du réseau, y compris dans le scénario de référence. En revanche, son extension augmente la consommation en GWh desservie, si bien que le montant total des émissions du réseau est plus élevé dans le scénario 1 que dans le scénario de référence. Les émissions plus faibles dans le scénario 2 par rapport au scénario 1 s'expliquent de deux manières :

- la moindre extension du réseau ;
- la part d'ENR & R plus élevée (majorité de bois).

Tableau A10 – Situation du réseau de chaleur urbain de la métropole de Grenoble selon le scénario en 2030 et en 2020

Situation en 2030	Scénario 1	Scénario 2	Scénario de référence	Situation avant 2020
Consommation en énergie finale desservie aux usagers (GWh)	1 100	810	568	790
Contenu CO ₂ du réseau (t/GWh)	82	60	98	150
Part d'ENR & R (%)	72 %	77 %	65 %	55 %
Émissions du réseau (tCO ₂) <i>(i)</i>	90 200	48 600	55 664	118 500
Surcoût complet par rapport au scénario de référence	+21,2 millions €/an	+4,8 millions €/an	-	-

Source : d'après Artelys et Grenoble-Alpes métropole

3. Calcul des émissions évitées

Les émissions évitées par chaque option par rapport à la situation de référence se décomposent entre émissions évitées par l'extension et celles évitées par la décarbonation du réseau de chaleur. Elles incluent donc :

- la différence d'émissions des bâtiments déjà desservis par le réseau en début de période, grâce à la décarbonation du réseau ;
- la différence entre les émissions des bâtiments nouvellement raccordés au réseau (*i. e.* les 542 GWh supplémentaires pour le scénario 1) et les émissions que ces mêmes bâtiments auraient émis s'ils n'avaient pas été raccordés (*i. e.* dans le scénario de référence). Pour cela, il est nécessaire d'établir une équivalence entre 1 GWh de réseau et 1 GWh de gaz. Afin de tenir compte des pertes relativement importantes de chaleur au niveau des échangeurs des sous-stations du réseau, on considère que 1 GWh de chaleur équivaut à 0,85 GWh de gaz.

Les hypothèses suivantes ont été formulées :

- On considère un horizon temporel de trente ans à partir de 2020, début de l'extension du réseau.
- À mesure que de nouveaux bâtiments sont raccordés, les émissions annuelles du réseau décroissent progressivement (on suppose de manière linéaire) entre 2020 et 2030. À partir de 2030, l'extension du réseau de chaleur est terminée, et on suppose que les émissions annuelles sont stables jusqu'en 2050 (il s'agit d'une hypothèse simplificatrice dans la mesure où elles pourraient en réalité continuer à diminuer sous l'effet de l'augmentation croissante de la part d'ENR & R dans le mix de production du réseau).
- On suppose que les bâtiments nouvellement desservis par le réseau dans les scénarios 1 et 2 (pour rappel, uniquement des immeubles à chauffage collectif) seraient, dans le scénario de référence, chauffés en 2030 à 3 % par du fioul, à 87 % par du gaz et 10 % du biogaz¹. Entre 2020 et 2030, le biogaz est progressivement introduit dans le mix gaz naturel / fuel et ne dépasse pas 10 % après 2030.

Ces hypothèses sont simplificatrices dans la mesure où elles ne tiennent pas compte d'une décarbonation supplémentaire des vecteurs énergétiques après 2030 (augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mix de production du réseau de chaleur, maintien du biogaz à 10 %). En ce sens, les montants totaux d'émissions évitées pour chaque scénario pourraient être sous-estimés.

¹ Hypothèses extrapolées à partir des éléments à notre disposition sur le mix énergétique de la consommation annuelle de chauffage et d'eau chaude dans le résidentiel et tertiaire en 2030 sur l'ensemble de la métropole de Grenoble sous le scénario 3. On retient dans ce mix le fioul et le gaz, et on formule une hypothèse additionnelle d'introduction progressive du biogaz jusqu'à atteindre 10 % en 2030 (aligné sur la trajectoire PPE pour 2030).

Sous ces hypothèses, les montants d'émissions évitées par les options 1 et 2 par rapport à l'option de référence sont détaillés dans le Tableau A11.

Tableau A11 – Émissions évitées par le réseau de chaleur (tCO₂)

	Scénario 1	Scénario 2
Émissions évitées par la décarbonation du réseau (tCO ₂) (i)	236 288	561 184
Émissions évitées par l'extension du réseau (tCO ₂) (ii)	1 158 293	655 595
Émissions évitées totales (i) + (ii)	1 394 581	1 216 779

Source : calculs France Stratégie

On voit que la différence d'émissions du réseau évitées est relativement faible étant donné que le réseau est plus carboné dans le premier scénario.

4. Calcul des coûts d'abattement

Il est supposé que le même montant annuel est engagé dès la première année de l'extension du réseau (2020) et ce jusqu'à 2050. On calcule ainsi un surcoût total actualisé des scénarios 1 et 2 par rapport au scénario de référence. Sous les hypothèses formulées, on en déduit un coût d'abattement en budget carbone pour chaque option (Tableau A12).

Tableau A12 – Coût d'abattement du réseau de chaleur (€/tCO₂)

	Scénario 1	Scénario 2
Surcoût total actualisé sur trente ans	366 468 291 €	83 196 272 €
Total des émissions évitées par rapport au scénario 3 sur trente ans (i) + (ii)	1 394 581	1 216 779
Coût d'abattement (€/tCO ₂)	263 €/tCO ₂	68 €/tCO ₂

Source : calculs France Stratégie

On peut par ailleurs analyser la rentabilité socioéconomique de l'investissement en comparant les coûts d'abattement à la trajectoire de la valeur de l'action pour le climat (VAC) sur la période de l'investissement (trente ans) (Tableau A13).

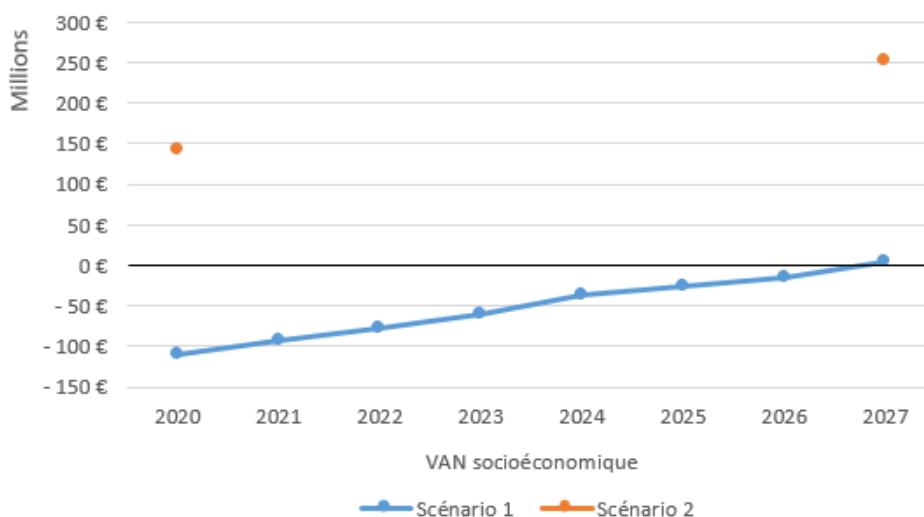
Tableau A13 – Calcul de la VAN socioéconomique

	Scénario 1	Scénario 2
Valeur totale actualisée des émissions évitées (selon la trajectoire de la VAC entre 2020 et 2050)	256 983 956 €	225 761 597 €
VAN socioéconomique	-109 484 336 €	142 565 325 €

Source : calculs France Stratégie

On trouve une VAN positive pour le scénario 2 et négative pour le scénario 1 dès lors que les montants sont engagés en 2020. Cela étant dit, la VAN socioéconomique du scénario 1 devient positive à partir de 2027 compte tenu de la trajectoire de la VAC mais semble rester durablement inférieure à la VAN du scénario 2 (Graphique A13).

Graphique A13 – Évolution de la VAN socioéconomique en fonction de l'année à laquelle sont engagés les investissements



Source : calculs France Stratégie



Directeur de la publication

Gilles de Margerie, commissaire général

Directeur de la rédaction

Cédric Audenis, commissaire général adjoint

Secrétaires de rédaction

Étienne de Latude, Valérie Senné

Contact presse

Matthias Le Fur, directeur du service Édition/Communication/Événements

01 42 75 61 37, matthias.lefur@strategie.gouv.fr

RETROUVEZ LES DERNIÈRES ACTUALITÉS DE FRANCE STRATÉGIE SUR :



www.strategie.gouv.fr



[@strategie_Gouv](https://twitter.com/strategie_Gouv)



[france-strategie](https://www.linkedin.com/company/france-strategie)



[francestrategie](https://www.facebook.com/francestrategie)



[@FranceStrategie_](https://www.instagram.com/FranceStrategie_)



[StrategieGouv](https://www.youtube.com/StrategieGouv)

Les opinions exprimées dans ce rapport engagent leurs auteurs et n'ont pas vocation à refléter la position du gouvernement



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



FRANCE STRATÉGIE
ÉVALUER. ANTICIPER. DÉBATTRE. PROPOSER.

Institution autonome placée auprès de la Première ministre, France Stratégie contribue à l'action publique par ses analyses et ses propositions. Elle anime le débat public et éclaire les choix collectifs sur les enjeux sociaux, économiques et environnementaux. Elle produit également des évaluations de politiques publiques à la demande du gouvernement. Les résultats de ses travaux s'adressent aux pouvoirs publics, à la société civile et aux citoyens.