



Réduction des émissions de CO₂, impact sur le système électrique :

quelle contribution du chauffage
dans les bâtiments à l'horizon 2035 ?

Réduction des émissions de CO₂, impact sur le système électrique :

quelle contribution du chauffage
dans les bâtiments à l'horizon 2035 ?

DÉCEMBRE 2020

RAPPORT COMPLET

SOMMAIRE

Résumé exécutif	7
1. États des lieux et objectifs de l'étude	43
1.1 Réduire les émissions dans le secteur du bâtiment : un enjeu majeur pour atteindre la neutralité carbone	44
1.2 L'état des lieux du bâtiment	49
1.3 L'état des lieux des énergies de chauffage	54
2. L'enjeu de l'étude approfondie : une compréhension fine des déterminants du besoin de chauffage	69
2.1 Le parc total de bâtiments résidentiels et tertiaires : une évolution déterminée par la démographie et l'activité économique	70
2.2 L'évaluation des besoins de chauffage par foyer : comprendre le besoin conventionnel de chauffage tel qu'il est estimé par le diagnostic de performance énergétique et les écarts potentiels avec la consommation réelle	72
2.3 La réduction des émissions associées au chauffage : des politiques qui portent sur la rénovation du bâti, l'évolution des solutions de chauffage et la décarbonation des vecteurs énergétiques associés	75
2.4 Les enjeux de l'isolation du bâti	86
2.5 Les enjeux sur les solutions de chauffage	94
2.6 La décarbonation des approvisionnements énergétiques utilisés pour le chauffage	108
2.7 Le bilan : une étude détaillée qui porte sur de nombreux paramètres et variantes pour identifier la sensibilité des résultats aux choix publics sur le bâtiment	116
2.8 Annexe : le calcul de la consommation conventionnelle	120
2.9 Annexe : modélisation du facteur correctif pour calculer la consommation réelle à partir de l'estimation du besoin thermique conventionnel et de l'effet rebond après rénovation	122
3. Des scénarios contrastés pour rendre compte des enjeux sur le bâtiment et le chauffage	127
3.1 Tous les scénarios de l'étude intègrent une transformation sur quinze ans	128
3.2 Des scénarios structurés autour de plusieurs axes : le développement des solutions de chauffage électriques, la performance des bâtiments (anciens et neufs) et l'efficacité des systèmes de chauffage	133
3.3 Des variantes explorant l'influence du mix de production et d'actions ciblées dans le bâtiment	135

4. Le fonctionnement du système électrique	159
4.1 L'étude vise à éclairer le débat public sur l'effet de l'électrification du chauffage sur le système électrique	162
4.2 L'électrification progressive du chauffage, si elle est accompagnée de progrès d'efficacité énergétique, ne conduit pas à faire augmenter la consommation d'électricité à moyen terme	163
4.3 Dans les bâtiments neufs : un recours accru à l'électricité n'entraînerait pas de forte augmentation de la consommation d'électricité	167
4.4 Dans les bâtiments existants : un développement du chauffage électrique associé à un échec partiel des objectifs d'efficacité entraîne une augmentation de la consommation électrique, mais modérée	169
4.5 Atteindre les objectifs SNBC en matière d'efficacité sans développer le chauffage électrique au-delà du tendanciel réduit la consommation d'électricité de façon modérée	174
4.6 Les évolutions attendues à 15 ans sur la consommation électrique liées aux politiques publiques sur le chauffage sont limitées par rapport à celles qui résultent de l'ensemble des politiques de décarbonation de l'économie	176
4.7 Si elle s'accompagne de mesures d'efficacité énergétique sur le bâti et les systèmes de chauffage, l'augmentation de la part du chauffage électrique ne dégrade pas le niveau de sécurité d'approvisionnement	180
4.8 Si elle s'accompagne de mesures d'efficacité énergétique sur le bâti et les systèmes de chauffage, l'augmentation de la part du chauffage électrique ne dégrade pas le niveau de sécurité d'approvisionnement	187
4.9 Si l'accroissement de la part du chauffage électrique se fait sans atteindre les objectifs d'efficacité énergétique, l'impact sur la pointe devient significatif et nécessite de mobiliser des flexibilités supplémentaires pour la sécurité d'approvisionnement	190
4.10 Des solutions de flexibilité sont envisageables pour répondre aux situations tendues, notamment via le pilotage de la demande	192
5. Analyse environnementale : une réduction substantielle des émissions de CO₂	203
5.1 La méthode utilisée dans le rapport vise à chiffrer les émissions de chaque scénario en s'affranchissant des débats récurrents sur les méthodes d'attribution du secteur électrique	206
5.2 Seule une action résolue et combinée sur l'efficacité dans le secteur du bâtiment, la bascule vers des solutions de chauffage bas carbone permet d'atteindre les objectifs de la SNBC	213
5.3 Toutes les actions de développement du chauffage électrique et d'efficacité énergétique (du bâti et des solutions de chauffage) permettent de réduire les émissions de CO ₂ à l'échelle nationale	218

5.4	Les actions d'électrification et d'efficacité énergétique doivent être combinées pour atteindre les objectifs de la SNBC	220
5.5	La prise en compte des effets induits à l'échelle européenne modifie les bilans CO ₂ nets des différents scénarios	221
5.6	Le renforcement de l'efficacité des bâtiments permet au scénario de la SNBC de présenter des gains de CO ₂ importants à l'échelle européenne	226
5.7	L'analyse complète du bilan carbone nécessite d'intégrer le développement du parc de production d'électricité en France programmé par la PPE	228
5.8	Le ciblage des passoires thermiques conduit à des émissions évitées en combustion de même ordre de grandeur que le scénario SNBC	231
5.9	Le déploiement de pompes à chaleur hybrides classiques a un effet légèrement négatif sur les émissions de gaz à effet de serre par rapport au déploiement de pompes à chaleur électriques	232
5.10	Au-delà des émissions de CO ₂ directes, la prise en compte de l'empreinte des différents équipements et combustibles ne modifie pas les résultats de bilan carbone	234
6.	L'analyse économique à l'échelle de la collectivité	237
6.1	L'évaluation des coûts de la transformation du secteur du bâtiment implique de prendre en compte l'ensemble des composantes économiques associées	240
6.2	La décarbonation du secteur du bâtiment implique des investissements soutenus dans la rénovation du bâti et les systèmes de chauffage	245
6.3	Les scénarios de transformation les plus ambitieux présentent les coûts complets annualisés les plus importants...	247
6.4	... mais ces coûts de transformation représentent un investissement climatique dont la pertinence économique peut se justifier uniquement par les réductions des émissions de CO ₂ , sous certaines conditions de maîtrise des coûts des rénovations	250
6.5	Les gains théoriques sur la consommation énergétique liés aux efforts d'efficacité énergétique sont contrebalancés par un « effet rebond » dont les bénéfices se situent au-delà de la réduction des émissions	252
6.6	Considérées séparément, les actions d'électrification et d'efficacité énergétique présentent toutes deux un intérêt économique pour la collectivité	256
6.7	Le ciblage des actions de rénovation sur les passoires thermiques permet d'obtenir des bénéfices similaires (réduction d'émissions, consommation d'énergie) par rapport au scénario de la SNBC, pour un coût plus faible	261
6.8	L'intérêt du déploiement de PAC hybrides est conditionné par des coûts des systèmes de PAC hybride significativement inférieurs aux coûts des PAC	263
	Abréviations	266



RÉSUMÉ EXÉCUTIF

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Le secteur du bâtiment est responsable, en France, de l'émission de 75 millions de tonnes de CO₂ par an en émissions directes de combustion (c'est-à-dire sans comptabiliser l'amont des combustibles ni les émissions liées à la production de l'électricité et de la chaleur utilisées). Cela représente 20% des émissions du pays. Parmi celles-ci, environ 53 millions de tonnes sont attribuables au chauffage combustible et représentent 15% de celles du territoire.

Décarboner le secteur des bâtiments constitue donc un prérequis pour l'atteinte de la neutralité carbone, et une priorité de l'action publique.

La stratégie nationale bas-carbone (SNBC) définit une trajectoire pour réduire les émissions associées, et les différentes politiques dans le secteur de l'énergie (programmation pluriannuelle de l'énergie – PPE) ou du bâtiment (projet de nouvelle réglementation environnementale pour la construction neuve – RE 2020, réforme du Diagnostic de performance énergétique – DPE –, etc.) précisent des mesures pour mettre en œuvre les orientations de la SNBC.

Cette stratégie repose sur trois piliers :

- 1.** une très forte amélioration de la performance des bâtiments – via des normes plus strictes pour la construction neuve et un grand programme de rénovation performante des logements et bureaux anciens permettant d'amener le parc au niveau d'un bâtiment basse consommation (BBC) en moyenne d'ici à 2050 ;
- 2.** l'amélioration du rendement des solutions de chauffage – via le choix de solutions performantes comme la pompe à chaleur ;
- 3.** le remplacement des installations de chauffage utilisant des énergies fossiles par des solutions bas-carbone – comme les modes de chauffage électrique performants, les réseaux de chaleur utilisant des sources renouvelables et de récupération, ou l'utilisation du bois et de la biomasse.

La combinaison de ces différentes inflexions apparaît indispensable pour ne pas prendre de retard dans la trajectoire de réduction des émissions, comme le note le récent rapport du Haut conseil pour le climat publié en novembre 2020.

Les questions auxquelles l'étude entend répondre

Le débat sur les réglementations à mettre en place sur le secteur du bâtiment pour atteindre la neutralité carbone est particulièrement vif, et ce d'autant plus que de nombreuses politiques doivent être coordonnées pour obtenir une action efficace sur les émissions de gaz à effet de serre de la France. Les inflexions associées ne peuvent se traduire que sur le temps long :

- ▶ par une action sur les performances énergétiques et environnementales des bâtiments neufs, mais ceux-ci ne représentent qu'environ 1% du parc de logements chaque année ;
- ▶ par la rénovation des bâtiments existants. Or, en moyenne longue, le rythme et la qualité des rénovations n'ont pas augmenté au niveau attendu au cours des années précédentes malgré les ambitions affichées et les moyens mis en place et le premier budget carbone de la SNBC a été dépassé sur la période 2015-2018. Au cours des derniers mois, une inflexion dans le rythme des gestes de rénovation a néanmoins été observée (dispositif des certificats d'économies d'énergie – CEE – et aides à la rénovation énergétique), qui devra être confirmée à l'avenir.

Dans le même temps, une partie du débat concerne spécifiquement l'intérêt de recourir aux solutions électriques dans le chauffage, l'opportunité d'utiliser des solutions électriques efficaces (pompes à chaleur) étant opposée à la crainte de développer des solutions peu efficaces (radiateurs à effet Joule) dans des bâtiments mal isolés, avec des interrogations sur les conséquences en matière de pointes de consommation et d'émissions de CO₂.

Le travail restitué dans le présent rapport a été engagé par RTE et l'ADEME avec la volonté de répondre à certaines de ces interrogations sur la base d'une modélisation affinée du système électrique :

1. sur le plan climatique, les orientations proposées dans le champ de la politique de l'énergie et du bâtiment permettent-elles effectivement **de réduire les émissions et respecter la trajectoire climat fixée par la SNBC ?** Cette trajectoire de réduction des émissions, qui comporte une électrification partielle du chauffage, **est-elle toujours valable en comptabilisant les émissions induites sur la production d'électricité, en France et dans les autres pays européens ?**
2. sur le plan de la sécurité d'approvisionnement, l'objectif d'accroissement de la part de l'électricité fixé dans la SNBC et en cours de transposition dans le secteur du bâtiment **engendre-t-il un risque pour la sécurité d'alimentation électrique ?** Créé-t-il une tendance à l'augmentation de la consommation d'électricité ou des pointes hivernales ?
3. sur le plan économique, la réduction des émissions dans les bâtiments nécessite des investissements importants : **certaines configurations peuvent-elles s'avérer plus efficaces** sur le plan économique ?

Pour chacune de ces questions, RTE et l'ADEME se sont attachés à analyser l'influence relative des différents leviers : l'efficacité des moyens de chauffage, l'ambition de la rénovation énergétique, et l'évolution du mix électrique. L'étude a également exploré dans quelles conditions des complémentarités peuvent jouer entre amélioration de la performance des bâtiments et changement des sources d'énergie.

La méthode de l'étude pour répondre à ces questions

L'étude RTE-ADEME évalue les conséquences de la politique engagée dans le secteur du bâtiment à long terme, en se situant à l'horizon 2035. Celui-ci

se situe à mi-chemin de l'atteinte de la neutralité carbone et correspond au cadrage global utilisé depuis 2017 pour le mix électrique (c'est notamment l'échéance à laquelle la part du nucléaire dans la production d'électricité devrait être de 50 %).

La méthode utilisée consiste à examiner et comparer différentes trajectoires :

- **la trajectoire de référence correspond à une bonne mise en œuvre de toutes les orientations publiques** indiquées dans la PPE et la SNBC, en cours de déclinaison dans la réglementation (RE 2020, réforme du DPE, dispositifs de soutien, obligations sur la rénovation, etc.). Elle est représentée par deux scénarios qui ne se distinguent que selon la part de l'électricité dans la construction neuve.
- des trajectoires dans lesquelles certains objectifs ne sont pas atteints : **ce sont autant de stress-tests qui permettent d'évaluer les risques** (sur la sécurité d'approvisionnement, les émissions ou les coûts) associés à une mise en œuvre imparfaite de la SNBC.

Au total, ce travail a consisté à étudier de manière détaillée 6 scénarios principaux et 6 variantes spécifiques. Tous ces scénarios et variantes font l'objet d'une triple analyse de leurs effets :

- **sur le système électrique** (consommation annuelle moyenne, pointe) ;
- **sur les émissions de CO₂** (évaluées au périmètre France en intégrant celles du système électrique, puis en intégrant les variations induites sur le système électrique à l'échelle européenne) ;
- **sur les coûts** (en intégrant ceux de la rénovation, de la pose et de l'entretien des solutions de chauffage, les coûts de combustibles et ceux d'évolution du système électrique).

Dans tous les scénarios étudiés, les objectifs de la SNBC sur le développement des autres vecteurs décarbonés de chauffage comme le bois énergie, le biogaz ou les réseaux de chaleur alimentés majoritairement par les énergies renouvelables ont été pris en compte.

Les grands messages de l'étude

Les conclusions de l'étude peuvent se ranger en deux catégories :

- ▶ les conclusions sur les scénarios de déclinaison de la SNBC ;
- ▶ les conclusions issues de l'analyse des stress-tests et des cas de mise en œuvre imparfaite de la trajectoire.

1. Sur l'ambition générale : l'étude confirme que la rénovation des bâtiments couplée au développement des solutions de chauffage électriques efficaces constitue une solution pertinente pour faire baisser les émissions selon la trajectoire et les budgets carbone définis par la SNBC.

Les résultats de l'étude confirment l'intérêt des solutions électriques pour réduire les émissions de gaz à effet de serre du secteur du bâtiment, dans le cadre prévu par la SNBC et la politique du bâtiment qui intègre un développement important de l'efficacité énergétique, tant au niveau du bâti qu'à celui des solutions de chauffage.

Ce résultat confirme et prolonge les conclusions de publications et d'études récentes, comme le récent rapport du Haut conseil pour le climat sur la rénovation énergétique, qui souligne à la fois l'importance d'améliorer l'isolation de l'enveloppe des bâtiments et celle de basculer vers des solutions de chauffage efficaces et bas-carbone : électricité avec les pompes à chaleur, réseaux de chaleur, chaudières et poêles à biomasse.

Dans l'étude réalisée, seule la combinaison des trois paramètres principaux (la performance des bâtiments, la performance des solutions de chauffage, la bascule vers des solutions bas-carbone dont l'électricité) permet d'atteindre les objectifs de réduction des émissions. Le respect de la trajectoire carbone a été vérifié s'agissant des objectifs propres au secteur bâtiment définis dans la SNBC (pour le chauffage, **un passage de 53 MtCO₂ aujourd'hui à environ 25 MtCO₂ en 2035**), mais aussi de ceux qui concernent le secteur de l'électricité en application de la trajectoire prévue par la PPE (passage d'environ 20 MtCO₂ aujourd'hui à 11 MtCO₂, en 2035).

L'effet baissier sur les émissions est également attesté une fois pris en compte les

effets induits sur le système électrique à l'échelle européenne. C'est-à-dire en intégrant le fait que, toutes choses étant égales par ailleurs, le développement d'un nouvel usage électrique en France conduit à moins exporter d'électricité bas-carbone (cas général) ou à importer une électricité en moyenne plus carbonée produite dans les pays voisins (cas peu fréquent).

Une politique publique qui respecte les trajectoires et les leviers de la SNBC qui n'ont pas d'impact majeur sur le système électrique : **la consommation électrique annuelle associée au chauffage serait stable voire diminuerait légèrement à l'horizon 2035** si les mesures d'efficacité énergétique étaient bien appliquées. La pointe de consommation électrique n'évoluerait pas non plus significativement, elle serait même légèrement en baisse.

Ces actions forment un tout cohérent qui maximise leur efficacité :

- ▶ **chacune est insuffisante, prise isolément, pour atteindre l'objectif de réduction des émissions** de la SNBC et soulève des enjeux spécifiques (efficacité des dépenses ou impact sur la gestion du système électrique, cf. ci-dessous) ;
- ▶ **chacune conduit à faire baisser les émissions de gaz à effet de serre**, et aucune de ces actions n'engendre de risque d'augmentation des émissions sur le temps long.

La meilleure isolation des bâtiments présente également d'autres avantages qui dépassent le

secteur énergétique : un accroissement du confort des habitants avec des effets positifs sur la santé, sur la qualité du bâti et la préservation de leur valeur patrimoniale, une réduction des facteurs et donc de la précarité énergétique, et un gisement d'emplois locaux non délocalisables.

Dans le scénario prévoyant une part de l'électricité (via les pompes à chaleur) plus importante dans le bâtiment neuf, les conclusions précédentes sont conservées. Le bilan CO₂ est même légèrement meilleur au fur et à mesure du temps (à l'horizon 2035, une réduction supplémentaire de 1 MtCO₂/an à l'échelle française).

2. Sur l'enjeu de respect des trajectoires climatiques : l'étude souligne que la non-atteinte d'une seule des dimensions étudiées (efficacité du bâti, performance des solutions de chauffage, bascule vers des solutions de chauffage bas-carbone dont l'électricité) conduirait à un retard par rapport à la trajectoire de la SNBC.

Cet effet a été chiffré pour chacun des scénarios de déclinaison partielle de la trajectoire SNBC. Par rapport au scénario de la SNBC, à l'horizon 2035 et en intégrant les variations d'émissions sur au périmètre du système électrique français, il conduit à :

- ▶ un écart de +5 MtCO₂/an si l'effort de rénovation performante du bâti et d'efficacité sur les systèmes de chauffage se produit, sans bascule vers des solutions électriques ;
- ▶ un écart de +6 MtCO₂/an si l'effort d'électrification des équipements de chauffages se produit, mais avec des radiateurs électriques à effet Joule peu performants et dans des logements dont la performance ne s'améliorerait pas ;
- ▶ un écart de +11 MtCO₂/an si ces effets se combinent. La trajectoire de la SNBC serait alors loin d'être respectée, avec un bilan à mi-chemin en 2035 à 36 MtCO₂/an au lieu de 25 MtCO₂/an.

Cela souligne l'importance de chacune des actions du « triptyque » décrit par la SNBC et en cours de déclinaison dans le secteur du bâtiment.

Dans le cas où le développement des solutions de chauffage électrique se produit selon la trajectoire du scénario de la SNBC via des solutions efficaces comme les pompes à chaleur, mais sans inflexion notable sur le rythme et la performance de rénovation du bâti à l'échelle française, l'écart demeure de +6 MtCO₂/an par rapport à l'objectif. Néanmoins, le bilan européen est dans ce cas plus favorable que si cette électrification se faisait via des radiateurs électriques (essentiellement car les exports d'électricité bas carbone depuis la France seraient plus importants, ponctuellement par une diminution des imports).

3. Sur l'enjeu de sécurité d'alimentation en électricité : l'étude souligne l'importance que les réglementations « bâtiments » qui orientent vers l'électricité et d'autres vecteurs bas-carbone y associent une bonne isolation du bâti et des équipements de chauffage efficaces. Dans le cas contraire, la pointe de consommation serait orientée à la hausse.

Bâtiments existants

Les réductions d'émissions sont favorisées si l'électrification du chauffage (en substitution du fioul et d'une partie du gaz fossile) s'accompagne d'efforts sur le nombre de rénovations et leur performance sur l'ensemble du parc de logements (pas uniquement sur les logements dont les systèmes de chauffage sont électriques ou en passe d'être

convertis à des solutions électriques à l'occasion d'une rénovation).

La consommation et la pointe électrique s'en trouvent réduites (-3 TWh de consommation annuelle et -3 GW sur la pointe dans le scénario de référence).

En revanche, dans le cas où le développement du chauffage électrique se traduirait par le déploiement massif de radiateurs électriques peu performants dans des logements mal isolés, la pointe électrique augmenterait de manière substantielle (+6 GW en 15 ans dans le scénario qui cumule les stress-tests sur la rénovation et l'efficacité des systèmes de chauffage, contre une pointe électrique de l'ordre de 100 GW aujourd'hui). Cela conduirait à tendre la sécurité d'alimentation en électricité. Le risque d'un développement majoritaire des radiateurs à effet Joule pouvant apparaître crédible à certains acteurs au regard des tendances observées par le passé, les réglementations sur la construction neuve actuellement en cours de définition doivent avoir pour

objectif d'orienter les investissements en solutions électriques vers les pompes à chaleur pour que ces solutions deviennent également la référence dans l'existant.

Bâtiments neufs

Les avantages cités dans la rénovation se retrouvent bien entendu dans le neuf, où les mesures d'efficacité du bâti sont plus beaucoup plus faciles à mettre en œuvre. Le rythme de construction des logements en France (400 000 par an, soit 1 % du parc) est toutefois insuffisant pour aboutir à des effets notables avant plusieurs décennies, et justifie pleinement les efforts à déployer sur la rénovation, en particulier celle des logements anciens mal isolés.

4. Sur le bilan économique : l'étude conclut à l'importance de prioriser les efforts de rénovation vers les logements les plus énergivores (« passoires thermiques ») et souligne l'intérêt des approches de rénovation performantes

Les politiques d'amélioration de l'efficacité des bâtiments existants, logements et bureaux, conduisent à des investissements soutenus pour la collectivité qui produisent des bénéfices de différentes natures au-delà de la lutte contre le changement climatique.

Évalués par rapport au seul angle des émissions, qui ne résume pas les avantages de la rénovation, les coûts de transition (et en particulier de la rénovation du bâti) rapportés aux sommes investies (coûts d'abattement) sont plus élevés que d'autres politiques de réduction des émissions (par exemple le passage à la mobilité électrique) **mais compatibles avec la valeur tutélaire du carbone retenue par les pouvoirs publics à l'horizon 2035 (375 €/tCO₂) :**

- ▶ en prenant en compte l'effet rebond (c'est-à-dire en intégrant le fait que le niveau de confort s'accroît avec la rénovation énergétique) : les coûts d'abattement se situent entre 310 et 430 €/tCO₂ (hypothèse de référence) selon le niveau de baisse des coûts de la rénovation liés aux effets d'échelle et à l'industrialisation de la rénovation ;
- ▶ sans prise en compte de l'effet rebond (à même niveau de confort) : les coûts d'abattement se situent entre 160 et 240 €/tCO₂ (hypothèse de référence).

Les perspectives de réduction du coût de la rénovation (par exemple via l'industrialisation des gestes dans le cadre d'un grand programme national) et l'arbitrage des habitants dans l'utilisation des gains énergétiques découlant de la rénovation du bâti et des solutions de chauffage (diminution de la facture ou amélioration du confort et réduction de la précarité énergétique) constituent donc les principales variables à prendre en compte dans l'analyse économique des scénarios.

La problématique économique est d'autant plus importante que l'effort nécessite des investissements financiers initiaux importants pour réduire la consommation énergétique, qui ne se rentabilisent que sur le temps long et exigent donc des montants de soutien significatifs pour les déclencher. C'est là, et dans des facteurs de décision non économiques (facilité de mise en œuvre de la rénovation, formation des professionnels, etc.) que se situent les principaux défis.

Il convient cependant de noter que la meilleure isolation des bâtiments, si elle est réalisée dans des conditions techniques permettant d'atteindre in fine la performance souhaitée (avec des rénovations permettant de réduire le besoin énergétique

de 50 %, par rapport à des rénovations moins profondes qui ne permettraient de le réduire que de 30 %), présente d'autres avantages qui dépassent le secteur énergétique : un accroissement du confort des habitants avec des effets positifs sur leur santé, une sollicitation budgétaire plus faible pour le chauffage et donc une réduction de la précarité énergétique, et un gisement d'emplois locaux non délocalisables. Ces externalités pourraient aider à compenser les difficultés mentionnées, mais elles sont pour une grande part corrélées avec la précarité financière, et cette barrière à la mise en œuvre risque de s'avérer importante en pratique.

Pour maximiser l'efficacité des dépenses, il apparaît souhaitable d'optimiser et de prioriser les efforts de rénovation : en remplaçant en priorité le chauffage au fioul, le plus émetteur et le plus onéreux en coûts de combustible, en ciblant les passoires énergétiques, et en privilégiant la performance des rénovations. Une variante analysée dans l'étude montre qu'il est possible d'augmenter significativement l'efficacité des euros investis en ciblant les logements anciens et énergivores (le coût d'abattement passant de 430 €/tCO₂ dans le scénario de référence à 290 €/tCO₂ où la rénovation

se concentre sur les passoires thermiques, avec avec prise en compte de l'effet rebond dans les deux cas).

L'étude montre que, du point de vue de la collectivité, cibler les « passoires énergétiques » et exiger des performances élevées lors de la rénovation constituent une méthode efficace pour maximiser l'efficacité des dépenses engagées et obtenir rapidement des résultats significatifs sur le front du climat.

Cette analyse a été menée sans préjudice d'une réflexion plus large sur la prise en compte des contraintes sur la capacité à investir des ménages. Il peut donc être également pertinent de combiner le traitement préférentiel des passoires énergétiques avec l'augmentation du nombre d'opérations de rénovation afin de maximiser l'effet d'entraînement pour la filière.

Enfin, le scénario prévoyant une électrification via des solutions efficaces comme les pompes à chaleur, mais sans inflexion notable sur l'isolation du bâti, présente une très bonne efficacité sous l'angle économique.

PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE

Pourquoi cette étude et comment a-t-elle été réalisée ?

Un enjeu spécifique au secteur du bâtiment

Le secteur du bâtiment est responsable de près de 75 millions de tonnes de CO₂, soit de l'ordre de 20% des émissions nationales. À ce titre, la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) vise à décarboner massivement le chauffage via différents moyens. En amont, l'isolation des bâtiments est considérée comme une action indispensable pour réduire le besoin thermique de chauffage. En aval, il est prévu de renforcer différents vecteurs énergétiques :

- ▶ l'électricité via les pompes à chaleur (PAC) qui présentent l'avantage d'être également très efficaces sur le plan énergétique ;
- ▶ la chaleur renouvelable via les chaudières biomasse ainsi que les réseaux de chaleur.

S'agissant des bâtiments neufs, une nouvelle réglementation environnementale (la RE2020) doit entrer en vigueur en 2021. Cette réglementation vise à aligner les normes sur les objectifs de neutralité carbone et la trajectoire de la SNBC et à traduire les ambitions de réduction de moitié de la consommation d'énergie finale en France au cours des trente prochaines années. Elle favorise la réduction de l'empreinte carbone des bâtiments sur l'ensemble de leur cycle de vie, en encourageant le recours à des matériaux à faible impact carbone (notamment bio-sourcés) pour la construction, en imposant des normes strictes sur l'isolation du bâti et en privilégiant l'installation de solutions de chauffage les moins carbonées.

S'agissant des bâtiments existants, les évolutions du diagnostic de performance énergétique (DPE) et des dispositifs de soutien à la rénovation, ou les dispositions sur la consommation des bâtiments tertiaires (décret tertiaire) font l'objet de nombreuses discussions entre l'État et les acteurs du secteur.

Le sujet du chauffage électrique est néanmoins régulièrement sujet de polémique en France. Ses partisans y voient un outil efficace de lutte contre le réchauffement climatique, puisque l'électricité produite sur le territoire est aujourd'hui décarbonée à 93%. Ses détracteurs considèrent les solutions traditionnelles des radiateurs à effet Joule – parfois qualifiées de « grille-pains » – comme des solutions inefficaces sur le plan énergétique, susceptibles de poser des problèmes pour la sécurité d'approvisionnement du pays du fait de leur influence sur les pointes de consommation électrique, et mettent en avant que le bilan carbone du chauffage électrique ne serait pas positif quand la France importe de l'électricité.

Ainsi, tandis que les uns érigent l'électrification du chauffage comme une priorité pour se passer d'énergies fossiles, les autres considèrent que d'autres solutions doivent être privilégiées, chaque « camp » brandissant une méthode de comptabilité différente pour illustrer le bien-fondé de ses thèses. Témoins de ces débats, les polémiques associées aux choix d'un facteur d'émissions ou du coefficient d'énergie primaire (CEP ou PEF) pour le projet de nouvelle réglementation environnementale des bâtiments neufs.

Le rapport établi par RTE et l'ADEME intervient à ce moment du débat. Il vise justement à croiser les multiples paramètres en jeu pour montrer l'influence des choix publics et privés sur l'isolation du bâti, et sur le choix et la performance de la solution de chauffe, afin d'apporter des éléments de réponse quantitatifs et de dépassionner le débat.

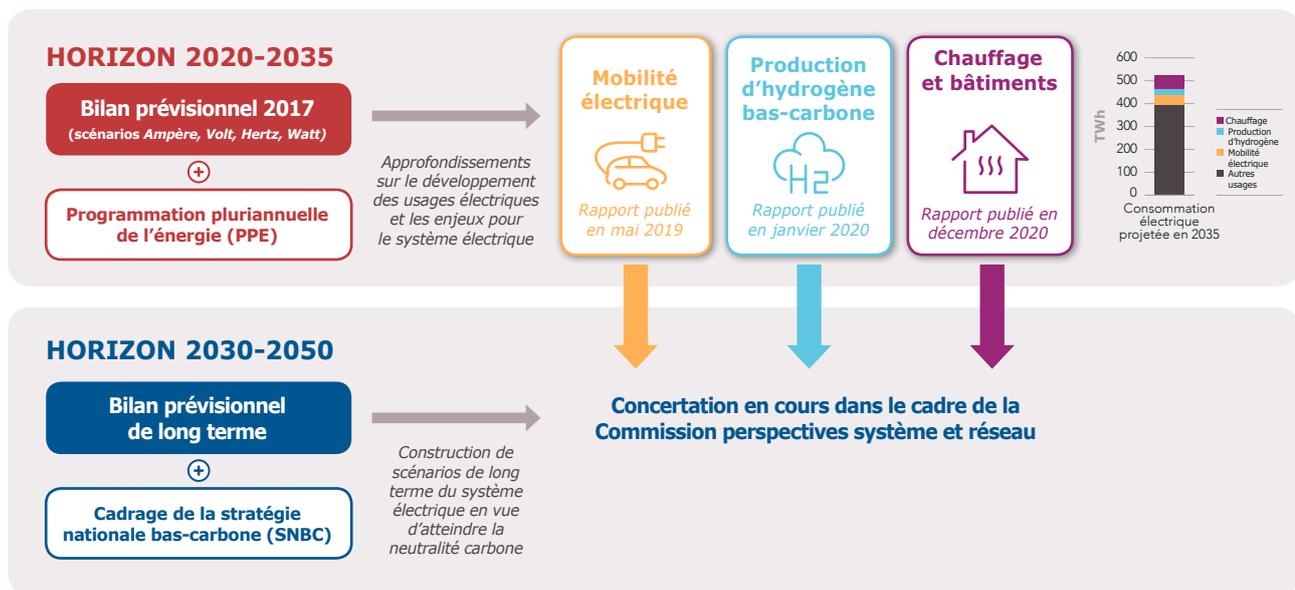
Un enjeu spécifique au secteur de l'énergie

Le développement des solutions électriques pour le chauffage des bâtiments s'inscrit dans un ensemble vaste de transformations à l'œuvre dans le secteur de l'énergie pour atteindre la neutralité carbone. Les différentes stratégies adoptées à cet effet par les Etats européens ou la Commission européenne (telle la SNBC en France), prévoient en effet toutes un développement du vecteur électrique dans certains secteurs aujourd'hui très émetteurs : les transports, l'industrie ou le bâtiment. La situation particulière de l'électricité en France – déjà très largement bas-carbone – peut en renforcer cet intérêt.

Pour étudier ces transformations et leurs impacts sur le système électrique, RTE a développé depuis

2019, le cas échéant avec d'autres institutions, une «trilogie des usages». Il s'agit de trois études thématiques visant à approfondir de manière spécifique l'analyse de l'électrification d'un usage particulier. Ces études partagent la même méthode et retiennent une temporalité identique (2035, à mi-chemin de l'horizon de la neutralité carbone). L'effet agrégé de ces transformations est étudié par ailleurs dans le Bilan prévisionnel.

L'étude «chauffage et bâtiment», réalisée avec l'ADEME, constitue le dernier volet de cette trilogie. Elle intègre notamment les enjeux spécifiques liés à la thermosensibilité de la consommation électrique en France, du fait d'un parc de chauffage déjà en partie électrifié.



Un ensemble de paramètres à étudier

L'étude RTE-ADEME est structurée autour de quatre paramètres clés :

- ▶ **le niveau de performance des bâtiments** – soit notamment le rythme et la qualité des opérations d'isolation des logements et bureaux existants ;
- ▶ **la part des différentes sources d'énergie** et vecteurs dans le chauffage – notamment la pénétration des solutions électriques ;
- ▶ **l'efficacité des solutions de chauffage installées** – qui conduit, pour l'électricité, à distinguer les pompes à chaleur et les radiateurs électriques à effet Joule ;
- ▶ **l'évolution du mix électrique en France** – avec un enjeu sur le rythme de développement des énergies renouvelables en plus de la trajectoire fixée sur le nucléaire.

Chacun de ces paramètres peut varier indépendamment, ce qui permet d'étudier une large variété de situations.

D'autres paramètres importants sont également évalués dans l'étude :

- ▶ la profondeur de l'effort de rénovation, qui peut être distinguée entre le secteur résidentiel et le secteur tertiaire ;
- ▶ les hypothèses de coût des opérations de rénovation, qui demeurent aujourd'hui hétérogènes et mal connues ;
- ▶ la performance unitaire des opérations de rénovation, s'agissant notamment du nombre de gestes réalisés en moyenne lors d'une rénovation (d'une approche par succession de gestes à une approche de rénovation complète) ;

- ▶ la répartition de l'effort de rénovation, qui peut être considérée homogène (cas de référence) ou intégrer le traitement préférentiel de certains logements, comme par exemple les passoires thermiques) ;
- ▶ les facteurs d'utilisation et la satisfaction du besoin thermique avant/après rénovation, permettant ainsi de tenir compte de l'effet rebond ;
- ▶ la performance unitaire des pompes à chaleur (notamment coefficient de performance – ou COP – en moyenne et en situation de grand froid) et la nécessité éventuelle de compléter certaines installations par un appoint en radiateurs électriques ;
- ▶ la nature même des pompes à chaleur déployées (air/air, air/eau, hybride électricité/gaz) ;
- ▶ le coût unitaire et les coûts d'entretien des solutions de chauffage.

Pour simplifier la restitution des résultats, celle-ci s'organise selon un double axe de lecture.

D'une part, les principaux résultats sont rassemblés au sein de scénarios cohérents, qui décrivent différentes trajectoires d'évolution, sur 15 ans, du secteur du bâtiment et des solutions de chauffage qui y sont associées.

D'autre part, la restitution croisée des résultats autour d'une même thématique peut être organisée pour tirer parti de la comparaison des résultats. Cette restitution est structurée autour des trois axes désormais classiques : le fonctionnement du système électrique, les émissions de CO₂, l'analyse économique.

Les scénarios

Les résultats de l'étude sont notamment restitués autour de six grands scénarios :

- ▶ un « contrefactuel », où les objectifs sur l'efficacité (des bâtiments et des solutions de chauffage) et le recours accru à l'électricité ne sont pas atteints.
- ▶ un scénario reprenant la trajectoire de la SNBC : le scénario A-SNBC 1 constitue le scénario de référence de l'étude. Les objectifs sur l'efficacité (des bâtiments et des solutions de chauffage) et le recours accru à l'électricité (via des PAC) y sont atteints ;
- ▶ un scénario (B) où les objectifs sur l'efficacité sont atteints, mais pas celui sur le développement des solutions électriques ;
- ▶ un scénario (C) où les objectifs sur l'efficacité sont partiellement atteints (les PAC sont développées, mais le rythme de rénovations performantes n'augmente pas), et atteint sur le développement des solutions électriques ;
- ▶ un scénario (D) où les objectifs sur l'efficacité ne sont pas atteints, mais où celui sur le développement des solutions électriques l'est.

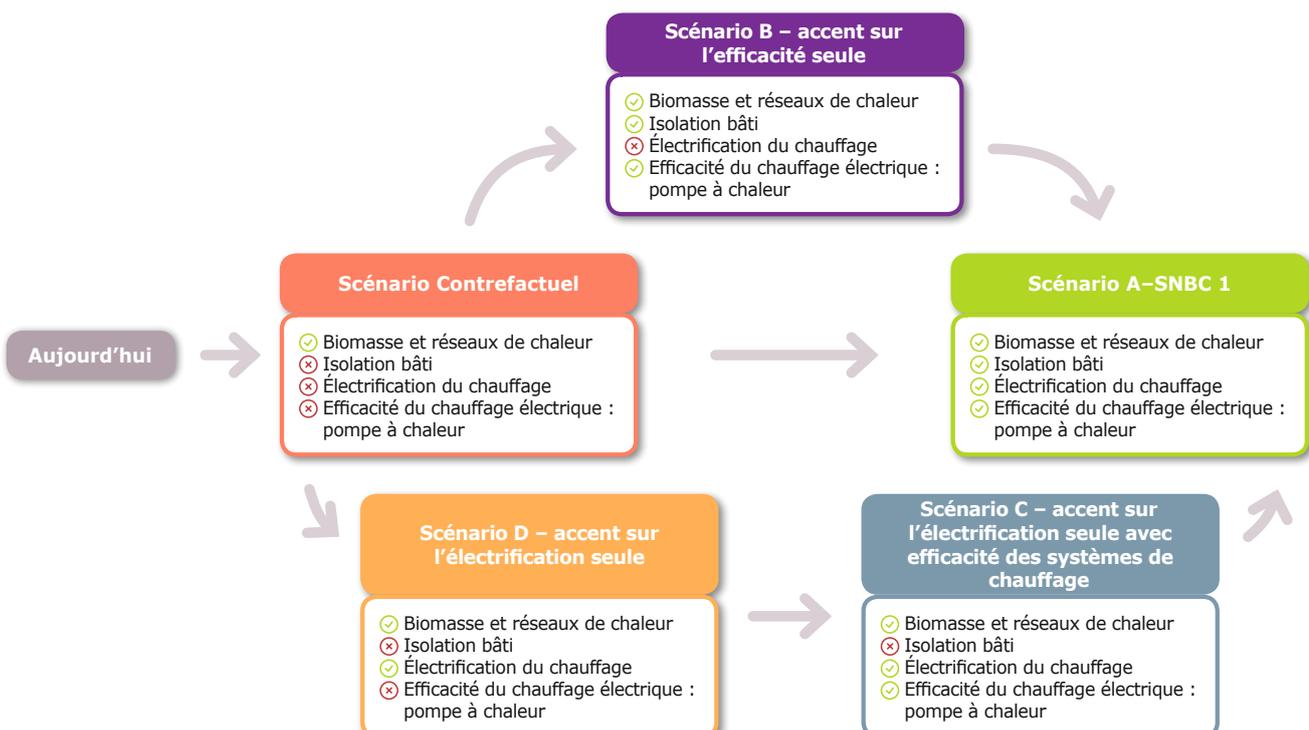
Tous ces scénarios ont un point commun : l'atteinte des objectifs sur le développement des réseaux de

chaleur urbains et la pénétration plus forte des solutions de chauffage au bois et le développement du biogaz. Ceci permet de comparer les scénarios entre eux sans dépendre d'hypothèses structurantes sur le développement de ces sources d'énergie, qui sont hors du champ de la présente étude.

Un autre scénario d'atteinte des ambitions de la SNBC (A-SNBC 2) a également été étudié. Dans le cadre d'un stress-test, il reprend les mêmes principes que A-SNBC 1 mais contient des réglages spécifiques dans la construction neuve : part de marché très majoritaire de l'électricité, moindre développement des solutions bois et réseaux de chaleur, disparition progressive du gaz.

Par défaut, l'évaluation des impacts sur le système électrique (coût, pointe, émissions de CO₂) est effectuée en supposant atteints les objectifs de la PPE.

En fonction du niveau de consommation induite par les différentes variantes, des variantes avec moindre développement du parc de production ont également été testées (le parc électrique est alors adapté via une modulation de la production nucléaire ou de la capacité éolienne installée).



Périmètre de validité des résultats

L'étude présente une analyse détaillée de très nombreux facteurs du secteur des bâtiments qui ont une influence sur le secteur électrique. En revanche, elle ne constitue pas une recherche d'optimisation au périmètre énergétique global. Ainsi, les résultats de la SNBC sont supposés atteints pour les autres vecteurs énergétiques (réseaux de chaleur urbains, développement du chauffage à bois et biomasse), de même que ceux de la PPE (développement du biogaz, de l'éolien...).

L'étude explore la façon de respecter la trajectoire de la SNBC sur le secteur du bâtiment. Elle ne vise pas à démontrer que les scénarios étudiés constituent la seule solution de parvenir à la neutralité carbone¹.

Son scénario de référence est celui de la PPE et de son cadrage 2035. Elle ne porte pas au-delà².

Par ailleurs, le développement de l'hydrogène et de la mobilité sont intégrés selon la trajectoire de la SNBC et les modélisations de RTE dans le Bilan prévisionnel et les rapports thématiques. Les scénarios d'évolution des parcs électriques dans les pays européens suivent l'hypothèse de référence retenue dans les plans nationaux énergie-climat.

S'agissant des impacts environnementaux, l'étude porte sur les émissions de gaz à effet de serre (en France et dans les pays voisins) et ne s'étend pas au-delà. Les autres impacts environnementaux, comme ceux sur les ressources nécessaires à ces évolutions du secteur bâtiment et du système électrique n'ont pas été estimés dans le cadre de cette étude. La résilience du secteur bâtiment et des systèmes de production face au changement climatique, qui peuvent varier fortement selon les scénarios, n'entre pas non plus dans le champ de cette étude.

S'agissant de la trajectoire de rénovation permettant d'atteindre à terme le niveau BBC pour l'ensemble du parc en moyenne, l'étude n'apporte pas d'éléments sur les conditions techniques permettant la rénovation des bâtiments à ces niveaux de performance tout en assurant confort et santé des occupants (hiver comme été) et qualité du bâti.

Enfin, l'étude n'évalue pas les effets macroéconomiques des scénarios, ni l'impact sur la facture énergétique des ménages.

1. Un travail ADEME de scénarios prospectifs énergie-ressource à l'horizon 2050 est en cours et vise à explorer quatre scénarios variés permettant d'atteindre la neutralité carbone.

2. RTE a engagé, en concertation avec les parties prenantes, la constitution de trajectoires sur le mix et la consommation électrique à horizon 2050. Ce travail sera restitué mi-2021.

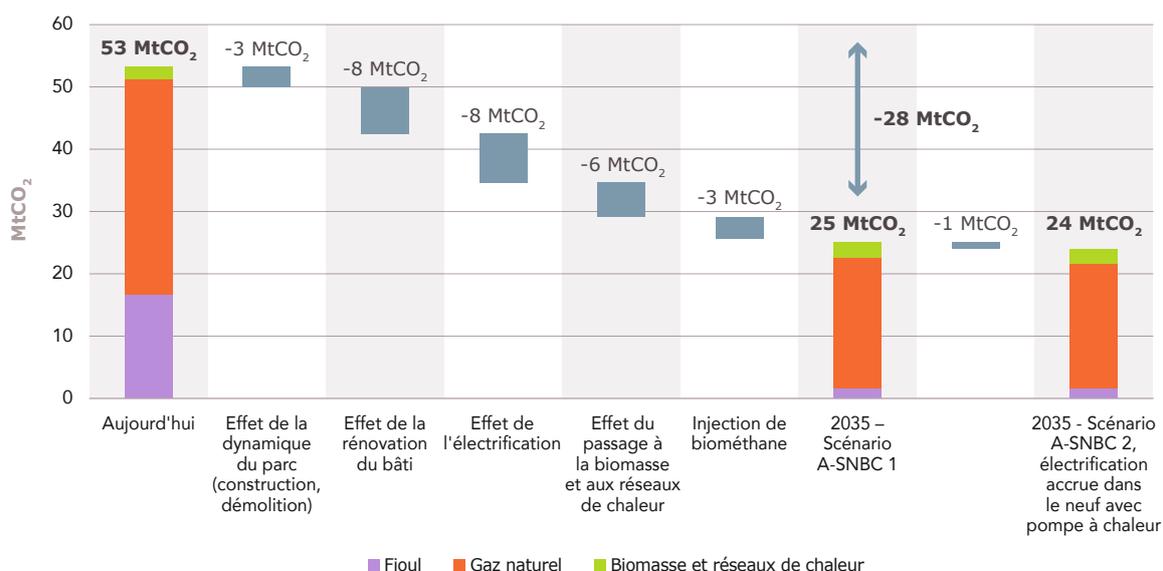
SYNTHÈSE

DES PRINCIPAUX RÉSULTATS

1) Une politique qui combine rénovation des bâtiments existants, recours aux solutions de chauffage les plus efficaces et bascule vers des vecteurs décarbonés comme l'électricité, la biomasse³ ou les réseaux de chaleur alimentés majoritairement par les énergies renouvelables permet de mettre les émissions du secteur « bâtiment » sur une trajectoire compatible avec les engagements climatiques de la France

1. Les besoins de chauffage de la France sont aujourd'hui satisfaits par des combustibles fossiles à plus de 50%. Ce poste est responsable de l'émission de 53 millions de tonnes de CO₂, soit environ 15% des émissions du pays.
2. Le scénario central de l'étude RTE-ADEME est calé sur la SNBC, et combine un effort substantiel sur l'efficacité de l'enveloppe des bâtiments (via la rénovation thermique des logements et bureaux existants et la performance des bâtiments neufs), l'efficacité

Figure 1. Évolution des émissions du chauffage (hors électricité) entre aujourd'hui et 2035 dans les scénarios SNBC



3. Bois énergie, et biogaz injecté dans les réseaux de gaz

des solutions de chauffage (via le recours très majoritaire aux pompes à chaleur plutôt qu'aux radiateurs électriques) et la bascule vers des vecteurs énergétiques bas carbone (électricité, biomasse, réseaux de chaleurs alimentés majoritairement par des énergies renouvelables et de récupération). **Il conduit à réduire les émissions de 28 millions de tonnes en 2035 par rapport à aujourd'hui.**

Un recours accru au chauffage électrique performant dans le neuf permet d'aller légèrement plus loin en portant les émissions du chauffage à 24 millions de tonnes à l'horizon 2035.

3. Au périmètre du seul système électrique français, ces deux scénarios ont un effet minime sur les émissions de CO₂, qui sont aujourd'hui très faibles comparées au total des émissions

nationales et à celles de la production d'électricité ailleurs en Europe (de l'ordre de 20 millions de tonnes par an, l'électricité produite en France étant à 93% décarbonée) et devraient l'être encore davantage à l'avenir en se stabilisant autour d'environ 10 millions de tonnes par an pour tous les usages électriques (soit une électricité à 95% décarbonée).

4. L'étude permet de confirmer que le scénario de la SNBC ne conduit pas à « externaliser des émissions » en augmentant celle des pays voisins. En intégrant la croissance des énergies renouvelables engagée en Europe et la trajectoire de référence de la PPE, le scénario de la SNBC aboutit à une réduction des émissions également à l'échelle européenne.

2) Les décisions prises aujourd’hui se traduiront de manière très progressive sur le parc de bâtiments et de solutions de chauffage. Dans le scénario de la SNBC, l’utilisation des combustibles fossiles dans les logements et de bâtiments tertiaires sera encore largement la norme en 2035, à mi-chemin de l’objectif de neutralité carbone

5. La politique du scénario SNBC implique d’accélérer sensiblement le rythme de rénovation et leur efficacité. En 2035, 15 millions de logements devront avoir fait l’objet d’une rénovation du bâti (soit 50 % du parc existant), point de passage nécessaire pour viser un parc de bâtiments équivalent BBC (bâtiment basse consommation) sur l’ensemble du territoire en 2050. Cela se traduit à la fois par une forte accélération du nombre de logements à rénover chaque année (doublement dans le scénario étudié) et une meilleure performance des opérations de rénovation considérées (passant de 30 % de gain énergétique conventionnel à 50 % en moyenne sur 2020-2035).
6. **Les mesures impliquées par la SNBC sont loin de conduire au « tout électrique » à l’échelle de la France :** en 2035, l’électricité chaufferait 50 % des logements et des surfaces tertiaires mais fournirait de l’ordre de 20 % de l’énergie finale de chauffage du pays du fait de la prédominance des pompes à chaleur (à laquelle s’ajoute l’énergie extraite de l’environnement par les pompes à chaleur). Le gaz représenterait encore un tiers des logements et surfaces tertiaires, et plus d’un tiers de l’énergie finale de chauffage.
7. Dans les bâtiments résidentiels existants, les mesures annoncées conduisent en premier lieu à mettre fin à l’utilisation du fioul comme combustible de chauffage. Plus de trois millions de logements utilisent encore cette énergie, qui a le plus grand impact sur l’effet de serre. Dans un souci d’efficacité, cette mesure est bien celle qui présente le plus haut niveau de priorité.
8. Dans les bâtiments neufs, le gouvernement a annoncé en novembre 2020 les orientations retenues dans la future réglementation environnementale 2020. Celles-ci sont en concertation mais pourraient conduire à ne plus utiliser le gaz comme combustible principal dans les maisons neuves à partir de l’été 2021 et dans les nouveaux logements collectifs à compter de 2024. Ceci conduira les bâtiments neufs à être chauffés par des solutions électriques (pompes à chaleur), des réseaux de chaleur faiblement émetteurs ou la biomasse. Le scénario A-SNBC 2 de l’étude RTE-ADEME permet de tester le cas d’une forte électrification dans les bâtiments neufs. Ses résultats demeurent, sur l’ensemble des variables étudiées, proches du scénario de référence de la présente étude mais avec des performances CO₂ légèrement meilleures.

Figure 2. Évolution de la consommation et du parc de chauffage entre aujourd'hui et 2035 dans le scénario de la SNBC

Consommation annuelle de chauffage (secteurs résidentiel et tertiaire)



Nombre de logements* (secteur résidentiel uniquement)



*À des fins de simplifications, seuls les logements résidentiels sont considérés sur le graphique

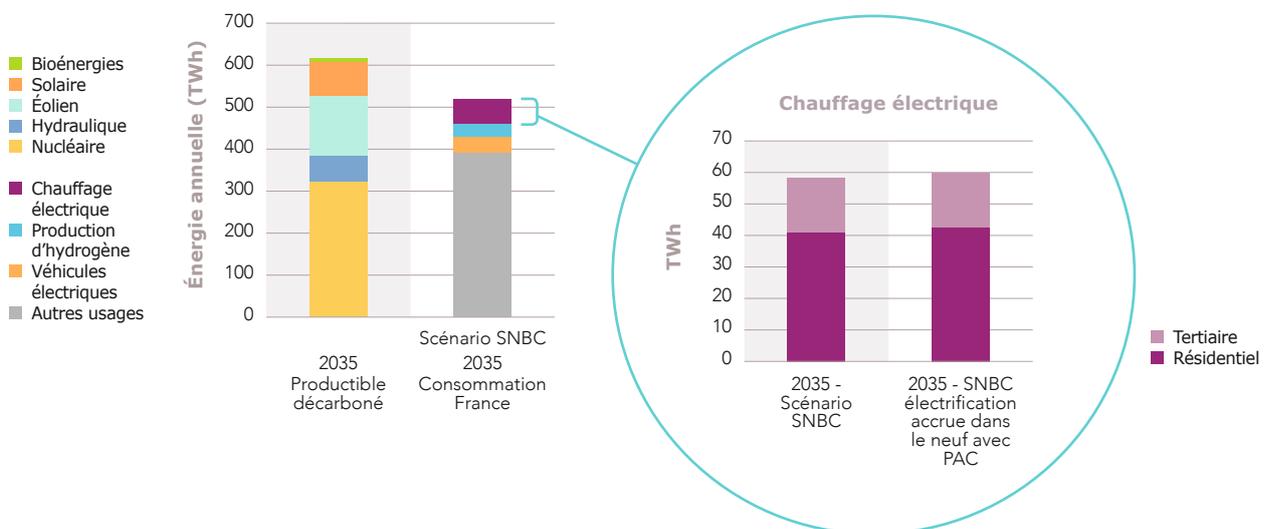
3) Le cadre de référence fixé par la SNBC et la PPE, associant des objectifs ambitieux sur la rénovation au développement des énergies renouvelables, n'engendre pas de hausse de la consommation d'électricité pour le chauffage ni d'impact sur les pointes électriques

9. La consommation d'électricité est aujourd'hui globalement stable depuis plusieurs années, de même que les pointes électriques. Dans le même temps, le potentiel de flexibilité à la pointe s'est accru. Étudier l'impact des politiques sur le bâtiment sur l'évolution de ces postes de consommation constitue l'un des objets du rapport : ce ne sont pas moins de douze variantes qui ont été étudiées pour disposer d'un diagnostic robuste.
10. De manière générale, une partie significative des progrès d'efficacité énergétique liés à une rénovation, qu'il s'agisse d'isolation ou de changement du système de chauffage, se traduit par un accroissement du confort thermique pour les occupants des logements concernés (concrètement, une augmentation de la température

de chauffage) et atténue la diminution de leur consommation. **L'étude RTE-ADEME prend bien en compte cet « effet rebond » : la rénovation du bâti ou le remplacement par des systèmes de chauffage efficaces entraînent un effet baissier, mais modéré, sur la consommation d'électricité.**

11. L'usage préférentiel de l'électricité dans le bâtiment neuf a une influence haussière mais minimale sur la consommation d'électricité, les normes de construction actuelles devenant plus strictes. L'électrification dans les logements et bâtiments tertiaires conduit à augmenter la consommation électrique mais dans des proportions limitées si elle repose majoritairement sur les pompes à chaleur comme le prévoit la SNBC.

Figure 3. Mix de production français et consommation dans le scénario PPE-SNBC, à l'horizon 2035



- 12.** Réduits sur le plan individuel et orientés en sens opposés, ces effets devraient entraîner au niveau agrégé des variations elles-mêmes de faible intensité sur la consommation d'électricité. En valeur moyenne (corrigée des variations climatiques), la consommation d'électricité dédiée au chauffage dans les logements et les bâtiments tertiaires serait stable voire en légère baisse (58 TWh en 2035 dans le scénario central A-SNBC 1, 60 TWh dans le scénario A-SNBC 2 prévoyant un développement très soutenu de l'électricité dans le neuf, contre 61 TWh aujourd'hui).
- 13.** Ce résultat central se retrouve sur l'évolution de la pointe électrique. Dans le scénario de la SNBC, la pointe «à une chance sur dix» serait même légèrement plus basse (-3 GW) que dans le scénario contrefactuel. Dans de nombreuses variantes, les scénarios étudiés sur le secteur du bâtiment ne conduisent pas à une augmentation de la pointe.
- 14.** Dans ces circonstances, le scénario de la SNBC ne pose pas de difficulté en matière de sécurité d'approvisionnement :
- ▶ La trajectoire de développement du parc de production d'électricité bas carbone prévue par la PPE suffit largement à couvrir les besoins supplémentaires qui résultent des transferts d'usage nécessaires pour décarboner l'économie (mobilité électrique pour le transport, hydrogène bas carbone pour l'industrie et la mobilité lourde, chauffage électrique pour le bâtiment).
 - ▶ La sécurité d'approvisionnement serait assurée dans le cadrage de la PPE (au sens du critère réglementaire).

4) Au périmètre des scénarios étudiés, le développement des solutions électriques est indispensable pour diminuer les émissions, mais insuffisant pour atteindre les objectifs de la SNBC s'il n'est pas accompagné d'un effort sur l'efficacité des solutions déployées et d'une exigence sur la performance des bâtiments

- 15. Tous les scénarios étudiés conduisant à renforcer l'utilisation des solutions de chauffage électriques permettent de faire baisser les émissions en France par rapport à aujourd'hui.** Comparés à un scénario moins ambitieux (contrefactuel), le recours accru au chauffage électrique permet d'économiser entre 5 et plus de 10 MtCO₂/an à l'horizon 2035. Le chauffage électrique implique un recours ponctuel à des centrales au gaz voire au fioul en France, mais dans des proportions beaucoup trop faibles pour invalider l'intérêt de se passer de combustibles fossiles pour le chauffage tout le reste de l'année.
- 16.** Ce résultat est conservé dans un bilan européen intégrant les émissions du système électrique dans les pays voisins : tous les scénarios étudiés prévoyant un recours accru au chauffage électrique en France permettent de faire baisser les émissions en Europe par rapport au contrefactuel (jusqu'à 14 MtCO₂/an), à une seule exception près (dans laquelle le bilan est quasiment nul).
- 17.** Cette exception correspondrait à un scénario particulièrement contraint, qui consisterait (i) en une prolongation durant 15 ans des tendances passées en matière de rénovation des bâtiments en France, (ii) en un retard sur le développement des énergies renouvelables, et (iii) en un développement rapide du chauffage électrique très majoritairement via des radiateurs électriques plutôt que par des pompes à chaleur. Dans cette configuration, les émissions de CO₂ diminueraient en France mais seraient déplacées à l'étranger, pour un bilan nul par rapport au scénario contrefactuel.
- 18.** Un développement des solutions électriques qui ne s'accompagnerait pas d'un effort sur l'efficacité (scénario D) ne serait pas suffisant pour atteindre les objectifs car (i) l'absence de rénovation des bâtiments chauffés au gaz (qui représente encore un tiers de l'énergie de chauffage en 2035) conduit à un surplus d'émissions des bâtiments en France et (ii) l'absence de rénovation des logements électriques conduit, toutes choses étant égales par ailleurs, à de moindres exports d'électricité bas-carbone et donc à une moindre réduction des émissions à l'échelle européenne.

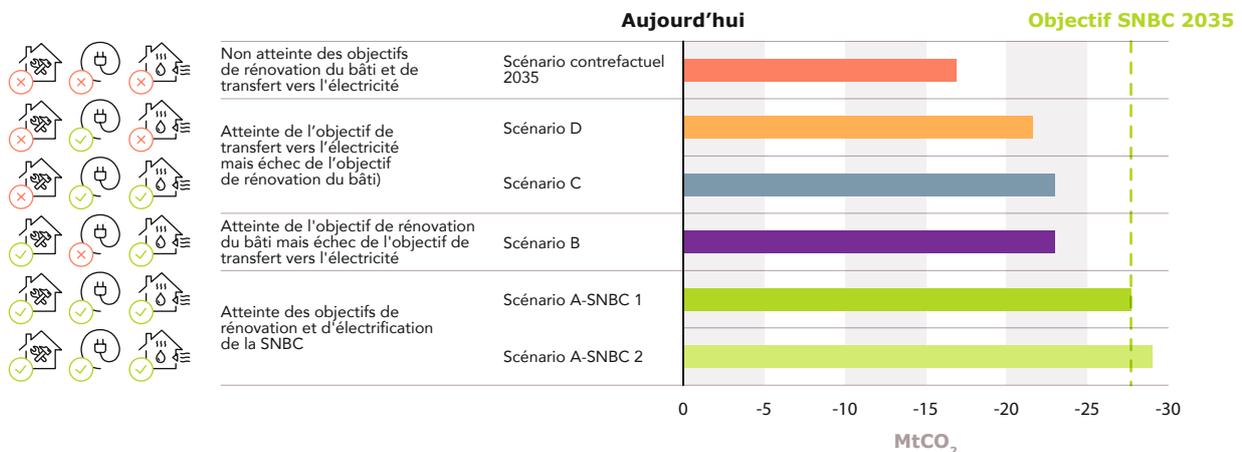
5) Au périmètre des scénarios étudiés, les politiques de rénovation du bâti et d'amélioration de l'efficacité thermique sont indispensables pour diminuer les émissions, mais insuffisantes pour atteindre les objectifs de la SNBC si elles ne s'accompagnent pas d'un développement des solutions électriques

- 19.** Au cours des 15 prochaines années, l'utilisation de combustibles fossiles pour le chauffage demeurera la norme pour un grand nombre de bâtiments résidentiels ou tertiaires en France, même dans le cas de figure où les orientations de la SNBC se déploient effectivement et conduisent l'électricité, le bois-biomasse et les réseaux de chaleur à gagner des parts de marché. Les programmes de rénovation auront comme conséquence d'économiser des combustibles fossiles pour ces logements et surfaces tertiaires : ils conduisent donc à faire baisser les émissions du pays.
- 20.** Pour un même nombre de logements et bâtiments tertiaires chauffés à l'électricité, le scénario prévoyant le remplacement des radiateurs électriques par des pompes à chaleur et le renforcement de la performance des bâtiments existants (scénario B) permet d'éviter des émissions de CO₂ à l'échelle nationale et

surtout européenne (par rapport au scénario contrefactuel) car il engendre une diminution de la consommation d'électricité et conduit, toutes choses étant égales par ailleurs, à exporter davantage d'électricité bas-carbone produite en France vers les pays voisins. À l'horizon 2035, cet effet joue encore de manière importante sur le bilan européen des émissions car de nombreux États devraient encore avoir recours de manière substantielle à des centrales à gaz ou au charbon en Europe, et que les exports d'électricité depuis la France ont un fort effet de levier sur les émissions.

- 21.** En revanche, ce scénario est insuffisant pour atteindre les objectifs de la SNBC. En effet, l'utilisation de combustibles fossiles (gaz, mais aussi fioul) demeurerait majoritaire en 2035, conduisant à s'écarter de la trajectoire nécessaire pour atteindre la neutralité carbone.

Figure 4. Évolution des émissions du chauffage en France entre aujourd'hui et 2035 selon l'atteinte des objectifs de politique publique (hors électricité)



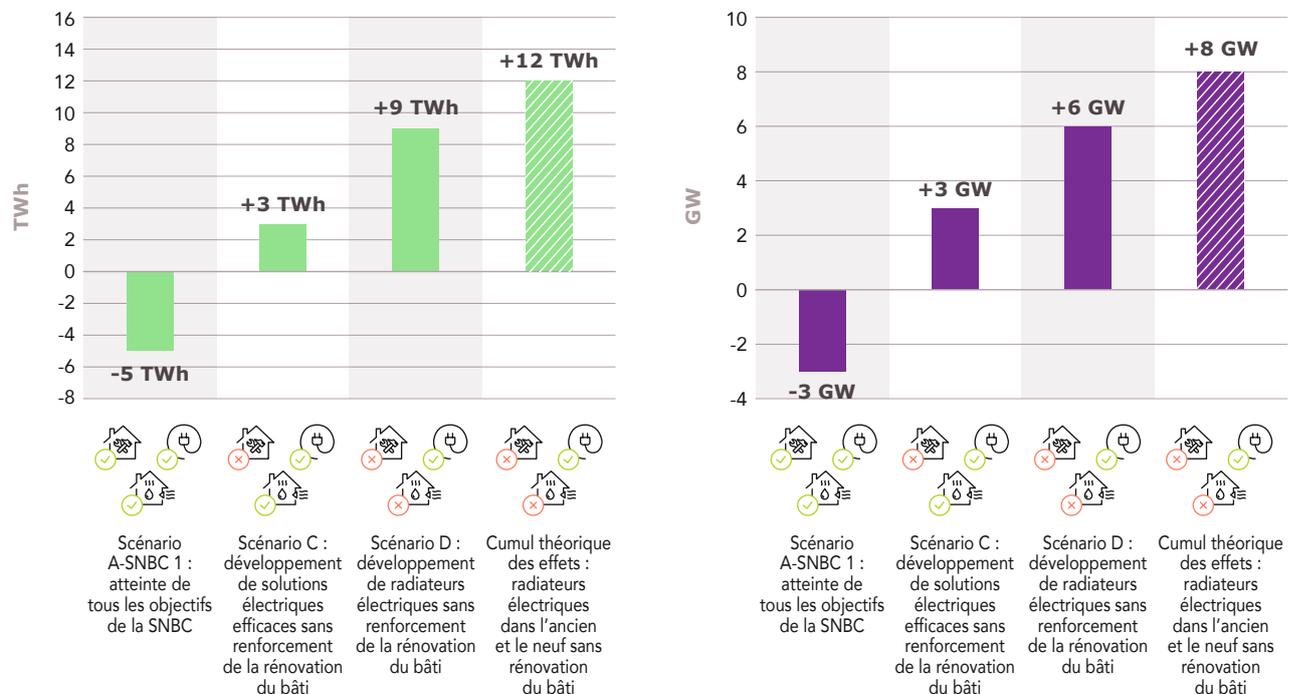
6) Les scénarios prévoyant un recours accru au chauffage électrique qui ne sont pas accompagnés d'un effort sur l'efficacité des solutions déployées et d'une exigence sur la performance des logements conduisent à augmenter les pointes électriques et rendent la sécurité d'alimentation en électricité plus tendue

22. Les scénarios où l'électrification s'accélère mais où les objectifs d'efficacité ne sont pas atteints engendrent une augmentation de la consommation d'électricité du chauffage (+9 à +12 TWh à un horizon de 15 ans par rapport au scénario contrefactuel). 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.

23. Ces scénarios conduisent également à augmenter les pointes hivernales à horizon 2035 (+6 à +8 GW dans le scénario cumulant les effets). En revanche, dans le scénario C où l'électrification se fait via des pompes à

Figure 5. Évolution de la consommation électrique et des pointes hivernales par rapport au scénario contrefactuel



chaleur mais sans atteinte de l'objectif sur la rénovation, l'augmentation de la pointe est modérée (3 GW sur 15 ans).

- 24.** Dans les scénarios les plus contraints, le maintien d'un haut niveau de sécurité d'alimentation implique un développement particulièrement poussé des flexibilités, atteignable sur le plan théorique mais à de nombreuses conditions techniques, industrielles et sociétales.
- 25.** Ces dynamiques d'augmentation de la pointe se matérialiseraient sur le temps long. Elles n'influencent pas, à court terme, la situation de l'équilibre offre-demande du système électrique, qui apparaît cet hiver plus tendue en raison de la crise sanitaire et sera à surveiller sur les deux prochains hivers du fait d'une tension sur la capacité de production (sortie définitive du charbon en France, nombreux arrêts prévus de réacteurs nucléaires, retard dans la mise en service de certains moyens de production renouvelables, gaz ou nucléaire).

7) Le développement des flexibilités de production et de consommation constitue une politique pertinente pour accompagner la transition

- 26.** Le chauffage est un usage thermosensible :
- ▶ Il n'est pas à l'origine de la forme de la «pointe du soir» observée chaque jour de semaine en hiver aux alentours de 19h. Celle-ci est majoritairement due aux usages résidentiels (éclairage, cuisson), alors que la consommation dans les bureaux et les transports n'a pas encore diminué. Le chauffage ne contribue que faiblement à ce pic.
 - ▶ En revanche, il constitue le principal facteur pour expliquer le niveau moyen de consommation durant une journée donnée l'hiver (ce niveau moyen pouvant varier de plusieurs dizaines de gigawatts entre une journée chaude et froide). Ces niveaux peuvent être importants durant plusieurs jours consécutifs en cas de vague de froid.
- 27.** Les différentes simulations restituées dans l'étude ont montré que les indicateurs sur la pointe électrique «à une chance sur dix», projetés à l'horizon 2035, s'échelonnaient entre un effet baissier (-3 GW dans le scénario de la SNBC) et haussier (+6 GW dans le scénario où le recours à des solutions électriques s'effectue sans accélération des efforts de rénovation et via des solutions électriques comme les radiateurs à effet Joule plutôt que les pompes à chaleur). Cette incertitude plaide pour que soient poursuivies les politiques visant à développer les leviers de flexibilité sur les usages. Dans le scénario le plus contraint (scénario D), la mobilisation de ces flexibilités constitue un prérequis pour assurer la sécurité d'approvisionnement.
- 28.** L'étude recense plusieurs moyens d'accompagner la croissance des usages thermosensibles, au-delà des hypothèses déjà considérées par la PPE (6,5 GW d'effacements en 2028, dont 5 GW de capacité d'effacement dans l'industrie et le secteur tertiaire) :
- ▶ le pilotage de la recharge des véhicules électriques, qui est susceptible d'offrir jusqu'à 8 GW de flexibilité supplémentaires (pour 15 millions de véhicules électriques, conformément à la SNBC, soit près de la moitié du parc à horizon 2035) à condition d'être généralisé de manière massive y compris un pilotage bidirectionnel de type *vehicule-to-grid* ;
 - ▶ le pilotage du chauffage électrique, soit par le biais d'effacements courts «cascado-cycliques» en roulement sur un parc – mais son effet agrégé est limité – soit par des effacements longs. En intégrant les effets de report, l'effet positif sur les marges serait de l'ordre de 2 GW, uniquement dans le secteur résidentiel.
- 29.** À l'inverse, l'étude ne vise pas à analyser les effets combinés du déploiement des nouveaux usages, comme le chauffage électrique, la mobilité électrique et la production d'hydrogène. Ces différentes actions pourraient se combiner de manière plus ou moins favorable pour la gestion du système électrique. Ce type d'analyse est réalisé dans le Bilan prévisionnel de RTE, dont la prochaine édition (mars 2021) étudiera l'échéance 2030.
- 30.** **Encourager la flexibilité de la consommation alors que les usages électriques sont amenés à se développer fortement constitue une politique sans regret** qui rend le système électrique plus robuste à différents aléas et concourt par ce biais à accompagner l'atteinte des objectifs climatiques. Les coûts de gestion de la pointe, par exemple via les effacements de consommation ou la généralisation de la recharge intelligente pour le véhicule électrique, apparaissent de second ordre par rapport aux investissements requis dans le secteur du bâtiment. Le succès de ce type de politique se joue dans l'appropriation par le consommateur. Les obstacles à lever

semblent essentiellement de nature pratique : rendre simple le pilotage d'une voiture électrique (comme pour le pilotage de l'eau chaude sanitaire dans les années 1980), proposer des offres de pilotage d'emblée lors du renouvellement d'une installation de chauffage, etc.

- 31.** L'étude considère également la possibilité d'installer des pompes à chaleur hybrides électricité/gaz en substitution à des pompes

à chaleur ou à des chaudières au gaz. Une pompe à chaleur hybride combine une pompe à chaleur de faible puissance à une chaudière gaz : elle fonctionne avec de l'électricité la plupart du temps, sauf en situation de froid où le gaz prend le relais. Le déploiement de chaudières hybrides à la place de pompes à chaleur classiques conduirait à diminuer la pointe de 1,4 GW par million d'installations. Le gisement économique pour ces technologies reste à préciser (voir supra).

8) La décarbonation du secteur du bâtiment implique des investissements significatifs dans la rénovation du bâti et les systèmes de chauffage

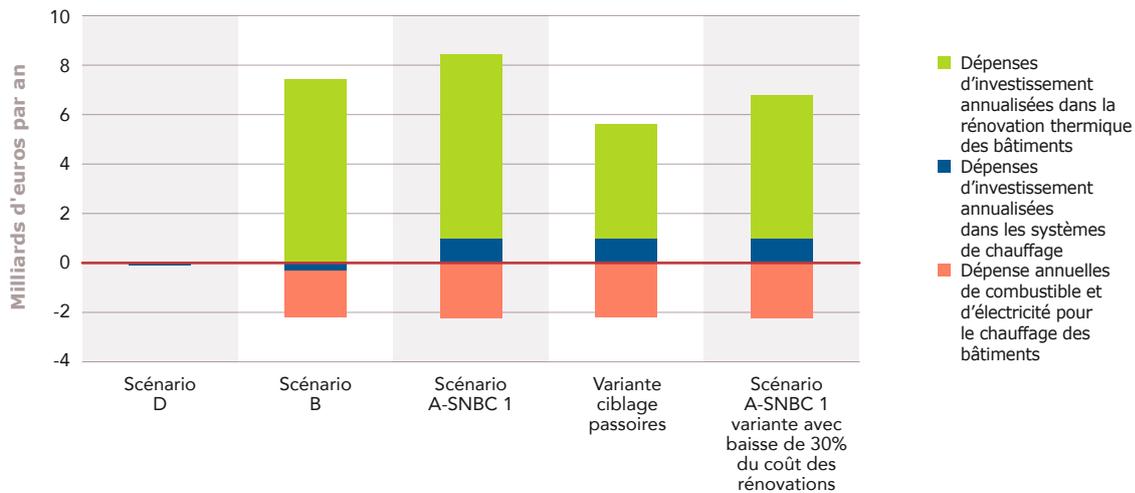
- 32.** La transformation progressive du parc immobilier français pour atteindre les objectifs de réduction de la consommation (objectif d'un parc en moyenne BBC à horizon 2050) et de décarbonation des solutions de chauffage implique des investissements importants. Ceux-ci se décomposent en plusieurs catégories : (i) la rénovation du bâti et (ii) le remplacement des systèmes de chauffage par des solutions efficaces et bas-carbone. Cet investissement est très largement porté par les acteurs privés (particuliers, entreprises) et favorisés par un ensemble d'aides et incitations de l'État.
- 33.** Dans le scénario SNBC, l'investissement évalué au périmètre de la collectivité (tous les acteurs français, Etat compris) doit augmenter de l'ordre de 12 milliards d'euros par an par rapport au scénario contrefactuel. Cet incrément correspond très largement à l'accélération du rythme de rénovation des bâtiments existants nécessaire pour atteindre les objectifs fixés sur le bâti. S'agissant du renouvellement des systèmes de chauffage – qui représentent en valeur absolue une part importante des dépenses collectives – l'évolution des coûts entre scénarios est moins prononcée : il s'agit essentiellement de rediriger une partie des dépenses récurrentes et largement incompressibles des entreprises et ménages vers des solutions bas-carbone, qui nécessitent un investissement initial souvent plus important.
- 34.** Les investissements dans la rénovation du bâti et les solutions électriques efficaces ne sont que partiellement compensés par une diminution de l'approvisionnement énergétique (gaz, fioul, électricité, etc.). Par rapport au scénario contrefactuel, les coûts variables (gaz, fioul, bois, électricité) sont réduits de 2,2 milliards d'euros par an.
- 35.** Les sommes à engager représentent un investissement climatique nécessaire pour l'atteinte des objectifs de réduction des émissions. Comparés à d'autres leviers concourant à cet objectif (sur la chaleur renouvelable, la mobilité électrique, la production d'hydrogène par électrolyse, etc.), le volume d'émissions évitées rapporté aux montants financiers engagés (coût d'abattement) apparaît relativement élevé et dépend fortement des hypothèses considérées sur le coût de la rénovation, lesquelles peuvent varier très sensiblement vu l'hétérogénéité des situations rencontrées et les projections sur les gains possibles associées à une industrialisation des actions de rénovation. Dans le scénario A-SNBC 1 à l'horizon 2035, les coûts d'abattement se situent entre 430 €/tCO₂ dans l'hypothèse de référence sur les coûts de la rénovation et 310 €/tCO₂ dans l'hypothèse basse correspondant à une baisse significative des coûts de la rénovation liés aux effets d'échelle et à l'industrialisation de la rénovation. **Il s'agit un niveau proche de la valeur tutélaire du carbone retenue par les pouvoirs publics à cette échéance (375 €/tCO₂ évitée).**
- 36.** Ce premier résultat brut sur le coût d'abattement est largement dû à la prise en compte de «l'effet rebond» sur la consommation d'énergie observé dans les logements dont le bâti et les solutions de chauffage sont plus efficaces. Cet effet rebond correspond à une amélioration de la qualité de vie des occupants, participe de la lutte contre la précarité énergétique et a des effets positifs sur la santé : ce type de bénéfice ne peut être valorisé selon une pure logique climatique. **À même niveau de confort (donc sans effet rebond), le coût d'abattement de la tonne de CO₂ évité dans le scénario de la SNBC s'évaluerait dans une fourchette comprise entre 160 et 240 €/tCO₂ (selon les coûts de la rénovation), une valeur significativement inférieure à la valeur de l'action pour le climat à l'horizon 2035.**

- 37.** Parmi les différents leviers de décarbonation, les mesures conduisant à accroître la part de l'électricité apparaissent les moins coûteuses économiquement. Néanmoins, elles ne permettent pas, prises isolément, d'atteindre les objectifs de réduction des émissions de CO₂.
- 38.** Vu du consommateur, l'adoption des solutions les plus efficaces sur le temps long (pompes à chaleur ou rénovations énergétiques performantes) sont celles qui nécessitent le plus d'investissement initial. Ceci risque de se traduire par une difficulté à assurer le déclenchement des investissements de rénovation

par les propriétaires (notamment les propriétaires bailleurs), de nature à justifier des mesures d'accompagnement spécifiques.

- 39.** Le résultat global sur l'intérêt économique des actions de rénovation pourra faire l'objet d'analyses complémentaires permettant d'identifier des priorités (sur les logements à privilégier, les zones géographiques, ou les gestes les plus efficaces) en appui à la décision publique. L'étude contient des premiers éléments d'analyse sur l'intérêt de cibler les « passoires thermiques ».

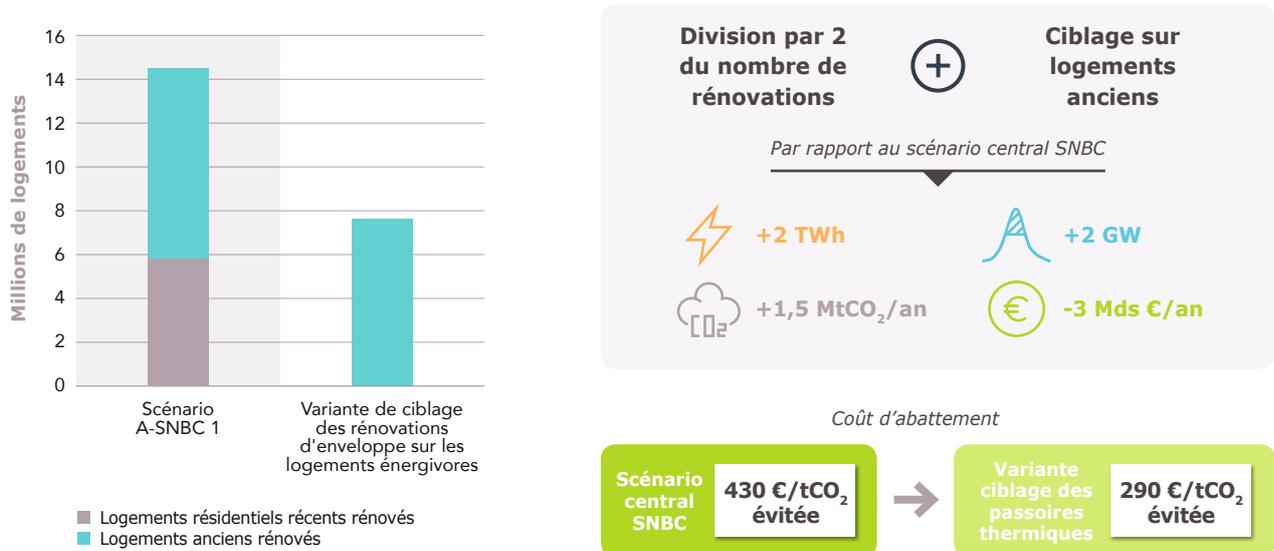
Figure 6. Chiffrage des coûts complets annualisés des différents scénarios (écart par rapport au scénario contrefactuel, hors valorisation du CO₂)



9) Cibler les « passoires thermiques » et augmenter le niveau d'exigence sur l'efficacité de la rénovation permet de maximiser les gains climatiques à enveloppe financière donnée

- 40.** Les bâtiments existants présentent des caractéristiques très hétérogènes. Certains, parfois qualifiés de « passoires thermiques » (notamment les bâtiments des classes G et F) présentent la particularité d'être très mal isolés. Ils sont également parfois caractérisés par des solutions de chauffage peu performantes (radiateurs électriques anciens) ou incompatibles avec la trajectoire de décarbonation du secteur des bâtiments (équipement en chaudières au fioul par exemple).
- 41.** L'étude RTE-ADEME permet de confirmer que procéder à des rénovations de meilleure qualité en ciblant les logements les plus énergivores est pertinent sur le plan de la performance de l'action climatique.
- 42.** Notamment, la possibilité de procéder à une rénovation ciblée sur des bâtiments construits avant 1975 (principalement des maisons individuelles), soit antérieurement au choc pétrolier et aux premières normes de construction thermique, a fait l'objet d'une variante spécifique. Dans cette dernière, la rénovation des bâtiments se déroule à un rythme similaire à celui du passé mais augmente en efficacité et est rigoureusement ciblée sur les bâtiments concernés plutôt que répartie de manière plus homogène sur le parc immobilier existant. Cette variante donne des résultats intéressants :
- ▶ des indicateurs sur la consommation électrique (en moyenne annuelle et en pointe) stables par rapport à aujourd'hui, légèrement supérieurs au scénario central de la SNBC (+2 TWh, +2 GW), sans pour autant occasionner de risque sur la sécurité d'approvisionnement ;
 - ▶ des performances sur les émissions de CO₂ proches du scénario central de la SNBC

Figure 7. Effet d'un traitement prioritaire des passoires thermiques



(surcroît d'émissions de 1,5 MtCO₂/an à l'horizon 2035), donc meilleures que celles des scénarios B et D ;

- ▶ un coût largement plus faible (gain de 3 milliards d'euros par an) car moitié moins de logements seraient rénovés.

43. La rénovation ciblée des « passoires thermiques » apparaît ainsi comme l'une des actions dont le rendement climatique est le plus important et présente un intérêt économique marqué. Même en tenant compte de l'effet rebond, son coût d'abattement ressort à 290 €/tCO₂. Il serait inférieur à 100 €/tCO₂ sans prendre en compte l'effet rebond.

44. Ce type de ciblage des rénovations sur les logements les plus énergivores apparaît ainsi un choix économique efficace du point de vue de la collectivité, alors qu'il permet de réduire la précarité énergétique et présente d'autres externalités positives. Même si les soutiens publics sont bonifiés pour ce type de travaux, la principale difficulté de mise en œuvre de cette politique publique est de pouvoir inciter

à la réalisation de ces travaux, notamment pour les propriétaires n'ayant pas de trésorerie ou un accès au crédit difficile.

45. Une politique de traitement prioritaire de certains logements peut également se concevoir dans le cadre d'une augmentation du nombre de rénovations par an, élargie à l'ensemble des types de bâtiments, mais avec un accent sur les logements et bâtiments tertiaires les plus énergivores et/ou présentant les performances climatiques les moins bonnes (en intégrant la nature de la solution de chauffage). Le scénario « ciblage » conduit en effet à traiter une partie des logements anciens non isolés, et n'épuise pas le gisement des logements énergivores et/ou fortement émetteurs.

46. Ce type d'étude pourrait être prolongé afin d'identifier les meilleures combinaisons pour maximiser l'efficacité de l'action collective dans le secteur du bâtiment, ainsi que les effets de seuils concernés (notamment les classes de logement au-delà desquelles l'effet marginal d'une amélioration de l'enveloppe décroît).

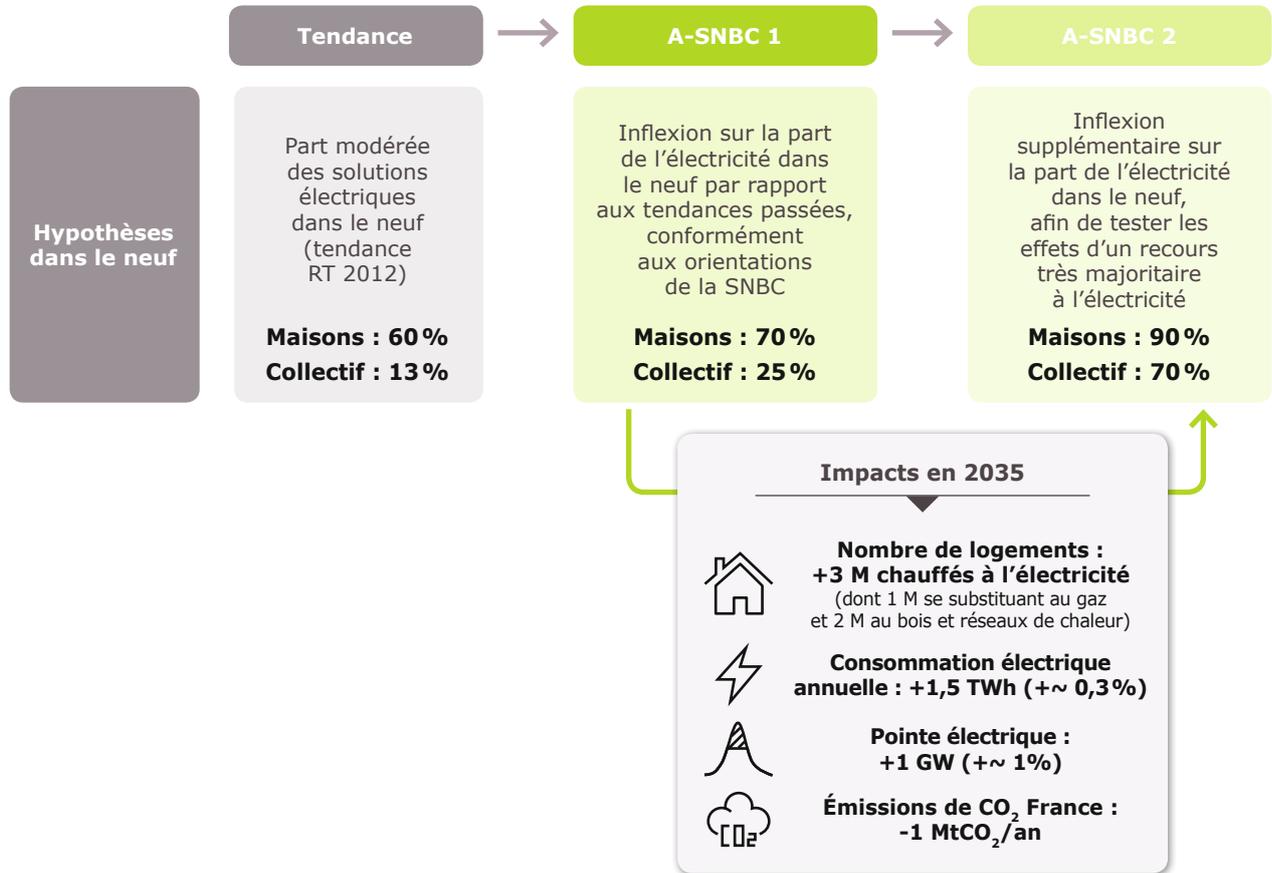
10) Les pompes à chaleur hybrides peuvent présenter un intérêt pour la politique climatique si elles se substituent à des chaudières fossiles ou un intérêt pour la sécurité d'approvisionnement électrique si elles se substituent à des pompes à chaleur électriques

- 47.** Les pompes à chaleur hybrides, qui sont aujourd'hui très peu déployées, sont constituées d'une pompe à chaleur électrique de faible puissance pour assurer la base et d'un appoint gaz pour assurer la pointe ; elles peuvent jouer un rôle dans la réduction des pointes électriques si elles viennent en substitution de solutions de chauffage électrique. Ce constat est présenté par ailleurs au point 31.
- 48.** Si elles se déploient en substitution à des chaudières utilisant des combustibles fossiles, les pompes à chaleur hybrides électricité/gaz n'engendrent pas de pointe électrique supplémentaire tout en contribuant à la réduction des émissions. L'amélioration du bilan carbone peut, dans ce cas, être évaluée à environ 3,5 millions de tonnes de CO₂ pour plus de 2 millions de pompes à chaleur hybrides déployées à la place de chaudières gaz.
- 49.** Par ailleurs, le déploiement des pompes à chaleur hybrides en substitution à des pompes à chaleur électriques permet de réduire la pointe et sans augmenter, ni faire baisser les émissions. En effet, les émissions supplémentaires liées à l'utilisation du gaz dans certaines situations, et les émissions évitées sur le secteur électrique pour gérer les pointes, sont du même ordre de grandeur et se compensent.
- 50.** Du point de vue de l'utilisateur, la solution PAC hybride peut s'avérer moins chère à l'investissement qu'une PAC classique, mais des analyses supplémentaires seraient nécessaires pour établir le bilan économique précis de ce scénario du point de vue de la collectivité. Il existe en effet une forte hétérogénéité des situations possibles : la pompe à chaleur hybride semble pouvoir présenter un intérêt dans certaines situations (maison individuelle difficile à isoler, avec présence d'un approvisionnement gaz, permettant d'obtenir un véritable effet de sous-dimensionnement de la pompe à chaleur électrique en cas d'utilisation d'un modèle hybride) et non dans d'autres (logements existants non raccordés au réseau gaz ou sans boucle d'eau chaude, espace limité pour accueillir un double système de chauffage...).

11) Dans le bâtiment neuf, un recours très majoritaire à l'électricité conduit à une performance proche du scénario central de la SNBC, avec une performance légèrement meilleure pour les émissions de CO₂

- 51.** Les travaux de l'étude RTE-ADEME ont été lancés en 2019, en intégrant la volonté de privilégier les solutions bas-carbone et efficaces dans des logements performants. Les orientations de la RE2020 n'étaient alors pas encore précisées.
- 52.** Parmi les annonces du gouvernement en novembre 2020 figure la disparition du chauffage exclusivement au gaz dans les bâtiments neufs (en 2021 pour les maisons et 2024 pour les appartements). Cette disparition ne conduit pas mécaniquement à installer des solutions électriques, la chaleur renouvelable (bois, géothermie, solaire) et le raccordement à des réseaux de chaleur alimentés par des énergies renouvelables figurant au titre des solutions privilégiées par la SNBC. La possibilité que les bâtiments neufs soient très largement chauffés à l'électricité doit néanmoins être étudiée. Le scénario A-SNBC 2 de l'étude RTE-ADEME permet de vérifier les conséquences d'une part de marché pour l'électricité de 90 % dans les maisons neuves et de 70 % dans les immeubles collectifs, avec l'hypothèse d'un fort développement des pompes à chaleur.
- 53.** À l'horizon 2035, ce scénario est légèrement plus performant que le scénario central de la SNBC sur le plan des émissions, car il permet d'émettre un million de tonnes en moins à l'échelle nationale (l'effet du passage de la RT 2012 à la RE 2020 étant encore plus important car le scénario A-SNBC 1 de l'étude RTE-ADEME intégrait déjà une réduction de la part du gaz dans la construction neuve). Cette performance est atteinte dans le cas où le recours à l'électricité se fait via des pompes à chaleur, dans des bâtiments dont les performances réelles sont conformes aux attendus. L'effet différenciant des mesures rendant obligatoire l'utilisation de vecteurs bas-carbone dans la construction neuve croît de manière progressive avec le temps et doit être analysé en intégrant la perspective plus large de la neutralité carbone à horizon 2050.
- 54.** Par rapport au scénario central de la SNBC, les indicateurs du système électrique sont proches (+1,5 TWh en moyenne annuelle, +1 GW sur la pointe). **Ce scénario, restreint au neuf, ne conduit pas à un risque sur la sécurité d'approvisionnement.**
- 55.** Les impacts sur le marché de la rénovation (qui serait susceptible de suivre celui du neuf en raison des effets d'échelle sur le prix des technologies et des compétences développées par les artisans) pourront faire l'objet d'analyses complémentaires. L'étude RTE-ADEME montre que ce sont bien dans les logements existants que se situe l'essentiel de l'enjeu pour le système électrique et pour les émissions à moyen terme : d'une part, le parc immobilier se renouvelle peu en rythme annuel et le flux a donc une importance de second ordre sur les résultats de l'analyse, d'autre part, les bâtiments neufs sont beaucoup plus performants que les anciens et ne soulèvent donc pas les mêmes enjeux.

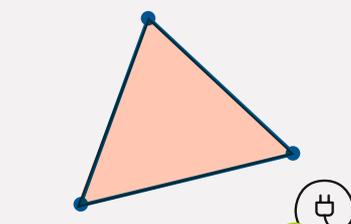
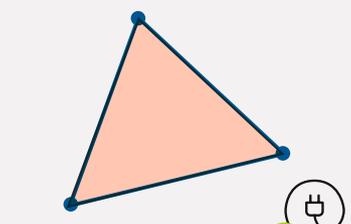
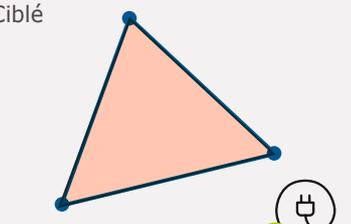
Figure 8. Effet de l'électrification du neuf sur les émissions de CO₂ nationales et la pointe avec et sans atteinte des objectifs de rénovation et de performance des solutions de chauffage



Présentation initiale

Valeurs en absolu

		2018 État des lieux	Effet démographie + décohabitation →	2035 Scénario Contrefactuel : atteinte partielle de la SNBC, tendanciel en électrification et efficacité
Hypothèses	Cadre général	29 millions de résidences principales		34 millions de résidences principales
	Chauffage électrique	~10 millions de foyers chauffés à l'élec.		Performance énergétique des bâtiments neufs et existants (isolation)
	Efficacité énergétique	Isolation : 400 000 rénovations enveloppe par an avec 30% de gain sur le besoin conventionnel Part Joule/PAC : 90%/10%		Remplacement des solutions de chauffage émettrices de CO ₂ par des sources d'énergie bas-carbone dont l'électricité
	Mix électrique	Mix électrique actuel (390 TWh nucléaire, 115 TWh EnR, 40 TWh thermique fossile)		Performance des systèmes de chauffage (rendement)
Résultats	Enjeux sociétaux	Confort thermique /		Confort thermique /
	Impacts techniques	61 TWh par an de chauffage électrique ~330 TWh par an de chauffage combustible (fioul, gaz, bois)		63 TWh par an de chauffage électrique 303 TWh par an de chauffage combustible (fioul, gaz, bois)
	Émissions de CO ₂	50 MtCO₂ (chauffage combustible bâtiments résidentiels-tertiaires) + 20 MtCO₂ (système élec. France)		~35 MtCO₂ (chauffage combustible bâtiments résidentiels-tertiaires) + ~11 MtCO₂ (système élec. France)
	Enjeux économiques			~19 Mds€/an (Investissements en installations de chauffage et travaux d'isolation)

	2035 Scénario A-SNBC 1	2035 Scénario A-SNBC 2 – Variante électrification accrue dans le neuf	2035 Variante ciblage des passoires thermiques
Cadre général	 34 millions de résidences principales		
Hypothèses sur le chauffage	<p>Performance énergétique des bâtiments neufs et existants (isolation)</p>  <p>Remplacement des solutions de chauffage émettrices de CO₂ par des sources d'énergie bas-carbone dont l'électricité</p> <p>Performance des systèmes de chauffage (rendement)</p>	<p>Performance énergétique des bâtiments neufs et existants (isolation)</p>  <p>Remplacement des solutions de chauffage émettrices de CO₂ par des sources d'énergie bas-carbone et électrification accrue dans le neuf</p> <p>Performance des systèmes de chauffage (rendement)</p>	<p>Performance énergétique des bâtiments neufs et existants (isolation)</p> <p>Ciblé</p>  <p>Remplacement des solutions de chauffage émettrices de CO₂ par des sources d'énergie bas-carbone dont l'électricité</p> <p>Performance des systèmes de chauffage (rendement)</p>
Enjeux sociétaux	 Confort thermique ++	 Confort thermique ++	 Confort thermique ++
Impacts techniques	 -5 TWh par an de chauffage électrique  -3 GW pointe à 1 chance sur 10	 -3,5 TWh par an de chauffage électrique  -2 GW pointe à 1 chance sur 10	 -3 TWh par an de chauffage électrique  -1 GW pointe à 1 chance sur 10
Émissions de CO₂	 -11 MtCO₂ (périmètre : chauffage combustible France et système élec. France)  -14 MtCO₂ (périmètre : chauffage combustible France et système élec. Europe de l'Ouest y.c. France)	 -12 MtCO₂ (périmètre : chauffage combustible France et système élec. France)  -14 MtCO₂ (périmètre : chauffage combustible France et système élec. Europe de l'Ouest y.c. France)	 -11 MtCO₂ (périmètre : chauffage combustible France et système élec. France)  -12 MtCO₂ (périmètre : chauffage combustible France et système élec. Europe de l'Ouest y.c. France)
Enjeux économiques	 + 12 Mds€/an (Investissements en installations de chauffage et travaux d'isolation)	 + 12 Mds€/an (Investissements en installations de chauffage et travaux d'isolation)	 +6,5 Mds€/an (Investissements en installations de chauffage et travaux d'isolation)

2035
Scénario B – Effort sur l'efficacité seule

2035
Scénario C – Effort sur l'électrification seule avec systèmes de chauffage efficaces

2035
Scénario D – Effort sur l'électrification seule

Cadre général



34 millions de résidences principales

Hypothèses sur le chauffage

Performance énergétique des bâtiments neufs et existants (isolation)

Remplacement des solutions de chauffage émettrices de CO₂ par des sources d'énergie bas-carbone dont l'électricité

Performance des systèmes de chauffage (rendement)

Performance énergétique des bâtiments neufs et existants (isolation)

Remplacement des solutions de chauffage émettrices de CO₂ par des sources d'énergie bas-carbone dont l'électricité

Performance des systèmes de chauffage (rendement)

Performance énergétique des bâtiments neufs et existants (isolation)

Remplacement des solutions de chauffage émettrices de CO₂ par des sources d'énergie bas-carbone dont l'électricité

Performance des systèmes de chauffage (rendement)

Par rapport au contrefactuel

Enjeux sociétaux



Confort thermique ++



Confort thermique +



Confort thermique /

Impacts techniques



-10 TWh par an de chauffage électrique



+3 TWh par an de chauffage électrique



+10 TWh par an de chauffage électrique



-4 GW pointe à 1 chance sur 10



+2,5 GW pointe à 1 chance sur 10



+6 GW pointe à 1 chance sur 10

Émissions de CO₂



-6 MtCO₂ (périmètre : chauffage combustible France et système élec. France)



-5 MtCO₂ (périmètre : chauffage combustible France et système élec. France)



-5 MtCO₂ (périmètre : chauffage combustible France et système élec. France)



-10 MtCO₂ (périmètre : chauffage combustible France et système élec. Europe de l'Ouest y.c. France)



-5,5 MtCO₂ (périmètre : chauffage combustible France et système élec. Europe de l'Ouest y.c. France)



-3 MtCO₂ (périmètre : chauffage combustible France et système élec. Europe de l'Ouest y.c. France)



Enjeux économiques



+11 Mds€/an (Investissements en installations de chauffage et travaux d'isolation)



+1 Mds€/an (Investissements en installations de chauffage et travaux d'isolation)



+0 Mds€/an (**(très proche de 0)** Investissements en installations de chauffage et travaux d'isolation)

1

ÉTATS DES LIEUX ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

ÉTATS DES LIEUX ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

1.1 Réduire les émissions dans le secteur du bâtiment : un enjeu majeur pour atteindre la neutralité carbone

1.1.1 Le secteur des bâtiments représente 20 % des émissions de CO₂ de la France

Le secteur du bâtiment, résidentiel et tertiaire, représente autour de 40% de la consommation annuelle d'énergie finale en France, qui a atteint près de 1800 TWh en 2018¹. Au sein des consommations

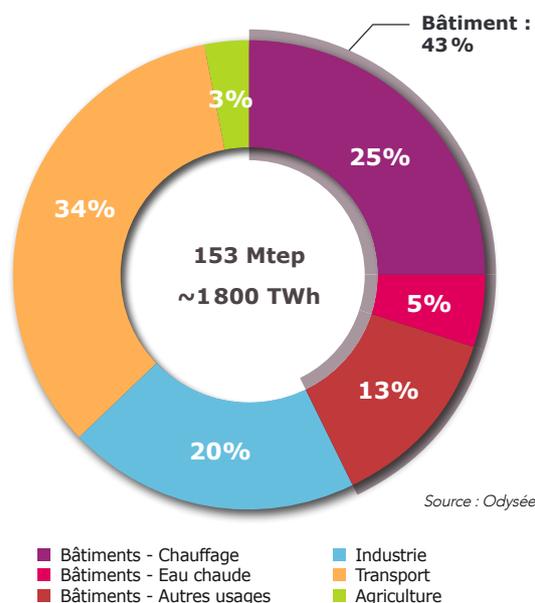
mesurées dans le secteur du bâtiment, environ 60% est consacrée au chauffage, qui constitue donc un quart de la consommation totale d'énergie finale en France. Cet usage énergétique s'appuie encore en grande partie sur des combustibles fossiles (fioul et gaz naturel en particulier) et compte ainsi pour 20% des émissions de gaz à effet de serre de la France (hors électricité et réseau de chaleur)².

La France est désormais engagée dans l'atteinte de la neutralité carbone à l'horizon 2050. Atteindre cet objectif nécessite une décarbonation quasi-totale du mix énergétique français à cet horizon. La Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) précise les choix stratégiques à opérer pour atteindre cet objectif, en les traduisant sous forme de « budgets carbone » par secteur.

Les orientations définies par les pouvoirs publics dans la version révisée finale de la SNBC publiée en avril 2020 s'articulent autour de différents axes, notamment : (1) la réduction de la consommation d'énergie totale via des mesures d'efficacité et de sobriété et (2) la substitution des énergies fossiles par des énergies décarbonées (en grande majorité pour les secteurs du bâtiment, de l'industrie et des transports).

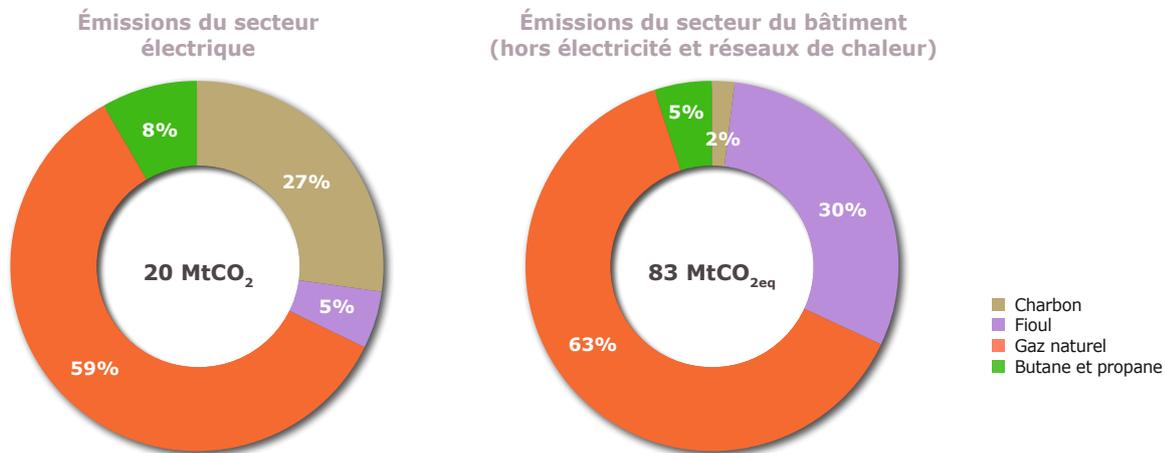
La décarbonation du système énergétique passe en particulier par une mobilisation accrue du gisement de chaleur issue de l'environnement (géothermie, pompes à chaleur...) et du gisement de biomasse pour la production de chaleur directe, de biogaz ou de biocarburants (en évitant la substitution à

Figure 1.1 Répartition de la consommation d'énergie finale entre les différents secteurs, 2018, source : SDES, Bilan énergétique France 2018



1. SDES, Bilan énergétique France 2018.

2. CITEPA, Secten 2020. Les émissions de CO₂ françaises sont évaluées à 321 MtCO₂ en 2018, celles du bâtiment à 70 MtCO₂ et celles liées au chauffage combustible sont estimées autour de 75% des émissions totales du bâtiment (d'après CGDD, 2019), soit 53 MtCO₂ (hors chauffage électrique et réseaux de chaleur). Des estimations évaluent la part du chauffage dans les émissions à 27-28% en comptant les émissions du chauffage électrique et des réseaux de chaleur.

Figure 1.2 Émissions de CO₂ du secteur électrique et du secteur du bâtiment en 2018³

des usages agricoles), ainsi que par une utilisation accrue de l'électricité, qui est dès aujourd'hui presque totalement décarbonée (à plus de 93%).

Dans le secteur du bâtiment, les orientations publiques prévoient une accélération des efforts de rénovation énergétique avec une amélioration de l'isolation des bâtiments existants mais également des remplacements des systèmes de chauffage par des solutions bas-carbone afin de répondre au double objectif de réduction de la consommation énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. En parallèle, une évolution de la réglementation thermique des bâtiments neufs est en cours d'élaboration afin de s'orienter vers une réglementation plus globale dite environnementale. Celle-ci intégrera une dimension «carbone», en plus de la dimension «énergie».

1.1.2 Un programme ambitieux de rénovation des logements : un objectif des politiques publiques avec une accélération qui doit se confirmer sur le temps long

Les ambitions de la SNBC impliquent des rénovations de logements significativement plus nombreuses

qu'aujourd'hui. La SNBC projette d'atteindre plus de 700 000 rénovations complètes équivalentes par an sur la période 2030-2050. Cet objectif peut correspondre à un nombre de logements bien plus important, effectuant chacun une rénovation moins performante qu'une rénovation complète équivalente. La projection du nombre de gestes permet de rendre compte plus précisément de la tendance à l'accélération : la SNBC prévoit à l'horizon 2035, un total d'environ 3 millions de gestes par an, tous postes confondus, dont entre 1,5 et 2 millions pour l'isolation (parois opaques et vitrées), et le reste consacré aux changements de chauffages, contre 800 000 gestes sur les parois opaques et vitrées entre 2015 et 2020, principalement sur ces dernières.

1.1.3 La place de l'électricité dans le secteur du bâtiment : une opportunité pour réduire les émissions mais un objet de polémiques récurrentes

Dans cette transformation, l'électricité, aujourd'hui déjà largement décarbonée en France, fait partie des vecteurs dont la place dans le mix de chauffage est amenée à croître. Pour autant, la SNBC articule le principe d'une utilisation accrue de

3. Pour les émissions du secteur électrique : RTE 2020, Bilan électrique 2019. Pour les émissions du secteur du bâtiment : CITEPA, Secten 2020 ; décomposition par source : MTES, 2020. Chiffres-clés du climat.

l'électricité au même titre que d'autres solutions bas-carbone comme la biomasse ou les réseaux de chaleur alimentés par des énergies renouvelables ou de récupération. Elle ne constitue pas un scénario «tout électrique».

La SNBC projette ainsi que la part de l'électricité dans la consommation d'énergie de chauffage atteindrait 28% de la consommation en énergie finale de chauffage en 2050⁴, contre environ 15% aujourd'hui⁵. Dans ce scénario, les modes de chauffage dominants en 2050 seraient les réseaux de chaleur, la biomasse et les pompes à chaleur.

L'accroissement de la part des solutions électriques est supposé se traduire en premier lieu par le déploiement de pompes à chaleur, qui présentent des rendements énergétiques très performants. Ce déploiement est attendu dans les bâtiments neufs ainsi que dans la rénovation des bâtiments existants.

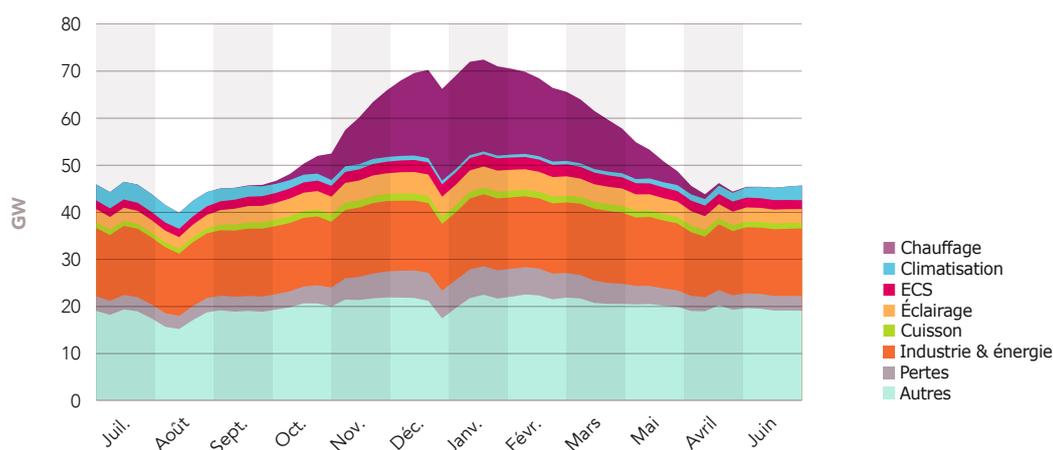
Dans le débat public, le développement du chauffage électrique suscite toutefois de nombreux

commentaires et soulève plusieurs interrogations qui portent en particulier sur la **capacité du système électrique à couvrir les besoins en chauffage électrique** à long terme (notamment lors des pointes hivernales), **sur le bilan carbone d'une telle transformation du secteur** (notamment du fait de la forte saisonnalité associée à cet usage et de l'éventuelle sollicitation accrue des moyens de production électriques les plus carbonés que cela entraîne) **ou encore sur les enjeux économiques associés**.

1.1.4 Le programme d'étude pour répondre à ces questions

Les questions sur la place de l'électricité ne sont pas spécifiques au chauffage et concernent également d'autres nouveaux usages électriques comme les véhicules électriques ou encore la production de gaz de synthèse à partir d'électricité. Pour répondre à ces questions, RTE a engagé en 2018-2019 une trilogie d'études sur

Figure 1.3 Profil annuel de consommation du chauffage électrique à températures de référence (année 2017-2018 – moyenne hebdomadaire)⁶



4. MTES, Direction Générale de l'Énergie et du Climat, 2020. Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat.
 5. Estimation à partir des données SDES : Bilan énergétique pour la France en 2018. Consommation d'énergie par usage du tertiaire 2018. Consommation d'énergie par usage du tertiaire 2018. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/energie>, ainsi que des données RTE pour le volume de chauffage électrique résidentiel (Bilan prévisionnels 2017, 2018, 2019).
 6. RTE, Bilan Prévisionnel 2018.

La difficulté spécifique liée à la comptabilité des émissions de CO₂ associées au chauffage électrique

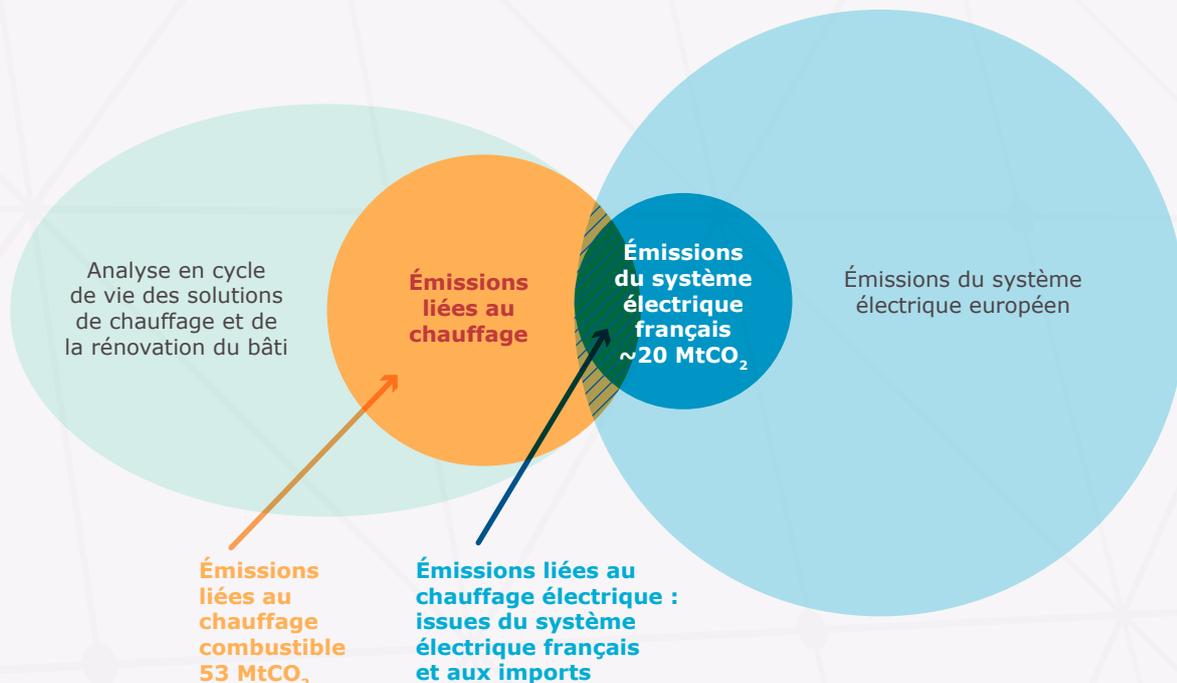
Les émissions liées au chauffage combustible sont relativement aisées à comptabiliser dès lors qu'une seule énergie de chauffage est utilisée, comme pour le chauffage au fioul, au gaz, ou encore au bois. Cette comptabilisation devient plus difficile lorsque le chauffage est assuré par un mix énergétique, qui plus est variable en fonction du temps ou de la localisation. Ce problème se pose par exemple dans le cas du chauffage urbain, pour lequel il existe plus de 700 réseaux de chaleur distincts, s'appuyant sur des mix énergétiques parfois très carbonés (fioul) ou au contraire issus d'énergies propres, renouvelables ou de récupération.

La question de la comptabilité des émissions se pose d'une façon encore plus complexe dans le cas du chauffage électrique. En effet, le vecteur énergétique en question voit son contenu carbone varier en fonction des moyens sollicités à différents instants en France mais aussi à l'étranger dans les

pays interconnectés avec la France. De plus, l'électricité alimente plusieurs usages simultanément, posant ainsi la question de l'attribution des émissions à chaque usage.

Différentes méthodes existent pour évaluer le contenu CO₂ du chauffage électrique, et l'éventail très large des valeurs obtenues selon ces différentes méthodes alimentent un débat récurrent quant à la juste métrique devant être adoptée, notamment dans le cadre des réglementations pour la construction neuve. Ce point est plus largement traité dans le chapitre 5.

Dans la présente étude, le choix est fait d'évaluer les émissions des systèmes électriques français et européens en totalité dans chaque scénario d'électrification afin de s'affranchir des questions de méthodes liées à la comptabilité des émissions de CO₂ liées au chauffage électrique.



ces nouveaux usages électriques : mobilité, production d'hydrogène bas-carbone et bâtiment.

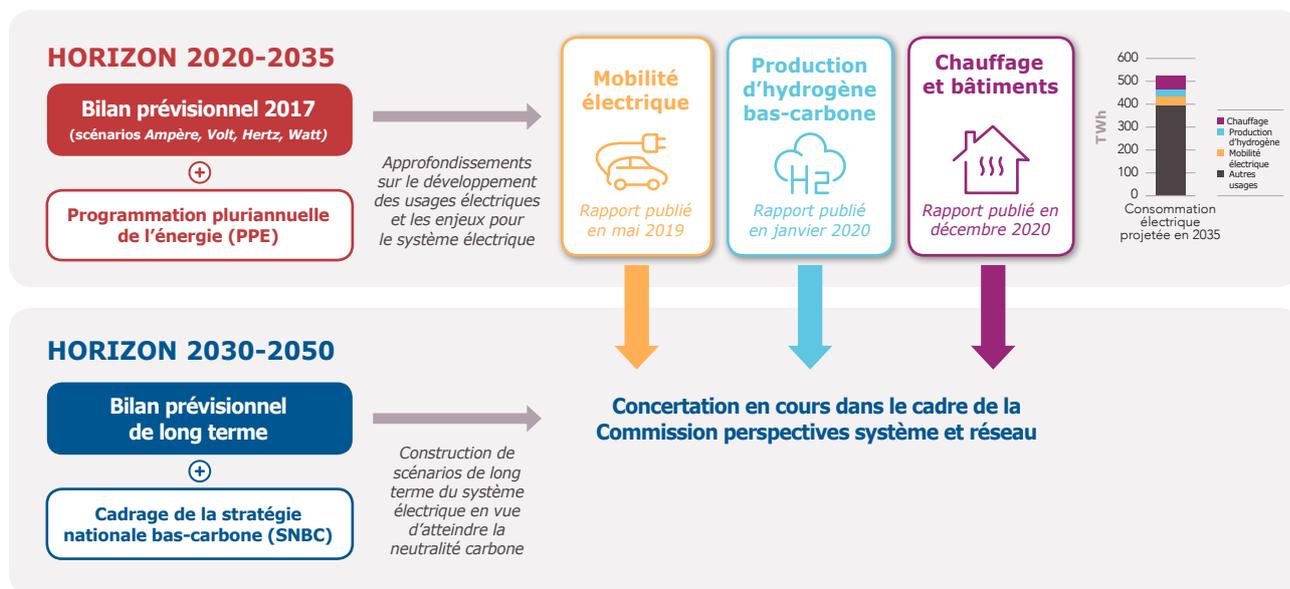
RTE a ainsi publié (i) une synthèse des principaux résultats sur les enjeux associés au développement la mobilité électrique⁷ en mai 2019 en partenariat avec l'AVERE-France et (ii) un rapport sur l'hydrogène bas-carbone⁸ en janvier 2020.

Dans le cadre de leur accord de coopération signé le 20 juillet 2017, RTE et l'ADEME ont convenu de réaliser une étude complète sur les enjeux techniques, environnementaux et économiques liés à la transformation du secteur des bâtiments et de l'usage du chauffage en particulier, et plus spécifiquement au développement de la part de l'électricité dans les bâtiments neufs et les rénovations. L'étude RTE-ADEME vise à ce titre, à éclairer le débat public et les discussions en cours sur les évolutions réglementaires dans le secteur des bâtiments.

Les scénarios présentés dans l'édition 2017 du Bilan prévisionnel de RTE avaient déjà permis de montrer que le développement du chauffage électrique via des solutions efficaces ne conduisait pas en soi à des difficultés d'approvisionnement en électricité, y compris dans des scénarios avec une réduction de la part du nucléaire à 50% du mix électrique et sans construction de nouveaux moyens de pointe (scénario *Ampère*).

L'étude RTE-ADEME contribue à approfondir l'analyse grâce à de nombreuses variantes sur la transformation des systèmes de chauffage et sur l'efficacité énergétique des bâtiments. Ceci permet en particulier d'identifier les paramètres les plus sensibles et les actions les plus pertinentes pour la décarbonation du secteur des bâtiments.

Figure 1.4 La trilogie d'études sur ces nouveaux usages électriques : mobilité, production d'hydrogène bas-carbone et bâtiment.



7. RTE, 2019. Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique

8. RTE, 2019. La transition vers un hydrogène bas carbone : atouts et enjeux pour le système électrique à l'horizon 2030-2035.

1.2 L'état des lieux du bâtiment

Les ambitions en matière de rénovation nécessitent d'approfondir la connaissance du parc de bâtiments et de leur performance énergétique. En 2018, la consommation d'énergie en chauffage s'élevait en 2018 à 400 TWh dans le secteur du bâtiment, dont 300 TWh pour le résidentiel, et 100 TWh pour le tertiaire⁹.

1.2.1 La moitié du parc de logements date d'avant la première réglementation thermique

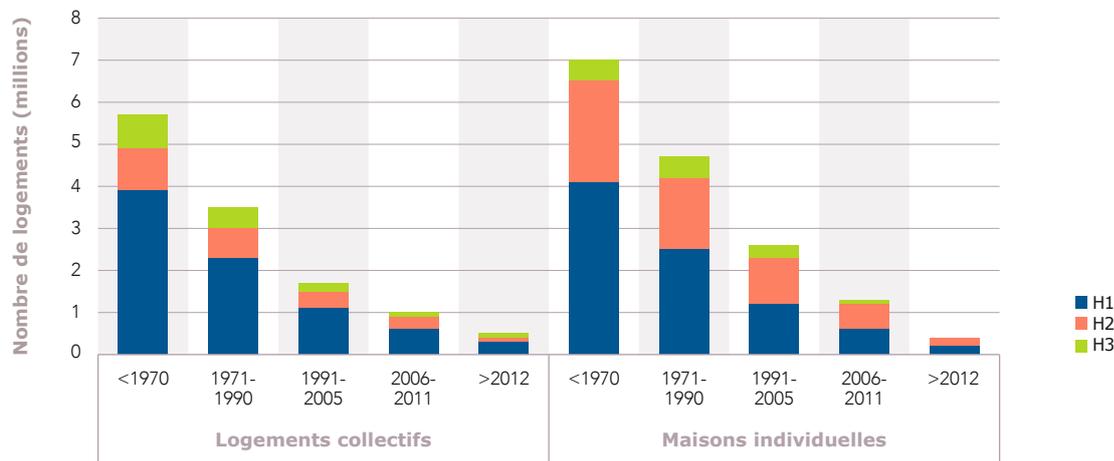
Le parc résidentiel français compte environ 29 millions de résidences principales en 2018¹⁰, réparti pour moitié en maisons individuelles et pour moitié en logements collectifs, avec une légère

prédominance des maisons individuelles. Signe de la lenteur du renouvellement du parc de bâtiments, l'analyse des dates de construction montre que la moitié des logements a été bâti avant 1974, donc avant la première réglementation thermique.

1.2.2 La moitié des résidences principales se situe dans les étiquettes DPE « D » et « E »

Depuis 2013, la performance énergétique des bâtiments est recensée par le Diagnostic de performance énergétique (DPE)¹¹, qui classe les bâtiments en sept catégories selon leur consommation d'énergie au m². La catégorie la plus performante, notée A, correspondant aux logements neufs

Figure 1.5 Répartition des logements entre maison individuelle et logement collectif selon la date de construction et la zone climatique¹²



9. SDES 2018. La zone climatique H3 correspond aux départements du pourtour méditerranéen et la Corse. Les autres départements sont répartis dans les zones H1 et H2 (respectivement dans les moitiés nord-est et sud-ouest du pays grosso modo). Tous les départements sous la diagonale formée par La Manche et les Alpes de Haute-Provence sont compris dans la zone H2, à l'exception de ceux du pourtour méditerranéen (dans la zone climatique H3) et du massif central (inclus dans la zone climatique H1).

10. Données CEREN

11. MTES, 2018. Diagnostic de performance énergétique – DPE. <https://www.ecologie.gouv.fr/diagnostic-performance-energetique-dpe>

12. INSEE, 2019. Recensement de la population 2016.

consommant moins de 50 kWh d'énergie primaire au mètre carré. La catégorie la plus énergivore, notée G, pour les bâtiments consommant plus de 450 kWh d'énergie primaire au mètre carré.

En parallèle à la mise en place du diagnostic de performance énergétique, diverses initiatives de suivi de la rénovation et du parc se poursuivent, comme l'Observatoire des performances énergétiques¹³ qui permet de collecter les données d'études thermiques des bâtiments construits ou rénovés depuis la mise en place de la réglementation thermique de 2012, ou les enquêtes régulièrement menées par l'ADEME, dont l'enquête sur les Travaux de Rénovation Énergétiques des Maisons Individuelles (TREMI) de 2017¹⁴, ou encore l'enquête sur les prix de la rénovation de 2019¹⁵, pour les dernières en date. L'enquête la

plus exhaustive pour obtenir un état des lieux complets de la performance énergétique du parc existant reste l'enquête PHEBUS réalisée en 2012, qui a analysé un échantillon, construit avec l'INSEE, de 8 000 logements représentatifs des régions, des zones climatiques, des types d'habitat (maison individuelle ou logement collectif) et des années de construction¹⁶. Par ailleurs, une étude récente du SDES exploitant la base des DPE de l'ADEME a permis d'affiner la description des logements par étiquette DPE¹⁷. **Il ressort de ces données que plus de la moitié des résidences principales se situe dans l'étiquette D ou E, et ce pour l'ensemble des tranches d'âge de bâtiment.** Néanmoins, il est clair que les logements les plus anciens constituent la majorité de l'effectif dans les étiquettes DPE les plus basses.

Figure 1.6 Étiquettes DPE

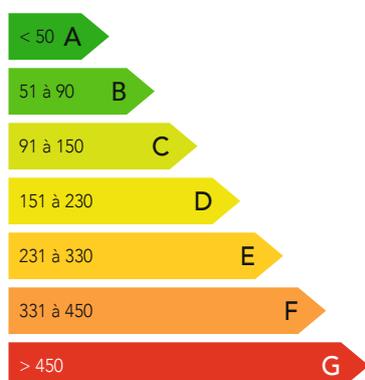
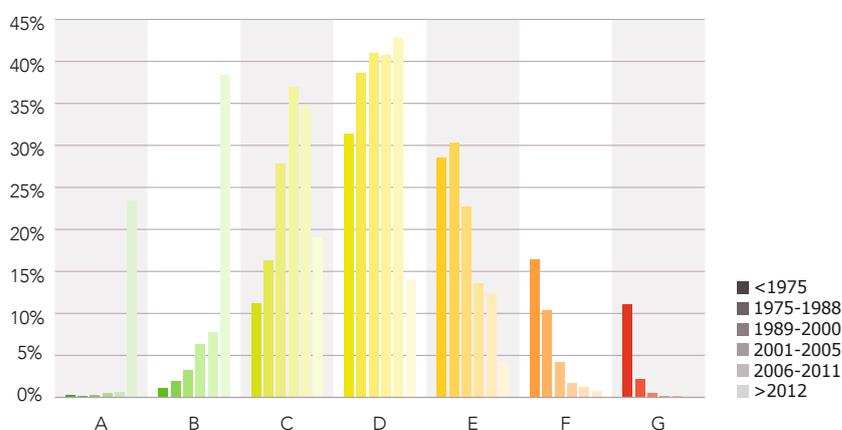


Figure 1.7 Âge et étiquette DPE du parc de logements en 2018¹⁷



13. <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/observatoire-des-performances-energetiques/>

14. ADEME, 2017. Travaux de Rénovation Énergétique des Maisons Individuelles : enquête TREMI. <https://www.ademe.fr/travaux-renovation-energetique-maisons-indivuelles-enquete-tremi>

15. ADEME, 2019. Rénovation énergétique des logements : étude des prix <https://www.ademe.fr/renovation-energetique-logements-etude-prix>

16. MTEs, 2018. Enquête Performance de l'Habitat, Équipements, Besoins et Usages de l'énergie (Phébus). <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/enquete-performance-de-lhabitat-equipements-besoins-et-usages-de-lenergie-phebus>

17. SDES, 2020. Le parc de logements par classe de consommation énergétique en 2018. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/le-parc-de-logements-par-classe-de-consommation-energetique>

En ce qui concerne le nombre de logements très énergivores (étiquettes F et G du DPE, regroupant les logements qualifiés de «passoires thermiques»), l'enquête PHEBUS estimait en 2013 que près d'un tiers du parc de logements, soit environ 9 millions de logements étaient des passoires thermiques. D'après les estimations réalisées par l'association «Rénovons», le nombre de logements très énergivores aurait diminué de 10 % entre 2012 et 2019¹⁸.

Néanmoins, les derniers chiffres publiés par le ministère de la transition écologique (2 septembre 2020) estiment le nombre de passoires thermiques à environ 4,8 millions de logements (correspondant à 17% du parc). Les écarts de méthodologie entre les deux études et des interrogations sur l'analyse statistique (taille de l'échantillon, qualité des DPE...) laissent donc une incertitude quant à l'évaluation du nombre de passoires thermiques entre 5 et 8 millions environ.

1.2.3 La performance énergétique des bâtiments s'améliore progressivement grâce aux réglementations thermiques

L'intérêt des politiques publiques pour la maîtrise de la consommation d'énergie est apparu à la suite du premier choc pétrolier de 1973. La première réglementation thermique (RT) de 1974 en découle directement, tout comme la création, à la même date, de l'Agence pour les économies d'énergie, qui deviendra l'ADEME en 1991. Elle a ouvert la voie aux réglementations de 1982, 1988, 2000, 2005, 2012 et maintenant 2020.

Si la succession de réglementations thermiques de plus en plus ambitieuses permet d'améliorer graduellement la performance thermique des bâtiments, elles ne portent toutefois que sur le neuf et ne concernent donc que le renouvellement du parc de bâtiments et son accroissement pour faire face à l'augmentation du nombre de ménages.

18. SIA PARTNERS, pour l'Initiative « Rénovons – Coûts et bénéfices d'un plan de rénovation des passoires énergétiques en 10 ans », <http://renovons.org/Le-scenario-Renovons-2020>

Historique des réglementations thermiques en France

La réglementation thermique (RT) française vise à encadrer les besoins thermiques des bâtiments pour les constructions neuves en France. Elle fixe une limite maximale à la consommation énergétique des bâtiments neufs pour le chauffage, la ventilation, la climatisation, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage. Depuis sa mise en place, plusieurs versions se sont succédé ajoutant de nouvelles mesures aux réglementations précédentes.

Afin de cibler le besoin de chauffage, la **réglementation thermique de 1974** a introduit un seuil réglementaire sur les déperditions thermiques du bâtiment, caractérisées par un coefficient exprimé en $W/m^3.C^\circ$ qui décrit l'énergie perdue par un espace à une certaine température.

Entre 1974 et 1982, les politiques d'aides (subvention PALULOS pour le parc social, aide fiscale pour les propriétaires et aides de l'Agence nationale de l'habitat ANAH) et d'incitation (label Haute Isolation ayant pour objectif de diminuer la consommation de 20 à 25% par rapport à la RT 1974) se poursuivent, encouragées par le second choc pétrolier de 1979. Par ailleurs, ces politiques s'étendent aussi au parc de bâtiments non résidentiels (tertiaire, industrie).

La **réglementation thermique de 1982** a introduit un deuxième coefficient portant sur les besoins de chauffage, afin de diminuer le coefficient de déperdition thermique des apports solaires et internes (éclairage, occupants, circuits d'ECS...). Elle visait ainsi à rééquilibrer le critère de la RT 1974, qui aurait eu pour effet de diminuer les surfaces vitrées des nouveaux bâtiments et de se priver des apports solaires.

Ces deux premières réglementations thermiques ne portent donc que sur les besoins thermiques des bâtiments, quel que soit l'énergie et le rendement du système de chauffage, sauf concernant l'électricité qui faisait l'objet d'un cas à part : un seuil différencié était appliqué pour le coefficient de déperditions thermiques des bâtiments correspondants.

La **réglementation thermique de 1988** a élargi son périmètre d'application à d'autres usages que le chauffage : eau chaude sanitaire, consommation des appareils auxiliaires pour la ventilation et la climatisation. Un troisième coefficient portant sur la consommation d'énergie du bâtiment est ajouté afin de prendre en compte les pertes énergétiques dues au rendement des différents appareils. Par ailleurs, cette réglementation cherchait à traduire le coût global de la consommation d'énergie du bâtiment, et à réduire la facture pour l'occupant, via un seuil affiché.

L'abondance énergétique à la fin des années 1980, aussi bien en électricité qu'en pétrole bon marché a conduit à ralentir le rythme des réglementations en faveur des économies d'énergie. Ainsi, il faut attendre le protocole de Kyoto et des engagements de la France à cette occasion pour que la réglementation évolue de nouveau.

La **réglementation thermique de 2000** a introduit pour la première fois un seuil de consommation maximale en énergie primaire (EP) en $kWhEP/m^2$. Ce seuil est différencié pour les bâtiments équipés de chauffage électrique et les bâtiments avec d'autres types de chauffage (fossile, bois). Cette réglementation conserve également un coefficient unique de déperdition thermique (intégrant les apports de chaleur solaires et internes). Elle instaure aussi la «Température Intérieure Conventionnelle» (TIC), température maximale pouvant être atteinte dans le bâtiment en été pendant 3 heures consécutives. Enfin, cette RT cherche également à faciliter le remplacement d'une installation de chauffage par une autre en limitant la lourdeur des travaux.

La **réglementation thermique de 2005** a pris en compte le bioclimatisme des bâtiments, qui consiste en une conception du bâtiment tirant le meilleur parti de son environnement (exposition, terrain, climat) afin d'assurer le confort autant que possible de façon naturelle (confort thermique, luminosité, humidité...) et donc de minimiser le recours aux équipements de chauffage, ventilation, climatisation, éclairage. De la même façon, elle prend en compte les énergies renouvelables utilisables par le bâtiment. Cette réglementation reprend les bases de la RT 2000, avec une augmentation des exigences de consommations. L'exigence en énergie primaire se présente toujours avec un seuil différencié pour les usages électriques plus élevé que pour les usages fossiles : $190 kWhEP/m^2$ pour les bâtiments à chauffage électrique, $110 kWhEP/m^2$ pour les bâtiments avec les autres types de chauffage (fossile, bois).

La mise en place de mesures incitatives s'est poursuivie entre 2005 et 2012, tandis que les initiatives au niveau européen se faisaient de plus en plus nombreuses (paquet énergie-climat de 2008, directive relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie renouvelable de 2009, directive de 2010 sur la performance énergétique des bâtiments, directive de 2012 sur l'efficacité énergétique).

La **réglementation thermique de 2012** s'est structurellement inscrite dans la continuité de la RT 2005, en présentant une rupture sur le niveau des exigences, bien plus strictes. Celles-ci s'inspirent fortement du label BBC (Bâtiment Basse Consommation,

introduit en 2005) en s'appuyant sur trois critères :

- ▶ un critère d'efficacité énergétique minimale requise,
- ▶ un seuil de consommation maximale en énergie primaire du bâtiment,
- ▶ et la reprise de la température maximale pour le confort d'été (la «TIC» introduite dans la RT 2000).

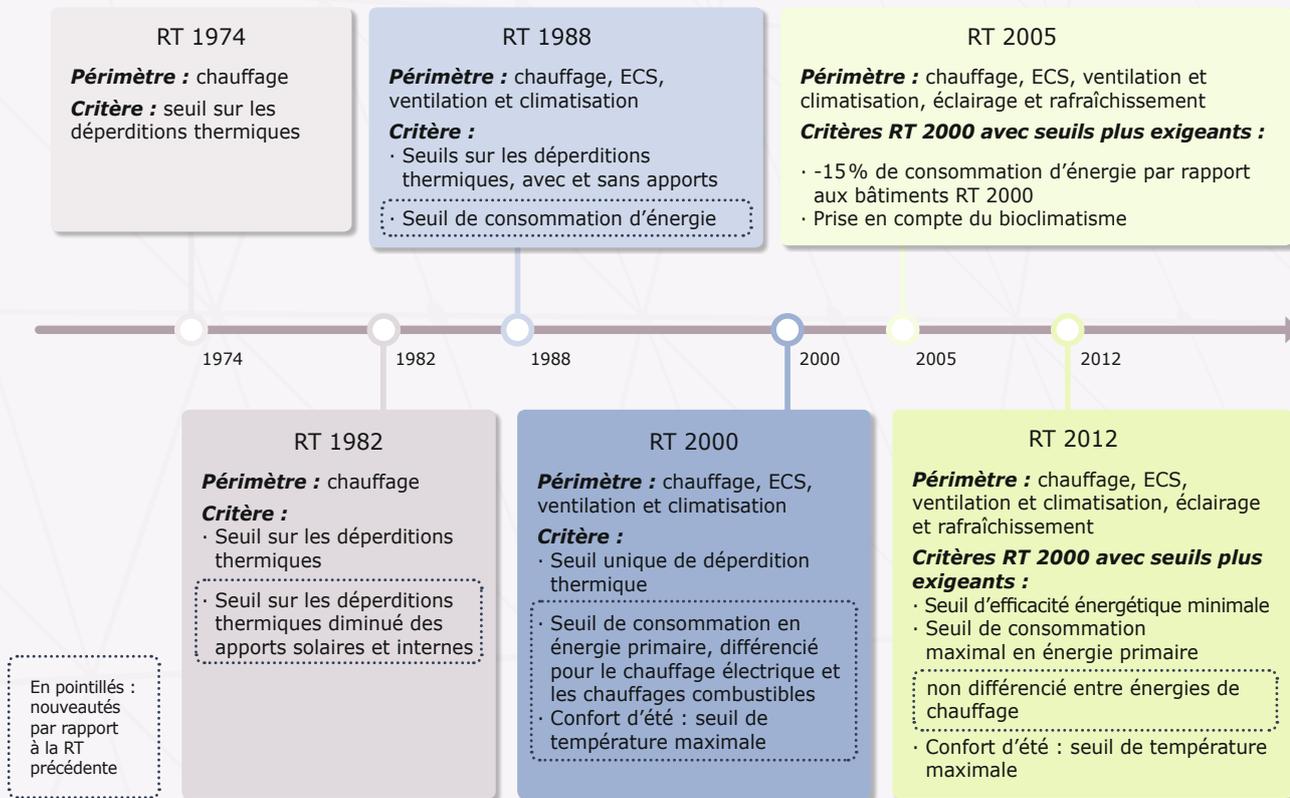
Dans la RT 2012 seuil de consommation d'énergie primaire est désormais indifférencié, fixé à 50 kWhEP/m².an, ce qui implique un saut de performance de 110 kWhEP/m².an à 50 kWhEP/m².an pour les bâtiments non chauffés à l'électricité, et de 190 kWhEP/m².an à 50 kWhEP/m².an pour les bâtiments équipés de chauffage électrique. Cette réglementation utilise le coefficient de conversion de l'électricité en énergie primaire de 2,58 (dit PEF – Performance Energy Factor) pour quantifier l'énergie primaire associée aux usages électriques.

Par ailleurs, la RT 2012 a introduit des exigences de moyen, notamment sur l'étanchéité du bâtiment,

la surface des baies vitrées (un minimum est fixé à 1/6) et une consommation d'énergie renouvelable fixée à au moins 5 kWhEP/m².an.

La **nouvelle réglementation environnementale**, dite RE 2020, dont les grandes lignes ont été annoncées en novembre 2020, vise à fixer de nouveaux standards. Elle met l'accent sur la baisse de la consommation des bâtiments, indépendamment du système de chauffage, et privilégie le recours à l'énergie décarbonée, notamment à travers la chaleur renouvelable (pompe à chaleur, biomasse...). Les exigences de la RE2020 vont entraîner la disparition progressive du chauffage utilisant des énergies fossiles dans les logements et des modes de chauffage électriques peu efficaces (radiateurs à effet Joule). En anticipation des effets du réchauffement climatique, un objectif de confort lors des vagues de chaleur devrait également être inclus. Enfin, un critère sur les émissions de gaz à effets de serre sera adopté, prenant en compte tout le cycle de vie du bâtiment, de la construction à la démolition en passant par les émissions lors de l'utilisation.

Figure 1.8 Chronologie des réglementations thermiques successives



1.3 L'état des lieux des énergies de chauffage

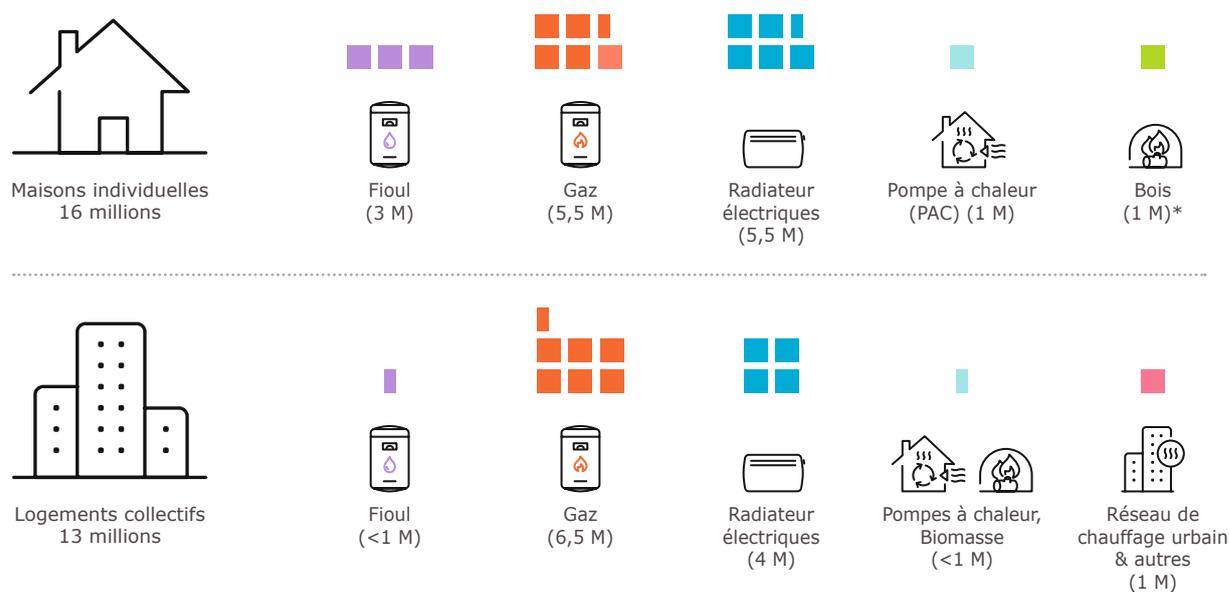
1.3.1 Dans le secteur résidentiel, un parc d'installations de chauffage aujourd'hui dominé par le gaz naturel et l'électricité

Aujourd'hui, le parc d'installations principales de chauffage dans les logements résidentiels est principalement constitué de chaudières fonctionnant au gaz naturel (desservi par réseau) et par les solutions de chauffage électrique (essentiellement des radiateurs électriques), qui représentent chacun

environ 40% des solutions de chauffage principal dans les résidences principales. Il est estimé que les pompes à chaleur assurant le chauffage sont par ailleurs installées dans 1 à 2 millions de logements.¹⁹

Les autres sources d'énergie pour les installations principales sont le fioul domestique, le charbon, le GPL²⁰, la biomasse ou le chauffage urbain par réseaux de chaleur²¹. Un certain nombre de logements sont néanmoins équipés de plusieurs

Figure 1.9 Parc des installations principales de chauffage dans le résidentiel en 2018²² (résidences principales)



* 2 millions de maisons sont en outre équipées de chauffage au bois comme source de chauffage secondaire

19. Il existe néanmoins des incertitudes autour de ce chiffre. Les chiffres récents montrent d'importantes ventes de pompes à chaleur. Le total de pompes à chaleur dans le secteur résidentiel a ainsi pu excéder un million dès 2018, et croître très rapidement ces deux dernières années. Le baromètre 2020 EurObserv'Er indique plus de 6 millions de pompes à chaleur installées en France. Néanmoins, environ deux tiers de celles-ci semblent installées pour un usage de climatisation (d'après le Baromètre EurObserv'Er paru en 2017). L'ensemble de ces éléments laisse penser que l'ordre de grandeur du nombre de pompes à chaleur utilisées pour le chauffage comme usage principal se situe entre 1 et 2 millions pour les dernières années.

20. Gaz de pétrole liquéfié.

21. Les réseaux de chauffage urbain utilisent un fluide caloporteur (généralement sous forme de vapeur) pour transporter la chaleur produite dans une installation centralisée jusqu'aux logements connectés. À l'origine de la production de chaleur en France, on trouve majoritairement du gaz naturel, de la biomasse ou des déchets (unités de valorisation énergétique).

22. SDES, Consommation d'énergie par usage du résidentiel 2018.

sources de chauffage (par exemple, des radiateurs électriques associés à une cheminée ou un insert à bois, etc.), ce qui complique la comptabilité des installations.

Exprimé selon l'énergie consommée plutôt que selon le nombre de logements équipés, l'état des lieux sur les solutions de chauffage actuelles fait davantage ressortir l'importance du gaz, de la biomasse et du fioul, qui équipent fréquemment de plus grandes surfaces (voir figure 1.10).

Pour chaque énergie de chauffage, différentes technologies peuvent exister :

- ▶ chaudières basse température ou chaudière à condensation pour le gaz et le fioul, ainsi que pompes à chaleur gaz ;
- ▶ radiateurs électriques (convecteurs, radiateurs à chaleur douce, panneaux rayonnants,

radiateurs à accumulation, chauffage au sol) ou pompes à chaleur pour l'électricité ;

- ▶ cheminée, poêle, chaudière à bûches ou à granulés pour le bois.

Si plus de 80% des systèmes de chauffage sont aujourd'hui individuels, le chauffage en zone urbaine passe également par des modes collectifs dans lesquels la production de chaleur est réalisée par une installation mise en commun. Les réseaux de chaleur urbains sont par définition des modes de chauffage collectifs, tandis que le chauffage électrique traditionnel (radiateurs électriques) constitue à l'inverse une solution exclusivement utilisée sous une forme individuelle. D'autres solutions comme les chaudières à gaz peuvent se présenter à la fois sous des formes individuelles (en maison individuelle ou dans certains immeubles) ou collectives (dans les immeubles).

Les différentes solutions de chauffage existant aujourd'hui



Le fioul, une énergie de chauffage surtout utilisé en chaudière individuelle

Le chauffage au fioul est un système centralisé individuel, souvent installé dans les maisons individuelles hors des zones raccordées au réseau gaz. Il consiste à brûler du fioul pour chauffer l'eau circulant dans les canalisations et les radiateurs de l'habitation. Différents types de chaudières au fioul existent : des chaudières classiques avec un rendement générateur de l'ordre de 80%, des chaudières

à basse température avec un rendement générateur de l'ordre de 90% ou des chaudières à condensation avec un rendement générateur pouvant dépasser 100% PCI.

Majoritaire dans les années 1970, le chauffage au fioul a vu sa part décroître rapidement au profit du gaz et de l'électricité au cours des années 1980.



Le gaz, une énergie de réseau se prêtant au chauffage collectif

Le chauffage au gaz peut être individuel ou collectif pour les zones raccordées au réseau de gaz. Comme pour le fioul, différents types de chaudières existent : des chaudières classiques avec un rendement générateur de l'ordre de 80%, des chaudières à basse température avec un rendement générateur de l'ordre de 90% ou des chaudières à condensation avec un rendement générateur pouvant dépasser

100% PCI. La distribution, l'émission et la régulation du chauffage conduisent également à des pertes de rendement. Le rendement complet d'une installation s'établira ainsi au mieux autour de 90%.

Le chauffage au gaz a vu sa part croître de façon continue pour atteindre environ 40% du parc aujourd'hui.



Le radiateur électrique à effet Joule, un appareil de petite puissance

Les radiateurs électriques sont par nature des solutions de chauffage individuel. Ils peuvent constituer des solutions de chauffage principales ou d'appoint, installées de façon pérenne dans les logements ou installées de façon temporaire par simple branchement sur une prise électrique lorsque le ménage en ressent l'utilité.

Ils présentent maintenant différentes formes. Les **convecteurs électriques** ont été les premiers chauffages à effet Joule, déployés à partir des années 1970. Parfois qualifiés de « grilles-pains », ils consistent en de simples résistances électriques s'échauffant plus ou moins en fonction du réglage d'intensité du courant électrique via un simple potentiomètre. Des radiateurs électriques à accumulation reprennent ce principe en y greffant un moyen d'emmagasiner un peu de la chaleur produite durant le passage du courant (radiateurs à bain d'huile, à brique de céramique, etc.).

La technologie des **panneaux rayonnants** a ensuite offert un mode de chauffage à effet Joule

avec une diffusion plus douce de la chaleur produite : ce n'est plus un simple conducteur en forme de fil ou de boudin, mais tout un panneau radiant, qui sert de conducteur, ce qui permet la diffusion de la chaleur sur toute la surface de l'appareil. Le principe de convecteurs ou de panneaux rayonnants a ensuite été adapté aux planchers, parois, voire vitres ou plafonds, afin de les rendre chauffants par effet Joule. Seuls le matériau et la forme du conducteur électrique diffèrent.

Si le rendement du chauffage à effet Joule est proche de 100%, le rendement total de ces systèmes de chauffage (par ratio entre la chaleur restituée et l'énergie électrique consommée) est de l'ordre de **90%** (rendement d'émission et de régulation de la chaleur produite par l'appareil).

Comme le chauffage au gaz, le chauffage électrique Joule a atteint une part d'environ 40% aujourd'hui, après une croissance plus ou moins continue tout au long des années 1980 et 1990.



La pompe à chaleur, un système efficace utilisant l'énergie de l'environnement

La pompe à chaleur (PAC) est un dispositif permettant de transférer l'énergie thermique d'un milieu à basse température (air extérieur, terre) vers un milieu à haute température (intérieur d'un bâtiment).

L'efficacité d'une pompe à chaleur est déterminée par son coefficient de performance (COP), qui correspond au rapport entre l'énergie transférée et l'énergie consommée. Contrairement à la plupart des installations de chauffage, les pompes à chaleur ont la particularité d'avoir un rendement ou coefficient de performance supérieur à 1 : en effet, celles-ci récupèrent des calories dans l'air extérieur et les restituent au milieu intérieur ce qui permet de limiter leur consommation énergétique.

Dans l'ensemble, l'essentiel des pompes à chaleur installées à l'heure actuelle fonctionnent à l'électricité (95% des cas)²³. Des modèles de pompes à chaleur avec un moteur à gaz existent aussi mais il s'agit d'une technologie encore récente et de dimension importante, plutôt destinée aux bâtiments d'envergure, dans le tertiaire ou le logement collectif. Enfin, les pompes à chaleur peuvent également être associées à une chaudière à gaz qui prend le relais en situation froide lorsque que la pompe à chaleur a un rendement trop faible ou ne peut plus fonctionner : on parle alors de pompe à chaleur hybrides.

Les pompes à chaleur constituent une faible partie du parc de chauffages aujourd'hui, mais connaissent une très forte croissance ces dernières années.



Le chauffage au bois, une énergie de chauffage traditionnelle et renouvelable

Pour le chauffage au bois, de multiples appareils de chauffage individuel, centralisé ou non, peuvent être utilisés : cheminée, poêle à bois, chaudière bois à bûches ou granulés.

Le bois-énergie ou biomasse est fréquemment en compléments d'autres modes de chauffage principaux (fonctionnant avec de l'électricité, du gaz ou du fioul). Ainsi, si sa part en tant que chauffage principal semble faible, il est potentiellement plus largement répandu qu'il n'y paraît.



Le chauffage urbain, un système collectif pouvant utiliser de l'énergie de récupération

Un réseau de chaleur est un système collectif de distribution de chaleur produite de façon centralisée, permettant en général de desservir plusieurs bâtiments dans un même quartier. La chaleur peut être produite à partir de gaz naturel, fioul, biomasse, géothermie, ou par récupération (incinération des déchets, biogaz, process industriels, data centers, eaux usées...), ou même par pompe à chaleur. Le rendement de ces installations dépend du processus de production de chaleur utilisé et des pertes sur le réseau de chaleur.

En fonction de l'entrant utilisé, le rendement de production thermique (avant pertes sur le réseau de chaleur) varie de 86% (unité de valorisation énergétique de déchets urbains) à 140% pour la chaleur géothermique²⁴.

Les réseaux de chaleur constituent une petite partie du parc de chauffage à l'heure actuelle, mais pourraient se développer en parallèle de leur verdissement pour desservir les zones urbaines.

23. MTES, Pompes à chaleur. <https://www.ecologique-solaire.gouv.fr/pompes-chaleur>

24. FEDENE, SNCU, Résultats de l'enquête annuelle – édition 2019. Les réseaux de chaleur et de froid. Chiffres clés, analyses et évolution.

1.3.2 La consommation énergétique finale pour le chauffage relève principalement du gaz naturel et de la biomasse

Exprimée en fonction de la consommation énergétique finale, la représentation de la part des différentes sources d'énergie conduit à une analyse différente. **Cette analyse met nettement en avant la place des combustibles fossiles (gaz et fioul) qui représentent plus de 50% de l'énergie consommée.** L'importance du bois doit également être soulignée (un peu plus du quart de l'énergie de chauffage).

Cette représentation diffère de celle du paragraphe 1.2.1 pour plusieurs raisons. D'une part, les logements ne consomment pas tous la même énergie finale pour se chauffer : leur consommation dépend de la surface mais aussi de nombreux autres paramètres comme l'isolation du bâti, la période de construction, la situation géographique, le coût de l'énergie, les revenus du foyer, etc. L'analyse met ainsi en évidence le fait que le gaz et le fioul sont souvent préférés pour les grands appartements et

maisons. C'est ce qui explique la part importante du gaz (40% de l'énergie de chauffage).

D'autre part, certains logements utilisent plusieurs sources d'énergie pour se chauffer. Ainsi, le bois constitue la deuxième source d'énergie de chauffage alors qu'il ne représente qu'une part très minoritaire des solutions de chauffage principales des logements. La part importante de cette source d'énergie dans la consommation énergétique finale s'explique ainsi par le fait que le bois constitue souvent une solution de chauffage complémentaire dans des logements ayant un chauffage principal à l'électricité, au gaz ou au fioul.

La part du chauffage urbain demeure, elle, minoritaire à la fois en nombre d'installations et en énergie de chauffage.

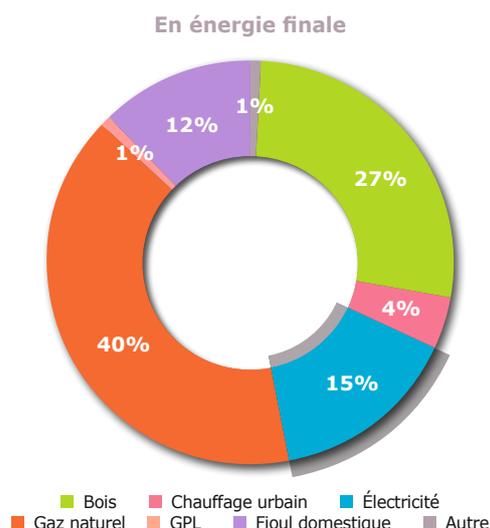
1.3.3 Les sources d'énergie utilisées pour le chauffage dépendent des caractéristiques des logements

Dans le secteur résidentiel, la répartition des énergies de chauffage dépend fortement de la superficie, avec une prédominance de l'électricité dans les surfaces réduites, mais aussi de l'année de construction.

En effet, celle-ci détermine à la fois la qualité d'isolation du bâti, mais aussi l'offre de chauffage disponible au moment de la construction et les réglementations en vigueur. Néanmoins, étant donné les durées de vie caractéristiques des systèmes de chauffage, les constructions les plus anciennes – datant de plus de vingt ans – ont de fortes chances d'avoir vu une rénovation de leur installation de chauffage (renouvelée à même technologie ou changée).

Les différences de répartition entre maisons individuelles et logements collectifs s'expliquent en grande partie par la possibilité de recours au chauffage collectif. En effet, les logements collectifs sont plus souvent équipés d'un chauffage central (par exemple alimentés par une chaudière à gaz collective ou par un réseau de chaleur urbain) que les maisons individuelles, qui de leur côté présentent

Figure 1.10 Répartition des énergies dans la consommation finale de chauffage résidentiel en 2018²⁵



25. Estimation à partir des données SDES (Consommation d'énergie par usage du résidentiel 2018), ainsi que des données RTE pour le volume de chauffage électrique résidentiel (Bilan prévisionnels 2018). Dans d'autres publications, tel le rapport de la FEDENE sur les réseaux de chaleur, le mix des énergies finales de chauffage est affiché en agrégeant le chauffage et l'eau chaude sanitaire, d'où une part de l'électricité autour de 16% et du bois autour de 25% pour ce périmètre.

Figure 1.11 Répartition des énergies de chauffage selon la date de construction²⁶

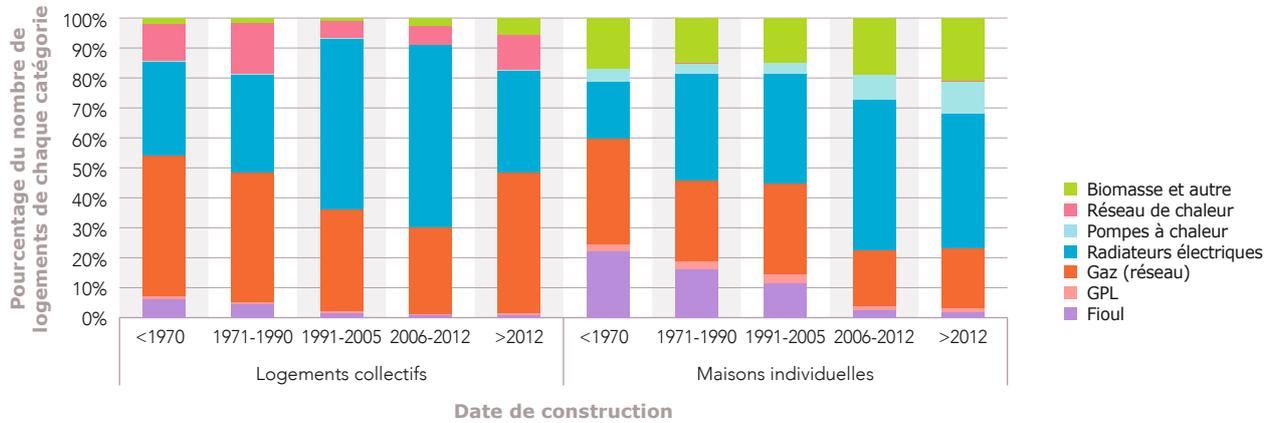


Figure 1.12 Répartition des énergies de chauffage selon la superficie²⁶

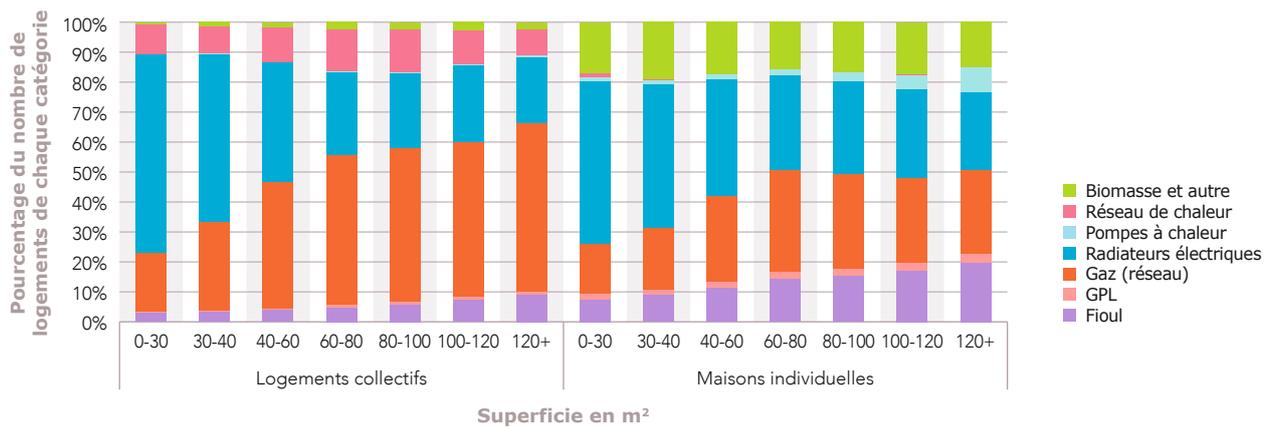
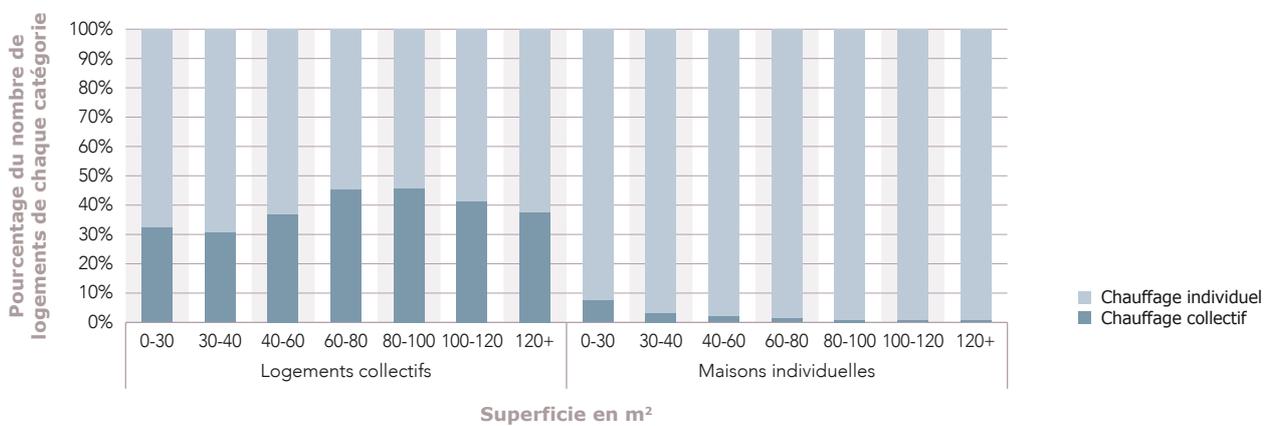


Figure 1.13 Part de chauffage individuel et collectif en fonction des surfaces des logements²⁶



26. INSEE, Recensement de la population 2016

un grand nombre de chauffages par appareils indépendants : poêles, cheminées...

La répartition entre modes de chauffages individuels et collectifs entraîne des modes de consommation très différents.

Historiquement, pour beaucoup d'occupants en immeubles collectifs, les consommations n'étaient pas individualisées, ce qui n'incitait pas à faire des économies d'énergie. À titre d'exemple, une partie des français ne connaissent pas leur facture d'énergie²⁷, celle-ci n'étant pas distinguée de leurs autres charges. Le niveau de centralisation des chauffages peut donc être un déterminant important de la consommation par les ménages. Mais depuis le 1er janvier 2018, tous les chauffages collectifs consommant plus de 120 kWh/m² par an doivent être équipés de compteurs individuels et l'obligation s'applique à ceux consommant plus de 80 kWh/m² par an depuis le 25 octobre 2020²⁸.

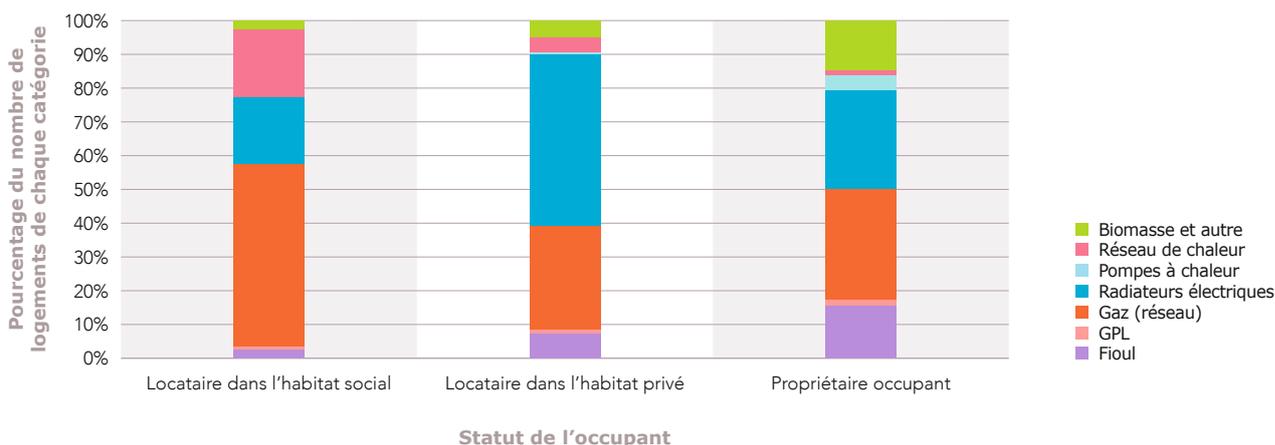
Enfin, la structure du parc diffère beaucoup suivant le statut d'occupation du logement, ce qui

s'explique par la nature du décideur dans chaque cas. En effet, les raisonnements économiques seront différents entre un office HLM, un bailleur privé, ou un propriétaire-occupant.

Les différences de consommation énergétique des bâtiments selon le statut d'occupation peuvent également s'analyser à l'aune des étiquettes énergétiques issues du diagnostic de performance énergétique mis en place depuis la fin des années 2000²⁹.

L'analyse permet de conclure que les logements loués par des bailleurs privés ainsi que ceux habités par des propriétaires-occupants sont ainsi nettement plus représentés par les étiquettes F et G, bâtiments les moins performants dits « passoires thermiques » (voire les bâtiments E), tandis que les logements sociaux sont en moyenne davantage représentés dans les étiquettes plus performantes que l'étiquette E. Etant donné l'homogénéité des dates de construction entre ces deux types de logement, cette répartition montre qu'il y a eu plus d'efforts de rénovation dans le parc locatif social que dans le parc privé et en particulier dans le parc locatif.

Figure 1.14 Énergie de chauffage en fonction du statut d'occupation³⁰

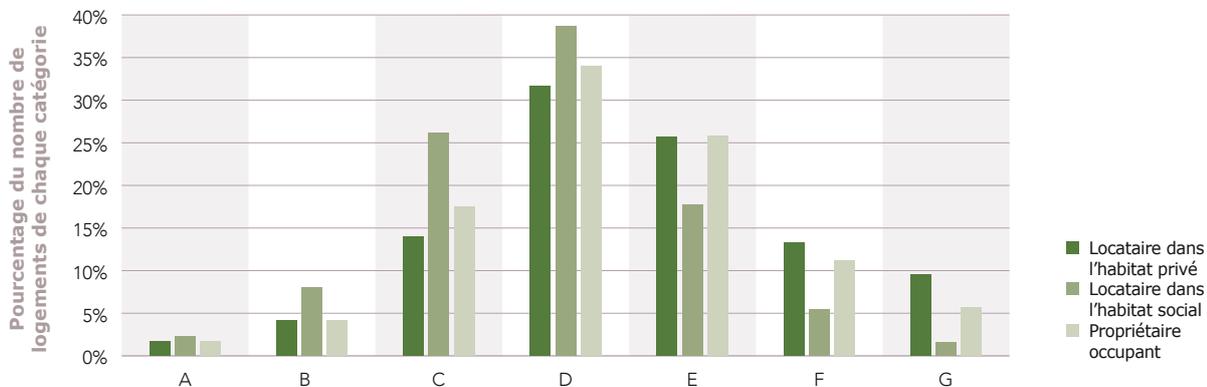


27. Risch, Salmon, 2013. « What matters in Residential Energy Consumption? Evidence from France ».

28. Les ménages consommant moins que ce dernier seuil n'ont pas d'obligations de comptage individualisé de la consommation de chauffage – articles R241-6 à R241-14 du code de l'énergie.

29. Le diagnostic de performance énergétique (DPE) classe les logements en 7 catégories de A à G (A correspondant à la meilleure performance, G à la plus mauvaise), correspondant à des fourchettes de consommation en énergie primaire.

30. INSEE, Recensement de la population 2016.

Figure 1.15 Répartitions des étiquettes énergétiques selon les statuts d'occupation³¹

1.3.4 L'évolution du parc de chauffage résulte en grande partie des réglementations thermiques successives mises en place depuis les années 1970 et des coûts-bénéfices des différents systèmes

Le parc de chauffage français a lentement évolué en suivant les différentes réglementations, passant d'une répartition largement dominée par le fioul et le charbon à une domination du gaz et de l'électricité. En particulier, deux vagues de développement massif du chauffage électrique ont eu lieu, à la fin des années 1970 puis dans les années 2000. À chaque fois, la part du gaz et de l'électricité a progressé, tandis que celle du fioul a régressé et que le charbon a largement disparu.

Les premières réglementations thermiques avaient initialement vocation à maîtriser la facture de chauffage des ménages, et ont peu à peu revêtu une dimension environnementale. Dans une optique de maîtrise de la consommation d'énergie au niveau du système énergétique global, le critère d'évaluation de la performance énergétique des

bâtiments en énergie primaire a pris de plus en plus d'importance, notamment après la publication du paquet européen énergie-climat de 2008, fixant un objectif de 20% d'amélioration de l'efficacité énergétique par rapport à la projection tendancielle, avec notamment un objectif de consommation en énergie primaire à ne pas dépasser³².

Une inflexion a eu lieu suite à la réglementation thermique 2012, qui a vu la part de la solution électrique reculer dans la construction neuve, notamment au profit du gaz dans les logements collectifs³³. Au sein des solutions électriques, la pompe à chaleur a été très largement préférée aux radiateurs électriques, du fait de son rendement élevé lui permettant de consommer environ trois fois moins d'électricité pour une même production de chaleur.

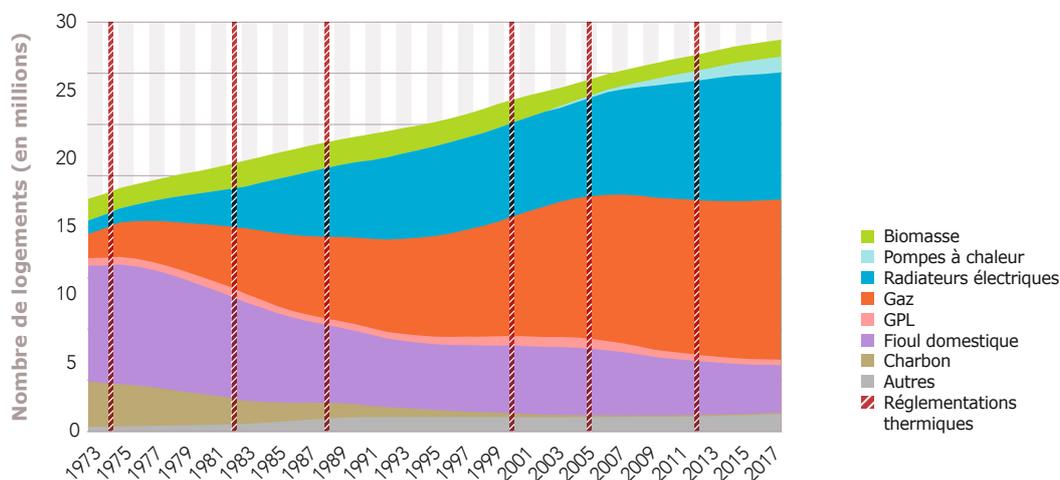
Les données récentes du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) sur les parts de marché dans les bâtiments neufs observées depuis la mise en œuvre de la RT 2012 mettent ainsi en évidence une part croissante des pompes à chaleur, à la fois dans le parc global et dans le parc électrique :

³¹. SDES, Consommation d'énergie par usage du tertiaire 2018. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/energie>

³². European Commission, 2014. EU 2020 target for energy efficiency, <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/targets-directive-and-rules/eu-targets-energy-efficiency>

³³. CGDD, 2018. Évaluation de la réglementation thermique de 2012 dans les bâtiments neufs en vue de la prochaine réglementation environnementale.

Figure 1.16 Évolution du parc de résidence principale en France, en fonction de la principale énergie de chauffage, entre 1973 et 2017 (source CEREN)



- ▶ Dans les maisons individuelles, les pompes à chaleur représentent 56 % des chauffages dans le parc total de maisons neuves, et 93 % parmi les maisons neuves chauffées à l'électricité³⁴.
- ▶ Elles sont également majoritaires dans certaines branches du tertiaire (bureaux et enseignement notamment).
- ▶ Elles restent néanmoins minoritaires dans les nouveaux logements collectifs, avec une part de marché de 5 %, presque à parts égales avec les radiateurs électriques. Dans ce type de logement, la part de l'électrique se limite à 13 % des logements depuis la RT 2012.

Le chauffage au bois est principalement présent surtout en maison individuelle, tandis que les réseaux de chaleur équipent surtout les logements collectifs, ainsi que certaines branches du tertiaire (bureaux, commerces). Mais ces deux énergies bas-carbone sont encore minoritaires dans la plupart des bâtiments.

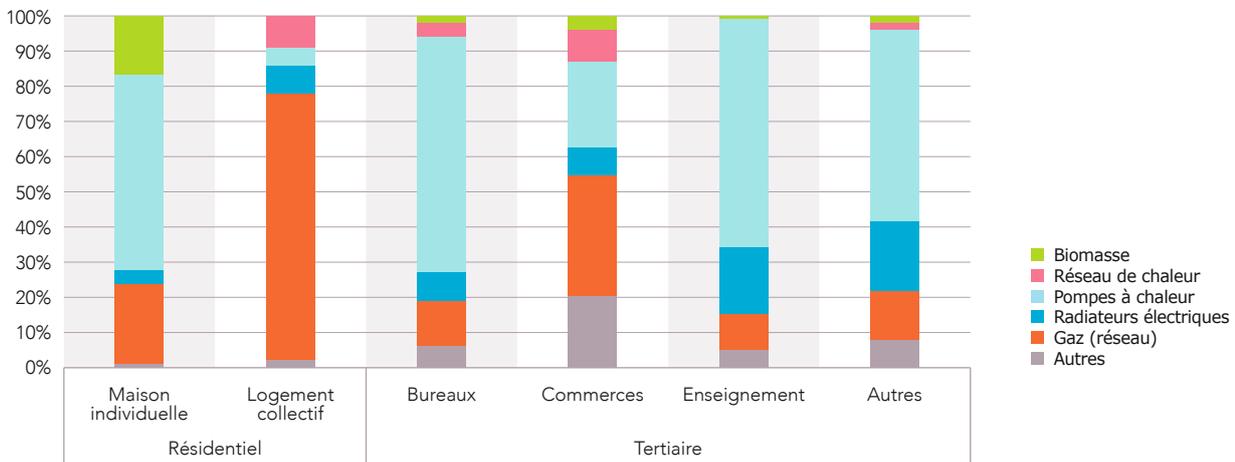
En revanche, comme cela a été indiqué précédemment, **des solutions utilisant des énergies fossiles sont encore très largement utilisées dans le neuf, et notamment dans les**

logements collectifs où les trois-quarts des nouveaux immeubles sont équipés au gaz (via des chaudières à condensation).

C'est notamment l'enjeu de la future RE 2020 de définir des normes applicables à la construction neuve qui seront articulées avec l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre, et doivent ainsi inciter à la fois à la réduction de la consommation d'énergie finale mais également au choix de solutions de chauffage décarbonées.

À partir de 2021, la réglementation thermique laissera place à une «réglementation environnementale» des bâtiments et intégrera pour la première fois un critère sur les émissions de gaz à effet de serre. Selon le paramétrage qui sera défini par les pouvoirs publics, cette nouvelle réglementation modifiera les incitations sur les systèmes de chauffage et donc la part des différentes sources d'énergie dans les bâtiments neufs. L'élaboration de cette nouvelle réglementation environnementale fait en conséquence l'objet de vifs débats entre les différentes parties prenantes. La nouvelle RE 2020 est la première à être conçue en intégrant la perspective

³⁴. CSTB, 2019. Caractéristiques thermiques des bâtiments soumis à la RT 2012 (rapport).

Figure 1.17 Répartition des systèmes de chauffages dans la construction neuve depuis 2012³⁵

de la neutralité carbone à l'horizon 2050. Elle doit pour cela restreindre l'utilisation des combustibles fossiles car les solutions de chauffage installées en 2020 seront toujours en fonctionnement vers 2040.

1.3.5 L'évolution du parc de chauffage dépend aussi, plus récemment, des politiques publiques pour aider à la rénovation

Le rythme de progression de la construction neuve reste un frein important pour la transformation du secteur des bâtiments : le rythme de renouvellement du parc français de résidences principales est aujourd'hui d'environ 1% par an. Par ailleurs, les durées de vie des systèmes de chauffage sont relativement longues (15 à 20 ans), et le déploiement des différentes technologies est souvent conditionnée par l'infrastructure (accès au réseau de gaz, à un réseau de chaleur...).

Les réglementations thermiques des bâtiments se sont donc également accompagnées de mesures

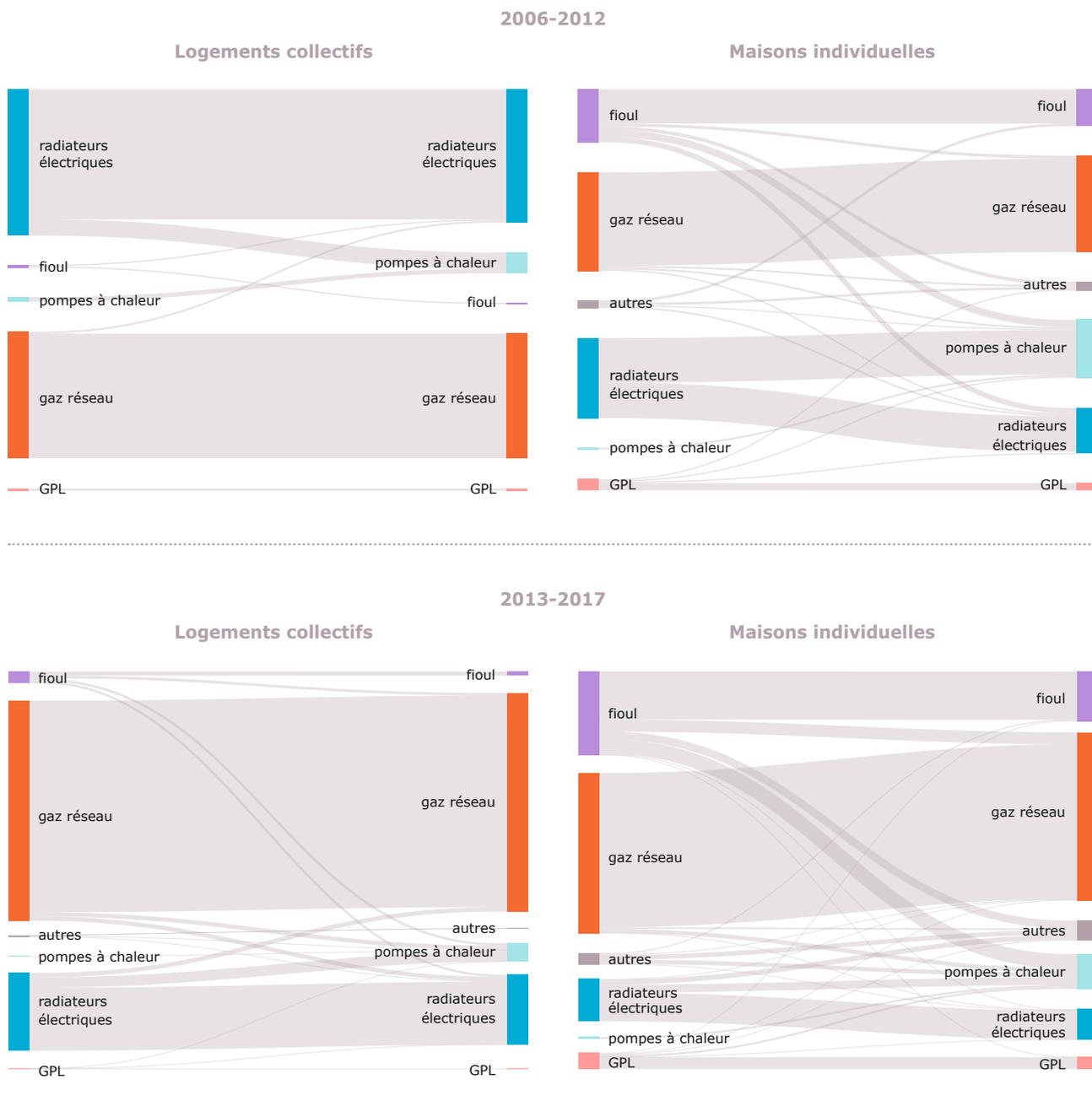
d'aides et d'incitation à la rénovation pour favoriser l'accélération de la transformation du secteur du bâtiment. Il existe ainsi aujourd'hui plus d'une dizaine de dispositifs (primes, prêts avantageux sous conditions de travaux et de ressources, etc.) aussi bien pour des rénovations du système de chauffage que pour des rénovations du bâti (isolation).

Les données historiques recensant les changements de système de chauffage montrent malgré tout une persistance assez forte du *statu quo* concernant la répartition des énergies de chauffage dans le parc de logements existants. L'essentiel des remplacements de systèmes de chauffage consistent ainsi en un renouvellement sans changement de l'énergie de chauffage : pour l'électricité comme le gaz, les taux de remplacement à l'identique se situent en moyenne autour de 90% voire plus. La propension à changer de solution de chauffage lors de l'échéance du renouvellement d'une chaudière au fioul est plus élevée, mais le taux de remplacement à l'identique demeure supérieur en moyenne à 50% dans un passé récent³⁶. Dans les maisons individuelles,

³⁵. CSTB, 2019. Caractéristiques thermiques des bâtiments soumis à la RT 2012 (rapport).

³⁶. CEREN, Panel installateur 2016.

Figure 1.18 Évolution des parts de marché des remplacements de chauffage individuels entre 2007 et 2012, puis 2013 à 2017, dans les logements collectifs à gauche et maisons individuelles à droite (source : données panels installateurs CEREN)³⁷



43. SDES, Consommation d'énergie par usage du tertiaire 2018.

une tendance à l'installation de pompes à chaleur s'observe, mais essentiellement en remplacement de radiateurs électriques.

In fine, il existe ainsi une forte stabilité dans l'utilisation des combustibles fossiles dans les logements existants. Ainsi, plus de 50% des opérations réalisées sur un chauffage au fioul conduisent à conserver cette énergie, alors qu'il s'agit du mode de chauffage le plus émetteur de gaz à effet de serre. Pour le gaz, lui aussi émetteur, la quasi intégralité des opérations conduisent au maintien de la solution de chauffe. Remplacer les solutions de chauffage sans changer de type de solution présente un intérêt dans la mesure où les nouvelles chaudières sont souvent plus efficaces et permettent de réduire les besoins de chauffe. Pour autant, **cette forte stabilité dans l'existant n'est pas alignée avec les trajectoires de réduction des émissions**, et conduira, si elle se poursuit, à des réductions d'émissions trop faibles dans le secteur du bâtiment.

Une tendance assez marquée au remplacement des radiateurs électriques par des pompes à chaleur dans les maisons individuelles peut tout de même être observée. Ceci montre que les politiques publiques ont bien une influence sur la rénovation des systèmes de chauffage, dans le sens d'une meilleure efficacité énergétique (la pompe à chaleur est bien plus efficace que le radiateur électrique, d'un

point de vue énergétique). Néanmoins, ce type de transfert n'intervient pas dans les logements collectifs, ce qui limite son efficacité, et intervient essentiellement sur des solutions électriques, seulement marginalement sur le fioul, et pas du tout sur le gaz : son effet sur la réduction de l'utilisation des combustibles fossiles est donc faible.

1.3.6 Dans le secteur tertiaire, un parc de chauffage dominé par le gaz

Le secteur du tertiaire représente une consommation d'énergie finale d'environ 240 TWh en 2018, dont une centaine pour le chauffage³⁸. Dans l'ensemble, en 2018, l'énergie majoritaire de chauffage du parc tertiaire est le gaz naturel qui alimente le chauffage pour 46% des surfaces, suivi de l'électricité pour près de 30% des surfaces. Le fioul représente quant à lui environ 15% des surfaces tandis que les 10% restants se divisent entre réseaux de chaleur urbains (7%), GPL et énergies renouvelables³⁹.

Les bâtiments du secteur tertiaire constituent un ensemble particulièrement hétérogène. La majorité des bâtiments tertiaires sont recensés sous les codes d'activité NAF, répartis selon huit branches d'activité, définies selon la nomenclature du

Figure 1.19 Parc des installations principales de chauffage dans les surfaces tertiaires en 2018⁴⁰



38. SDES, Consommation d'énergie par usage du tertiaire 2018. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/energie>

39. CEREN, Suivi du parc et des consommations du secteur tertiaire année de constat 2017

40. Cette représentation exclut donc les chauffages collectifs.

CEREN : cafés, hôtels, restaurants ; habitat communautaire ; santé, action sociale ; enseignement, recherche ; sports, loisirs ; bureaux, administration ; commerce ; transports (bâtiments du transport, hors force motrice). Les bâtiments classifiés comme « autre tertiaire » regroupent les parties communes d'immeubles, les data centers, certains centres de recherche...

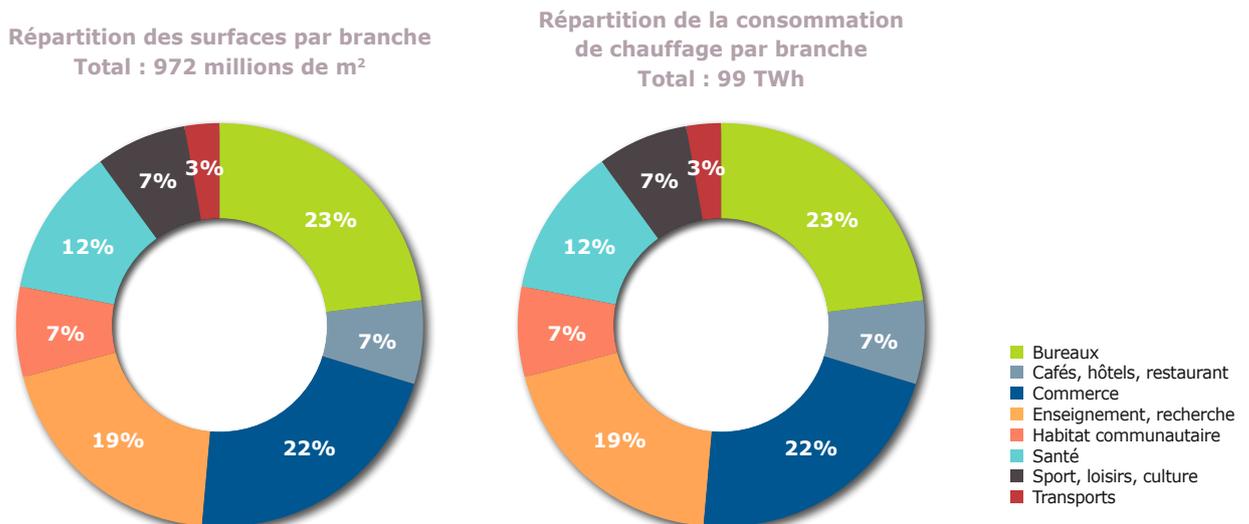
L'hétérogénéité des branches du tertiaire rend l'estimation de l'évolution de la consommation du secteur plus complexe. Les besoins énergétiques sont par exemple différents entre un immeuble de bureaux, une école et un établissement de santé. Au sein d'une même branche, il existe également de grandes disparités : par exemple, au sein de la branche commerce, la consommation d'énergie sera très différente pour une grande surface et une épicerie.

Les surfaces munies des systèmes de chauffage électriques dans le tertiaire augmentent du fait de deux facteurs : une augmentation des surfaces

occupées par le tertiaire de façon générale, qui est liée au dynamisme de l'activité économique et à l'évolution de la population active, et une augmentation de la part du chauffage électrique au sein des bâtiments tertiaires. Entre 2005 et 2017, les surfaces chauffées à l'électricité ont augmenté de 38%, soit bien plus vite que l'ensemble des surfaces des branches du bâti tertiaire, qui ont progressé seulement 13% sur la même période⁴¹. Cette électrification de l'usage est principalement portée par le développement des pompes à chaleur sur le marché.

Sur l'énergie de chauffage utilisée, des disparités importantes entre les différentes branches d'activité peuvent ainsi être observées. Les branches *Bureaux, Commerce et Cafés, Hôtels, Restaurants* sont aujourd'hui principalement chauffées à l'électricité, tandis que les surfaces des branches appartenant majoritairement au secteur public telles que *Habitat communautaire, Santé, Enseignement* sont traditionnellement chauffées au gaz.

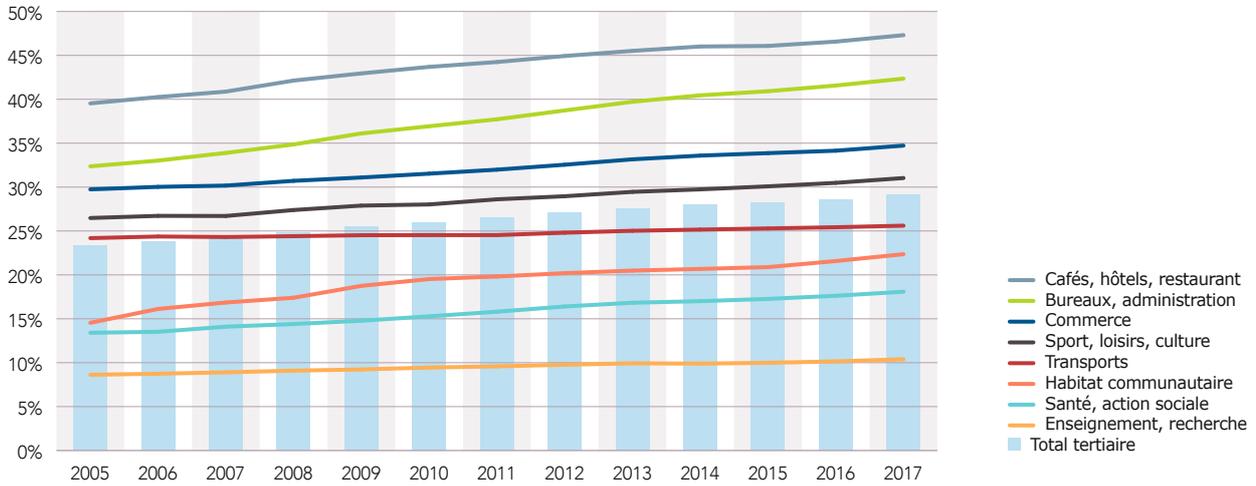
Figure 1.20 Répartition des surfaces et des consommations d'énergie entre les branches⁴²



⁴¹. Données CEREN

⁴². MTES, 2020. Stratégie à long terme de la France pour mobiliser les investissements dans la rénovation du parc national de bâtiments à usage résidentiel et commercial, public et privé. http://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/200210_strategie_de_renovation_2020_vf.pdf

Figure 1.21 Historique de la part du chauffage électrique dans les secteurs tertiaires entre 2005 et 2017⁴³



43. Données CEREN

2

L'ENJEU DE L'ÉTUDE
APPROFONDIE :
une compréhension
fine des déterminants
du besoin de chauffage

L'ENJEU DE L'ÉTUDE APPROFONDIE : UNE COMPRÉHENSION FINE DES DÉTERMINANTS DU BESOIN DE CHAUFFAGE

2.1 Le parc total de bâtiments résidentiels et tertiaires : une évolution déterminée par la démographie et l'activité économique

Pour envisager la décarbonation du secteur du bâtiment, il est nécessaire de se pencher sur l'évolution du parc de bâtiment et la politique du logement. Contrairement au secteur de la mobilité, où le parc de véhicules devrait être renouvelé en quasi-intégralité d'ici 2035, ce qui rend plus facile la bascule vers des solutions bas-carbone, le secteur du bâtiment est marqué par une forte inertie : les bâtiments de 2035, voire de 2050, sont en majeure partie ceux d'aujourd'hui.

L'évolution générale du parc de logement, intégrant le rythme de construction neuve et celui de reconstruction des logements existants, constitue une hypothèse de première importance. La modélisation utilisée dans l'étude RTE-ADEME établit une projection de référence concernant cette évolution, en cohérence avec celle utilisée pour l'élaboration du Bilan prévisionnel de RTE et concertée avec les parties prenantes¹.

Dans le secteur résidentiel, le parc de logements et notamment celui des résidences principales, qui en constitue la majeure partie et sur lequel se focalise cette étude, est globalement déterminé par l'évolution démographique. Sous l'effet combiné de la croissance démographique et de la décohabitation,

les projections retenues dans la présente étude, issues des projections de l'INSEE (démographie haute), intègrent une augmentation du nombre de résidences principales, qui passe de 29 millions en 2018 à 34 millions en 2035.

Ceci conduit notamment à la construction d'un nombre significatif de bâtiments neufs dans les prochaines années. Le flux de la construction neuve rend compte à la fois du besoin de logements supplémentaires lié à l'évolution démographique qui se chiffre à environ six millions d'ici 2035, mais aussi au renouvellement dans le parc de logements anciens (qui porte sur environ deux millions de logements dans les quinze prochaines années). Enfin, si la construction neuve se répartit aujourd'hui à parts égales entre maisons individuelles et logements collectifs, la SNBC projette une augmentation de la part des logements collectifs, pour atteindre environ 65 % dans la construction neuve en 2035, contre 35 % pour les maisons individuelles.

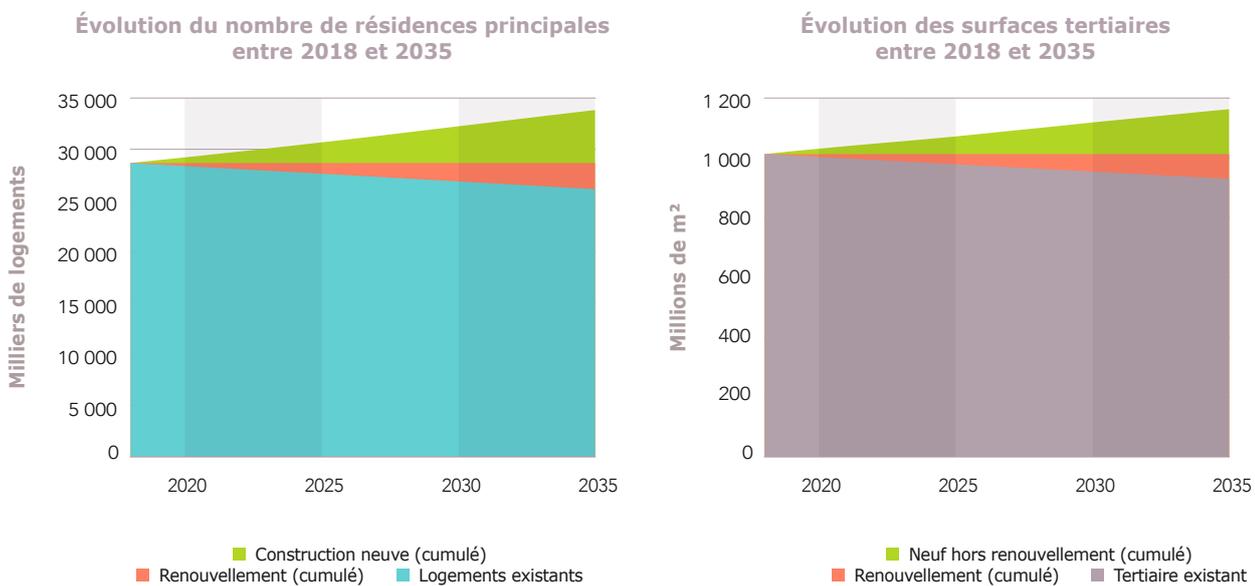
L'évolution à long terme du parc de bâtiments tertiaires dépend quant à elle au premier ordre de l'activité économique ; son évolution est donc estimée via les projections du taux d'emploi et la

1. Cette étude s'appuie sur la modélisation du parc de logements et de bâtiments tertiaires utilisé dans les Bilans prévisionnels de RTE et les études associées : électromobilité, hydrogène. Cette modélisation focalisée majoritairement sur les bâtiments chauffés à l'électricité, a été présentée aux parties prenantes en mars et mai 2019, dans le cadre du groupe de travail sur la consommation. Dans le cadre du travail sur les scénarios 2050, la concertation a globalement conduit à confirmer la modélisation retenue et conduira à réviser certaines hypothèses, généralement dans des proportions limitées, compte tenu du retour des parties prenantes. Néanmoins, à la date d'aujourd'hui, ces révisions d'hypothèses ne modifieront les valeurs de consommation des différents usages qu'à la marge.

progression du PIB². Pour ce secteur, qui regroupe des sites de natures très hétérogènes, l'unité pertinente n'est pas le nombre de sites mais la surface correspondante (en m²). On décompte aujourd'hui près d'un milliard de m² de surfaces tertiaires équipées de systèmes de chauffage, électrique ou non.

En retenant une hypothèse de croissance moyenne annuelle du PIB à environ 2%³ sur la période 2020-2035, l'augmentation des surfaces chauffées du secteur tertiaire est estimée à environ 15% à l'horizon 2035 (soit environ 150 millions de m² supplémentaires).

Figure 2.1 Évolution du nombre de résidences principales et des surfaces tertiaires entre 2018 et 2035



2. Cf. documents de concertation du groupe de travail sur la consommation, mars et mai 2019.

3. Les hypothèses de PIB retenues, alignées sur le modèle RTE portant sur la consommation du secteur industriel, tiennent compte des évolutions constatées et des prévisions établies par des groupements d'économistes, par l'intermédiaire du rapport *Consensus Forecasts* publié mensuellement. (RTE, 2019. Document de concertation : Groupe de travail « consommation d'électricité » : la consommation du secteur tertiaire, p.13). Ces hypothèses ont été établies avant la crise sanitaire de la COVID-19.

2.2 L'évaluation des besoins de chauffage par foyer : comprendre le besoin conventionnel de chauffage tel qu'il est estimé par le diagnostic de performance énergétique et les écarts potentiels avec la consommation réelle

Caractériser précisément les besoins de chauffage dans les bâtiments est essentiel pour modéliser leurs évolutions possibles à l'avenir. Il s'agit d'une étape incontournable pour analyser la manière dont ces besoins peuvent être réduits dans une optique d'efficacité énergétique, et desservis par des énergies bas-carbone dans le cadre d'une politique de lutte contre le changement climatique.

Pour cela, de la même façon que l'étude publiée par RTE de mai 2019 sur la mobilité électrique était fondée sur une analyse détaillée des besoins de mobilité (en s'appuyant sur les enquêtes nationales transport déplacement), et que celle de janvier 2020 sur l'hydrogène bas-carbone s'articulait autour d'une analyse des consommations d'hydrogène dans l'industrie, la présente étude sur le secteur du bâtiment analyse finement les différents facteurs qui déterminent le besoin de chauffage.

Ces facteurs sont nombreux. Ils portent par exemple, pour le secteur résidentiel, sur la taille du foyer et du logement, la nature et qualité du bâtiment, son ancienneté, sa localisation, mais également le niveau de vie des occupants et la performance de la solution de chauffage.

Par ailleurs, cette évaluation sur le temps long est complexe. Ainsi, il n'existe pas même de consensus sur la consommation d'énergie pour le chauffage aujourd'hui. En effet, celle-ci est évaluée sans être directement mesurée : les installations de chauffage ne sont pas équipées de dispositifs de mesure spécifiques, et la consommation des foyers est mesurée à l'échelle de l'ensemble du foyer, sans différencier les usages. S'agissant de l'électricité, dont les usages au sein d'un bâtiment sont multiples (chauffage, mais également eau chaude sanitaire, ventilation ou climatisation, cuisson, électro-ménager, numérique, etc.), la reconstitution nécessite l'utilisation

de modèles qui rendent compte des différents postes de consommation.

Cette partie de l'étude précise la façon dont le besoin est évalué aujourd'hui et les hypothèses considérées pour modéliser son évolution à terme.

2.2.1 L'évaluation du besoin de chauffage ne peut pas se baser sur la méthode standard issue de la réglementation thermique

Dans le cadre de la réglementation thermique, des méthodes standardisées d'évaluation de la consommation énergétique des bâtiments ont été définies. La réglementation thermique pour les bâtiments neufs détermine ainsi le besoin de chauffage des logements via une méthode dynamique horaire (méthode ThBCE), standardisée, pour établir le diagnostic de performance énergétique («DPE neuf»). Pour les bâtiments existants, une méthode similaire mais simplifiée s'applique également pour calculer le diagnostic de performance énergétique (méthode 3CL-DPE⁴ permettant de calculer un «DPE existant»).

Par définition, ces méthodes de calcul, dites «conventionnelles», ne peuvent refléter systématiquement la consommation réelle. Le mode de calcul conventionnel considère un usage standardisé du logement, mais qui peut différer des conditions réelles dans lesquelles les consommateurs résidentiels utilisent leur chauffage, qu'il s'agisse des aspects purement comportementaux ou des spécificités techniques liées à chaque bâtiment et à ses équipements.

En pratique, la consommation réelle d'énergie finale s'avère souvent différente, et dans la plupart des cas inférieure, à la consommation théorique conventionnelle. Cela peut s'expliquer par de multiples facteurs :

4. RT 2012, méthode 3CL-DPE.

- ▶ le niveau réel de vétusté de l'équipement de chauffage (âge, niveau d'entretien...) ;
- ▶ les malfaçons (étanchéité à l'air, humidité...) ;
- ▶ la météo (conventionnelle dans les calculs) ;
- ▶ les scénarios d'occupation ;
- ▶ le comportement réel (consigne de température réelle⁵, mise en place de réduits de

- température pendant la nuit ou en période d'absence, ouverture des fenêtres...) ;
- ▶ la sensibilité de l'occupant au coût de l'énergie, en particulier sur les logements très énergivores (passoires thermiques), qui peut conduire à l'effet rebond suite à une rénovation.

Le calcul de la consommation conventionnelle de chauffage : la méthode 3CL-DPE

La méthode considère une **température intérieure de référence de 19°C** : le besoin conventionnel de chauffage correspond à la chaleur qui doit être apportée au logement (c'est-à-dire dans toutes les pièces) pour assurer cette température de confort.

Les **déperditions thermiques** sont estimées à partir des caractéristiques du bâtiment d'une part, et d'un indicateur de la rigueur du climat d'autre part.

La **fraction des besoins de chauffage couverts par les apports gratuits** concerne les apports internes et solaires. Les apports internes sont calculés en fonction du nombre de personnes par logement et par les pertes des appareils à l'intérieur du logement (chaleur dégagée par l'éclairage, etc.). Les apports solaires sont déterminés par la surface des baies vitrées et l'exposition au sud.

Les **pertes récupérables de l'eau chaude sanitaire** correspondent à la chaleur perdue du circuit d'eau chaude sanitaire pouvant être récupérée pour diminuer le besoin thermique.

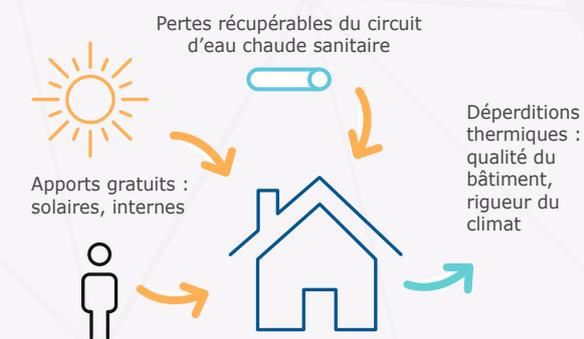
Le **facteur d'intermittence** reflète la diminution du besoin de chauffage à certains moments : réduction de la température de chauffage la nuit (d'environ deux degrés), absences (une semaine d'absence en hiver). Ce facteur est fixé de façon conventionnelle selon le type de logement et l'ancienneté.

Le **besoin thermique conventionnel** résulte de ces différentes variables : la température de consigne, les déperditions diminuées des apports (solaires, internes, eau chaude sanitaire), modulées de l'intermittence (nuit, absences).

La **consommation conventionnelle** d'énergie finale de chauffage s'obtient en divisant le besoin thermique conventionnel par le rendement du système de chauffage.

Le détail des paramètres est présenté de façon quantitative en annexe du chapitre.

Figure 2.2 Schéma des apports et déperditions thermiques d'un bâtiment



5. Il est communément admis que la température de consigne moyenne observée dans les logements est proche de 21°C.

De plus, les simplifications nécessaires à la modélisation d'un parc d'une telle ampleur (surfaces moyennées par logements, classification des logements selon trois catégories d'âge... Cf. annexe section 2.10) peuvent également contribuer à l'écart entre consommation conventionnelle et réelle.

Finalement, 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. La modélisation de la consommation de chauffage réelle ne peut donc pas s'appuyer uniquement sur la méthode du DPE du calcul du besoin conventionnel.

2.2.2 La modélisation du besoin de chauffage utilisée dans l'étude intègre un facteur correctif endogène qui rend compte des contraintes économiques

La modélisation utilisée dans l'étude RTE-ADEME, commune aux Bilans prévisionnels de RTE et études associées, calibre le volume de chauffage électrique via un facteur correctif endogène. Ce type de méthode est également décrit dans la littérature spécialisée⁶.

Cette calibration s'appuie sur une interprétation économique, en considérant la sensibilité de l'occupant au coût de l'énergie comme le paramètre explicatif principal (après avoir tenu compte des données de climat réel et des performances des bâtiments estimées). En réalité, il s'agit d'une approximation servant à reproduire tous les effets identifiés au-delà du seul effet «coût». Ce point fait débat parmi les experts, cette interprétation pouvant paraître réductrice compte tenu des nombreux paramètres explicatifs réels : des pistes

d'amélioration de la modélisation sont mises en avant par certains acteurs, notamment par une estimation conventionnelle plus fine d'une part, et un renforcement des observations du bâti d'autre part⁷. Néanmoins, ce choix de modélisation permet de **reconstituer le volume de consommation réelle de chauffage électrique à partir de la consommation théorique**.

De surcroît, comme ce facteur lie de façon endogène la consommation réelle, conventionnelle, et le coût de l'énergie, il présente l'avantage de modéliser **des projections crédibles de l'effet rebond lié à une rénovation** (ce point est détaillé dans les sections dédiées 2.4.4 et 2.5.7). Ce même facteur correctif est ainsi utilisé par le service des données et des études statistiques (au service des ministères en charge du logement, des transports, de l'énergie, de l'environnement, du climat et du développement durable) dans le rapport «Les ménages et la consommation d'énergie» en mars 2017⁸ ainsi que dans plusieurs publications⁹. Le détail de cette modélisation est présenté en annexe section 2.10.

Progressivement, les effets combinés des rénovations dans le parc existant, des performances dans la construction neuve et de l'amélioration de la performance des équipements tendent à réduire l'écart entre consommation conventionnelle et consommation réelle du chauffage sur l'ensemble du parc (suite à la réduction de la part du chauffage dans le budget des ménages). Cette tendance est confirmée par l'étude PREBAT de l'ADEME, qui a analysé la consommation d'énergie de plus de 100 bâtiments récents basse consommation (bâtiments neufs post-RT 2012 ou rénovés), et relève des consommations globalement proches de la consommation théorique attendue (niveau de consommation BBC) avec quelques disparités. La consommation est parfois même légèrement supérieure au niveau théorique.

6. La formule de calcul pour l'intensité d'utilisation a ainsi été proposée dans la thèse de B. Allibe «Modélisation des consommations d'énergie du secteur résidentiel français à long terme – Amélioration du réalisme comportemental et scénarios volontaristes» (2012), en effectuant une régression entre l'intensité d'utilisation constatée des systèmes de chauffage sur un échantillon de 913 logements (EDF R&D 2009), et le coût du service normé en euros par mètre carré. D'autres références de la littérature utilisant le même type de modélisation sont présentées dans les notes suivantes.
7. Institut négawatt, 2018, Résorber la précarité énergétique et rénover les passoires thermiques. Solutions innovantes et prêtes à déployer pour rendre accessible à tous la rénovation performante des maisons individuelles. https://www.institut-negawatt.com/fichiers/autres_documents/etude_juin_2018_inw.pdf
8. L'enquête «Performances de l'Habitat, Équipements, Besoins et Usages» (Phébus), réalisée par le service statistique du ministère chargé de l'énergie, permet de décrire la performance thermique des logements et éclaire sur les comportements de consommation d'énergie des ménages, que ce soit dans l'habitat ou dans les transports. Le croisement de ces informations avec le revenu des ménages vise à enrichir en outre la compréhension de la précarité énergétique.
9. Stanislas Nöesperger, Dominique Osso, and Maxime Raynaud, 2017. "A Proposal to Go beyond the Rebound Effect: How to Evaluate the Financial Value of Comfort after Retrofitting?," 1759-67. Maxime Raynaud *et al.*, 2018 "How Deep Does the Retrofitting Have to Be? A Cost-Benefit Analysis of Two Different Regional Programmes,". CGDD, 2015 «La Revue du CGDD. La rénovation thermique des logements : quels enjeux, quelles solutions ?». Cayla, Osso, 2013, Does energy efficiency reduce inequalities? Impact of policies in residential sector on household budget, ECEE conference proceedings.

2.3 La réduction des émissions associées au chauffage : des politiques qui portent sur la rénovation du bâti, l'évolution des solutions de chauffage et la décarbonation des vecteurs énergétiques associés

2.3.1 Les orientations publiques pour la décarbonation du secteur du bâtiment

Pour parvenir à la neutralité carbone en 2050, les orientations de la stratégie énergie-climat de la France, précisées dans le cadre de la PPE et de la SNBC publiées en avril 2020, s'appuient sur plusieurs piliers qui touchent directement le secteur du bâtiment :

- ▶ Un objectif de réduction de 50 % de la consommation finale d'énergie à l'horizon 2050 par rapport à 2012, en développant l'efficacité énergétique ainsi que les efforts de sobriété ;
- ▶ Une décarbonation de la production d'énergie, en remplaçant les énergies fossiles par des sources d'énergie neutres en carbone, avec en particulier une mobilisation accrue du gisement de biomasse pour l'énergie et un développement de l'électricité décarbonée (dont la part dans la consommation finale doit croître).

Dans le cas des bâtiments et de l'usage chauffage en particulier, ces orientations se traduisent par plusieurs actions : réduire la consommation des bâtiments à la fois via l'isolation du bâti et l'installation généralisée de systèmes de chauffage à haute performance énergétique, et privilégier et développer les énergies faiblement carbonées. Ce cadre conceptuel et juridique a plusieurs fois évolué au cours des dernières années :

- ▶ l'objectif portant sur la consommation d'énergie a été fixé en 2015 dans le cadre de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte. Il consiste en une cible globale de réduction de la consommation d'énergie de 50 % en 2050, reprise dans le SNBC, et en une cible sectorielle pour le parc de logement français qui doit atteindre en moyenne un niveau équivalent BBC (bâtiment basse consommation) d'ici 2050.

- ▶ l'objectif de neutralité carbone a été fixé en 2019 dans la loi énergie-climat, et détaillé par la SNBC en avril 2020. La SNBC implique que le secteur du bâtiment tous usages confondus émette 5 millions de tonnes par an en 2050, contre environ 83 aujourd'hui.

Pour atteindre cet objectif, la SNBC prévoit en particulier (i) une évolution de la réglementation environnementale des bâtiments neufs pour favoriser les bâtiments performants sur le plan énergétique et peu émetteurs de CO₂ et (ii) une accélération forte du rythme de rénovations dans l'existant.

Concernant le neuf, la nouvelle réglementation environnementale, dont les grandes lignes ont été annoncées en novembre 2020, met l'accent sur la baisse de la consommation des bâtiments, indépendamment des systèmes de chauffage, et privilégie le recours à l'énergie décarbonée, notamment à travers la chaleur renouvelable (pompe à chaleur, biomasse...). Les exigences de la RE 2020 vont entraîner la disparition progressive du chauffage utilisant des énergies fossiles dans les logements et des modes de chauffage électriques peu efficaces (radiateurs électriques). En anticipation des effets du réchauffement climatique, un objectif de confort lors des vagues de chaleur devrait également être inclus. Enfin, un critère sur les émissions de gaz à effets de serre sera adopté, prenant en compte tout le cycle de vie du bâtiment, de la construction à la démolition en passant par les émissions lors de l'utilisation¹⁰.

Concernant le bâti existant, les politiques publiques incitent à l'accélération des efforts de rénovation dans les secteurs résidentiels et tertiaires. Celles-ci se traduisent par des outils législatifs et réglementaires de différentes natures :

- ▶ mise en place d'un nouveau calcul de diagnostic de performance énergétique (DPE),

10. MTES, 2020. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/re2020-nouvelle-etape-vers-future-reglementation-environnementale-des-batiments-neufs-plus>

- ▶ aides aux travaux de rénovation énergétique (MaPrimeRénov', prêt à taux zéro éco-PTZ, aides de l'ANAH pour les ménages modestes, TVA à taux réduit...),
- ▶ dispositifs de certificats d'économie d'énergie,
- ▶ obligations de rénovation pour les logements les plus énergivores prévues par la loi énergie-climat (dont les modalités d'application doivent encore être précisées par voie réglementaire),
- ▶ obligations de réduction de la consommation énergétique du parc tertiaire prévues par la loi ELAN et les textes réglementaires associés (« dispositif Éco Énergie tertiaire »), etc.

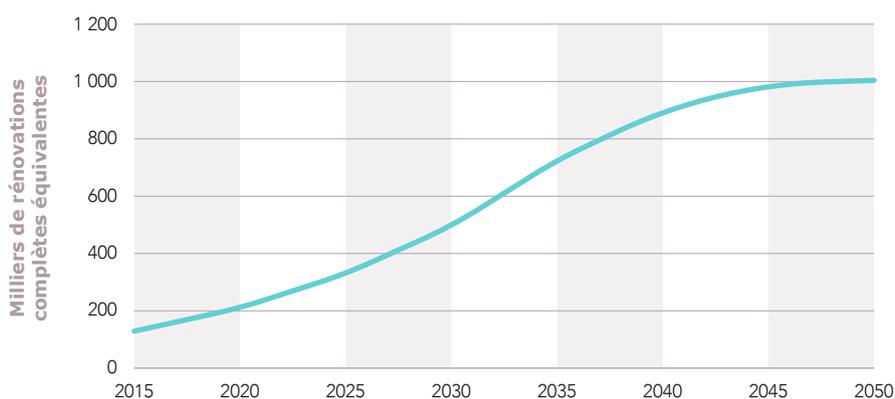
Dans l'ensemble, ces dispositifs visent à favoriser l'accélération des rénovations et de leurs effets sur la consommation énergétique des bâtiments. Ainsi, selon la trajectoire définie par la SNBC pour l'atteinte de la neutralité carbone, le rythme de rénovations devrait augmenter rapidement afin d'atteindre plus de 700 000 rénovations complètes équivalentes¹¹ par an dans le secteur résidentiel sur la période 2030-2050 (contre l'équivalent de 200 000 aujourd'hui). Le rythme de rénovations

dans le secteur tertiaire est également supposé suivre une accélération similaire, pour atteindre un rythme de 3% de surfaces rénovées par an.

Ces rénovations se matérialisent en pratique par une multiplicité de gestes principalement sur trois postes majeurs : isolation des parois opaques (toitures, murs, sols), remplacement des fenêtres (parois vitrées) et changement du système de chauffage. Ceux-ci sont précisés dans l'encadré « Terminologie et recensement des travaux de rénovation ». Selon leur nature, les rénovations peuvent donc conduire à des effets différents sur la consommation énergétique et sur le bilan carbone des bâtiments.

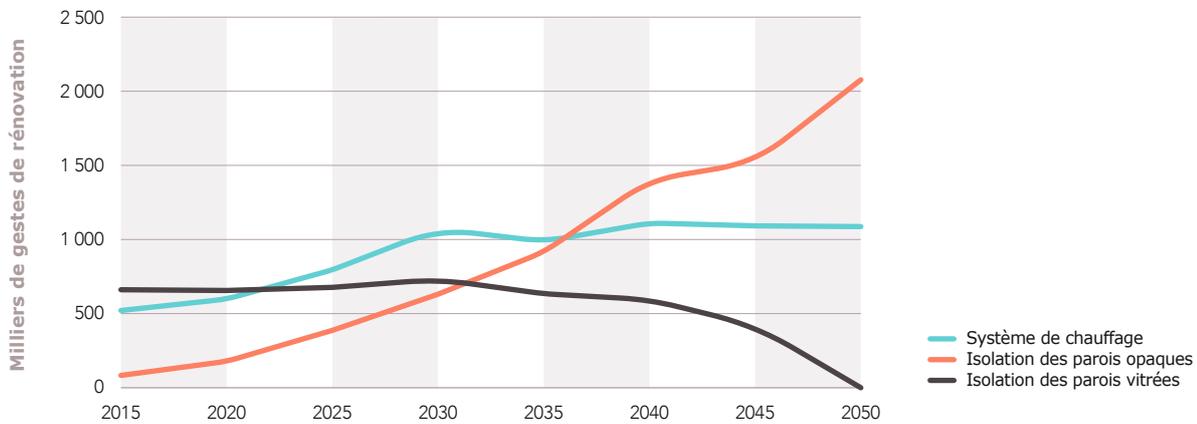
La SNBC décline la trajectoire de rénovations complètes équivalentes en gestes. L'accélération de l'effort de rénovation prévue se traduit ainsi en un rythme d'environ 3 millions de gestes par an à l'horizon 2050, tous types de gestes confondus. Dans la mesure où la réduction de consommation associée à un geste n'est pas spécifiée dans la SNBC, cet objectif peut recouvrir des réalités assez disparates « par geste » (seuls les gestes générant

Figure 2.3 Évolution du nombre de rénovations complètes équivalentes dans le résidentiel entre 2015 et 2050 établie par la SNBC (en milliers)¹²



11. Une rénovation complète équivalente correspond à une rénovation permettant d'atteindre un niveau d'efficacité énergétique très performant pour l'ensemble d'un bâtiment. Le gain sur la consommation énergétique associé à une telle rénovation dépend donc de l'état initial du bâtiment. La SNBC fournit une valeur indicative de l'ordre de 250 kWh d'énergie finale par mètre carré et par an en moyenne. Il s'agit d'un ordre de grandeur permettant de quantifier la performance d'une telle rénovation en matière de saut de classes DPE (diagnostic de performance énergétique). Il ne constitue pas une valeur absolue valable pour toute rénovation individuelle, mais permet de qualifier l'évolution de la performance moyenne du parc dans la trajectoire de la SNBC.

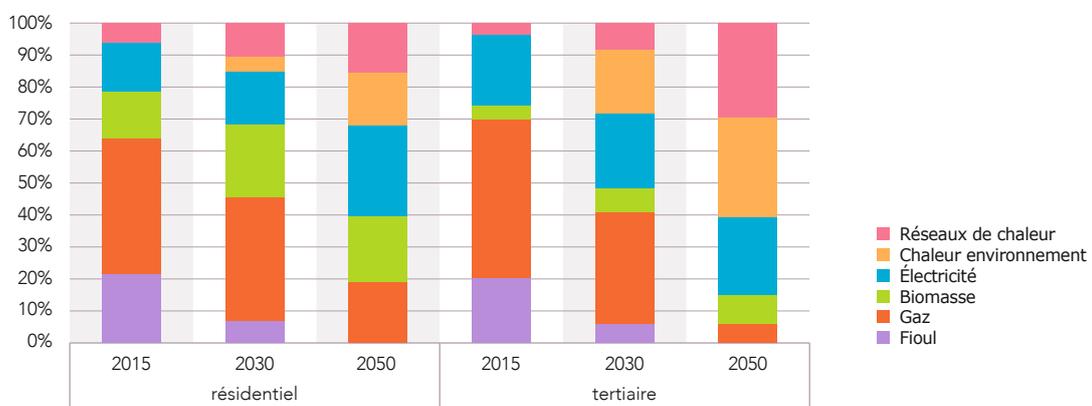
12. Direction Générale de l'Énergie et du Climat, synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat. Version provisoire du projet de stratégie nationale bas carbone (SNBC) et du projet de programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE). 15/03/2019.

Figure 2.4 Évolution du nombre de gestes de rénovations dans le résidentiel entre 2015 et 2050 (en milliers)¹²

un minimum de gain énergétique sont toutefois comptabilisés dans la SNBC).

En matière d'énergie et de systèmes de chauffage, la SNBC cible de manière privilégiée le développement des solutions les plus vertueuses sur les plans de la réduction des émissions de CO₂ et de l'efficacité énergétique : (i) les réseaux de chaleur urbains, qui utilisent de la biomasse ou de l'énergie de récupération, (ii) les pompes à chaleur qui présentent des rendements énergétiques très élevés, (iii) les chauffages au bois.

De façon spécifique, l'effort principal est supposé porter, au cours des prochaines années, sur les chaudières au fioul, solution la plus directement émettrice qui équipe encore aujourd'hui plus de 3 millions de logements. L'objectif est de remplacer la totalité des chaudières fioul dans le résidentiel d'ici 2028 par des solutions « moins carbonées », voire décarbonées. L'électrification du chauffage projetée par la SNBC se fait principalement via l'installation de pompes à chaleur.

Figure 2.5 Part modale des énergies de chauffage en 2015, 2030, 2050 dans le scénario de synthèse de la SNBC

La rénovation : terminologie et recensement des travaux de rénovation dans les logements

Le terme «rénovation» recouvre de multiples actions visant à améliorer la performance énergétique d'un bâtiment, depuis le passage du simple au double vitrage, à un bouquet de travaux ambitieux composé par exemple de travaux d'isolation d'une toiture et du remplacement d'une chaudière fioul ancienne par une pompe à chaleur neuve.

Il est difficile de recenser précisément, dans la littérature spécialisée, le nombre de rénovations ayant lieu tous les ans ainsi que leur ampleur, car les travaux peuvent s'étaler sur plus d'un an, une rénovation peut comporter plusieurs actions et les modalités de comptage des différents recensements peuvent différer. Néanmoins certaines sources permettent d'identifier des ordres de grandeur.

Terminologie des travaux de rénovation

Issue de l'initiative OPEN de l'ADEME, l'enquête TREMI s'attache à recenser les rénovations ayant eu lieu entre 2014 et 2016 dans les maisons individuelles, ainsi que les réductions de consommation liés aux usages suivants : chauffage, eau chaude sanitaire, ventilation mécanique centralisée et climatisation. Pour décrire ces rénovations, l'enquête emploie la terminologie ci-dessous :

- ▶ Le **poste** désigne la partie du logement qui subit une rénovation : toiture et combles, murs, plancher, ouverture (fenêtres ou portes), système de chauffage, eau chaude sanitaire, ventilation.
- ▶ Le **geste** correspond au détail des travaux effectués sur le poste en question : rénovation d'un pan ou de la totalité de la toiture, avec ou sans isolation...

- ▶ Une rénovation correspond le plus souvent à un «**bouquet de travaux**», c'est-à-dire «plusieurs gestes concernant plusieurs postes».

Recensement des gestes

L'enquête TREMI estime qu'environ 14 millions de gestes ont été effectués sur la période 2014-2016, pour la rénovation de 5 millions de maisons individuelles dans le parc privé, dont la rénovation est considérée «achevée» en 2016. Parmi ces rénovations, l'étude relève 75% de rénovations où la classe est inchangée, 20% de rénovations faisant gagner une classe DPE et 5% de rénovations faisant gagner deux classes et plus. En particulier, l'étude indique que 260 000 maisons individuelles privées ont achevé en 2016 une rénovation faisant gagner deux classes DPE ou plus. À titre de comparaison, l'observatoire BBC, qui effectue le suivi des certifications «BBC rénovation» accordées, recense autour de 30 000 logements engagés dans une rénovation basse consommation par an, entre 2016 et 2019¹³.

Dans son rapport Rénovation énergétique : chantier accessible à tous, l'institut Montaigne (2019) recense environ 265 000 rénovations¹⁴, sans préciser si cela concerne les maisons individuelles ou les logements collectifs, privés ou sociaux, ni la source. De son côté, en 2018, l'Union sociale pour l'habitat estimait à 288 000 le nombre total de rénovations énergétiques par an dans le parc social, tout type de logements confondus¹⁵ (collectif et individuel).

Par ailleurs, l'Agence nationale de l'habitat a permis la réalisation de 156 000 rénovations de logements privés (dont 23 000 logements en copropriété) au

13. Observatoire BBC, 2020. «Tableau de Bord de la certification – Observatoire BBC – 1^{er} Trimestre – 2020» https://www.effinergie.org/web/images/attach/base_doc/2679/202001tableau-de-bord.pdf

14. Institut Montaigne, 2019. «Rénovation énergétique : chantier accessible à tous», p. 97

15. Union sociale pour l'habitat, Dossier. La rénovation énergétique : une priorité nationale. <https://www.union-habitat.org/actualites/dossier-la-renovation-energetique-une-priorite-nationale#content>. 15 mai 2018.

bénéfice de ménages à faibles revenus en 2019, en augmentation de 65% par rapport à 2018¹⁶.

Pour les logements collectifs, la dynamique de rénovation est très différente de celle des maisons individuelles : les occupants en sont moins souvent propriétaires (85% de propriétaires occupants en maison et 30% de propriétaires occupants en collectif¹⁷) et même quand ils le sont, la prise de décision en copropriété est bien plus lente qu'en maison individuelle, d'où un nombre vraisemblablement bien plus bas de rénovations, et notamment de rénovations ayant une incidence significative sur la consommation d'énergie. L'exception reste le parc de logements sociaux, qui connaît une dynamique de rénovation bien plus importante étant donné les réglementations auxquelles sont soumis les bailleurs sociaux : l'Union sociale pour l'habitat fait état d'environ 100 000 rénovations par an dans le logement social.

Ces valeurs sont disparates tant en niveau qu'en périmètre. Néanmoins, à partir de ceux-ci, un chiffre de 400 000 logements rénovés par an sur l'ensemble du parc semble être la meilleure estimation possible en moyenne longue sur les dernières années, ce qui correspond à 250 000 rénovations en maison individuelle et 150 000 rénovations en logement collectif (principalement dans le logement social qui pèse pour environ 100 000 rénovations).

Performance d'une rénovation

Le diagnostic de performance énergétique d'un logement peut être effectué selon les cas, à partir d'un calcul conventionnel ou de factures donc sur la base de la consommation réelle (ou parfois les deux). Or pour un même logement, le calcul conventionnel et la consommation réelle observée peuvent présenter des écarts (cf. section dédiée annexe section 2.10). Il en résulte qu'une même étiquette DPE attribuée

à deux logements peut recouvrir des réalités de consommation assez disparates. Néanmoins, étant donné le niveau de consommation d'énergie associé à chaque classe DPE, on peut établir des estimations en ordre de grandeur sur le gain énergétique lié à une rénovation : un saut d'une classe énergétique correspond à une réduction de la consommation en énergie d'environ 80 kWhEP/m²/an soit autour de 30% ; un saut de deux classes énergétiques correspond à une réduction de la consommation d'environ 160 kWhEP/m²/an, soit autour de 60%. En comparaison, dans la SNBC, une rénovation complète équivalente correspond à un gain de consommation unitaire moyen de l'ordre de 250 kWh d'énergie finale/m²/an, et correspondrait à un saut de trois ou quatre classes énergétiques, afin de faire passer le logement rénové d'une étiquette « énergivore » (étiquette DPE E, F ou G) à une étiquette « économe » (A ou B).

En pratique, plus une rénovation cumule de gestes, plus elle a de chances d'entraîner des gains énergétiques importants : la figure 2.6 présente des exemples de bouquets de gestes pouvant correspondre à différents niveaux de performance de rénovation. Néanmoins, la performance est conditionnée par la pertinence des gestes, à effectuer sur les postes les plus énergivores, et par la qualité de l'opération de rénovation, et de nombreux autres bouquets de travaux qui pourraient amener un même gain.

Au-delà des gestes concernés par les rénovations, un débat existe sur la pertinence d'effectuer des rénovations par étapes : si cette façon de faire a l'avantage d'étaler les coûts pour les ménages réalisant les travaux, techniquement, réaliser les gestes de façon séparée dans un logement augmenterait les chances de créer des ponts thermiques et autres malfaçons potentiellement difficiles à identifier, mais installées de façon durable, et aurait

¹⁶. Chiffres clés de l'Anah 2019.

¹⁷. INSEE, 2015. Recensement de la population.

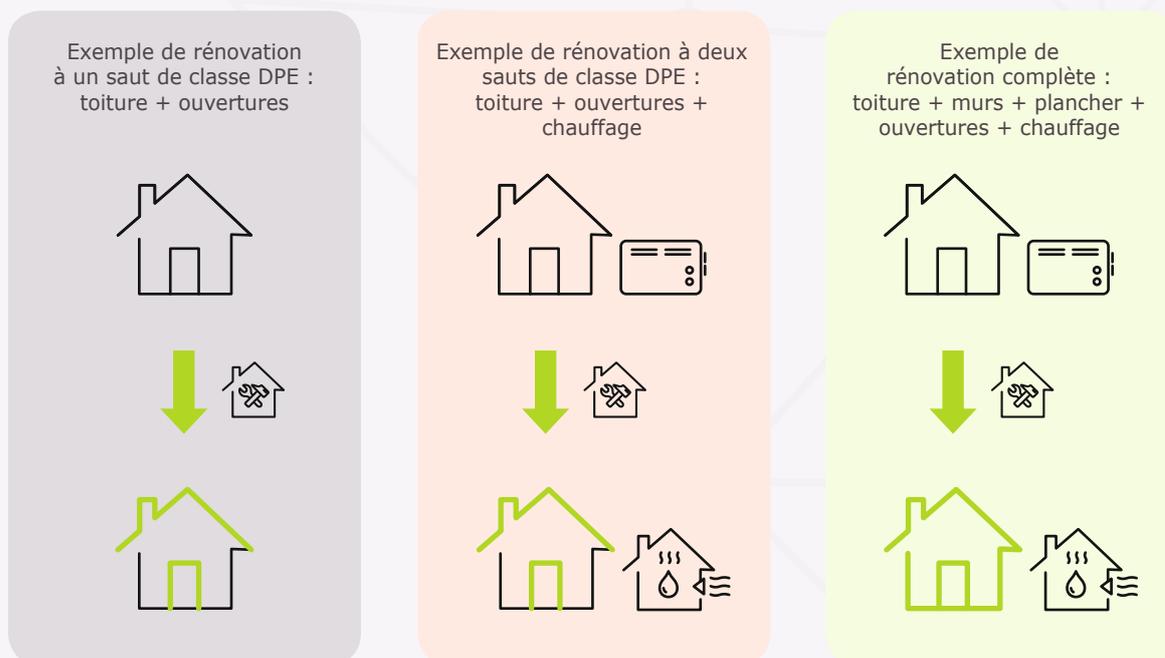
donc tendance à limiter les réductions de consommation atteignables dans ce logement.

Logique d'une rénovation complète

L'effet principal recherché est de réduire la consommation de chauffage. La logique standard d'une rénovation complète correspond à un bouquet de travaux où il faudrait d'abord isoler, afin de réduire le besoin thermique du bâtiment, puis installer un système de chauffage performant¹⁸. À titre

d'exemple, une rénovation complète équivalente peut correspondre à un bouquet de gestes d'isolation sur toutes les parois (toitures, murs, planchers, fenêtres), combinés à un geste sur le poste chauffage, réalisés de façon performante. Si cet exemple est le plus courant, d'autres cas, comme un bouquet de gestes d'isolation très performants, pourraient également correspondre à une rénovation complète équivalente en termes de réduction de consommation.

Figure 2.6 Exemples de bouquets de gestes pouvant correspondre à différents niveaux de performance d'une rénovation



¹⁸. Dimensionner le système de chauffage après l'isolation du bâti devrait en réduire la taille car le besoin de chauffage s'en trouve diminué. Néanmoins, pour la plupart des systèmes de chauffage, l'effet sur le dimensionnement ne semble pas démontré, à part pour les chauffages bois (conduisant à un insert plus petit). Pour les chaudières fioul et gaz, leur taille semble largement standardisée et l'impact sur le dimensionnement est faible (rapport ADEME, 2019. «Rénovation énergétique des logements : étude des prix»). Le choix de la puissance des chaudières est plutôt déterminé par les besoins d'eau chaude sanitaire que par ceux du chauffage. En effet, les contraintes d'emplacement du système de chauffage, la géométrie du logement... entrent également en jeu dans le choix de la puissance/taille du système de chauffage et peuvent potentiellement avoir une plus grande influence.

2.3.2 La modélisation de l'étude RTE-ADEME intègre les grandes orientations de la stratégie de référence de la SNBC en matière de rénovation du bâti, d'évolution des solutions de chauffage et de décarbonation pour simuler l'évolution du parc de bâtiments

La modélisation utilisée dans l'étude RTE-ADEME, en cohérence avec celle utilisée pour l'élaboration du Bilan prévisionnel de RTE et concertée avec les parties prenantes dans ce cadre, retient une approche centrée sur le nombre de logements rénovés plutôt qu'exprimée en nombre de gestes. Elle se focalise sur deux grands types de rénovation :

- ▶ La rénovation du bâti, qui consiste à réaliser des travaux d'isolation sur le bâti pour réduire le besoin énergétique du logement. Ce type de rénovation couvre les gestes d'isolation sur les postes suivants : toitures, murs, sols et fenêtres.
- ▶ La rénovation du système de chauffage, qui consiste à remplacer celui-ci par un système jugé plus performant, c'est-à-dire moins consommateur d'énergie. En pratique, la plupart des opérations de remplacement d'installations de chauffage tombent dans cette catégorie, puisque même le simple renouvellement (remplacement par un appareil neuf utilisant le même type d'énergie) permet en général de disposer d'appareils neufs présentant de meilleures propriétés énergétiques, avec notamment un meilleur rendement (par exemple, une chaudière à condensation à la place d'une chaudière à basse température fonctionnant au fioul ou au gaz).

Parmi les différentes formes de rénovation du système de chauffage, l'étude menée par RTE et l'ADEME porte plus particulièrement sur l'électrification du chauffage, c'est-à-dire les rénovations du système de chauffage consistant en un remplacement d'appareils utilisant des combustibles fossiles par des solutions électriques.

Le recours accru aux solutions électriques peut s'orienter vers deux principaux types de solutions : (i) le déploiement majoritaire de pompes à chaleur

dans le cas où les principes fixés par la SNBC se traduisent dans l'effet et conduisent à développer des solutions présentant une forte efficacité, (ii) le déploiement majoritaire de radiateurs électriques dans le cas contraire.

Les enjeux associés à ces deux grands types de rénovation sont détaillés dans la suite de cette section aux parties 2.4 et 2.5.

Pour le secteur résidentiel, l'approche retenue dans l'étude permet de traduire les orientations de la SNBC en un nombre de logements rénovés chaque année, selon les différents types de rénovation précisés ci-dessus. Pour le secteur tertiaire, qui regroupe des sites par nature très hétérogènes, l'approche est adaptée : le nombre de rénovations est rapportée à la surface concernée (comptabilisée en mètre carrés).

Dans la suite du document, les enjeux associés à l'évolution du parc de chauffage sont décrits en prenant pour exemple le secteur résidentiel (description en nombre de logements) mais des principes similaires s'appliquent également sur les surfaces du secteur tertiaire¹⁹.

En s'appuyant sur les données présentées dans la PPE et la SNBC et sur des données complémentaires fournies par la DGEC, RTE et l'ADEME ont ainsi élaboré un scénario de référence d'évolution du parc de bâtiments sur la période 2020-2035. Ceci constitue la stratégie de référence qui est étudiée dans la suite de ce rapport et comparée à d'autres scénarios plus ou moins ambitieux.

Le parc de logements considéré dans ce scénario de référence reflète donc l'effet volume dû à l'évolution démographique, ainsi que toutes les transformations identifiées, notamment (i) le déclassement des chaudières fioul et leur remplacement pour moitié par des pompes à chaleur et pour moitié en chauffage alimenté par de la biomasse²⁰, (ii) une augmentation importante de la part de la biomasse (dans les maisons individuelles) et des réseaux de chaleur (dans les logements collectifs), et (iii) une

¹⁹. Pour l'évaluation économique du secteur tertiaire, une approche par logements-équivalents a été adoptée, en utilisant la consommation unitaire d'un logement du secteur résidentiel, suivant la méthode appliquée dans le rapport FEDENE, SNCU, 2019 «Les réseaux de chaleur et de froid» (p.33).

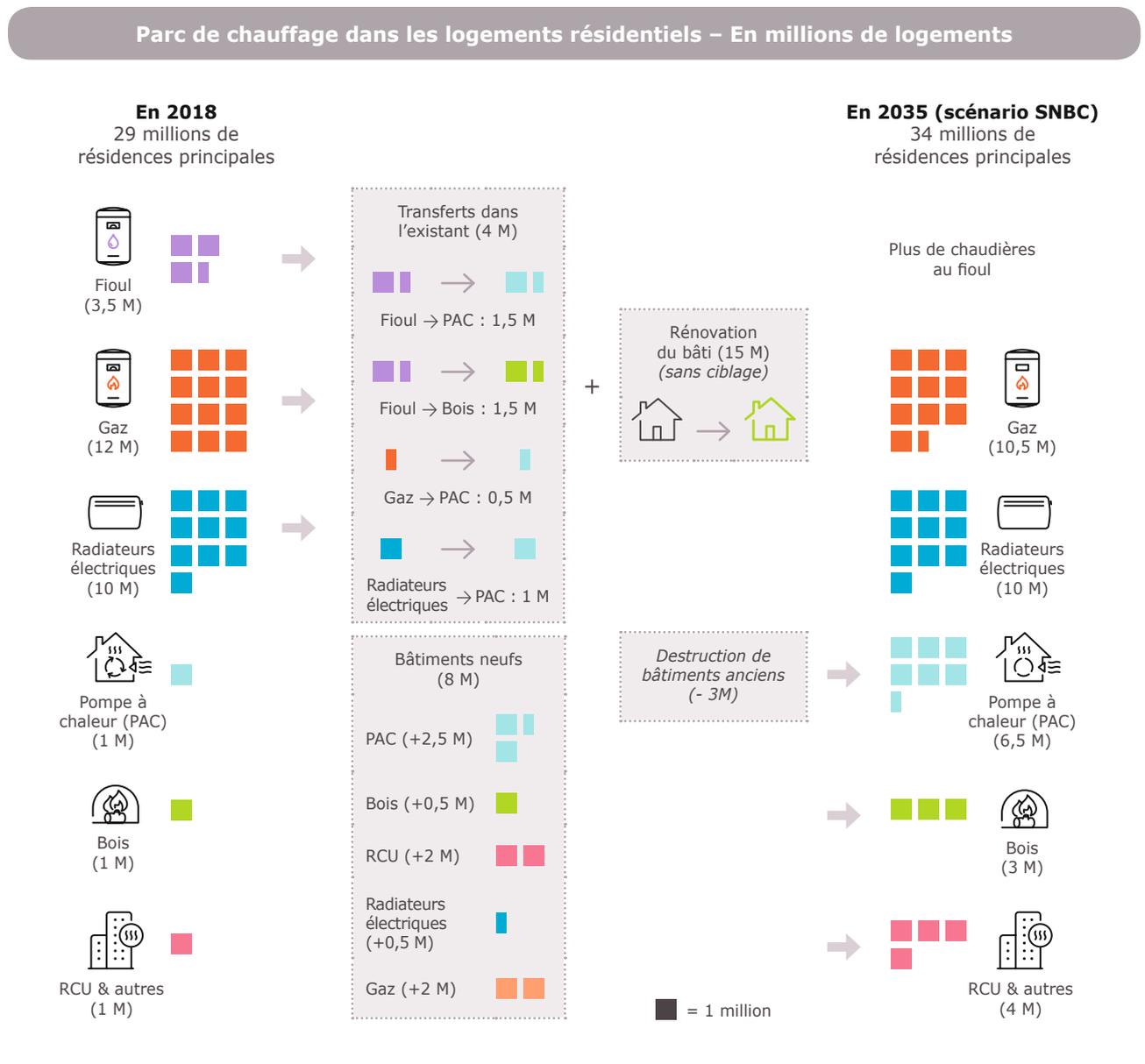
²⁰. On désigne par biomasse le bois de chauffage.

rénovation du bâti basée sur une isolation performante pour la moitié du parc de logements d'ici 2035. L'évolution correspondante sur la période 2018-2035 est illustrée sur la figure 2.7.

L'évolution des surfaces tertiaires considérée dans ce scénario de référence reflète donc l'augmentation

liée à l'effet combiné de l'augmentation démographique et de la croissance économique, ainsi que toutes les transformations identifiées, notamment (i) une pénétration importante des pompes à chaleur, (ii) une augmentation importante de la part des réseaux de chaleur et autres bioénergies, et (iii) une rénovation d'environ la moitié des surfaces

Figure 2.7 Évolution du parc de chauffage dans le secteur résidentiel et tertiaire sur la période 2018- 2035 : estimation selon les orientations de la SNBC



Parc de chauffages tertiaire – En millions de m²

résultant d'un rythme d'environ 3% de surfaces rénovées par an de 2018 à 2035, illustrée sur la figure 2.7.

Conjointement aux orientations dans le secteur du bâtiment, la modélisation doit prendre en compte les ambitions de décarbonation des vecteurs énergétiques utilisés pour le chauffage, avec la volonté d'accorder une place plus grande aux réseaux de chaleur, au bois et autres énergies renouvelables,

et en particulier la volonté de poursuivre la décarbonation du mix électrique comme indiqué dans la PPE publiée en janvier 2020. Dans ce projet, la décarbonation du mix électrique s'appuie principalement sur la fermeture des centrales à charbon à moyen terme et l'absence de nouveaux projets de centrales thermiques à combustible fossile (éventuellement, hors cogénération), une accélération du développement des énergies renouvelables et un développement soutenu des interconnexions.

2.3.3 Chaque volet de ces politiques présente des enjeux spécifiques en matière d'évaluation et de déploiement des politiques publiques, qui occasionne son lot de discussions

Comme mentionné dans le premier chapitre, la possibilité d'électrifier une partie du parc de chauffages combustibles soulève des questions en matière de sécurité d'approvisionnement et d'émissions de CO₂ notamment via la sollicitation de moyens de production flexibles potentiellement carbonés. Au-delà de la seule question de l'électrification, ce débat s'inscrit dans le contexte plus large des évolutions réglementaires du bâtiment (RE2020, DPE, décret et arrêté tertiaire) qui visent à augmenter la performance énergétique et environnementale du secteur via différents leviers.

Dans le neuf, un premier enjeu réside dans le fait de privilégier massivement la construction de logements collectifs, moins énergivores que les maisons individuelles du fait de leurs surfaces réduites et des déperditions moindres grâce à la mitoyenneté ; cela réduirait également l'artificialisation des terres par l'étalement urbain. Au vu de l'exigence de la RT 2012, qui a représenté un saut de performance énergétique conséquent pour toutes les constructions, de nombreuses dérogations ont été accordées depuis l'application de cette réglementation. En particulier, les logements collectifs auront bénéficié d'une dérogation autorisant ces bâtiments à dépasser la RT 2012 de 15 % pendant toute l'application de celle-ci²¹. Un deuxième enjeu consiste donc à réduire le recours aux dérogations par rapport à la réglementation. Enfin, un troisième enjeu concerne la progression des exigences sur le neuf pour atteindre en moyenne le niveau BBC (bâtiment basse consommation) au niveau du parc, pour les maisons individuelles mais aussi pour les logements collectifs, malgré les dérogations obtenues durant la période d'application de la RT 2012.

Dans la rénovation, il s'agit évidemment d'accélérer le rythme des opérations. De nombreux débats portent sur la façon d'atteindre cet objectif, par exemple en les rendant plus systématiques, notamment au moment des changements d'occupant ou de propriétaire²². Leur performance doit également être revue substantiellement à la hausse pour atteindre les objectifs ambitieux de la SNBC. Dans cette optique, le rôle du DPE pourrait être renforcé : ce diagnostic a aujourd'hui un rôle purement informatif lors des démarches de locations et de ventes des logements ; il pourrait engager légalement la responsabilité du propriétaire et donner lieu à des obligations de rénovation.

Dans le tertiaire, le décret tertiaire²³ prévoit une obligation de baisse de la consommation de 40 % en 2030, 50 % en 2040 et 60 % en 2050 par rapport à 2010 pour les bâtiments de plus de 1 000 m² (qui représentent 68 % des surfaces tertiaires). À partir de 2021, les acteurs tertiaires devront déclarer annuellement les consommations énergétiques de ces bâtiments, eux-mêmes ou via un prestataire dédié. Ces données seront transmises sur la plateforme numérique OPERAT, gérée par l'ADEME, et une sanction financière pourra être appliquée en cas de non-respect des clauses du décret tertiaire (1 500 euros d'amende pour les personnes physiques et jusqu'à 7 500 euros pour les personnes morales). Par ailleurs, la non-transmission des données pourra entraîner une mise en demeure par le préfet, voire mener à la publication de l'identité des entreprises concernées selon le principe du « *name and shame* ».

La SNBC reprend donc les politiques déjà annoncées pour un plan ambitieux de rénovation du bâti, visant à avoir un parc BBC en moyenne en 2050. Ces politiques impliquent des mutations rapides dans le secteur du bâtiment, qui n'auront pas forcément toutes lieu, ou pas forcément de la façon escomptée par le scénario de référence de la SNBC. Concernant le chauffage électrique, selon le

21. Actu environnement, 2020. RT 2012 : la dérogation des logements collectifs neufs est prolongée <https://www.actu-environnement.com/ae/news/logements-collectifs-neufs-derogation-rt2020-prolongee-34764.php4>

22. Renovons, 2020. Pour la rénovation des passoires énergétiques en 10 ans. Feuille de route 2020. http://renovons.org/IMG/pdf/feuille_de_route_re_novons_2020.pdf
Convention citoyenne pour le climat, 2020. Les propositions de la convention citoyenne pour le climat. <https://propositions.conventioncitoyennepourleclimat.fr/pdf/ccr-rapport-final.pdf>

23. MTES, 2019. Fiche d'impact du décret tertiaire (N° NOR du texte : LOG1909871D).

paramétrage choisi par les pouvoirs publics dans les nouveaux dispositifs réglementaires associés aux politiques de décarbonation du bâtiment (RE2020, DPE...), les incitations se voulant favorables à l'électrification via les pompes à chaleur pourraient conduire à un déploiement, en écart avec la trajectoire prévue par la SNBC de radiateurs électriques.

C'est pourquoi la scénarisation des enjeux présentée dans l'étude explore, pour chacun des objectifs SNBC examiné dans l'étude, deux hypothèses : (i) un rythme dit SNBC où l'objectif est atteint et (ii) l'hypothèse contrefactuelle correspondant à un rythme tendanciel.

2.4 Les enjeux de l'isolation du bâti

2.4.1 Dans le neuf : vers une enveloppe toujours plus performante

La RT 2012 exige déjà une haute qualité d'enveloppe des bâtiments neufs avec un seuil de consommation en énergie primaire à 50 kWh/m². Les orientations présentées par le gouvernement en novembre 2020 sur la nouvelle réglementation environnementale laissent penser que l'exigence de performance sur l'enveloppe sera revue à la hausse.²⁴

Dans la modélisation du scénario SNBC, il est ainsi supposé que la construction neuve présenterait des performances supérieures à celles définies dans la RT2012, avec une réduction de la consommation de chauffage de 20 %, ce qui semble un objectif déjà ambitieux compte tenu du niveau d'isolation du bâti requis par la RT 2012. Dans l'hypothèse d'un prolongement de la tendance actuelle, les bâtiments neufs présenteraient une performance du bâti identique à celle d'aujourd'hui, c'est-à-dire à celle définie par la RT 2012.

Figure 2.8 Hypothèses tendancielle et SNBC concernant la performance du bâti neuf sur la période 2020-2035 comparé au bâti neuf suivant la RT 2012

Qualité du bâti neuf	Performance tendancielle : Performance du bâti neuf identique de 2020 à 2035	Performance SNBC – Scénario de référence : 20 % de gain sur la consommation (2035 par rapport à 2020)
-----------------------------	---	--

2.4.2 Le rythme des opérations de rénovation dans l'existant : une meilleure isolation des bâtiments passe par une accélération du rythme des rénovations d'enveloppe

Comme évoqué dans l'encadré « Terminologie et recensement des rénovations », les rénovations peuvent recouvrir des réalités d'économie d'énergie très disparates, certains travaux pouvant n'entraîner qu'un impact très faible sur la consommation d'énergie, et leur nombre peut varier d'une année sur l'autre.

En pratique, à dire d'experts, les opérations de rénovation d'enveloppe portent aujourd'hui principalement sur les logements mal isolés construits avant la fin des années 1980, pour lesquels les potentiels de gains énergétiques sont les plus importants. Dans les logements collectifs, les rénovations concernent essentiellement les logements sociaux gérés par des bailleurs. Néanmoins, le nombre effectif d'opérations de rénovation (tant dans les maisons individuelles que dans les logements collectifs) par an est aujourd'hui une réalité difficile à appréhender précisément et à chiffrer, faute d'instruments de suivi précis et du fait de l'hétérogénéité des travaux concernés. À l'avenir, l'observatoire national de la rénovation énergétique doit venir combler ce manque d'informations²⁵.

À défaut de disposer d'un chiffre précis, l'étude retient comme meilleure estimation possible un rythme tendanciel de 400 000 opérations de rénovation efficaces sur les logements (au sens où elles entraînent une baisse significative de leur consommation) en moyenne longue sur les dernières années, c'est-à-dire de manière antérieure à l'inflexion des derniers mois. Ce chiffre correspond à un rythme annuel de 250 000 rénovations

24. MTES, 2020. RE2020 : Une nouvelle étape vers une future réglementation environnementale des bâtiments neufs plus ambitieuse contre le changement climatique, <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/re2020-nouvelle-etape-vers-future-reglementation-environnementale-des-batiments-neufs-plus>

25. MTES, 2020. Transposition de l'article 2 bis de la directive sur la performance énergétique des bâtiments modifiée par la directive 2018-844 du 30 mai 2018. Stratégie à long terme de la France pour mobiliser les investissements dans la rénovation du parc national de bâtiments à usage résidentiel et commercial, public et privé, http://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/200210_strategie_de_renovation_2020_vf.pdf

en maison individuelle et 150 000 rénovations en logement collectif, principalement dans le logement social (environ 100 000 rénovations).

Une difficulté du sujet tient à la différence entre les métriques utilisées pour décrire le flux d'opérations de rénovation. La SNBC retient un indicateur dont l'unité est le nombre de gestes de rénovation par an, et estime le rythme actuel à environ 800 000 gestes par an sur les parois opaques et vitrées (entre 2015 et 2020). Ceci correspondrait à une moyenne de deux gestes d'isolation par rénovation sur un logement : par exemple, un geste d'isolation des ouvertures (changement de fenêtres) associé à un geste d'isolation des combles ou des murs. Ces chiffres constituent donc une estimation moyenne du flux des rénovations du bâti et sont destinés à rendre compte d'une évolution globale de la performance énergétique du parc. Par ailleurs, ce flux correspond à une moyenne sur le temps long au cours des dernières années : en réalité, le nombre de gestes effectués semble s'être accéléré en 2019 et 2020, comme le montre le suivi de l'attribution des Certificats d'Économies d'Énergies²⁶.

L'atteinte des objectifs de la SNBC implique que les rénovations du bâti soient significativement plus nombreuses qu'aujourd'hui. Si la SNBC projette d'atteindre plus de 700 000 rénovations complètes équivalentes par an sur la période 2030-2050, les rénovations sont, en pratique, rarement « complètes » : elles portent sur un nombre limité de postes (par exemple, isolation des murs et de la toiture un logement), comparé à ce qui serait nécessaire pour considérer la rénovation comme complète (par exemple, pour le même logement, la rénovation complète pourrait être un bouquet composé de l'isolation des murs, de la toiture, des ouvertures, ainsi que le changement du chauffage). Ce chiffre de 700 000 rénovations complètes équivalentes correspondrait donc en réalité à un nombre de logements bien plus importants effectuant chacun un bouquet de gestes plus réduit et/ou moins performants. La projection du nombre de gestes permet de rendre compte plus précisément de la tendance à l'accélération : la SNBC prévoit à

l'horizon 2035, un total d'environ 3 millions de gestes par an, tous postes confondus dont entre 1,5 et 2 millions pour l'isolation (parois opaques et vitrées), ce qui correspond à plus d'un doublement par rapport aux 800 000 gestes d'isolation identifiés aujourd'hui (voir figures 2.3 et 2.4).

Dans le scénario de référence de l'étude, les objectifs de la SNBC sont supposés se traduire par une accélération significative du rythme de rénovation du bâti, passant de 400 000 logements par an ces dernières années à 1 million de logements rénovés par an en 2035. En moyenne sur la période 2018-2035, cela correspond à environ 800 000 logements rénovés par an.

Ces éléments permettent de mesurer l'ambition de l'objectif consistant à atteindre un parc de logements équivalent en moyenne au label BBC d'ici 2050. L'atteinte de cet objectif, repris dans la trajectoire de la SNBC, nécessite une mobilisation importante de la filière du bâtiment. En effet, un tel rythme de rénovations n'a jamais été observé et en dépit des annonces et plans successifs, le rythme de rénovation n'a pas augmenté au niveau attendu au cours des années précédentes. En particulier, le nombre de rénovations énergétiques performantes entreprises chaque année demeure très en deçà des niveaux requis pour atteindre les objectifs fixés. À titre d'illustration, d'après les estimations réalisées par l'association « Rénovons », le nombre de logements très énergivores (« passoires énergétiques ») n'a diminué que de 10% entre 2012 et 2019, et la précarité énergétique, au mieux, de 7,5% entre 2015 et 2020, donc en-dessous de l'objectif de 15% fixé par la LTECV. Différents facteurs peuvent contribuer à expliquer qualitativement cet état de fait, en première ligne la gêne causée par les travaux, le poids économique et la méconnaissance des ménages, à la fois des aides disponibles et des potentiels bénéfiques liés à la rénovation. Le manque de compétences adéquates, ainsi que d'organisation collective de la filière du bâtiment, secteur aujourd'hui très diffus et peu qualifié, avec un faible niveau de R&D comme d'industrialisation, peut également constituer un facteur important²⁷.

26. Les suivis d'attribution des CEE font état de 300 000 logements ayant effectué une isolation de la toiture sur la période 2011-2014, contre 840 000 logements pour la période 2019-2020, soit un rythme ayant plus que doublé en moins de dix ans. Source : MTE, 2020, Lettre d'information « Certificats d'économies d'énergies » <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2020-11%20lettre%20d%27infos%20VF.pdf> ; <https://www.ecologie.gouv.fr/dispositif-des-certificats-deconomies-denergie#e3>

27. CGDD, 2015, « La rénovation thermique des logements : quels enjeux, quelles solutions ».

Pour évaluer les enjeux en matière de consommation énergétique et de décarbonation du secteur, l'étude explore un scénario contrefactuel avec une hypothèse basse correspondant à une stabilité du rythme annuel de rénovations estimé aujourd'hui.

2.4.3 La performance des actions de rénovation du bâti : une meilleure isolation passe par des rénovations plus performantes et une amélioration de la qualité des opérations

Au-delà du nombre de rénovations par an, la qualité intrinsèque des gestes d'isolation constitue un élément déterminant dans l'atteinte des objectifs publics. Ce thème fait l'objet de débats, certains soulignant une moindre efficacité des gestes de rénovation par rapport aux hypothèses théoriques retenues dans les études.

L'évaluation précise d'un « gain unitaire moyen » présente en réalité une véritable difficulté pratique. Celle-ci tient en premier lieu à la disparité des

caractéristiques des bâtiments, des gestes possibles, et de la qualité des travaux. Elle tient également à la prise en compte de l'effet rebond qui peut suivre une rénovation, qui conduit à une réduction de la consommation moindre qu'attendue (ce point fait l'objet d'une attention et d'une modélisation spécifiques dans cette étude, voir annexe section 2.10). À l'heure actuelle, la littérature spécialisée existante sur la rénovation indique, pour des rénovations d'enveloppe combinant deux gestes (murs et fenêtres, toiture et murs, ou toiture et fenêtres), voire trois gestes (murs, fenêtres et ventilation par exemple), un gain énergétique attendu d'environ 30% en consommation conventionnelle, hors effet rebond. Après la prise en compte de l'effet rebond et de différents écarts entre les hypothèses conventionnelles et l'utilisation réelle du bâtiment, ce gain est évalué à 15% à 20% de réduction sur la consommation réelle.

L'évolution de la performance des rénovations du bâti n'est pas explicitement précisée dans la SNBC. Néanmoins, l'atteinte des objectifs de la SNBC, et notamment l'atteinte d'un parc de bâtiments équivalent BBC en 2050, implique que les

Figure 2.9 Hypothèses tendancielle et SNBC concernant le rythme des rénovations d'enveloppe

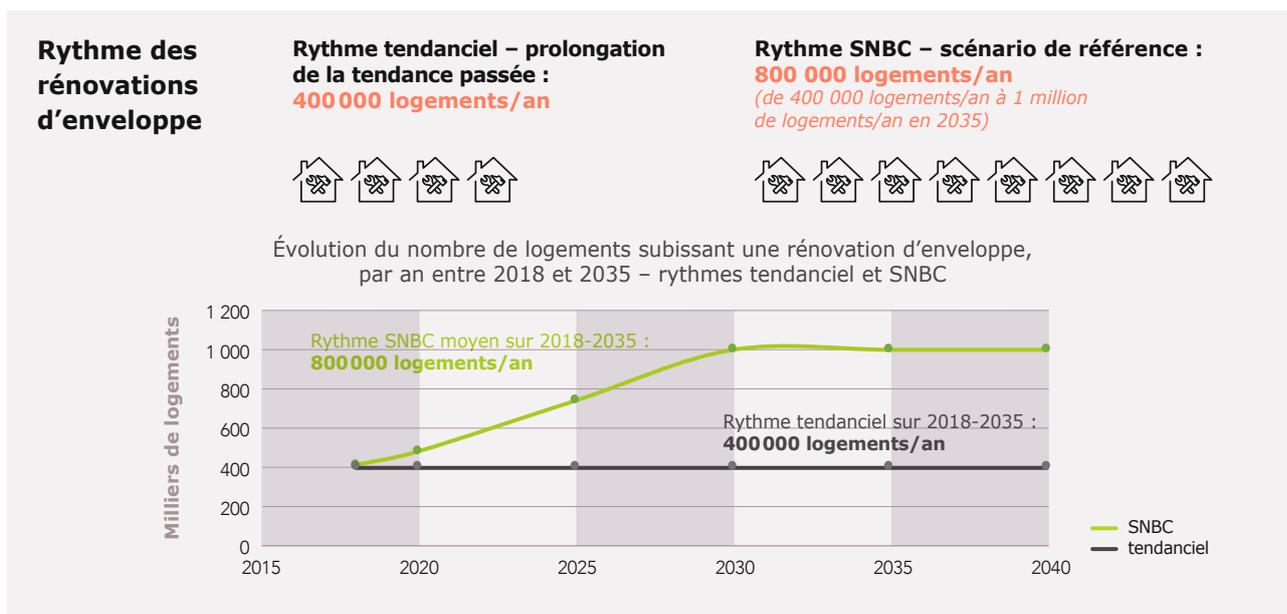
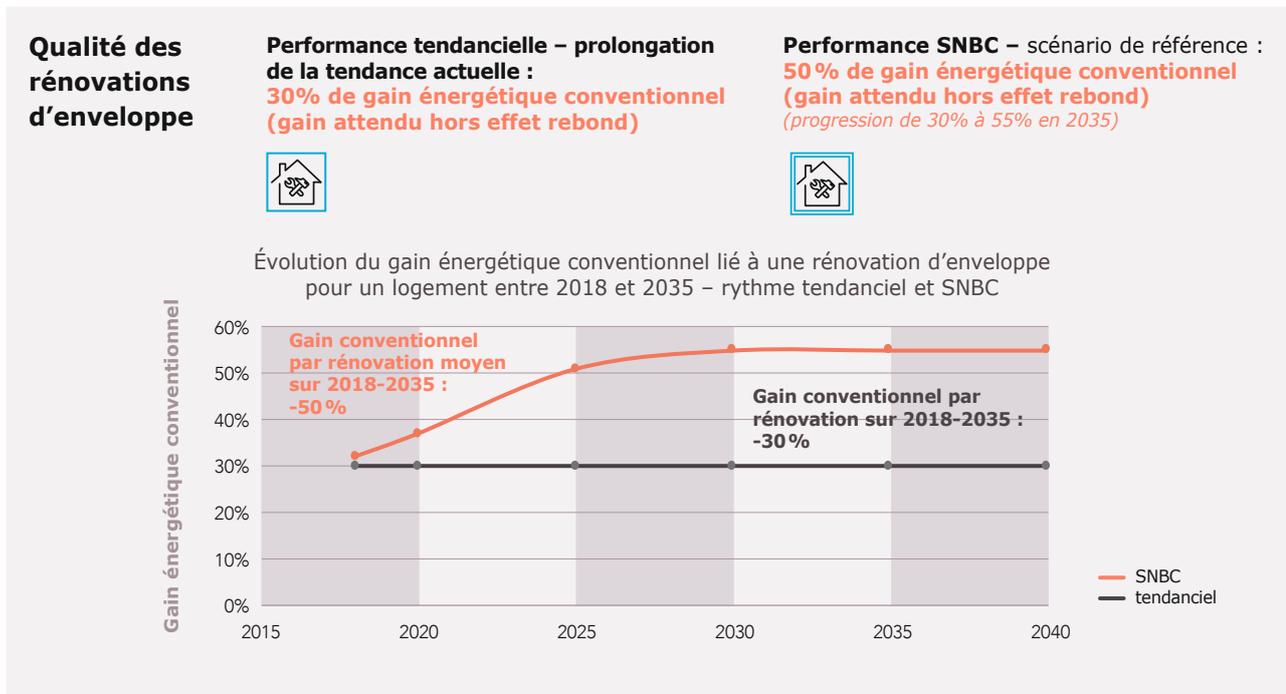


Figure 2.10 Hypothèses tendancielle et SNBC concernant la qualité des rénovations d'enveloppe et du bâti neuf



rénovations du bâti soient significativement plus performantes qu'aujourd'hui. L'estimation faite dans cette étude, en cohérence avec les données de la SNBC, est que le gain énergétique conventionnel associé à une rénovation d'enveloppe doit passer d'environ 30 % aujourd'hui à environ 55 % à l'horizon 2035 avant prise en compte de l'effet rebond.

Cette amélioration de la performance peut s'appuyer sur différentes évolutions :

- ▶ en cohérence avec l'accélération des rénovations complètes équivalentes, les gestes d'isolation doivent comporter de plus en plus de gestes « profonds » et performants (sur les parois opaques : murs, toitures), ayant un effet important sur la consommation énergétique, et de moins en moins de gestes « peu profonds » et moins performants (sur les parois vitrées) car le gisement pour ceux-ci s'épuise ;
- ▶ la qualité des travaux doit s'améliorer, pour atteindre des gains énergétiques plus proches de ceux attendus à l'engagement des travaux.

Ceci constitue un véritable objectif de politique publique dans le secteur du bâtiment ;

- ▶ l'ordre des opérations réalisées peut également avoir un impact, selon les précautions prises pour éviter les « fuites thermiques » (par exemple, les fenêtres devraient être rénovées dans un premier temps, avec des dormant – huisserie extérieures – larges pour éviter les « fuites thermiques » lorsque l'isolation des murs se fait ultérieurement, etc.).

2.4.4 La prise en compte de l'effet rebond après une rénovation

La transformation des bâtiments et des systèmes de chauffage pose des questions sur l'évolution de l'utilisation du chauffage et des effets rebonds associés. La prise en compte de l'effet rebond est en effet déterminante pour la projection de la consommation énergétique des bâtiments, dans un contexte où ceux-ci seront marqués par des actions fortes d'efficacité énergétique (isolation du bâti et système de chauffage performant) et des changements importants

d'énergies de chauffage selon les objectifs de la SNBC. Elle permet de ne pas surestimer les gains sur la consommation énergétique et sur les émissions de gaz à effet de serre qui se produiront réellement avec l'atteinte des objectifs de la SNBC.

En effet, l'expérience montre qu'en général, pour un logement procédant à une rénovation d'isolation ou de système de chauffage (comme l'installation d'une pompe à chaleur), le gain de consommation théorique escompté n'est pas observé dans la pratique. En effet, étant donné les meilleures performances de leur logement ou de leur chauffage, les occupants sont susceptibles d'augmenter le niveau de chauffage (température intérieure) et donc leur confort, et ce, sans augmenter leurs dépenses énergétiques par rapport à la situation avant rénovation : c'est **l'effet rebond**. En d'autres termes, le fait d'habiter un bâtiment performant rend l'occupant moins regardant sur ses factures et plus exigeant sur son niveau de confort.

L'effet rebond s'explique fréquemment dans la littérature spécialisée par la diminution de la facture de chauffage et la facilitation de la consommation. Si le facteur économique permet de proposer des explications quantitatives, en réalité d'autres paramètres techniques plus difficilement mesurables entrent en jeu et pourraient avoir un poids tout aussi important. Dans l'étude, la modélisation s'appuie sur le facteur correctif présenté dans la section 2.2 et détaillé en annexe 2.10 pour anticiper l'effet rebond lié à la rénovation. À titre d'exemple, l'hypothèse tendancielle sur les rénovations d'enveloppe, avec le rythme de déploiement actuel et un gain sur le besoin conventionnel de 30 % entraînerait, pour un logement dans notre modélisation,

un effet de rebond moyen (défini ici par rapport à la consommation d'énergie finale attendue après rénovation) de 20 à 30 % pour le chauffage en 2035 par rapport à 2018. De façon générale, l'effet rebond aura tendance à être compris entre 10 % et 30 % pour une rénovation peu profonde et performante et 30 % à 50 %, voire plus, pour une rénovation profonde performante (gain de 50 % sur le besoin conventionnel du logement). D'autres sources externes donnent des ordres de grandeur similaires sur l'effet rebond²⁸.

2.4.5 Homogénéité ou ciblage dans le déploiement des efforts de rénovation

Les dispositifs de soutien à la rénovation énergétique mis en place par les pouvoirs publics ne portent pas, à l'heure actuelle, d'incitations spécifiques visant à favoriser les actions de rénovation dans les bâtiments les plus énergivores. Si les programmes d'accompagnement à la rénovation²⁹ mettent en avant l'objectif de prioriser ce type de bâtiments, les dispositifs de soutien existants sont essentiellement modulés par les revenus des ménages, notamment afin de réduire la précarité énergétique.

Pourtant, l'ordre dans lequel sont effectuées les opérations de rénovation et le type de logements concernés en priorité sont susceptibles d'avoir une influence réelle sur les émissions de gaz à effet de serre : l'effet sera différent selon que sont traités en priorité des bâtiments anciens et mal isolés (plutôt que récents) ou équipés de solutions de chauffage à combustibles fossiles (plutôt que des solutions renouvelables). À l'horizon 2035, les différentes trajectoires sont donc susceptibles de

28. La littérature fait état d'effets rebonds relevés entre 5-51 % en Europe et de 10-30 % aux États-Unis selon différentes études.

Études européennes :

Galvin, R., 2015: Integrating the rebound effect: Accurate predictors for upgrading domestic heating. *Build. Res. Inf.*, 43, 710-722.

Galvin, and Sunikka-Blank, 2017: Ten questions concerning sustainable domestic thermal retrofit policy research. *Build. Environ.*, 118, 377-388.

Teli *et al.*, 2016: Fuel poverty induced "prebound effect" in achieving the anticipated carbon savings from social housing retrofit. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, 37, 176-193.

Cali *et al.*, 2016: Energy performance gap in refurbished German dwellings: Lesson learned from a field test. *Energy Build.*, 127, 1146-1158.

Aydin *et al.*, 2017. "Energy Efficiency and Household Behavior: The Rebound Effect in the Residential Sector," *The RAND Journal of Economics* 48, no. 3 : 749-82.

Gillingham *et al.*, 2016. "The Rebound Effect and Energy Efficiency Policy," *Review of Environmental Economics and Policy* 10, no. 1: 68-88.

Wisse, and Nieuwenhuijzen, 2015. "Household Energy Use - EFL Working Group Energy Efficient Buildings & EU Subsidies," EPFL

Études américaines (États-Unis) :

Thomas and Azevedo, 2013. "Estimating Direct and Indirect Rebound Effects for U.S. Households with Input-Output Analysis Part 1: Theoretical Framework," *Ecological Economics, Sustainable Urbanisation: A resilient future*, 86 : 199-210

Thomas and Azevedo, 2013. "Estimating Direct and Indirect Rebound Effects for U.S. Households with Input-Output Analysis. Part 2: Simulation," *Ecological Economics, Sustainable Urbanisation: A resilient future*, 86: 188-98

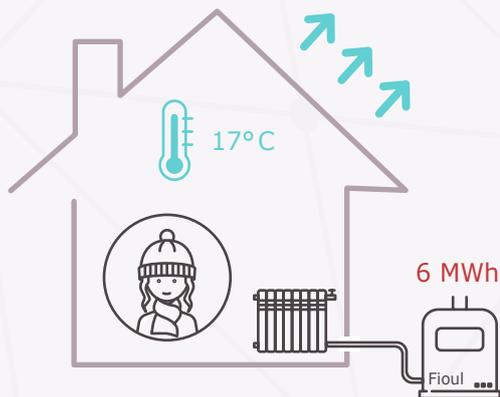
Volland, 2016. "Efficiency in Domestic Space Heating: An Estimation of the Direct Rebound Effect for Domestic Heating in the U.S.," IRENE Working Paper.

29. Service d'accompagnement pour la rénovation énergétique - SARE.

<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/service-daccompagnement-renovation-energetique-sare>

L'effet rebond : définition via un exemple concret

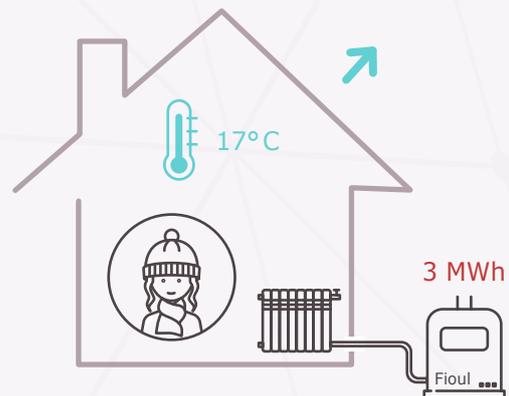
L'exemple suivant concerne une maison individuelle chauffée au fioul.



Avant rénovation, le foyer consomme 6000 kWh par an pour un budget de 500 €.

Le logement subit une rénovation performante avec un gain attendu de 50%. Ainsi, les déperditions thermiques sont moindres et certains aspects de confort sont améliorés (parois plus chaudes, moins de courants d'air, etc.).

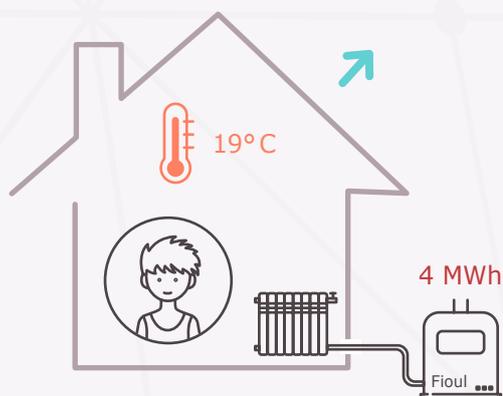
On s'attend donc à une consommation réduite, à hauteur de 3000 kWh/an. La dépense devrait désormais se situer autour de 250 €/an.



En réalité, on constate que la consommation annuelle est désormais de 4000 kWh, pour une facture autour de 350 €/an.

La raison consiste en une augmentation de la température ambiante. De fait, les occupants choisissent de chauffer plus de pièces ou de piloter moins sobrement leur consommation, tout en faisant un peu d'économies. C'est l'**effet rebond**.

La consommation réelle (4000 kWh/an) est supérieure de 30% à la consommation attendue (3000 kWh/an). On assiste donc à un effet rebond de 30%. S'il existe bien une réduction de la consommation énergétique suite à la rénovation, celle-ci est bien moindre que ce qui est accessible en théorie.



présenter des performances différentes en matière de lutte contre le changement climatique.

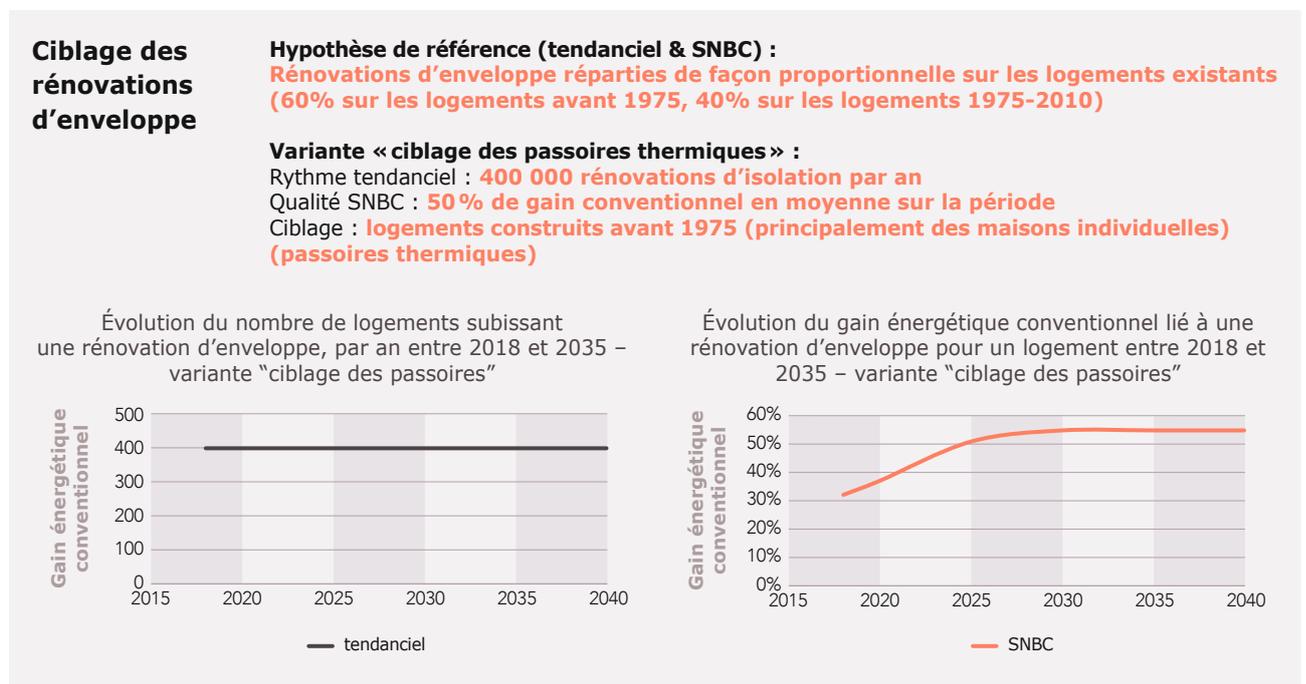
À défaut de sources précises sur les caractéristiques des bâtiments concernés par des rénovations, l'approche retenue dans le scénario de référence suppose que les rénovations du bâti se répartissent de manière homogène entre les logements peu performants construits avant 1975 et ceux datant des décennies suivantes mais construits avant 2010. Cette modélisation conduit à attribuer 60 % des rénovations au parc construit avant 1975³⁰.

Toutefois, les débats sur la rénovation soulèvent régulièrement la question d'un effort spécifique pour la rénovation des bâtiments les plus énergivores,

aussi qualifiés de « passoires thermiques ». À titre d'exemple, la loi énergie et climat de 2019 prévoit la mise en place progressive de dispositions particulières pour inciter les propriétaires de logements les plus énergivores à réaliser des travaux de rénovation énergétique. Ces dispositions doivent encore être définies au niveau réglementaire³¹. On peut néanmoins noter que ce type de ciblage dépendrait de l'étiquette énergétique des logements, et non de leur performance en matière d'émissions de CO₂. Cela renvoie aux débats récents sur l'évolution du DPE et sa mise en cohérence avec les objectifs de neutralité carbone, qui conduit à mieux distinguer les logements selon leurs émissions de CO₂.

Pour évaluer les enjeux associés à un possible ciblage des actions de rénovation énergétique,

Figure 2.11 Hypothèses du ciblage des rénovations d'enveloppe



30. La modélisation considère trois catégories d'âge du parc : avant 1975, construit entre 1975 et 2010, et post-2010.

31. Un décret doit introduire un seuil de consommation d'énergie finale dans les critères de décences des logements mis en location à partir de janvier 2023. Source : Ministère de la cohésion des territoires, 2020.

<https://www.cohesion-territoires.gouv.fr/introduction-dun-critere-de-performance-energetique-en-energie-finale-dans-le-decret-definissant>

une variante dans lesquelles les rénovations porteraient en priorité sur les « passoirs thermiques » est également étudiée. Cette variante combine :

- ▶ un nombre réduit de rénovations d'isolation, prolongeant les tendances passées estimées à 400 000 rénovations d'isolation par an,
- ▶ des opérations ciblées sur les logements du type passoirs énergétiques (supposées être des maisons individuelles construites avant 1975),
- ▶ des rénovations performantes (le besoin conventionnel de chauffage diminue jusqu'à 55%, et donc la consommation réelle baisse d'environ 30 à 40%).

2.4.6 Le coût des rénovations du bâti dans l'existant

Les besoins de financement associés aux actions de rénovation énergétique des bâtiments et l'efficacité économique des dispositifs de soutien font régulièrement l'objet de discussions dans le débat public sur la transition énergétique.

Les rénovations pouvant correspondre à des travaux de nature très différente et porter sur des logements relativement hétérogènes, il apparaît difficile de dégager des hypothèses de coûts normatives. Les coûts peuvent par ailleurs dépendre du séquençage et du nombre d'opérations réalisées à chaque rénovation.

Différentes publications et observatoires fournissent néanmoins de nombreuses estimations du coût des travaux de rénovation du bâti, en fonction des gestes réalisés, des postes concernés et des

caractéristiques des bâtiments impliqués (cf. chapitre 6). La fourchette apparaît très large (entre 100 et 300 €/m² de surface habitable), témoignant de l'hétérogénéité des opérations de rénovation, de la difficulté méthodologique à identifier un coût (souvent, les travaux conduisent à la fois à mieux isoler et à une rénovation « esthétique » du logement), mais également de la diversité des intervenants sur les travaux.

Dans l'analyse économique (chapitre 6), une hypothèse de référence a été construite pour les coûts de rénovation d'enveloppe, pour chaque variante sur la performance de la rénovation. S'agissant de coûts de rénovation portant sur un nombre limité de postes (enveloppe seule) et notamment hors de tout geste sur le système de chauffage, les hypothèses de références pour les rénovations d'enveloppe se situent autour des valeurs basses de la fourchette identifiée dans la littérature. Des variantes à la hausse sur les hypothèses de coûts seront considérées, afin d'identifier la sensibilité des conclusions à ces hypothèses de coûts.

La partie économique de cette étude permet, en déterminant des coûts d'abattement par tonne de CO₂ économisée, de préciser des cibles de coûts à atteindre pour que l'effort de rénovation constitue une action efficace du point de vue de l'objectif de réduction des gaz à effet de serre. Elle permet ainsi de préciser les enjeux associés à une massification des gestes de rénovation et à la structuration des filières industrielles concernées afin de générer des baisses de coût des actions de rénovation.

Figure 2.12 Hypothèse de coût des rénovations

Coût des rénovations d'enveloppe	Hypothèses tendancielle (pour 30% de gain énergétique conventionnel) :	Hypothèse de coût SNBC (pour 50% de gain énergétique conventionnel) :
		100 €/m ²
	Variante industrialisation des procédés :	
	~75€/m ²	~125€/m ²

2.5 Les enjeux sur les solutions de chauffage

2.5.1 La transition vers des solutions électriques telles que les pompes à chaleur, l'une des solutions pour décarboner l'énergie utilisée pour le chauffage

La SNBC privilégie le développement de différentes options bas-carbone pour l'énergie de chauffage : réseaux de chaleur urbains, bois ou biogaz, pompes à chaleur, etc. La SNBC ne correspond donc pas à une stratégie d'électrification complète du parc de chauffages mais s'appuie sur des options diversifiées.

Sa production étant déjà très faiblement carbonée, l'électricité, figure ainsi parmi les vecteurs énergétiques bas-carbone envisagés. Comme précisé au chapitre 1, les solutions de chauffage électriques regroupent des équipements de types différents :

- ▶ **Les pompes à chaleur (PAC)** extraient de l'énergie à partir des calories de l'extérieur du bâtiment (souvent l'air extérieur, mais parfois aussi le sol ou l'eau). Ces dispositifs qui utilisent l'électricité pour le cycle thermodynamique disposent d'un très bon rendement énergétique, très supérieur à un, et leur développement est ainsi favorisé par les politiques publiques.
- ▶ Les radiateurs électriques, aussi appelés convecteurs ou chauffage Joule, transforment l'électricité en chaleur via des résistances électriques qui chauffent les pièces en utilisant l'effet Joule.

Le développement de ces solutions de chauffage électrique doit se concrétiser à la fois dans les bâtiments neufs (en fonction de la réglementation environnementale), mais également dans les bâtiments existants dans le cadre des actions de rénovation, en fonction des dispositifs de soutien et de la réglementation (DPE, prime...).

La suite de la partie 2.5 expose les hypothèses concernant le chauffage électrique et la partie 2.6 expose les hypothèses concernant les autres solutions de chauffage, en particulier les solutions bas-carbone.

2.5.2 La part des systèmes de chauffage dans le neuf : des incitations au développement des pompes à chaleur en lien avec la réglementation thermique/environnementale

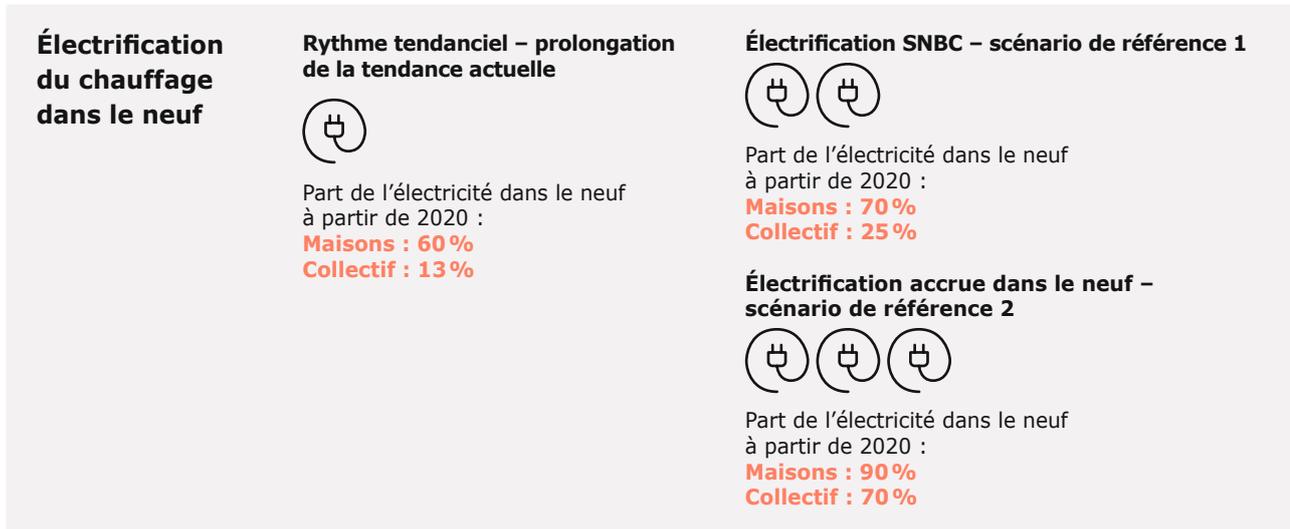
Dans une optique de décarbonation totale du mix de chauffage, la SNBC projette une légère augmentation de la part du chauffage électrique dans le neuf, la décarbonation se poursuivant en parallèle via le recours aux autres énergies bas-carbone : le raccordement massif aux réseaux de chaleur pour le logement collectif, le recours au bois dans les maisons individuelles, voire le verdissement du gaz injecté dans les réseaux dont la part atteindrait 7 à 10% en 2030, même si la SNBC privilégie l'usage du biogaz pour les usages énergétiques difficilement substituables et non pour le bâtiment.

En s'appuyant sur les orientations de la SNBC, l'étude RTE-ADEME considère dans son scénario de référence A-SNBC 1 une évolution de la part des logements neufs chauffés à l'électricité, atteignant 70% dans les maisons individuelles neuves (contre environ 60% aujourd'hui), et 25% dans les logements collectifs (contre 13% aujourd'hui). Ainsi, le scénario de référence n'est pas un scénario «tout électrique». De façon contrefactuelle, l'étude examine en hypothèse tendancielle une conservation stricte des parts de marché actuelles.

Dans le tertiaire, la part de l'électricité dans le chauffage des surfaces neuves s'avère assez haute, et est estimée à environ 50%. Dans le scénario de référence, celle-ci est supposée s'élever progressivement jusqu'à 65% en 2035, principalement portée par une diffusion des pompes à chaleur. En scénario tendanciel, cette part reste stable à 50%, en cohérence avec les parts observées aujourd'hui.

Le second scénario de référence de l'étude (A-SNBC 2) est bâti autour du principe d'un développement très majoritaire de l'électricité dans la construction neuve. Ses principes ont été définis

Figure 2.13 Hypothèses d'électrification du chauffage dans les logements neufs



avant les annonces de novembre 2020 sur les orientations de la future RE 2020 et ils ne visent pas à modéliser précisément tous les paramètres de cette future réglementation qui ne sont, à ce stade pas fixés. Néanmoins, ce scénario permet de tester le cas de figure d'un développement très poussé de l'électricité dans la construction neuve et d'une disparition du gaz dans les nouveaux bâtiments.

Au lieu de l'hypothèse SNBC pour le chauffage électrique dans le neuf qui projette une part majoritaire de chauffage électrique en maison individuelle (70%) mais relativement minoritaire en logement collectif (25%), le second scénario de référence prévoit une part nettement majoritaire du chauffage électrique dans tous les logements neufs, avec 90% en maison individuelle et 70% en logement collectif, (majoritairement via des pompes à chaleur dans A-SNBC 2).

2.5.3 L'évolution de la part des systèmes de chauffage électriques dans l'existant, en lien avec les opérations de rénovation

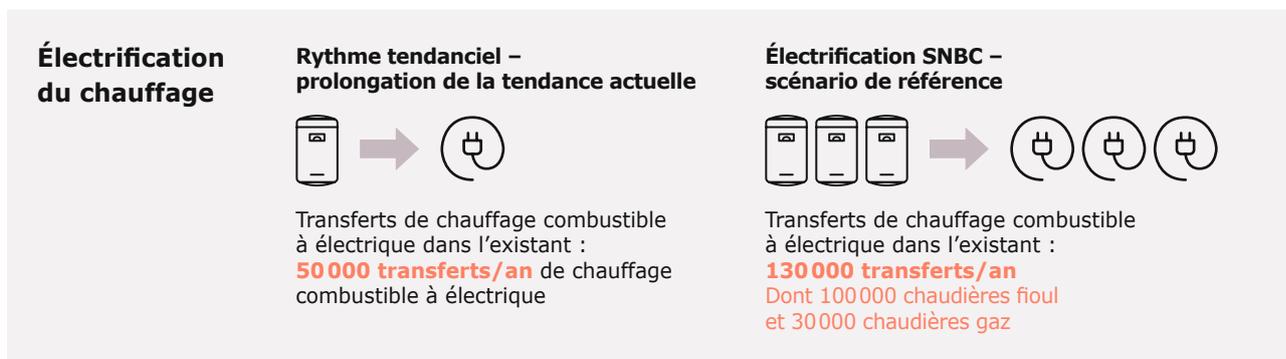
Au-delà des enjeux dans la construction neuve, la SNBC s'appuie en particulier sur l'électrification par le déploiement de pompes à chaleur pour réduire les émissions de gaz à effet de serre du chauffage dans les bâtiments existants, qui constituent l'essentiel de l'enjeu en matière d'émissions.

Aujourd'hui, les transferts de systèmes de chauffage alimentés par des combustibles fossiles vers des systèmes de chauffage électriques s'élèvent à environ 50 000 par an d'après les données du CEREN³² (radiateurs électriques et pompes à chaleur confondus), soit un taux de transfert de 0,2% du parc de chauffage.

Le rythme de transferts vers le chauffage électrique, surtout les pompes à chaleur, sont supposés quasiment tripler dans les prochaines années pour atteindre les objectifs publics annoncés récemment, en particulier l'objectif de déclasser la totalité des trois millions des chaudières fioul d'ici 2028. La SNBC laisse penser que cette conversion aurait lieu pour moitié via une électrification avec une pompe à

³². CEREN, Panels installateurs annuels.

Figure 2.14 Hypothèses d'électrification du chauffage dans les bâtiments existants



chaleur, l'autre moitié via d'autres énergies décarbonées (bois-énergie, biogaz...), ce qui correspondrait à un flux de 100 000 chaudières fioul par an remplacées par une pompe à chaleur. Parallèlement, la conversion de chaudières gaz en pompes à chaleur fait également partie des moyens pour réduire les émissions: sur la base de la tendance nécessaire pour atteindre les objectifs de la SNBC, on suppose que près d'un demi-million de chauffages gaz seraient remplacés par des pompes à chaleur sur quinze ans, soit un flux d'environ 30 000 transferts par an de chaudières gaz vers des pompes à chaleur.

Des variantes dans lesquelles l'inflexion sur les transferts vers des pompes à chaleur dans l'existant ne se produit pas, prolongeant les tendances actuelles, sont également étudiées.

2.5.4 Vers des systèmes de chauffage plus performants : des rendements de plus en plus élevés et une part de pompe à chaleur croissante dans le chauffage électrique

En parallèle aux actions d'isolation des bâtiments et de changement d'énergie de chauffage, la décarbonation visée par la SNBC implique d'employer

les systèmes de chauffage énergétiquement les plus performants.

L'évaluation du rendement énergétique des solutions de chauffage fait l'objet de nombreux débats, notamment s'agissant de la métrique devant faire référence dans la réglementation (énergie finale versus énergie primaire).

Aujourd'hui, les chaudières alimentées en combustibles brûlent le combustible fossile ou biomasse avec un rendement proche de 100 % dans le générateur de la chaudière – voire légèrement supérieur pour les chaudières à condensation. En prenant en compte les rendements d'émissions, de régulation (déperditions de chaleur dans le circuit d'eau chaude, les radiateurs, lors de variations de température de consigne) de l'ensemble de l'installation de chauffage, on estime le rendement total du système à 90 % PCI³³ pour les chaudières à condensation³⁴.

Les radiateurs électriques ont également un rendement proche de 100 % en énergie finale, soit le rapport entre l'électricité consommée et la chaleur produite. En tenant compte des déperditions thermiques liées à la régulation et l'émission, le rendement complet de radiateurs électriques est estimé

33. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, en supposant la vapeur d'eau non condensée et sa chaleur non récupérée.

34. MTEs (MEDDTL/DGALN/DHUP), 2012. Nouvel algorithme de calcul des consommations conventionnelles des logements pour la réalisation des diagnostics de performance énergétique.

à environ 90%³⁵. Une fois déterminé par rapport à l'énergie primaire, c'est-à-dire en prenant en compte le rendement du parc de production d'électricité, ce rendement apparaît de l'ordre de 40% – sachant que ce chiffre, structurellement dépendant de la composition du mix électrique, sera amené à évoluer avec les évolutions du parc de production. En effet, considérées conjointement (quoique leur rendement diffère en fonction des technologies), les centrales thermiques classiques ainsi que les centrales nucléaires convertissent en moyenne environ un tiers de la chaleur qu'elles produisent en électricité. Pour les renouvelables, il est considéré que la totalité de l'énergie du soleil ou vent captée par le système (panneau PV, éolienne) est convertie en électricité, d'où un rendement de 100% pour ces énergies³⁶. Ainsi plus la proportion de renouvelables dans le mix sera importante, plus le rendement en énergie primaire du chauffage électrique sera élevé.

Les technologies de chaudières à condensation et de radiateurs électriques sont des technologies matures, dont le rendement en énergie finale est déjà aujourd'hui très proche de 100%. En conséquence, dans cette étude, il est supposé que leur rendement n'évoluera pas davantage à l'avenir.

Les pompes à chaleur constituent un cas particulier : alimentées à l'électricité pour extraire de l'énergie renouvelable dans l'environnement (air extérieur ou géothermie) et la restituer sous forme de chaleur dans le bâtiment, **elles produisent une quantité de chaleur supérieure à l'électricité qu'elles consomment pour fonctionner et présentent un rendement supérieur à un**, appelé coefficient de performance (COP). Elles représentent donc une technologie de chauffage électrique d'une efficacité bien supérieure au radiateur électrique. Le tableau 2.1 montre les COP respectifs des différents types de pompes à chaleur neuves air/air ou air/eau vendues aujourd'hui (technologies constituant la majorité des ventes). En énergie primaire, le rendement d'une pompe à chaleur se situe donc

Tableau 2.1 COP moyen des pompes à chaleur vendues en 2017 (sources : estimations d'après les données de fabricants)

COP vente du système de chauffage à 7°C (intégrant le rendement de l'installation)	
Air (7°C)/Air (27°C)	2,6
Air (7°C)/Eau (35°C)	2,9

autour de 100%, voire plus, la performance de ce système compensant les pertes de chaleur ayant lieu dans les centrales électriques.

Le coefficient de performance³⁷ agrégé du parc actuel de pompes à chaleur est aujourd'hui estimé à environ 2,8. Son évolution dépend à la fois du COP des pompes à chaleur nouvellement installées, ainsi que du volume de pompes à chaleur vendues. Leurs performances s'améliorent au fil du temps et une diffusion massive de pompes à chaleur neuves et performantes tire la performance globale du parc vers le haut.

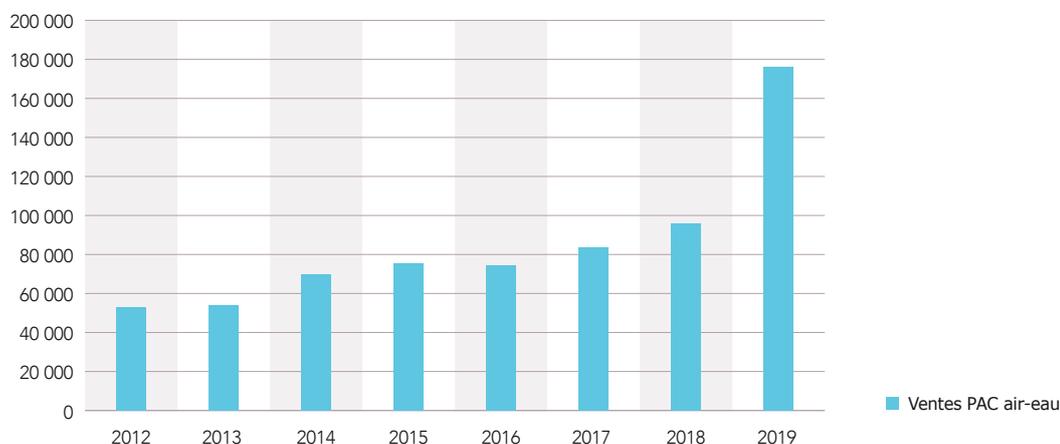
Pour estimer le volume ainsi que la performance du parc de pompes à chaleur à long terme, il est donc important d'évaluer les perspectives de diffusion dans le parc de chauffages. Depuis la RT 2012, les ventes de pompes à chaleur ont progressé régulièrement avant une importante augmentation en 2012. Récemment, le « coup de pouce chauffage » semble avoir accéléré considérablement les installations de pompes à chaleur air-eau dans les maisons existantes en 2018 et 2019, tirant les chiffres de vente vers le haut (voir figure 2.15). Les politiques de soutien ont fait l'objet de politiques successives (arrêt provisoire du « coup de pouce chauffage » puis

35. MTEs (MEDDTL/DGALN/DHUP), 2012. Nouvel algorithme de calcul des consommations conventionnelles des logements pour la réalisation des diagnostics de performance énergétique.

36. Si le rendement en énergie primaire des énergies renouvelables à 100% semble faire consensus, certaines méthodologies préconisent néanmoins un rendement bien plus bas, d'après un rapport de l'Institut Fraunhofer pour la Commission Européenne. Esser, Sensfuss, 2016. "Review of the default primary energy factor (PEF) reflecting the estimated average EU generation efficiency referred to in Annex IV of Directive 2012/27/EU and possible extension of the approach to other energy carriers."

37. Les COP cités ici correspondent à une température de 7°C, i.e. une température hivernale moyenne. En réalité, le COP varie en fonction de la température extérieure : au-dessus de cette température, le COP s'améliore, en-dessous il se dégrade. La modélisation de la dépendance du COP à la température extérieure est détaillée dans la section suivante.

Figure 2.15 Ventes annuelles de PAC air/eau, source Uniclimate³⁸



prolongation dans le cadre du plan de relance suite à la crise liée à la Covid-19), pourraient aller dans le sens d'un soutien continu à la pompe à chaleur³⁸.

Dans les logements neufs chauffés à l'électricité, la pompe à chaleur représente plus de 90% des installations en maison individuelle et autour de 40% dans le collectif. Cette proportion assez élevée de pompes à chaleur dans le chauffage électrique est prise comme hypothèse de référence dans le cas tendanciel comme dans le cas SNBC. Par ailleurs, le second scénario de référence A-SNBC 2 qui comprend 90% de chauffage électrique en maison individuelle (pompes à chaleur ou radiateurs électriques) et 70% en logement collectif, repose sur l'hypothèse que le développement de l'électricité dans le neuf se fait via des pompes à chaleur, en conservant l'hypothèse de référence sur la répartition entre PAC et radiateurs (93% de pompes à chaleur en maison neuve électrifiée et 40% en logement collectif neuf). Une variante prévoyant une électrification dans le neuf via des radiateurs électriques à effet Joule, qui relève sans ambiguïté de la catégorie des stress-tests, a également été testée.

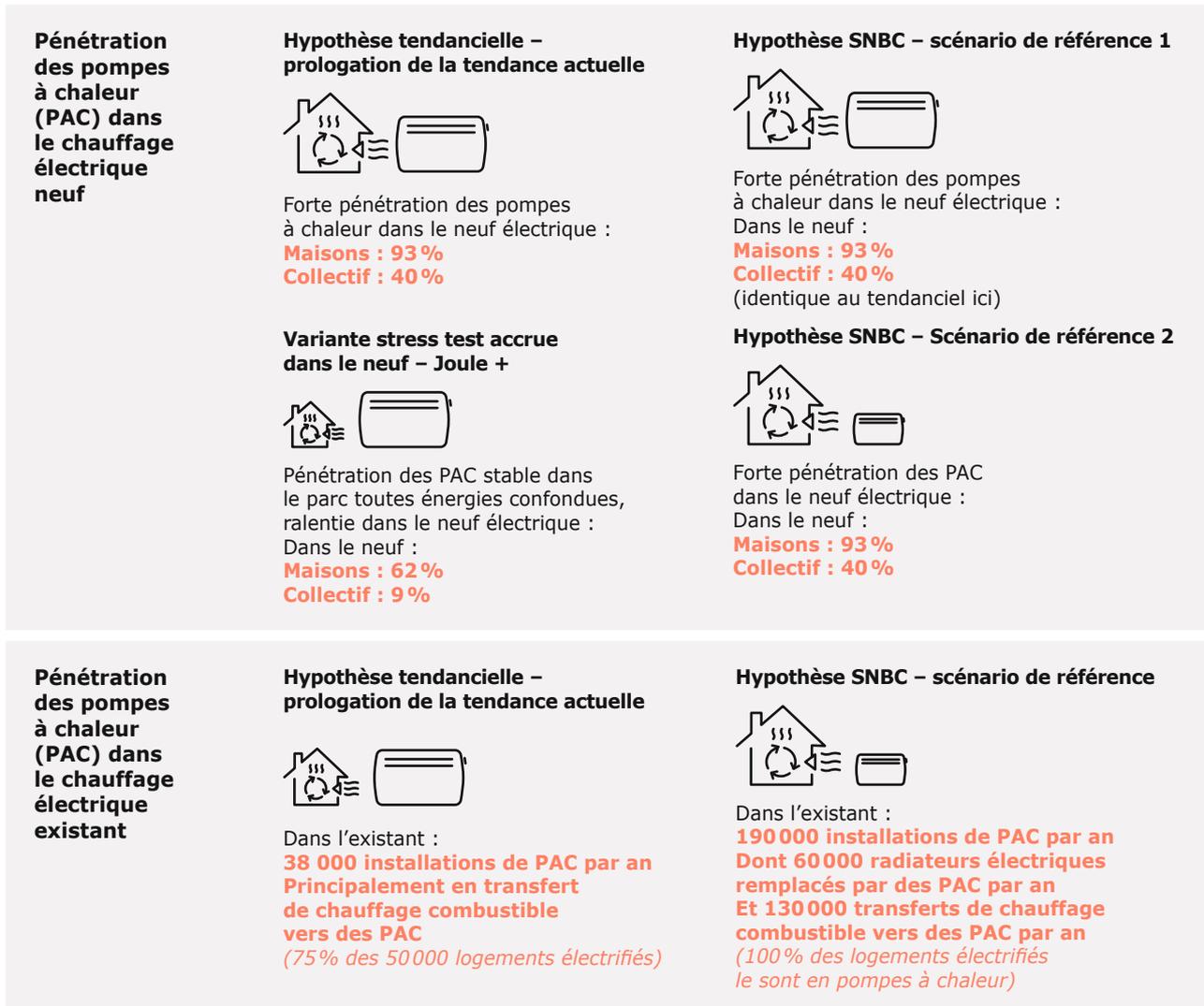
Dans les logements existants, la pénétration des pompes à chaleur est plus difficile à retracer, car les

chiffres de vente bruts ne permettent pas de distinguer le neuf et l'existant. Dans les maisons individuelles existantes, les tendances sur les dernières années font état d'un flux autour de 35 000 pompes à chaleur installées par an (source CEREN). L'ordre de grandeur est bien plus faible en logement collectif, de l'ordre de 3 000 par an, soit un flux total de 38 000 pompes à chaleur installées par an, constituant donc les trois quarts du flux d'électrification dans l'existant (50 000 logements par an).

Au-delà de l'électrification des chaudières alimentées en combustibles, la SNBC préconise de privilégier l'installation de PAC en remplacement de radiateurs électriques existants, par mesure d'efficacité énergétique. En rythme tendanciel, ce flux est estimé à environ 5 000 remplacements par an. Afin d'atteindre les objectifs de la SNBC, cette mesure pourrait conduire à convertir un million de logements chauffés par des radiateurs électriques d'ici 2035, soit un flux d'environ 60 000 remplacements par an. En y ajoutant le remplacement d'environ 130 000 chaudières au fioul ou gaz existantes par des pompes à chaleur chaque année, la totalité des installations de pompes à chaleur atteindrait 190 000 par an, soit près de 3 millions de pompes à chaleur installées en cumulé à l'horizon 2035, dans le parc résidentiel existant.

³⁸. Uniclimate, 2020. Bilan 2019 et perspectives 2020 du génie climatique. Dossier de presse.

Figure 2.16 Hypothèses de pénétration des pompes à chaleur



Dans le secteur tertiaire, on constate aujourd'hui un développement marqué des pompes à chaleur air-air, alors que celles-ci sont minoritaires dans le secteur résidentiel : les volumes d'équipements vendus s'avèrent près de 4 à 5 fois supérieurs⁴⁰. Cet essor de la pompe à chaleur air-air dans le secteur tertiaire s'expliquerait notamment par le déploiement dans des bâtiments d'envergure (bureaux, centre commerciaux...). Il est néanmoins difficile

de comparer les chiffres de vente du résidentiel et du tertiaire, car les équipements peuvent être extrêmement différents. Si le dimensionnement des pompes à chaleur dans le secteur résidentiel apparaît relativement standard, avec des puissances comprises entre 4 et 10 kWth, les pompes à chaleur équipant le tertiaire peuvent atteindre des puissances au-delà de 500 kWth⁴¹.

40. Uniclimate, 2020. Dossier de presse « Bilan 2019 et perspectives 2020 du génie climatique »

41. Uniclimate- PAC&Clim'Info, 2019. « La climatisation, les pompes à chaleur. Les chiffres du marché français de janvier à août 2019. »

2.5.5 La prise en compte de la performance réelle des pompes à chaleur : les périodes de grand froid et autres facteurs de dégradation de la performance des pompes à chaleur

La pompe à chaleur réchauffe l'intérieur du bâtiment en extrayant des calories de l'environnement : l'air extérieur pour les pompes à chaleur dites aérothermiques (air-eau ou air-air), le sol profond ou les nappes phréatiques pour les pompes à chaleur géothermiques. Pour ces dernières, la source d'énergie de l'environnement est soumise à peu de variations de température ; les performances de ces pompes à chaleur sont donc stables.

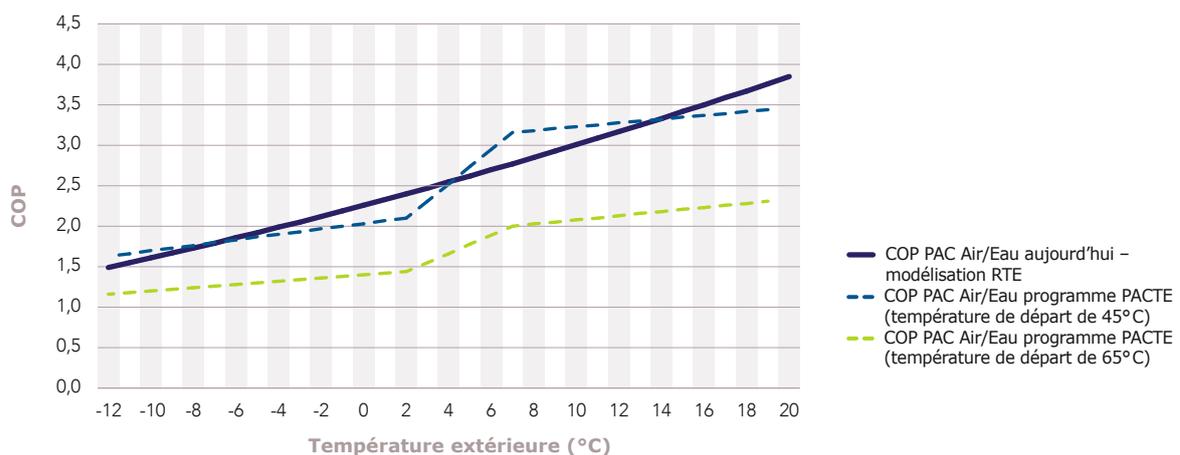
En revanche, lorsque la pompe à chaleur extrait l'énergie de l'air extérieur, sa performance est sensible à la température de l'air : en effet, plus l'air extérieur est froid, plus il est difficile d'en extraire de l'énergie. Il en résulte que le COP décroît avec la température. L'évolution du COP en fonction de la température relevées dans la documentation⁴²

du Programme d'action pour la qualité de la construction et la transition énergétique (PACTE) fait état d'une relation globalement linéaire, avec une modification de la pente entre 0°C et 5°C apparemment.

Cette rupture de pente correspond au dégivrage de la machine : en-dessous d'une certaine température extérieure, étant donné que la pompe à chaleur extrait des calories de l'air extérieur déjà froid, elle rejette à l'issue du cycle thermodynamique un air encore plus froid qui tend à givrer l'unité extérieure. Il lui faut donc temporairement inverser son cycle pour réchauffer son unité extérieure et faire fondre le givre sur ses composants (qui viendrait autrement réduire son efficacité).

Dans cette étude, le COP a été modélisé comme décroissant linéairement avec la température pour bien rendre compte de cette sensibilité à la température extérieure, avec un profil retenu cohérent avec les profils de COP inscrits dans la documentation du programme PACTE⁴³.

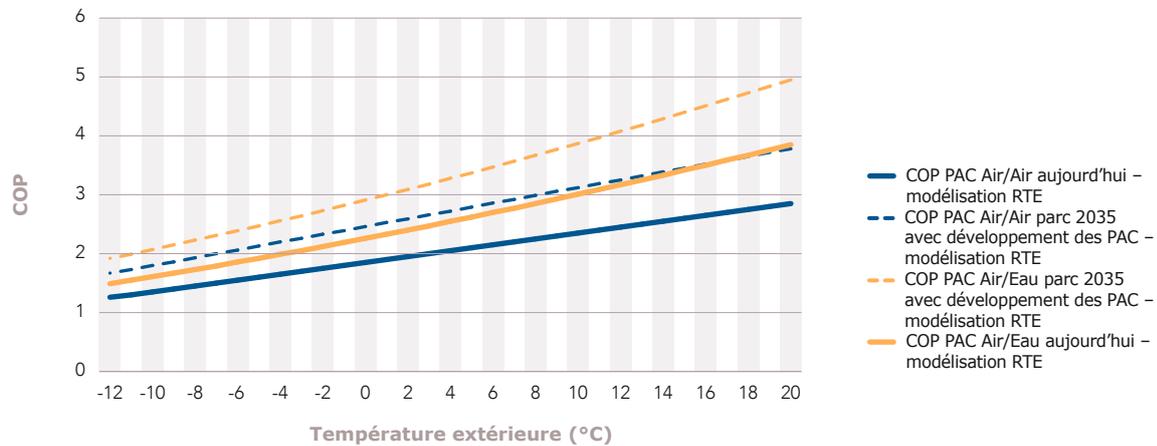
Figure 2.17 Évolution du COP en fonction de la température – PAC air-eau actuelle



42. Schémathèque de pompes à chaleur en habitat individuel, octobre 2013

43. Les boucles d'eau chaude basse température, à 35°C-45°C, correspondent plutôt aux installations de pompe à chaleur en logement neuf, tandis que les boucles haute température à 65°C correspondent plutôt aux installations en rénovation sur boucle d'eau chaude déjà existante. Étant donné que l'installation de PAC en rénovation peut également se faire en remplacement de Joule donc avec installation d'une nouvelle boucle d'eau chaude, par souci de simplification, la modélisation a retenu un profil proche d'une boucle d'eau chaude basse température.

Figure 2.18 Évolution du COP en fonction de la température, actuel et en 2035 dans le cas d'un fort développement des PAC



Selon les modèles de pompes à chaleur et la température de la boucle d'eau chaude, le COP d'une pompe à chaleur actuelle en vague de froid peut tomber entre 1,8 et 1,3 pour une vague de froid très marquée (type février 2012), voire descendre davantage entre 1 et 1,5, soit proche du rendement d'un radiateur électrique. Dans tous les cas, cette dégradation représente de l'ordre d'une division par deux du COP nominal à 7 °C.

Pour pallier en partie la dégradation du COP en période de vague de froid, les pompes à chaleur air-eau sont équipées d'une résistance Joule venant prendre le relais de la production de chaleur, en partie voire en totalité lorsque le cycle thermodynamique de la pompe à chaleur ne peut plus fonctionner.

Tableau 2.2 Évolution du COP moyen du parc de pompes à chaleur dans une trajectoire compatible avec la SNBC avec une forte pénétration des PAC

Type de pompe à chaleur	Aujourd'hui	En 2035 (avec un développement des PAC conformes aux orientations de la SNBC)
COP moyen du parc⁴⁴	2,8	3,5
Air/Air	2,2	2,9
Air/Eau	2,8	3,6

44. Le COP moyen du parc s'avère quasiment identique à celui des PAC air-eau en raison de leur plus forte présence historique dans le parc de pompes à chaleur, mais aussi car il englobe le COP des PAC eau-eau sensiblement plus élevé. Les ventes et la part de marché des pompes à chaleur eau-eau étant minoritaires, l'étude se concentre sur les PAC air/air et air/eau.

Le comportement des logements avec des pompes à chaleur air-air en période de grand froid est également sensible à la température, de façon similaire à celui des pompes à chaleur air-eau. Il est décrit dans la partie suivante (2.5.6), notamment s'agissant de besoin d'appoints Joule durant ces périodes. L'option des pompes à chaleur hybrides est quant à elle décrite dans la partie 2.5.8.

En cumulant l'hypothèse d'un progrès technologique sur les pompes à chaleur vendues, et une forte pénétration des pompes à chaleur dans le parc, dans une trajectoire compatible avec la SNBC, l'étude RTE-ADEME retient comme hypothèse centrale une progression du COP agrégé du parc de pompes à chaleur, qui atteindrait environ 3,5 en 2035 (tableau 2.2). La performance globale du parc de pompes à chaleur s'en trouverait donc modifiée, en moyenne mais également sur les périodes les plus froides avec un COP restant au-dessus de 1,5, même à basse température (exemple pour les pompes à chaleur air/air en figure 2.19).

Néanmoins, les travaux de concertation récents, engagés par RTE avec les acteurs lors des consultations menées dans le cadre du Bilan Prévisionnel et les retours de terrain recueillis par l'ADEME, conduisent à envisager également le cas de figure où les performances effectives des pompes à chaleur seraient inférieures aux performances théoriques (pouvant se situer autour de 1,5 au lieu de 2). L'hypothèse de référence de l'étude RTE-ADEME intègre déjà

les pertes dans l'installation : consommation des auxiliaires, pertes thermiques dans le circuit d'eau chaude... Ces déperditions représentent une dégradation d'environ 15% pour le COP des pompes à chaleur air-eau et d'environ 20% pour les pompes à chaleur air-air par rapport au «COP nominal» indiqué par le fabricant et correspondant au générateur seul. Le retour terrain sur la sous-performance des pompes à chaleur air-air semblerait lié à des raisons de nature différente et s'expliquerait par des mauvais réglages techniques lors de l'installation. En effet, les réglages initiaux de la pompe à chaleur, qui, s'ils sont mal réalisés, peuvent diminuer le rendement du système⁴⁵. D'après les observations de l'étude PREBAT de l'ADEME (2018), les réglages des pompes à chaleur pourraient être affinés quelques mois après l'installation par un effet d'apprentissage, et permettre ainsi une amélioration du COP après la première année. De plus, un mauvais dimensionnement des pompes à chaleur est également vecteur de dégradation de la performance : une pompe à chaleur surdimensionnée notamment effectuera beaucoup de cycles marche-arrêt pour maintenir la température de consigne, ce qui est source de perte de rendement. Enfin, la rigueur de l'hiver joue également sur le COP saisonnier : lors d'un hiver plus doux, on mesurera des COP plus élevés. Afin de prendre en compte une potentielle généralisation des problèmes d'installation cités (réglages erronés, mauvais dimensionnement), l'étude RTE-ADEME a également considéré une variante où le COP global du parc est réduit de 0,5.

Figure 2.19 Hypothèses de COP des pompes à chaleur

Coefficient de performance (COP) des PAC	COP tendanciel – prolongation de la tendance actuelle COP Parc : 2,8	COP avec pénétration des PAC de la SNBC – scénario de référence COP Parc : 3,5 en 2035
		Variante COP dégradé COP Parc : 3,0 en 2035

⁴⁵. Tejada *et al.*, 2014. Energy Consequences of Non-optimal Heat Pump Parametrization, International High Performance Buildings Conference. D'après cette étude, un mauvais paramétrage de la pompe à chaleur par l'installateur pourrait en augmenter la consommation d'électricité jusqu'à +50% par rapport au fonctionnement nominal.

2.5.6 Les besoins éventuels de radiateurs électriques d'appoint en complément de pompes à chaleur air-air

Lors de la phase de cadrage de cette étude, certains acteurs ont souhaité analyser une configuration dans laquelle le dimensionnement des pompes à chaleur serait insuffisant pour couvrir le besoin thermique de certains logements. Ces acteurs craignent que le remplacement de chaudières au gaz par des solutions électriques conduise en réalité à installer, en plus de la pompe à chaleur, un complément de radiateurs électriques dans le logement.

Ces acteurs ont transmis à RTE des « données installateurs » montrant que l'installation proposée correspondrait à une pompe à chaleur air-air en *monosplit* dans la pièce principale, représentant 65% de la demande de chauffage du logement, complétée par l'installation de radiateurs électriques dans les autres pièces. Le point de vigilance avancé dans ce cas porte sur le surcroît de consommation électrique et d'appel de puissance en vague de froid occasionné par une telle installation.

Il est difficile de statuer sur la représentativité de ces données. D'autres éléments recueillis durant la préparation de ce rapport soulignent, au contraire, que les modèles de pompes à chaleur les plus récents offrent des performances supérieures à des radiateurs électriques même à des températures assez froides, et le progrès des technologies de pompes à chaleur laissent penser que les COP

à basse température pourront s'améliorer dans les années à venir, rendant inutiles les compléments de radiateurs électriques. Cet aspect devra donc faire l'objet d'un suivi précis au cours des prochaines années.

De manière à explorer la sensibilité des résultats à une éventuelle utilisation de radiateurs électriques, en complément des pompes à chaleur, l'étude est structurée comme suit :

- ▶ dans l'hypothèse de référence utilisée dans les simulations, les pompes à chaleur air-air sont supposées couvrir le besoin thermique pour l'intégralité du logement : il n'est pas besoin de complément via des radiateurs électriques ;
- ▶ une variante du scénario SNBC est étudiée, en intégrant un complément via des radiateurs électriques systématique pour l'installation de pompes à chaleur air-air.

2.5.7 La prise en compte de l'effet rebond

Comme pour les rénovations d'enveloppe (cf. 2.4.4), l'installation d'une pompe à chaleur en remplacement d'un radiateur électrique ou d'une chaudière fossile améliore sensiblement la performance du logement en matière de besoin de chauffage. Les occupants sont donc susceptibles d'être moins regardants sur leur facture de chauffage et d'augmenter leur confort, et ce, sans augmenter leurs dépenses énergétiques par rapport à la situation avant rénovation. Avec le remplacement d'un radiateur électrique par une pompe à

Figure 2.20 Hypothèses pour variante avec complément Joule pour la pompe à chaleur air-air

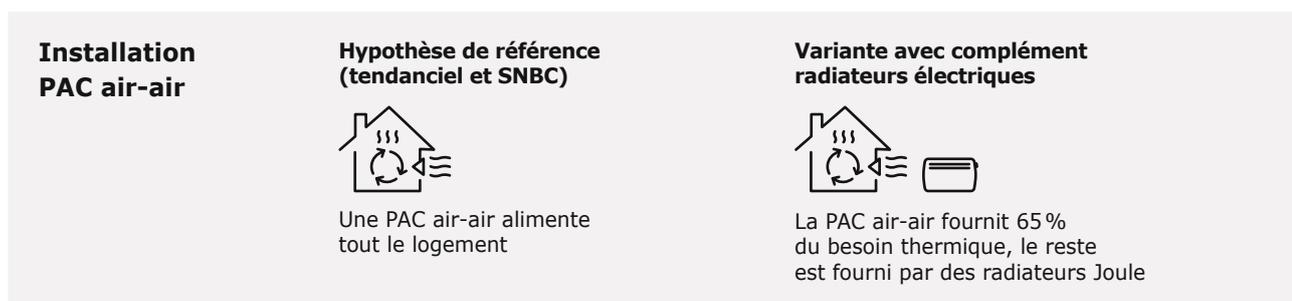
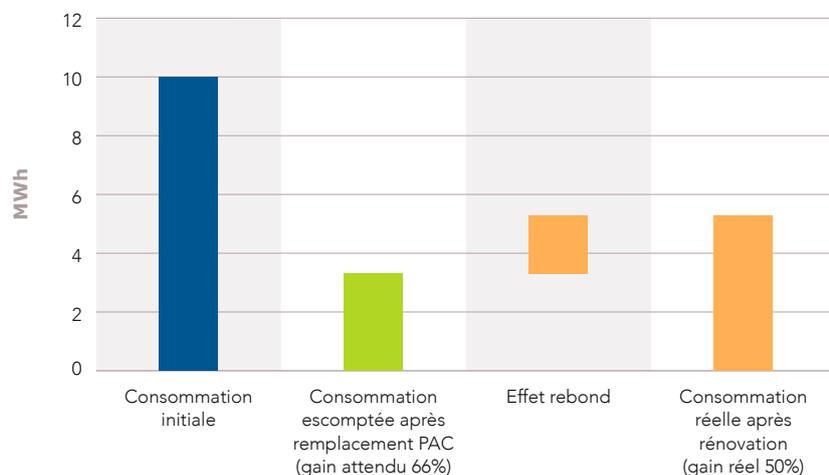


Figure 2.21 Effet rebond après remplacement d'un radiateur électrique par une pompe à chaleur (exemple d'un logement moyen consommant 10 000 kWh/an)



chaleur, on escompte en théorie une division de la consommation d'électricité par environ trois. Or la modélisation de l'effet rebond (cf. annexe) montre qu'avec une telle économie d'énergie théorique, la consommation réelle tend plutôt à être divisée par deux – ce qui représente déjà une économie substantielle. Il n'en reste pas moins que la nouvelle consommation est finalement supérieure d'environ 50% à celle escomptée, soit un effet rebond très important, bien que combiné à une économie d'énergie également très importante.

L'étude RTE-ADEME retient systématiquement un effet rebond, dans toutes les variantes.

2.5.8 Mes équipements visant à favoriser la maîtrise des appels de puissance à la pointe

La consommation d'électricité française est déjà largement thermosensible du fait d'une présence déjà réelle des solutions électriques pour le chauffage (voir Chapitre 4). En conséquence, l'augmentation de la part du chauffage électrique soulève

systématiquement la question des besoins de flexibilités du système électrique pour assurer la couverture de la pointe saisonnière de consommation électrique. En particulier, le développement de la pilotabilité et de la flexibilité du chauffage électrique est souvent présenté comme une solution indispensable à la maîtrise de la pointe électrique et à la sécurité d'approvisionnement.

De telles flexibilités sur le chauffage doivent être considérés dans l'ensemble des solutions de flexibilité disponibles pour ajuster l'équilibre offre-demande électrique : la flexibilité des centrales de production (existantes ou nouvelles), la flexibilité de la demande associée à d'autres usages (eau chaude sanitaire, véhicules électriques) ou d'autres secteurs (tertiaire et industriel) ou encore le stockage (hydraulique, par batteries, etc.).

Les travaux de RTE sur la valorisation socio-économique des réseaux électriques intelligents⁴⁶ ont ainsi montré qu'une seule de ces solutions de flexibilité ne dominerait pas les autres mais qu'il était efficace d'en développer un bouquet, afin de bénéficier de leurs différentes caractéristiques

46. RTE, 2017, *Valorisation socio-économique des réseaux électriques intelligents*

(durée d'utilisation, capacité, caractéristiques dynamiques, localisation, etc.), étant donné l'ensemble des services qu'elles rendent (énergie, capacité de pointe, services-système, gestion de congestion). Plus récemment, les rapports publiés sur l'électromobilité⁴⁷ et la transition vers un hydrogène bas carbone⁴⁸ ont montré l'intérêt du pilotage de ces consommations pour apporter de la flexibilité au système électrique.

Dans le domaine du chauffage, deux pistes sont couramment évoquées s'agissant de la flexibilité du chauffage électrique :

- 1) La solution des radiateurs «connectés» (via un dispositif intégré au radiateur ou via un boîtier spécifique associé à des actionneurs), qui permettrait d'effectuer des effacements de courte durée (par exemple de 15 minutes) sur des radiateurs électriques dans un grand nombre de logements, en profitant de l'inertie thermique du système afin qu'une courte interruption ait peu d'impact sur le confort des occupants, et induise un report limité.

Ce type d'initiatives se sont développées ces dernières années, et représentent aujourd'hui un volume mobilisable d'un peu plus d'une centaine de mégawatts⁴⁹. Si les estimations de gisements sont très variables à date, les travaux de RTE ont montré que ce gisement était susceptible de se développer à moyen terme⁵⁰.

Concrètement, le gisement de capacité d'effacement mobilisable «vu du système électrique» ne correspond pas à la somme algébrique de chaque effacement individuel. Après les premières sollicitations d'effacement tournant, les effacements suivants dans l'heure sont en effet susceptibles d'être en

partie compensés par le report de consommation des chauffages ayant été coupés lors des premières vagues d'appel. L'évaluation agrégée du report ne fait pas l'objet d'un consensus, des valeurs comprises entre 19% et 70% ayant été rapportées en fonction des méthodes utilisées⁵¹.

Au-delà de la question du report, se pose la question du réalisme d'une généralisation massive d'un tel pilotage, notamment en matière d'acceptabilité, alors que les orientations de la SNBC et du gouvernement en général s'accordent à donner une place importante à la problématique de la précarité énergétique et au confort thermique. Dans cette étude, l'appel à la flexibilité des radiateurs électriques n'est donc pas inclus dans les hypothèses de base, mais une estimation du service que pourrait apporter ce type de dispositif a été réalisée en marge de l'étude (cf. chapitre 4, section 4.11).

- 2) Une autre piste est celle de la pompe à chaleur hybride, qui consiste à combiner une pompe à chaleur légèrement sous-dimensionnée à une chaudière gaz à haute performance, afin que celle-ci prenne le relais de la pompe à chaleur en-dessous d'une certaine température, lorsque le froid entraîne autrement une trop forte dégradation de la performance des pompes à chaleur.

Cette solution est susceptible de présenter plusieurs avantages et notamment, elle permet de limiter les appels de puissance électrique en vague de froid.

Par ailleurs, la pompe à chaleur hybride pourrait également être susceptible de coûter moins cher à l'investissement qu'une pompe à chaleur

47. RTE, 2019, *Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique*, https://www.rte-france.com/sites/default/files/electromobilite_synthese_9.pdf

48. RTE, 2020, *La transition vers l'hydrogène bas-carbone – Atouts et enjeux pour le système électrique à l'horizon 2035*, https://www.rte-france.com/sites/default/files/rapport_hydrogene_vf_2.pdf

49. Mécanisme de capacité : résultats des appels d'offres long terme (AOLT) organisés en 2019. <https://www.services-rte.com/fr/actualites/mecanisme-de-capacite-resultats-appels-d-offres-long-terme-aolt-organises-en-2019.html>

50. RTE, 2017, *Valorisation socio-économique des réseaux électriques intelligents*, https://www.rte-france.com/sites/default/files/rei_2017_complet_8.pdf

51. RTE, 2016, *Évaluation des économies d'énergie et des effets de bord associés aux effacements de consommation*, https://clients.rte-france.com/htm/fr/mediatheque/telecharge/20160401_Rapport_report_complet.pdf

Figure 2.22 Représentation graphique des modes de fonctionnement de la PAC hybride en fonction de la température extérieure

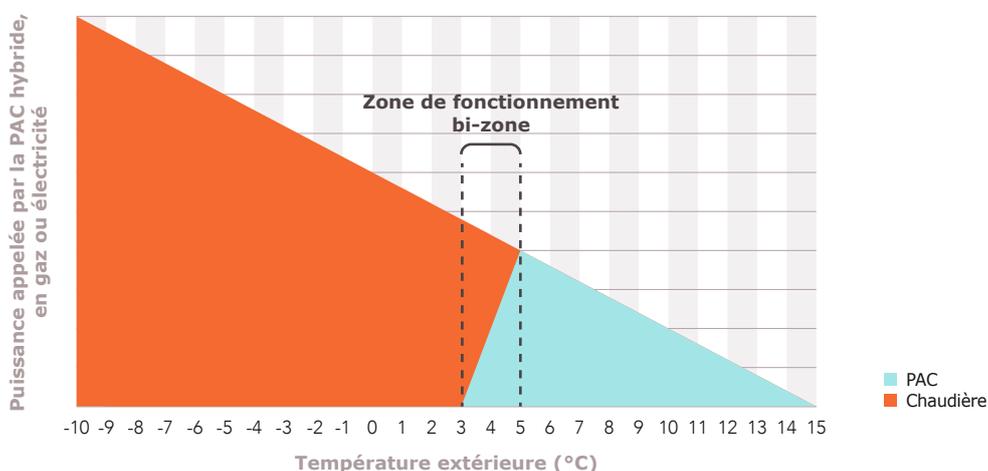
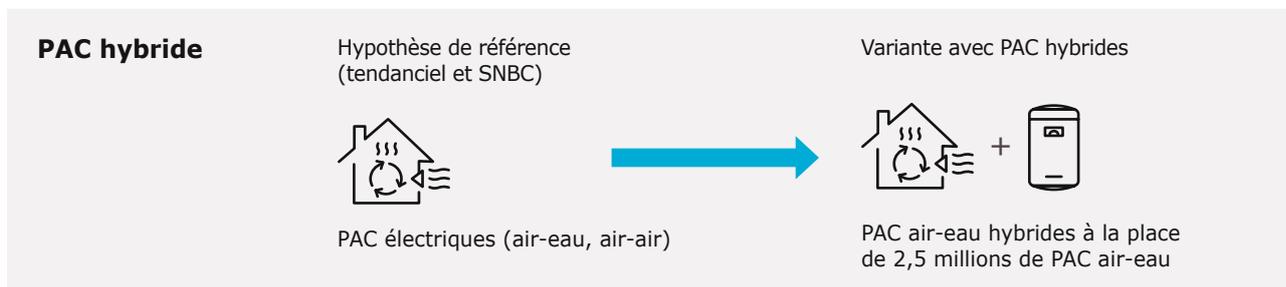


Figure 2.23 Hypothèse de la variante PAC hybride



électrique classique, car la puissance installée de la pompe à chaleur peut être réduite du fait de la présence d'une chaudière gaz afin de répondre aux situations les plus froides. Ce coût d'investissement réduit est néanmoins conditionné par le juste dimensionnement de l'installation. Dans cette étude, une variante «PAC hybride» est étudiée en simulant le cas où toutes les pompes à chaleur électriques supplémentaires dans la trajectoire SNBC par rapport à la trajectoire tendancielle seraient hybrides.

Le fonctionnement d'une pompe à chaleur hybride nécessite de définir les critères de « bascule »,

c'est-à-dire les critères qui définissent les instants où la chaudière gaz doit prendre le relais de la pompe à chaleur. Plusieurs critères de « bascule » sont possibles en théorie : bascule par rapport à une température extérieure donnée, à la consommation en énergie primaire, ou à des signaux de prix ou d'émissions de gaz à effet de serre.

Dans cette étude, la modélisation retenue pour le fonctionnement de pompe à chaleur hybride se veut « réaliste », et proche de ce qui pourrait être installé aujourd'hui : le pilotage se fait avec un basculement selon la température extérieure. Un couple de températures de bascule, 3°C et 5°C,

est retenu pour définir le passage entre les modes de fonctionnement retenu, en cohérence avec les valeurs de différents constructeurs et de l'AFPAC⁵². Concrètement, ce pilotage se traduit de la façon suivante :

- ▶ en mode «pompe à chaleur électrique seule» au-dessus d'une température extérieure de 5°C,
- ▶ en bi-mode entre 3 et 5°C, c'est-à-dire en sollicitant à la fois la chaudière gaz et la pompe à chaleur électrique pour la production de chaleur
- ▶ en chaudière seule en-dessous de 3°C.

2.5.9 Le coût des solutions de chauffage

Tout comme les rénovations d'enveloppe, les coûts liés aux systèmes de chauffage font partie du périmètre de l'évaluation économique, qui sera détaillée dans le Chapitre 6. Ces coûts comprennent à la fois :

- ▶ Les coûts des systèmes de chauffage en eux-mêmes : équipements en chaudières, pompes

à chaleur, poêles, etc. en tenant compte des coûts d'installation et de maintenance ;

- ▶ Les coûts de l'énergie utilisée pour le chauffage : combustibles (gaz, fioul, biomasse...) et production d'électricité.

Pour les systèmes de chauffage, la fourchette des coûts d'installation pour les différents types de chauffage apparaît très large, entre 5000 et 16000 €. Le coût initial à l'installation pèse lourdement dans le choix des consommateurs. Néanmoins, des aides d'état comme la prime à la conversion des chaudières peu performantes et l'opération «pompe à chaleur à 1 €» ont été multipliées récemment afin d'alléger la dépense d'investissement dans un équipement présentant une meilleure performance. L'analyse quantitative des dépenses liées à l'installation et à la fourniture d'énergie pour le chauffage est donc essentielle pour préciser l'enjeu associé à la massification des opérations d'installations dans un contexte d'accélération des rénovations, et donc à la maîtrise du coût de la décarbonation dans le secteur du bâtiment.

⁵². AFPAC, 2016. La pompe à chaleur hybride : quel avenir en maison individuelle ?

2.6 La décarbonation des approvisionnements énergétiques utilisés pour le chauffage

En complément des efforts de rénovation du bâti et d'évolution des systèmes de chauffage, la décarbonation du chauffage doit s'appuyer sur une réduction des émissions de CO₂ associées aux différentes sources énergétiques : développement du biogaz dans le secteur gazier, utilisation accrue de combustibles neutres en carbone dans les réseaux de chaleur urbain, poursuite de la décarbonation du système électrique (essentiellement dans les pays voisins, la France ayant déjà un système électrique très largement décarboné).

2.6.1 Le gaz : un développement important du biométhane qui pourrait atteindre de 7 à 10 % de la consommation de gaz en France en 2030

Si le gaz est aujourd'hui quasi-exclusivement d'origine fossile, le développement du biogaz constitue un objectif de politique énergétique et doit progressivement faire évoluer le contenu carbone du vecteur gaz.

Selon les objectifs fixés par la PPE, le biométhane pourrait ainsi représenter de l'ordre de 7 à 10 % de la consommation de gaz à l'horizon 2030. Le scénario de synthèse de la SNBC projette par ailleurs une forte croissance de la production de biogaz après 2030, pour atteindre 150 TWh en 2050, mais la capacité à atteindre des volumes importants dépendra de la disponibilité de biomasse pouvant être utilisée pour un tel usage (alors que son gisement est par nature limité).

Dans la présente étude, le développement du biogaz selon la trajectoire de la SNBC est tenu pour acquis, et les réductions d'émissions correspondantes sont intégrées dans les bilans énergétiques pour le vecteur gaz.

Le développement de solutions de captation et de séquestration du CO₂ est parfois aussi évoqué comme solution potentielle de décarbonation de l'usage gaz. À ce stade, celle-ci n'est toutefois pas privilégiée par les pouvoirs publics en France pour des questions de maturité technologique, d'efficacité et d'acceptabilité. Ce type de solutions serait par ailleurs difficilement applicable à des usages diffus comme le chauffage et serait a priori réservé à des usages industriels du gaz.

2.6.2 Les réseaux de chaleur : une transition vers l'utilisation de combustibles neutres en carbone comme la biomasse.

Les réseaux de chaleur permettent un usage important des énergies renouvelables et de récupération. Aujourd'hui, la biomasse et la valorisation des déchets comptent pour près de la moitié de l'énergie des réseaux de chaleur, à parts à peu près équivalentes. Pour autant, les combustibles utilisés dans les réseaux de chaleur urbains sont encore aujourd'hui en partie d'origine fossile et leur combustion dégage donc des émissions de gaz à effet de serre : 5 % de l'énergie brûlée dans les réseaux de chaleur vient du fioul, et près de 40 % vient du gaz naturel.

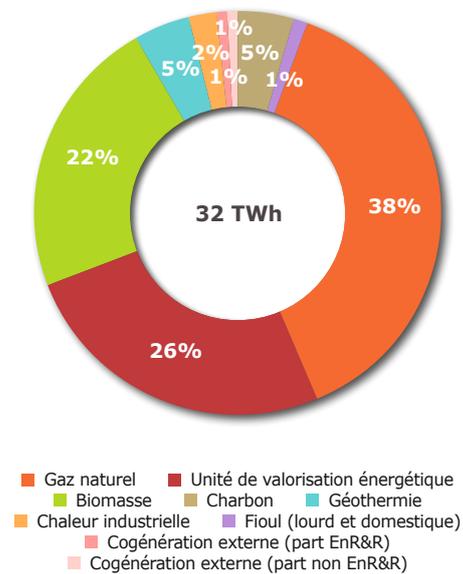
Étant donné l'existence de nombreux réseaux de chaleur utilisant un large éventail de sources d'énergie, le contenu CO₂ doit être établi pour chacun des réseaux de chaleur : une méthodologie de calcul en ACV a été définie par la SNCU⁵³. L'agrégation de ces chiffres individuels donne un contenu en CO₂ moyen des réseaux de chaleur en France. Comme le montre la figure 2.25, le contenu global en CO₂ des réseaux a été divisé par deux entre 2012 et 2017, notamment grâce à l'introduction progressive de la biomasse dans le mix énergétique.

53. SNCU, 2018. Note méthodologique sur le calcul des données clés de chaque réseau.

Dans la stratégie énergie-climat de la France, le développement des réseaux de chaleur urbains doit donc aller de pair avec une décarbonation des combustibles utilisés. À l'horizon 2050, la SNBC fixe ainsi comme objectif que la part des réseaux de chaleur urbains augmentera jusqu'à 15% dans le résidentiel et 30% dans le tertiaire, ce qui correspondrait à 20% sur l'ensemble du secteur du bâtiment et à une quarantaine de térawattheures⁵⁴.

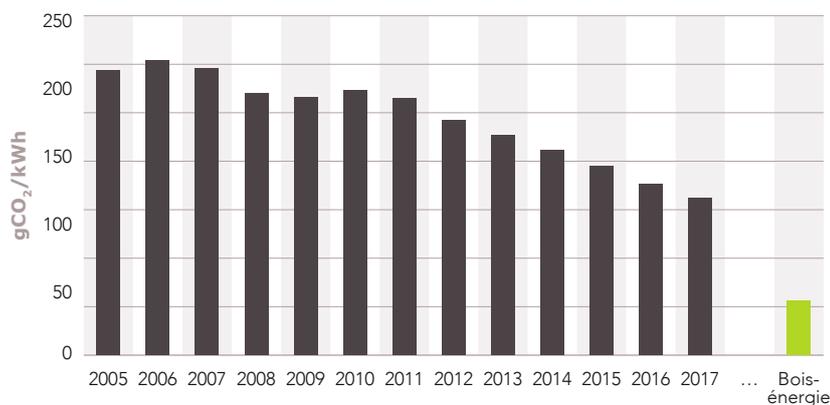
Par ailleurs, dans la continuité de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) de 2015, la SNBC rappelle cela s'accompagne d'un objectif qui vise « multiplier par cinq la quantité de chaleur et de froid renouvelables et de récupération livrée par les réseaux de chaleur et de froid à l'horizon 2030 par rapport à l'année 2012 ». La poursuite des efforts de verdissement des réseaux de chaleur consisterait en premier lieu à faire sortir du mix énergétique les énergies fossiles les plus polluantes comme le fioul tout en augmentant la part du bois. À moyen terme, le contenu CO₂ des réseaux de chaleur pourraient se situer entre 50 et 100 gCO₂/kWh, pour se rapprocher, à long terme, de celui du bois, estimé à 40 gCO₂/kWh d'après la base carbone.

Figure 2.24 Mix énergétique entrant dans les réseaux de chaleur en 2017⁵⁵



Si le développement des réseaux de chaleur a connu une forte croissance en passant de 26000 bâtiments raccordés en 2012 à 38000 en 2017, avec

Figure 2.25 Évolution du contenu CO₂ des réseaux de chaleur gCO₂/kWh⁵⁵



54. MTES, 2020. Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat.

55. SNCU, FEDENE, 2018. Les réseaux de chaleur et de froid.

un doublement de la chaleur renouvelable produite sur la même période, le rythme actuel sera insuffisant pour satisfaire les ambitions publiques. D'après le Syndicat national du chauffage urbain et la FEDENE, il est nécessaire d'accélérer à la fois la densification et le verdissement des réseaux⁵⁶.

2.6.3 L'électricité : un mix électrique déjà très largement décarboné en France mais des effets à l'échelle du système interconnecté à prendre en compte

La production électrique française est aujourd'hui déjà largement décarbonée, notamment du fait du socle important de production nucléaire et d'énergies renouvelables (hydraulique, éolien, photovoltaïque et bioénergies), qui constituent plus de 90 % de la production annuelle. Il en résulte un contenu CO₂ moyen du kWh électrique parmi les plus faibles d'Europe, autour de 60 gCO₂/kWh. Ce chiffre représente une moyenne annuelle, car en réalité, le contenu CO₂ du kWh électrique varie selon les moyens de production sollicités à chaque instant.

Néanmoins, dans un système européen interconnecté, les échanges entre la France et ses voisins sont permanents. Concrètement, le système électrique français est très largement exportateur – une tendance qui devrait se renforcer si la trajectoire de la PPE est tenue. La France est également souvent un pays de transit (avec par exemple des imports sur certaines frontières et des exports sur d'autres, le bilan net étant le plus souvent exportateur). Enfin, la France est parfois importatrice, dans des situations qui peuvent être très différentes : situations de très forte production éolienne conduisant à des prix négatifs (la production française module alors « à la baisse », y

compris le nucléaire) mais aussi périodes de forte consommation en France (conduisant à importer une production en moyenne carbonée). En 2019, le solde des échanges français était néanmoins très largement exportateur (environ 60 TWh)⁵⁷.

La méthode de la Base Carbone® de l'ADEME vise déjà à prendre en compte cet aspect en attribuant un contenu carbone différencié aux usages électriques selon la structure du mix de production et l'état des échanges d'électricité au moment de la consommation, afin de refléter la sollicitation plus ou moins forte de moyens de production carbonés. Néanmoins, le contenu CO₂ de certains usages, comme le chauffage électrique, pouvant être très sensible au choix méthodologique adopté, celui-ci est régulièrement sujet à débat (voir chapitre 5, section 5.1).

La méthode retenue dans l'étude RTE-ADEME intègre la prise en compte des émissions induites sur la production d'électricité dans les pays voisins (par rapport à un contrefactuel où la politique de la SNBC n'est pas menée à bien). Les impacts du chauffage électrique sont donc bien étudiés sur la base d'une modélisation du système électrique interconnecté.

Il s'agit d'une plus-value de l'étude RTE-ADEME, qui permet d'apporter des réponses quantitatives à la question de l'impact carbone lié au développement d'un usage électrique. Pour chaque scénario d'évolution du chauffage électrique étudié, le volume d'émissions de CO₂ est ainsi évalué à l'échelle française et européenne, s'affranchissant ainsi des considérations méthodologiques d'attribution des émissions aux usages. La suite de cette partie est consacrée à la présentation des caractéristiques de la modélisation et les hypothèses adoptées pour refléter les ambitions publiques de décarbonation du mix électrique.

56. SNCU, FEDENE, 2018. Les réseaux de chaleur et de froid.

57. Bilan électrique, <https://bilan-electrique-2019.rte-france.com/>

Modélisation de la consommation de chauffage électrique selon les variations du climat

La consommation d'électricité, en France, dépend au premier ordre des conditions météorologiques. La thermosensibilité de la consommation est étudiée spécifiquement au chapitre 4 du rapport.

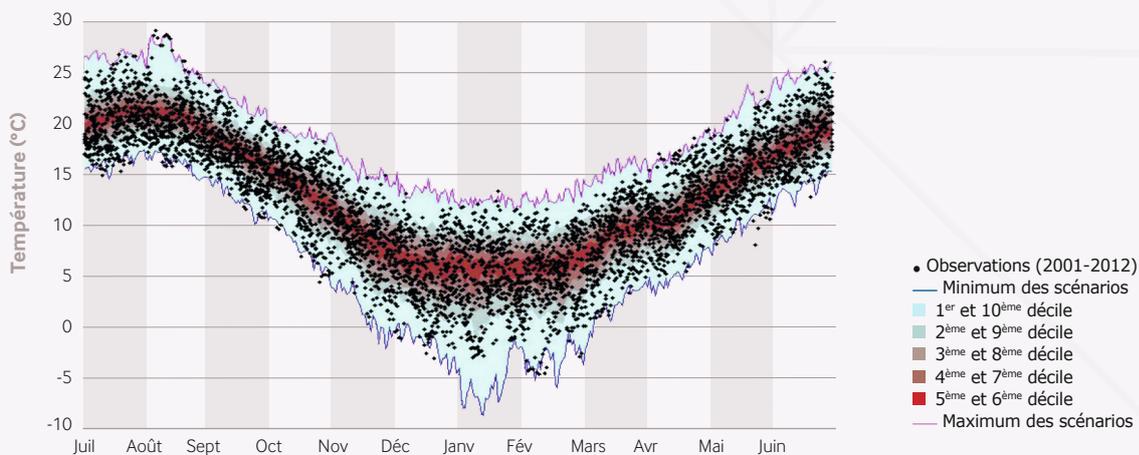
Dans le même temps, la part croissante des énergies renouvelables dans le mix électrique rend la production d'électricité également dépendante des conditions extérieures (vent, ensoleillement, débit des cours d'eaux).

Pour des études d'équilibre offre-demande, il est donc nécessaire de simuler un grand nombre de situations climatiques. Or les données historiques sont insuffisantes pour offrir un éventail satisfaisant de simulations à la fois en nombre et en représentativité du climat. C'est pourquoi RTE a travaillé conjointement avec les experts de Météo-France pour établir un référentiel climatique. Ce

référentiel recense 200 chroniques climatiques issues du modèle ARPEGE développé par le centre de recherches de Météo-France. Un modèle de climat a pour but de simuler le climat, c'est-à-dire de calculer de façon réaliste la valeur moyenne et la dispersion autour de cette moyenne de paramètres tels que températures, vent, rayonnement... Il n'a pas vocation à prévoir une valeur précise pour un jour donné comme le fait un modèle de prévision. Les données doivent représenter les situations climatiques contraignantes pour le réseau électrique, en particulier les vagues de froid ou de chaleur ; c'est pourquoi RTE a recours à un grand nombre de simulations, couvrant un large champ d'événements météorologiques possibles.

La résolution spatiale des données est de 50 km (6035 points étudiés). Les séries sont archivées au pas horaire. Il s'agit de simulations à climat

Figure 2.26 Températures journalières : simulations (200 années simulées) et observations (13 ans)



représentatif du climat actuel et à venir dans les prochaines années. Chaque chronique produite est une réalisation possible. RTE dispose ainsi d'un jeu de 200 chroniques de variables climatiques au pas horaire, cohérentes à l'échelle européenne, qui alimente les études d'impact des aléas climatiques sur le système électrique aux différentes échelles européenne, nationale ou régionale.

En particulier, ce référentiel permet d'étudier de façon cohérente l'effet des variations climatiques sur la consommation comme la production d'électricité, via cinq variables climatiques :

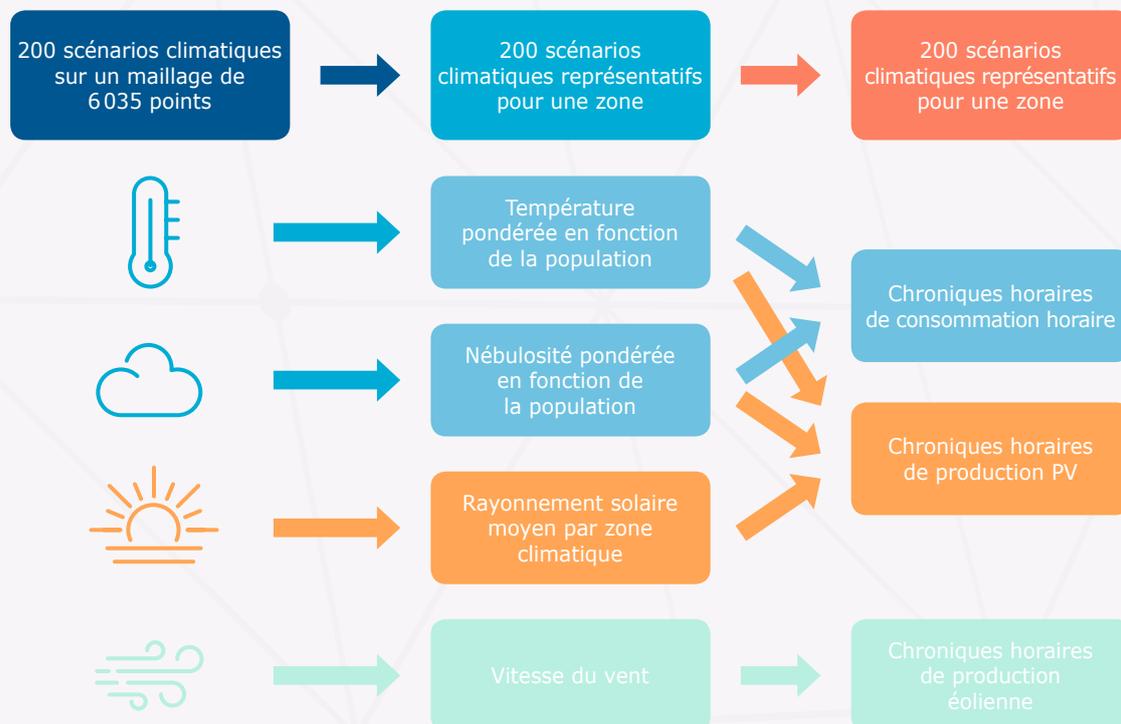
- ▶ la température (à 2 mètres)
- ▶ le vent à 100 mètres
- ▶ la nébulosité totale

- ▶ le rayonnement solaire à la surface du sol (flux direct et diffus)

La température et la nébulosité influent sur la consommation via le chauffage et la climatisation. La production solaire est affectée par la température, la nébulosité et le rayonnement solaire. Enfin, la production éolienne est influencée exclusivement par les paramètres de vent.

Avec le réchauffement climatique, ce référentiel, représentatif du climat des dernières décennies, est amené à évoluer de concert avec les températures réelles. RTE déploie actuellement un nouveau référentiel climatique élaboré avec Météo France, intégrant des températures moyennes plus douces en hiver.

Figure 2.27 Influence des paramètres climatiques sur la consommation d'électricité et la production renouvelable



L'évolution du mix électrique en France

Les hypothèses d'évolution du mix électrique utilisées pour l'analyse sont basées sur la trajectoire de la PPE adoptée par le Gouvernement en 2020. Elles intègrent en particulier :

- ▶ une accélération du développement des énergies renouvelables d'ici 2028 (multiplication par 2,5 des capacités d'éolien terrestre d'ici 2028 et multiplication par 4 des capacités photovoltaïques sur la même période, développement des parcs éoliens en mer, etc.), supposée prolongée sur la période 2029-2035 ;
- ▶ la fermeture des centrales au charbon d'ici 2022 et l'absence de nouveaux projets de centrales thermiques à combustibles fossiles (au-delà de la centrale de Landivisiau dont la mise en service est attendue pour 2021) ;
- ▶ un déclassement de 14 réacteurs nucléaires d'ici 2035 (en comptant ceux de Fessenheim) selon la trajectoire indiquée par le Gouvernement ;
- ▶ un développement soutenu des interconnexions.

Au-delà du mix de production, le système électrique est influencé par tous les développements de la consommation électrique. Les transformations envisagées par la SNBC comprennent plusieurs changements majeurs dans la consommation d'électricité :

- ▶ le renforcement des actions d'efficacité énergétique, via l'isolation du bâti et le

développement de solutions de chauffage performantes comme détaillées ci-avant, mais également

- ▶ le développement de nouveaux usages électriques, et en premier lieu l'électrification de la mobilité à hauteur de 15,6 millions de véhicules dans le parc à l'horizon 2035, consommant environ 40 TWh par an, avec une hypothèse de pilotage modéré de la recharge (40% des véhicules en recharge pilotée) et la production d'hydrogène par électrolyse à hauteur de 30 TWh par an⁵⁸.

En comparaison, dans le cadrage de la SNBC (électrification, efficacité énergétique du bâti et des solutions de chauffage), la consommation électrique associée au chauffage devrait rester globalement stable à l'horizon 2035 (cf. chapitre 4).

Dans l'hypothèse de référence de l'étude, le mix électrique considéré correspond à celui prévu par l'application de la PPE. Ce mix électrique est dimensionné pour répondre à la consommation d'électricité telle que prévue par les orientations publiques sur les transferts d'usages, et en particulier au développement du chauffage électrique au rythme prévu par la SNBC. Cette hypothèse de mix est ensuite conservée pour tous les scénarios et variantes où le niveau d'électrification est celui de

Figure 2.28 Objectifs publics en matière de transformation du mix énergétique, issus des projets de PPE et SNBC



58. RTE, 2019, Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique, https://www.rte-france.com/sites/default/files/electromobilite_synthese_9.pdf. RTE, 2020, La transition vers l'hydrogène bas-carbone – Atouts et enjeux pour le système électrique à l'horizon 2035, https://www.rte-france.com/sites/default/files/rapport_hydrogene_vf_2.pdf

Figure 2.29 Productible et consommation électrique en 2018 et à l’horizon 2035 (scénario du projet de PPE)

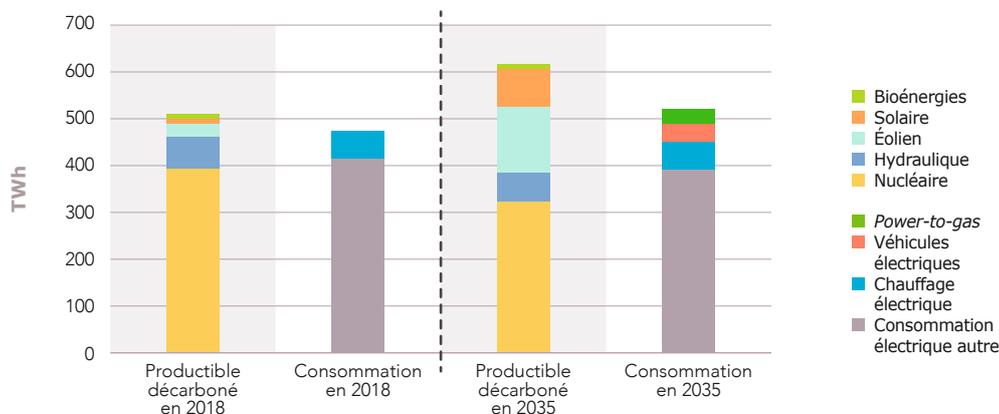
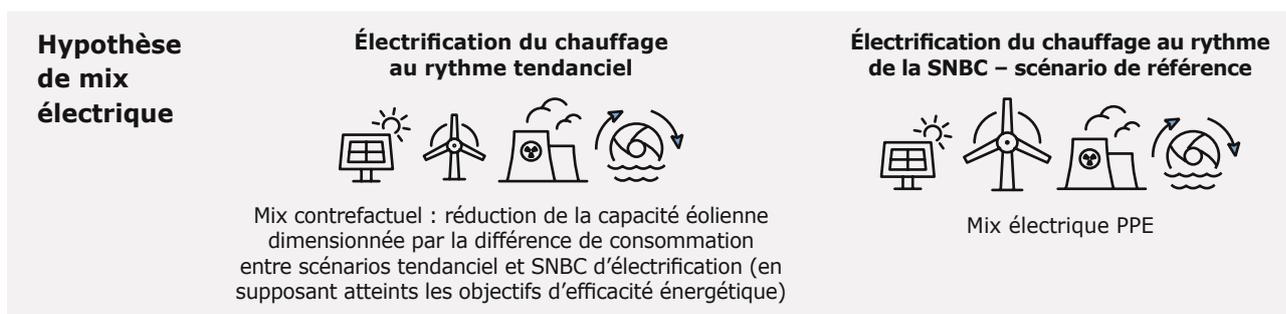


Figure 2.30 Hypothèse de mix électrique adoptée en fonction de l’hypothèse du niveau d’électrification du chauffage



la SNBC, quelles que soient les hypothèses faites par ailleurs sur le niveau d’efficacité des équipements ou du bâti.

Dans l’étude RTE-ADEME, certaines simulations sont également réalisées en retenant un « mix électrique contrefactuel », dans le cas où le développement du chauffage électrique ne se produit pas au-delà de la tendance actuelle reprise dans le scénario contrefactuel. Concrètement, ce mix de production contrefactuel est caractérisé par un volume de production est réduit à hauteur de la moindre consommation électrique observée entre l’atteinte de l’objectif d’électrification de SNBC et la poursuite de la tendance actuelle, dans l’hypothèse où l’objectif d’amélioration du bâti et d’isolation est atteint.

Les hypothèses de mix de production (mix PPE et mix contrefactuel) s’ajoutent donc aux autres hypothèses sur l’isolation du bâti et les solutions

de chauffage, indépendamment de la consommation électrique du chauffage obtenue par la combinaison de ces dernières hypothèses. La déclinaison chiffrée de cette hypothèse est présentée avec les résultats des scénarios dans le chapitre 3.

L’évolution du mix électrique dans les autres pays européens

De la même façon que pour le mix français, les hypothèses utilisées pour l’évolution des mix électriques étrangers reposent principalement sur les études de l’ENTSO-E, notamment le scénario *Sustainable Transition* du TYNDP 2018, qui décrit l’évolution des parcs de production aux horizons 2030 et 2040, et ont pu être complétée par des données plus récentes en cas d’annonces publiques dans certains pays européens.

La figure ci-contre résume l’ensemble des hypothèses sur le parc électrique français et européen.

2.6.4 Un enjeu sociétal et technologique : la sobriété

La sobriété est présentée par la SNBC comme l'un des leviers de réduction de la consommation d'énergie.

Dans le scénario de référence de la SNBC, la sobriété est mise en œuvre de façon « raisonnable », en considérant une légère diminution de la consommation dans l'ensemble des secteurs mais sans perte de confort. Concrètement, cette sobriété reposerait sur l'adoption de comportements vertueux : abaisser la température de consigne du chauffage de 1 °C en moyenne, ne pas

chauffer les pièces non occupées et les logements vacants en journée... mais aussi sur la généralisation de technologies intelligentes permettant d'éviter les gaspillages d'énergie (chauffages intelligents à détection de présence, d'ouverture de fenêtre...).

Dans cette étude, afin de rendre compte d'une légère baisse de la consommation de chauffage grâce à la sobriété, cet effet a été pris en compte via une baisse de la température de consigne de 1 °C entre 2020 et 2030, modélisé comme une baisse d'environ 15% du besoin, puis une baisse annuelle liées aux technologies intelligentes, autour de 0,1 % par an.

2.7 Le bilan : une étude détaillée qui porte sur de nombreux paramètres et variantes pour identifier la sensibilité des résultats aux choix publics sur le bâtiment

La présentation de l'ensemble des paramètres clés de l'étude permet de souligner l'importance quantitative et qualitative des variables à prendre en compte pour modéliser correctement l'évolution sur le temps long de la consommation associée au chauffage dans les bâtiments.

Pour chacun de ces paramètres, il a été récapitulé dans le tableau suivant :

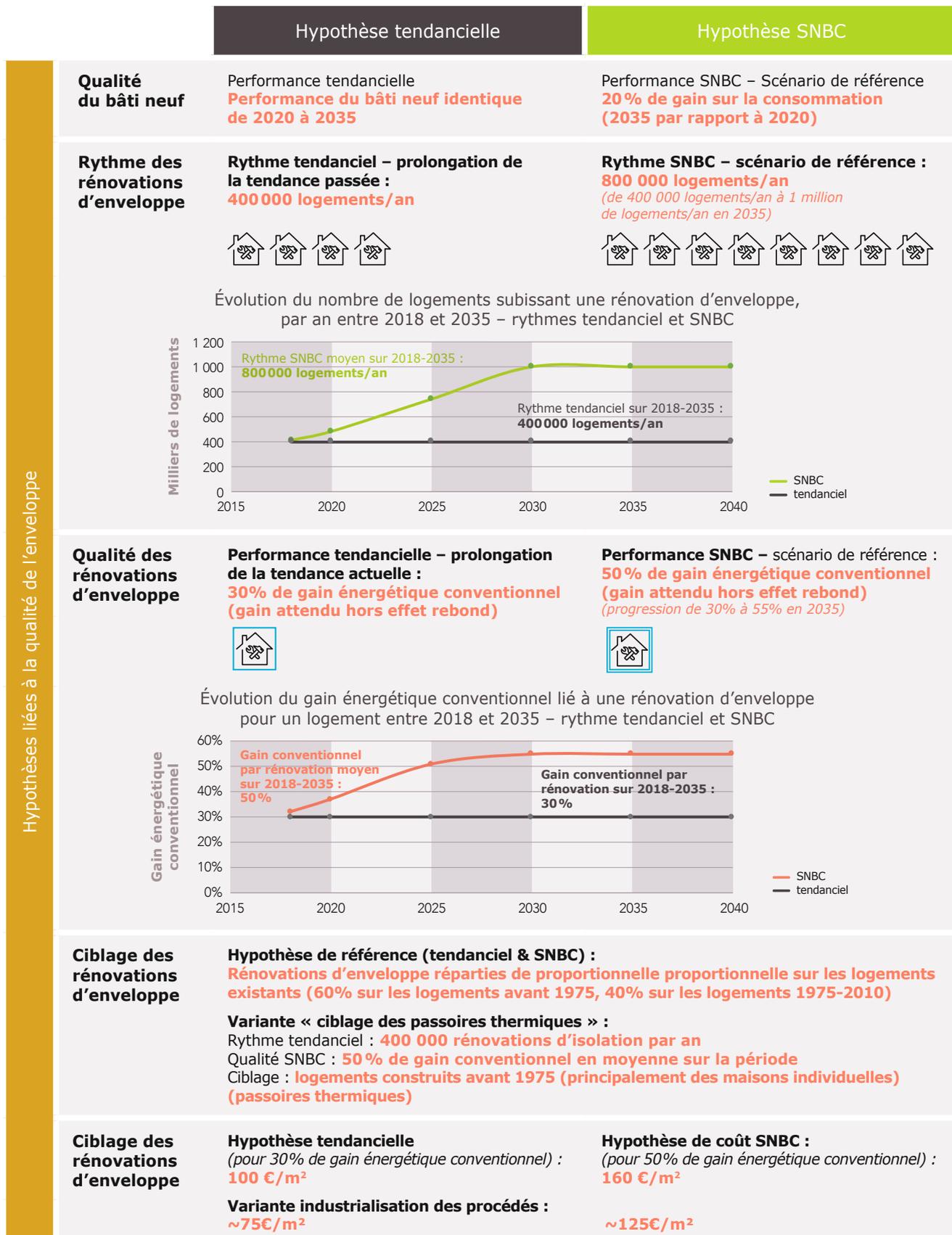
- ▶ Une hypothèse tendancielle
- ▶ Une hypothèse de référence dans les scénarios A-SNBC 1 et A-SNBC 2 de la présente étude.

Si certains paramètres semblent connaître une tendance encourageante quant à l'atteinte des objectifs de la SNBC, comme la forte pénétration des PAC dans les maisons individuelles neuves,

d'autres sont demeurés stables au cours des dernières années, comme le rythme de la rénovation des logements. Étant donné l'incertitude portant sur ces paramètres-clés et les questions qu'elles soulèvent, de nombreuses combinaisons d'hypothèses sont possibles pour construire des scénarios.

L'étude choisit d'explorer les combinaisons les plus porteuses de sens, en regroupant les paramètres clés sous quatre catégories : la qualité du bâti (enveloppe), le niveau d'électrification du chauffage, la proportion de pompes à chaleur dans le chauffage électrique, et le mix de production électrique, afin de se focaliser sur un nombre restreints de scénarios cohérents, analysés en profondeur.

Figure 2.32 Ensemble des paramètres clés définissant la consommation de chauffage électrique entre une hypothèse tendancielle et une hypothèse de référence «SNBC»



Hypothèses liées à la qualité de l'enveloppe

Hypothèse tendancielle

Hypothèse SNBC

Électrification du chauffage dans le neuf

Rythme tendanciel – prolongation de la tendance actuelle



Part de l'électricité dans le neuf à partir de 2020 :

Maisons : 60 %
Collectif : 13 %

Électrification SNBC – scénario de référence 1



Part de l'électricité dans le neuf à partir de 2020 :

Maisons : 70 %
Collectif : 25 %

Électrification accrue dans le neuf – scénario de référence 2



Part de l'électricité dans le neuf à partir de 2020 :

Maisons : 90 %
Collectif : 70 %

Électrification du chauffage

Rythme tendanciel – prolongation de la tendance actuelle

Transferts de chauffage combustible à électrique dans l'existant :
50 000 transferts/an de chauffage combustible à électrique

Électrification SNBC – scénario de référence

Transferts de chauffage combustible à électrique dans l'existant :
130 000 transferts/an
Dont 100 000 chaudières fioul et 30 000 chaudières gaz

Pénétration des pompes à chaleur (PAC) dans le chauffage électrique neuf

Hypothèse tendancielle – prolongation de la tendance actuelle



Forte pénétration des PAC dans le neuf électrique :

Maisons : 93 %
Collectif : 40 %

Variante stress test accrue dans le neuf – Joule +



Pénétration des PAC stable dans le parc toutes énergies confondues, ralentie dans le neuf électrique :

Dans le neuf :
Maisons : 62 %
Collectif : 9 %

Hypothèse SNBC – scénario de référence 1



Forte pénétration des PAC dans le neuf électrique :

Dans le neuf :
Maisons : 93 %
Collectif : 40 %

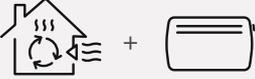
(identique au tendanciel ici)

Hypothèse SNBC – Scénario de référence 2



Forte pénétration des PAC dans le neuf électrique :

Dans le neuf :
Maisons : 93 %
Collectif : 40 %

	Hypothèse tendancielle	Hypothèse SNBC
Hypothèses liée à la pénétration des pompes à chaleur	Pénétration des pompes à chaleur (PAC) dans le chauffage électrique existant Hypothèse tendancielle – prolongation de la tendance actuelle  Dans l'existant : 38 000 installations de PAC par an Principalement en transfert de chauffage combustible vers des PAC <i>(75% des 50 000 logements électrifiés)</i>	Hypothèse SNBC – scénario de référence 1  Dans l'existant : 190 000 installations de PAC par an Dont 60 000 radiateurs électriques remplacés en PAC/an Et 130 000 transferts de chauffage combustible à PAC <i>(100% des logements électrifiés le sont en PAC)</i>
	Coefficient de performance (COP) des PAC COP tendanciel – prolongation de la tendance actuelle COP Parc : 2,8	COP avec pénétration des PAC de la SNBC – scénario de référence COP Parc : 3,5 en 2035 Variante COP dégradé COP Parc : 3,0 en 2035
	Installation PAC air-air	Hypothèse de référence (tendanciel et SNBC)  Une PAC air-air alimente tout le logement Variante avec des radiateurs électriques en complément  La PAC air-air fournit 65% du besoin thermique, le reste est fourni par des radiateurs électriques
PAC hybride	Hypothèse de référence (tendanciel et SNBC)  PAC électriques (air-eau, air-air)	Variante avec PAC hybrides  PAC air-eau hybrides à la place de 2,5 millions de PAC air-eau
Hypothèses liées au mix électrique	Hypothèse de mix électrique Électrification du chauffage au rythme tendanciel  Mix contrefactuel : réduction de la capacité éolienne dimensionnée par la différence de consommation entre scénarios tendanciel et SNBC d'électrification (en supposant atteints les objectifs d'efficacité énergétique)	Électrification du chauffage au rythme de la SNBC – scénario de référence  Mix électrique PPE

2.8 Annexe : le calcul de la consommation conventionnelle

Comme présenté en section 2.2, le calcul de consommation conventionnelle met en jeu les paramètres suivants : les déperditions thermiques, la fraction des besoins de chauffage couverts par les apports gratuits, les pertes récupérables de l'ECS et le facteur d'intermittence. Cette annexe détaille de façon quantitative les valeurs retenues pour ces différents paramètres dans la modélisation⁵⁹.

Trois niveaux de qualité du bâti, correspondant à trois catégories d'âge du parc, sont ainsi considérés dans la modélisation : les logements construits avant 1975, date d'application de la première réglementation thermique, les logements construits entre 1975 et 2010, et les logements construits après 2010 donc correspondant globalement à la construction neuve soumise à la RT 2012 (en admettant un léger effet d'anticipation).

Les **déperditions thermiques** sont estimées à partir des caractéristiques du bâtiment d'une part, et d'un indicateur de la rigueur du climat d'autre part. Le volume du bâtiment considéré intervient, ainsi que son coefficient global de déperdition G en $W/m^3 \cdot ^\circ C$: ce coefficient est calculé en fonction de la qualité thermique des murs, fenêtres,

toiture, sous-sol et ventilation. Dans la modélisation, les coefficients G utilisés correspondent aux valeurs moyennes observées (estimées selon les valeurs par défaut de la méthode 3CL-DPE), selon les types de logement et les années de construction (cf. tableau 2.3).

La rigueur du climat est quantifiée par l'écart entre la température d'une journée donnée et un seuil de température préétabli ($18^\circ C$), et ce pour tous les jours de la période de chauffage. Concrètement, les déperditions représentent le produit de ces trois paramètres.

La fraction des besoins de chauffage couverts par les apports gratuits (coefficient F) concerne les apports internes et solaires. Les apports internes sont calculés en fonction du nombre de personnes par logement et par les pertes des appareils à l'intérieur du logement (chaleur dégagée par l'éclairage, etc.). Les apports solaires sont déterminés par la surface des baies vitrées et l'exposition au sud. La fraction de ces apports est calculée en fonction de l'inertie du bâtiment : plus cette inertie est forte, plus la fraction des apports gratuits est élevée et le besoin thermique réduit.

Tableau 2.3 Coefficients de déperditions thermiques G (en $W/m^3 \cdot ^\circ C$) utilisés dans la modélisation (source : estimations RTE d'après la méthode 3CL-DPE)

	Maison individuelle	Immeuble collectif
Ancien (<i>avant 1975</i>)	2	1,6
Récent (<i>entre 1975 et 2010</i>)	1	0,86
Neuf (<i>après 2010</i>)	0,4	0,37

⁵⁹. Cette modélisation a été présentée aux acteurs lors du groupe de travail sur la consommation des usages thermiques dans le résidentiel, en mars 2019. Le document de concertation est disponible sur <https://www.concerte.fr/>

Tableau 2.4 Fraction des besoins de chauffage couverts par les apports gratuits utilisée dans la modélisation (source : estimations RTE)

	Maison individuelle	Immeuble collectif
Ancien (<i>avant 1975</i>)	12 %	15 %
Récent (<i>entre 1975 et 2010</i>)	23 %	27 %
Neuf (<i>après 2010</i>)	50 %	53 %

À titre indicatif, le tableau ci-dessous présente les valeurs du coefficient F utilisées dans la modélisation en fonction du type de logement. Les différences observées relèvent principalement des déperditions thermiques, plus importantes dans les logements anciens, réduisant ainsi la part d'apports gratuits effectivement captés dans le logement.

Les **pertes récupérables de l'ECS**, de l'ordre de 6 kWh/m² par an (source : méthode 3CL-DPE), correspondent à la chaleur perdue du circuit d'ECS pouvant être récupérée pour diminuer le besoin thermique.

Le **facteur d'intermittence** reflète la diminution du besoin de chauffage à certains moments : réduction de la température de chauffage la nuit (d'environ deux degrés), absences (une semaine d'absence en hiver). Ce facteur fluctue de 77% à 90% selon le type de logement et l'ancienneté (source : méthode 3CL-DPE).

Le **besoin thermique conventionnel** résulte de ces différentes variables selon la formule suivante :

$$\text{Besoin} = [\text{déperditions} \times (1 - \% \text{ apports gratuits}) - \text{pertes récupérables ECS}] * \text{facteur d'intermittence}$$

L'amélioration de la performance du bâti apportée par une rénovation d'enveloppe dans l'existant, ou par une qualité supérieure d'isolation dans des logements neufs, est prise en compte en diminuant ce besoin thermique du gain énergétique conventionnel attendu. L'effet rebond est ensuite pris en compte (cf. annexe section 2.10).

Les surfaces moyennes par logement utilisées dans le modèle, basées sur les données de l'INSEE, sont respectivement de 110 m² et 65 m² pour les maisons individuelles et les appartements.

2.9 Annexe : modélisation du facteur correctif pour calculer la consommation réelle à partir de l'estimation du besoin thermique conventionnel et de l'effet rebond après rénovation

Comme expliqué en début de chapitre, la consommation réelle d'énergie finale s'avère souvent différente de la consommation théorique conventionnelle, ce qui peut s'expliquer par de multiples facteurs liés à la qualité des équipements, du bâti, au comportement des occupants... Par ailleurs, l'expérience montre que pour un logement subissant une rénovation d'isolation ou de système de chauffage (comme l'installation d'une pompe à chaleur), le gain de consommation théorique escompté n'est en général pas observé dans la pratique, du fait de **l'effet rebond et des malfaçons**.

Pour modéliser correctement la consommation de chauffage à partir des estimations de besoin conventionnel, il est donc nécessaire d'appliquer une calibration aux modèles afin (i) de reconstituer le volume de consommation réelle de chauffage électrique à partir de la consommation théorique et (ii) d'anticiper l'effet rebond lié à la rénovation.

L'effet rebond s'explique fréquemment dans la littérature par la diminution du coût de l'énergie et la facilitation de la consommation. Par extension, l'effet rebond pourrait être issu d'un effet préexistant, à savoir un écart important entre la consommation observée et la consommation théorique attendue, c'est-à-dire que le consommateur ne se chauffe pas à 100% de son besoin (par un effet « pré-rebond »)⁶⁰. Pour les chercheurs qui ont travaillé sur ce sujet, les effets rebond et « pré-rebond » sont clairement identifiés comme liés au coût de l'énergie pour le consommateur et à la précarité énergétique⁶¹. D'après le Baromètre Énergie-Info 2019, 15% des répondants déclarent avoir souffert du froid au cours de l'hiver, principalement

en raison de la mauvaise isolation de leur logement, un tiers des ménages a restreint le chauffage pour ne pas avoir de factures trop élevées, et un foyer sur dix rencontre des difficultés pour payer certaines factures d'électricité ou de gaz naturel. Ainsi, après une rénovation, l'effet rebond sera bien plus important pour un ménage modeste que pour un ménage aisé⁶². Ces effets font appel à la notion économique d'élasticité prix-revenu : si le coût de l'énergie de chauffage baisse, le consommateur aura tendance à en consommer plus pour augmenter son confort, et cela d'autant plus que son revenu est faible. Toutefois l'élasticité est limitée et s'exerce entre deux seuils : un seuil minimum de consommation de chauffage, correspondant à un confort minimum, en-dessous duquel le consommateur ne descendra pas ; et un seuil maximum au-delà duquel le consommateur est arrivé à « saturation » de son besoin, et ne consommera pas plus, et n'augmentera pas davantage la température de son logement même si le prix de l'énergie baisse encore.

Si le facteur économique permet de proposer des explications quantitatives, en réalité d'autres paramètres techniques plus difficilement mesurables entrent en jeu et pourraient avoir un poids tout aussi important. Dans la modélisation utilisée dans cette étude, cette calibration s'appuie sur l'interprétation économique évoquée ci-dessus, sachant qu'en réalité cette approximation sert à reproduire tous les effets identifiés et pas seulement l'effet « coût de l'énergie pour le consommateur ».

En considérant que le besoin conventionnel correspondrait au seuil maximum et à la « saturation » du besoin, on pourrait

60. Galvin and Sunikka-Blank, 2017. Ten questions concerning sustainable domestic thermal retrofit policy research. *Build. Environ.*, 118, 377-388.
Teli *et al.*, 2016. Fuel poverty induced "prebound effect" in achieving the anticipated carbon savings from social housing retrofit. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, 37, 176-193.
Call *et al.*, 2016. Energy performance gap in refurbished German dwellings: Lesson learned from a field test. *Energy Build.*, 127, 1146-1158.

61. Teli *et al.*, 2015; Berger and Holtl, 2019; Vilches *et al.* 2017; Poon, 2015; Seebauer, 2018; Sorrel *et al.* 2018

62. Aydin *et al.*, 2017 "Energy Efficiency and Household Behavior: The Rebound Effect in the Residential Sector," *The RAND Journal of Economics* 48, no. 3 (2017): 749-82. Cet article a montré qu'aux Pays-Bas, l'effet rebond pour les ménages du quantile de revenus le plus bas found est double par rapport à celui des ménages du quantile de revenus le plus haut.

Tableau 2.5 Intensités d'utilisations observées par segment du parc résidentiel français en 2005 (source : Allibe, 2012)

Période de construction	Maisons individuelles			Logements collectifs	
	électricité	gaz	fioul	électricité	gaz
< 1975	0,35	0,48	0,37	0,46	0,48
1975-1981	0,40	0,50	0,44	0,47	0,65
1982-1988	0,49	0,67	0,57	0,67	0,87

Tableau 2.6 Prix des énergies de chauffage en 2005 (source : PEGASE, 2012) et 2018 (source Tarifs Réglementés de Vente 2018-2019)

Prix en €/kWh _{PCI}	électricité	gaz	fioul
2005	0,11	0,04	0,05
2018	0,14	0,06	0,10

mesurer l'effet pré-rebond via le ratio de la consommation effective sur la consommation théorique⁶³ : il s'agit d'un facteur correctif, aussi appelé « intensité d'utilisation » du chauffage.

En France, des études telles que celle de B. Allibe (2012)⁶⁴, fondées sur des échantillons de plus de 900 logements ont montré que le facteur correctif pour le chauffage électrique est le plus bas parmi les autres énergies de chauffage traditionnelles⁶⁵, ce qui dans ces analyses peut s'expliquer de façon quantitative par le coût relatif des

énergies, le chauffage électrique pouvant revenir plus cher aux ménages que les chauffages combustibles⁶⁶.

Par conséquent, pour un logement subissant une rénovation d'isolation ou de système de chauffage (comme l'installation d'une pompe à chaleur), le facteur correctif devrait augmenter en conséquence, c'est-à-dire que la consommation réelle devrait se rapprocher de la consommation conventionnelle, étant donné les meilleures performances énergétiques du logement. La modélisation du facteur correctif, reprenant l'approche

63. Centre scientifique et technique du bâtiment, 2015. « Modèle de prévision de l'évolution des consommations du parc résidentiel » (Rapport d'étude issu de la base de données Phébus)

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

65. Nöspinger, Osso, and Raynaud, 2017. "A Proposal to Go beyond the Rebound Effect: How to Evaluate the Financial Value of Comfort after Retrofitting?," 1759-67. Raynaud *et al.*, 2018 "How Deep Does the Retrofitting Have to Be? A Cost-Benefit Analysis of Two Different Regional Programmes,".

66. Sorrell, Gatersleben, and Druckman, 2018. "Energy Sufficiency and Rebound Effects," Report (European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE), November 2018).

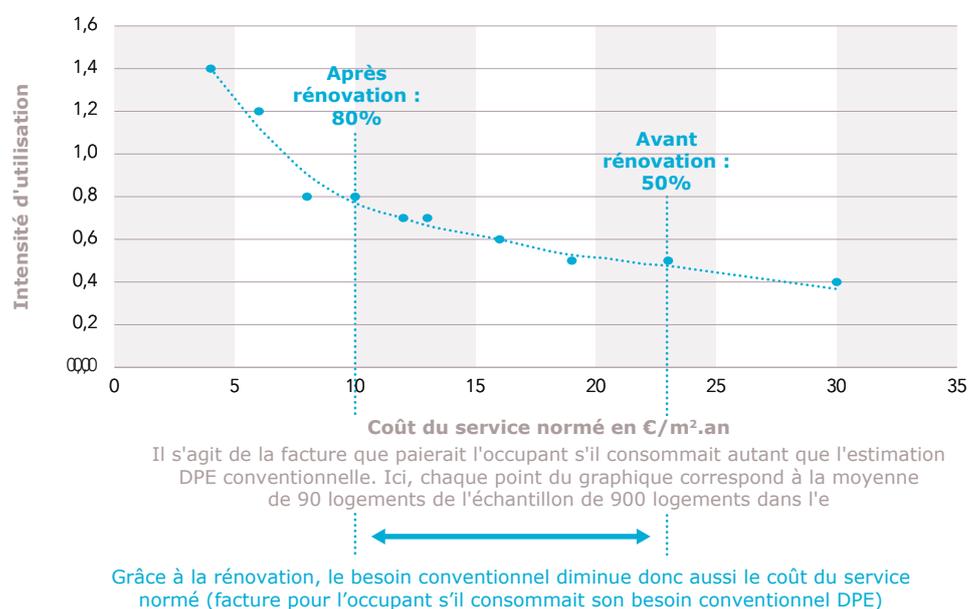
développée par B. Allibe (2012)⁶⁷ est un outil efficace pour **reconstituer le volume de consommation réelle de chauffage électrique à partir de la consommation théorique, et de réaliser des projections crédibles de l'effet rebond lié à une rénovation.**

La relation entre le facteur correctif et le coût du service théorique, c'est-à-dire le coût pour l'occupant s'il consommait autant d'énergie que prévu par le calcul conventionnel, est présentée dans l'annexe section 2.9. Ainsi, plus le coût « théorique » pour l'occupant est élevé, et plus son intensité d'utilisation est faible : la consommation réelle est bien inférieure à la consommation conventionnelle, permettant de limiter la facture de l'occupant. En revanche, plus le coût du service théorique est

faible, plus l'intensité d'utilisation est forte : on constate même quelques valeurs au-dessus de 100 % dans les logements neufs, signifiant que les occupants de ces logements consomment une énergie de chauffage supérieure au besoin conventionnel estimé par le DPE. Dans le cadre de cette étude, on considère, qu'en moyenne, une saturation du besoin de l'occupant une fois la totalité du besoin conventionnel couvert, c'est-à-dire que l'on plafonne l'intensité d'utilisation à 100 %⁶⁸.

Il convient de remarquer que cette notion s'applique principalement dans le secteur résidentiel, où l'occupant est acteur de sa consommation d'énergie. Néanmoins, dans les logements ayant un chauffage collectif, l'occupant est moins apte à contrôler sa consommation. Dans le tertiaire,

Figure 2.33 Intensité d'utilisation en fonction du coût du service normé⁶⁵



67. Une formule de calcul pour l'intensité d'utilisation a été proposée dans la thèse de B. Allibe en effectuant une régression entre l'intensité d'utilisation constaté des systèmes de chauffage sur un échantillon de 913 logements (EDF R&D 2009), et le coût du service normé en euros par mètre carré.

68. En pratique, les études PREBAT montrent que, pour les bâtiments performants après rénovation, la consommation réelle relevée est souvent en-dessous du niveau de consommation conventionnel BBC sur l'échantillon étudié d'une centaine de bâtiments. Néanmoins, pour une petite dizaine de cas, la consommation relevée s'avère supérieure au niveau BBC théorique, avec un ratio entre réel et théorique pouvant aller jusqu'à 1,5. ADEME et CEREMA, 2018. « Bâtiments démonstrateurs à basse consommation d'énergie. Enseignements opérationnels tirés de 141 constructions et rénovations du programme PREBAT ».

Tableau 2.7 Estimation du facteur correctif appliqué à la consommation conventionnelle (intensité d'utilisation) des logements chauffés à l'électricité en fonction de l'année de construction

Date de construction du logement	2017
avant 1975	33%
entre 1975 et 2010	52%
après 2010	100%

les systèmes de chauffage ont tendance à être contrôlés de façon centralisée. En conséquence, on estime que l'effet rebond après rénovation est négligeable dans le tertiaire⁶⁹.

Cette modélisation est régulièrement confrontée à l'historique : les consommations de chauffage calculées sont recalées sur les consommations réalisées. RTE dispose pour cela d'une évaluation de la part thermosensible hivernale de la consommation, à partir des puissances appelées heure par heure et des conditions climatiques réelles sur les dernières années. Ce volume thermosensible est ensuite réparti entre le chauffage résidentiel et le chauffage tertiaire, à partir des données de consommations du CEREN.

Ainsi, en confrontant la consommation théorique du parc de logements recensé par le CEREN et le volume de chauffage identifié par les données de consommation de RTE, il est possible d'estimer

l'intensité d'utilisation du chauffage sur l'historique. Aujourd'hui, **le facteur correctif du chauffage électrique se situe autour de 50 % en moyenne pour le parc total de logements chauffés à l'électricité** (modélisation RTE), mais la dispersion est importante selon le degré d'isolation du logement : il se situe entre 30 % et 40 % pour les logements anciens datant d'avant 1975, tandis qu'il atteint 100 % dans les logements neufs.

Dans l'étude, ce facteur correctif va avoir tendance à augmenter et donc à se rapprocher de 100 % avec l'amélioration de la performance du parc et en particulier l'amélioration de la qualité de l'enveloppe.

De façon générale, l'effet rebond aura tendance à être compris entre 10 % et 20 % pour une rénovation peu profonde et performante et 30 % à 40 % voire plus pour une rénovation profonde performante (gain de 50 % sur le besoin conventionnel du logement).

⁶⁹. Sorrell, Gatersleben, and Druckman, 2018. "Energy Sufficiency and Rebound Effects," Report (European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE), November 2018).

3

**DES SCÉNARIOS
CONTRASTÉS**
pour rendre compte
des enjeux sur le bâtiment
et le chauffage

DES SCÉNARIOS CONTRASTÉS POUR RENDRE COMPTE DES ENJEUX SUR LE BÂTIMENT ET LE CHAUFFAGE

3.1 Tous les scénarios de l'étude intègrent une transformation sur quinze ans

3.1.1 Un cadre général : un parc de bâtiments qui évolue en fonction de la démographie, de l'activité économique et des politiques énergie-climat

L'augmentation de la part du chauffage électrique prévue par la SNBC doit être replacée dans le contexte global d'évolution du parc de bâtiments et des énergies de chauffage à moyen terme.

S'agissant du parc de bâtiment en France métropolitaine, la projection de référence retenue dans l'étude RTE-ADEME conduit le parc résidentiel à passer de 29 millions de résidences principales en 2018 à 34 millions en 2035, et le parc tertiaire passer d'un milliard à près d'1,2 milliards de m². Malgré cette tendance à la hausse du nombre de bâtiments dans le parc, la SNBC prévoit une division par deux de la consommation de chauffage à horizon 2050, soit environ 200 TWh contre 400 TWh aujourd'hui, et une sortie des énergies fossiles (abandon du fioul, réduction de l'usage du gaz et remplacement du gaz naturel par du biogaz) au même horizon.

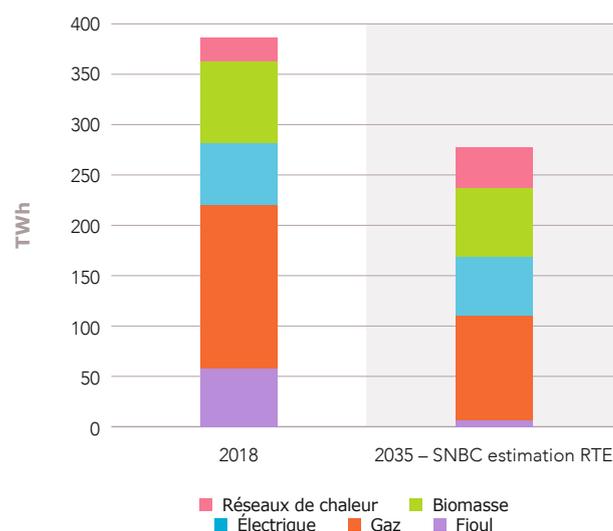
Au point intermédiaire 2035, qui fait l'objet de la présente étude, la SNBC prévoit :

- **Au niveau des solutions de chauffage : la disparition complète du fioul dans le résidentiel** et quasi-complète dans le tertiaire, au

profit d'un développement accru des pompes à chaleur, des réseaux de chaleur et de la biomasse ;

- Au niveau de la consommation d'énergie : une réduction de la consommation d'énergie de chauffage d'un quart, passant de 400 TWh¹ à 300 TWh environ.

Figure 3.1 Évolution de la consommation de chauffage entre 2018 et 2035 pour la SNBC (estimation RTE pour le point 2035)



1. Le chauffage résidentiel en 2018 s'élève à 291 TWh PCI d'après les données SDES (source CEREN), avec chiffre RTE pour le chauffage électrique. Le chauffage tertiaire en 2018 s'élève à 103 TWh PCI d'après les mêmes sources.

Figure 3.2 Répartition des résidences principales selon leur énergie de chauffage, dans le parc résidentiel, dans le scénario SNBC

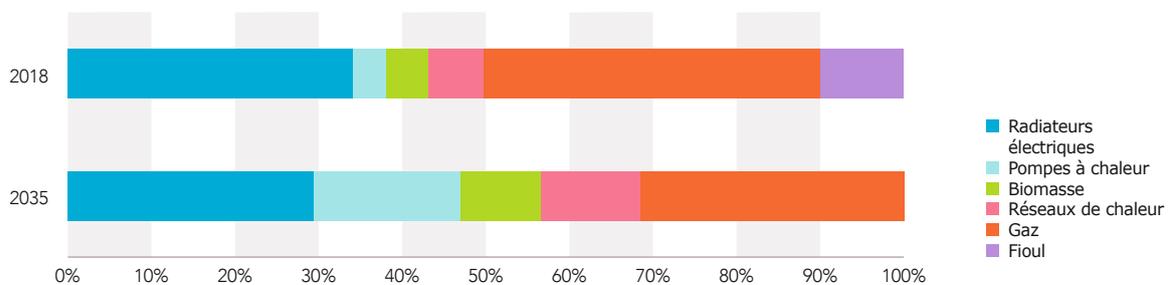
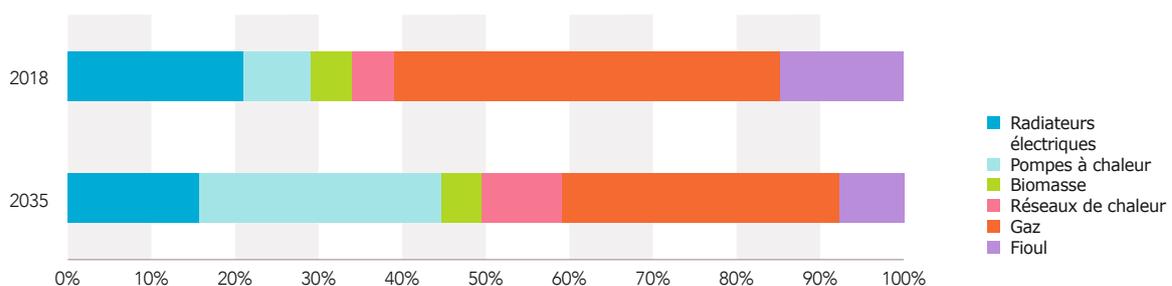


Figure 3.3 Répartition des surfaces dans le secteur tertiaire selon énergies de chauffage, dans le parc tertiaire, dans le scénario SNBC



3.1.2 Au niveau du développement de la part de l'électricité : un enjeu qui porte sur 10% de la part des bâtiments résidentiels et tertiaires en quinze ans

La SNBC est parfois décrite comme un scénario prévoyant une forte électrification des usages. Le recours accru à l'électricité est en réalité une caractéristique commune de très nombreux scénarios visant la neutralité carbone à l'horizon 2050.

S'agissant de l'usage « chauffage » dans le bâtiment, **les mesures impliquées par la SNBC sont loin de conduire au « tout électrique » à l'échelle de la France** : en 2035, l'électricité chaufferait 50% des logements et des surfaces tertiaires mais fournirait de l'ordre de 20% de l'énergie finale de chauffage du pays du fait de la prédominance

des pompes à chaleur (à laquelle s'ajoute l'énergie extraite de l'environnement par les pompes à chaleur). Le gaz représenterait encore un tiers des logements et surfaces tertiaires, et plus d'un tiers de l'énergie finale de chauffage.

L'évolution entre aujourd'hui et 2035 peut être décomposée en deux composantes :

- Les modifications résultant naturellement d'une prolongation des tendances actuelles et de l'évolution du parc immobilier, qui se produiraient même si la SNBC n'avait pas été adoptée ou si elle ne produisait aucun effet (évolution naturelle de la part de l'électricité du fait du renouvellement régulier du parc et de la part plus importante des solutions électriques dans le neuf, augmentation du parc du fait de la démographie et de l'activité économique) ;

- Les modifications spécifiquement imputables à la SNBC en tant que politique publique (renforcement de la part de l'électricité dans le neuf au-delà de la tendance du fait d'une nouvelle réglementation environnementale, accélération des rénovations, incitations au remplacement des solutions de chauffage peu efficaces, etc.).

Sur l'ensemble du secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire), la trajectoire de la SNBC prévoit ainsi un transfert correspondant à 3 millions d'équivalents-logements chauffés à l'électricité, par rapport à un scénario prolongeant la tendance actuelle en matière d'évolution des solutions de chauffage².

La SNBC conduit à augmenter la part du parc chauffé à l'électricité d'un peu moins de 10 % des logements ou des surfaces tertiaires à horizon 2035, au-delà de la tendance actuelle prolongée. Ce volume s'ajouterait à la part des bâtiments utilisant déjà des solutions de chauffage électrique (environ 40 % des logements et 30 % des surfaces tertiaires aujourd'hui).

Dans le secteur résidentiel

La seule évolution tendancielle du parc des systèmes de chauffage entraîne des effets importants. Elle conduirait le nombre de foyers utilisant l'électricité comme solution de chauffage à passer de 11 millions aujourd'hui (principalement des solutions Joule) à 14,4 millions en 2035.

- Les trois quarts de cette évolution proviennent de l'effet combiné de la croissance démographique et de la décohabitation dans la projection de l'INSEE (démographie haute) sur l'évolution du nombre de résidences principales.
- Un quart de cette hausse s'explique par le flux de remplacement au profit du chauffage électrique dans les logements existants et par le recours au chauffage électrique dans un tiers des nouveaux logements (cf. ci-après).

Ceci constitue la première tranche d'électrification étudiée dans ce rapport. Dans les scénarios tendanciels en matière d'électrification (scénario contrefactuel et B), cet incrément est intégré, ce qui conduit à une part des logements chauffés à l'électricité voisine de 40 %.

Un second incrément est lié à la politique de la SNBC proprement dite. Dans les scénarios qui s'en réclament (A-SNBC 1, C et D), le développement des solutions électriques concerne un peu plus de 2 millions de logement supplémentaires. Cela conduit à 16,5 millions de logements électriques en 2035. Cela représente un peu moins de la moitié du parc.

Les différents scénarios étudiés dans l'étude RTE-ADEME conduisent à étudier un parc de logements chauffés à l'électricité compris entre 14,4 à 16,5 millions à l'horizon 2035, soit entre 42 et 48 % du parc total de logements.

Enfin, le scénario A-SNBC 2 explore une configuration où le recours aux solutions électriques deviendrait très majoritaire dans les bâtiments neufs à la suite de la nouvelle réglementation environnementale (ce qui n'est pas une certitude, le scénario A-SNBC 2 ne consistant pas en une étude d'impact de la RE 2020)³. Ces variantes ajouteraient 2,7 millions de logements à l'électricité, soit près de 8 % du parc, ce qui porterait le nombre de logements chauffés à l'électricité à 19,2 millions et la part de l'électricité à 56 %.

Dans le secteur tertiaire

Des principes de construction similaires sont utilisés pour le secteur tertiaire.

Actuellement, la part des surfaces chauffées à l'électricité s'élève à environ 30 % (en 2018).

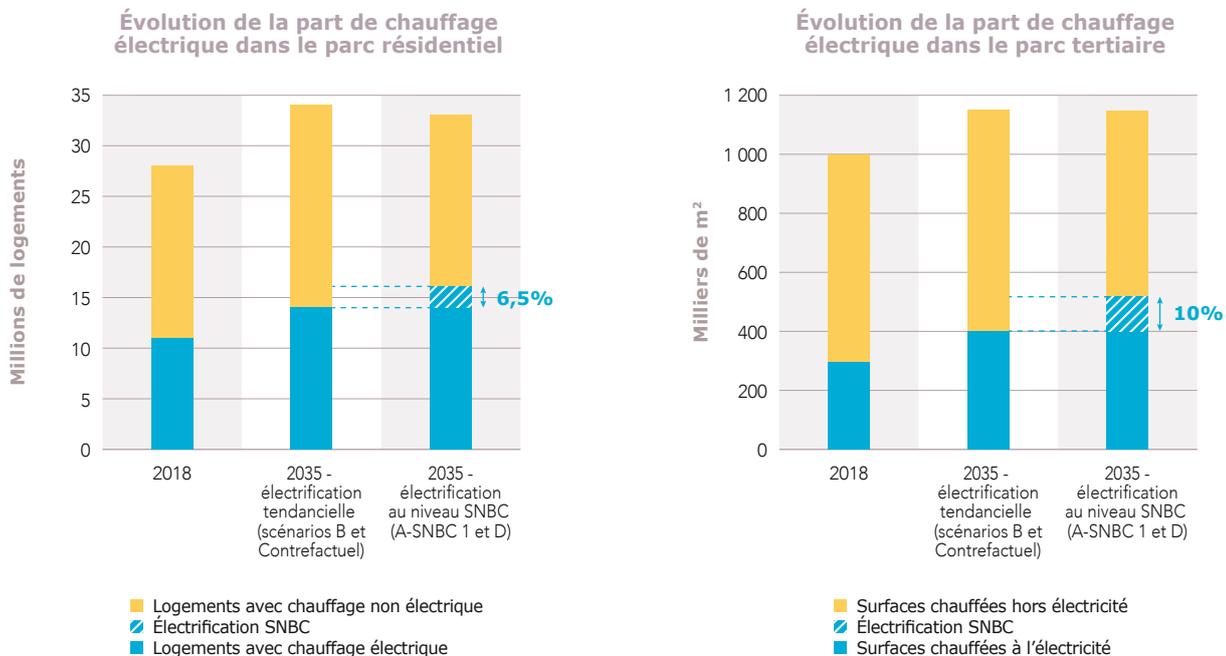
Sous l'hypothèse d'une croissance moyenne annuelle du PIB voisine de 2 %⁴ sur la période 2020-2035, les surfaces totales chauffées du

2. Étant donné qu'il est difficile de quantifier de façon homogène le nombre d'équipement dans le tertiaire, on considère des «équivalents-logements» pour le tertiaire, selon l'approche adoptée par la FEDENE dans le rapport sur les réseaux de chaleur. Un équivalent-logement est déterminé par la consommation unitaire moyenne d'un logement dans le scénario de référence SNBC.

3. Le scénario A-SNBC 1 projette une part du chauffage électrique de 70 % dans les maisons individuelles neuves, et de 25 % dans le logement collectif (25 %). Le scénario A-SNBC 2 porte ces parts respectivement à 90 % et 70 %, avec une forte proportion de pompes à chaleur (voir chapitre 2).

4. Comme mentionné au chapitre 2, les hypothèses de PIB ont été établies avant la crise sanitaire de la COVID-19.

Figure 3.4 L'évolution de la part du chauffage électrique dans le parc résidentiel et tertiaire entre 2018 et 2035 selon les hypothèses d'électrification tendancielle et SNBC



secteur tertiaire augmenteraient d'environ 15% à l'horizon 2035 :

- ▶ cet effet mécanique conduirait la part des surfaces électrifiées à 35% en 2035 dans les scénarios prolongeant la tendance sur la part de marché des différentes solutions de chauffage (contrefactuel et B), sous l'effet d'un développement des pompes à chaleur dans les surfaces tertiaires de type bureau et commerce ;
- ▶ **un rythme d'électrification plus élevé en cohérence avec la SNBC (scénario A-SNBC 1, A-SNBC 2, C et D) porterait la part des surfaces chauffées à l'électricité à 45% en 2035.**

Dans le tertiaire, cette électrification concernerait donc autour de 10% des surfaces tertiaires.

Les différents scénarios font varier de 400 à 500 millions de m² la surface chauffée à l'électricité dans le secteur tertiaire en 2035, soit entre 35 et 45% de la surface totale.

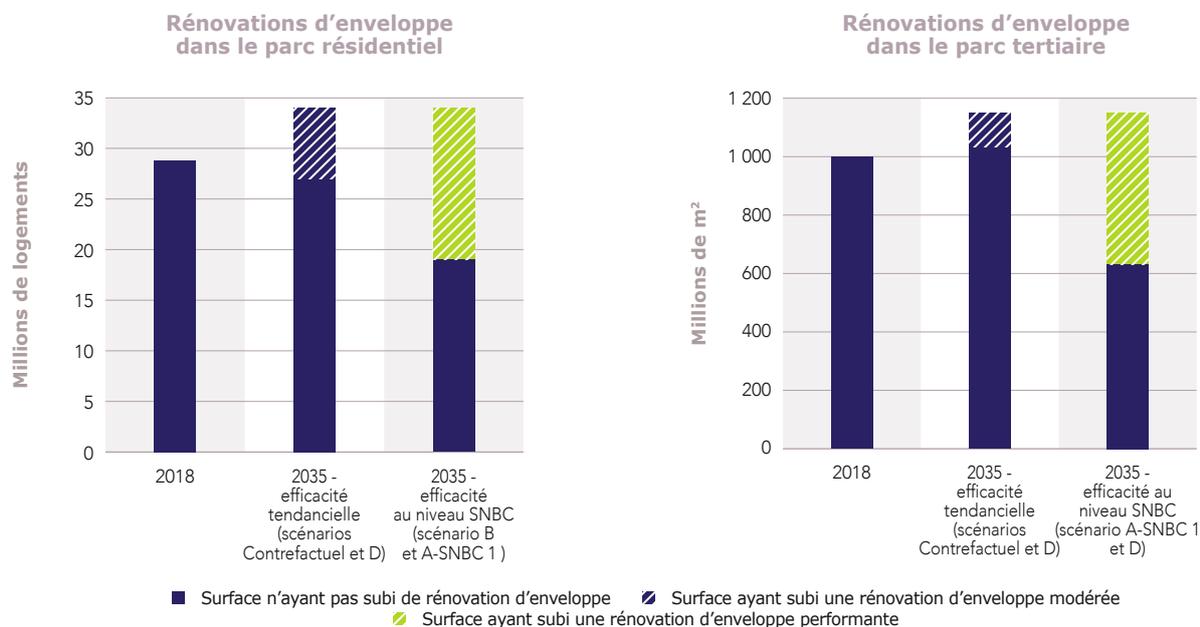
3.1.3 Au niveau des objectifs de rénovation : un enjeu qui porte sur la moitié du parc en quinze ans

La SNBC préconise un effort important en matière de rénovation des bâtiments existants. Elle implique une accélération significative du rythme de rénovation du bâti, ainsi qu'une amélioration substantielle de la qualité intrinsèque des gestes d'isolation.

Concrètement, atteindre les objectifs SNBC en matière de rénovation du bâti signifie que 15 millions de logements auront subi une rénovation d'enveloppe performante en 2035 : ce rythme est cohérent avec l'objectif d'amener le parc immobilier français au niveau BBC en moyenne à l'horizon 2050.

Dans le secteur tertiaire, le rythme de rénovation prévu par la SNBC est supposé conduire d'ici 2035 à rénover environ la moitié des surfaces existantes. La consommation surfacique résultante devrait

Figure 3.5 Rénovations d'enveloppe selon le niveau d'efficacité des scénarios



diminuer d'environ 50%, avec de fortes disparités selon les branches d'activités et les énergies de chauffage. **La diminution de la consommation est supposée plus conséquente dans ce secteur que dans l'habitat résidentiel : aucun effet rebond n'a été pris en compte dans le tertiaire.**

En revanche, la poursuite du rythme tendanciel de rénovation devrait conduire seulement 7 millions des logements à bénéficier d'une rénovation d'enveloppe en 2035, et celle-ci ne sera pas aussi performante que dans le scénario de la SNBC. La consommation unitaire des logements diminuerait d'environ 15%. Dans le secteur tertiaire, un dixième des surfaces seraient rénovées, la consommation surfacique diminuant alors d'environ 20%.

3.2 Des scénarios structurés autour de plusieurs axes : le développement des solutions de chauffage électriques, la performance des bâtiments (anciens et neufs) et l'efficacité des systèmes de chauffage

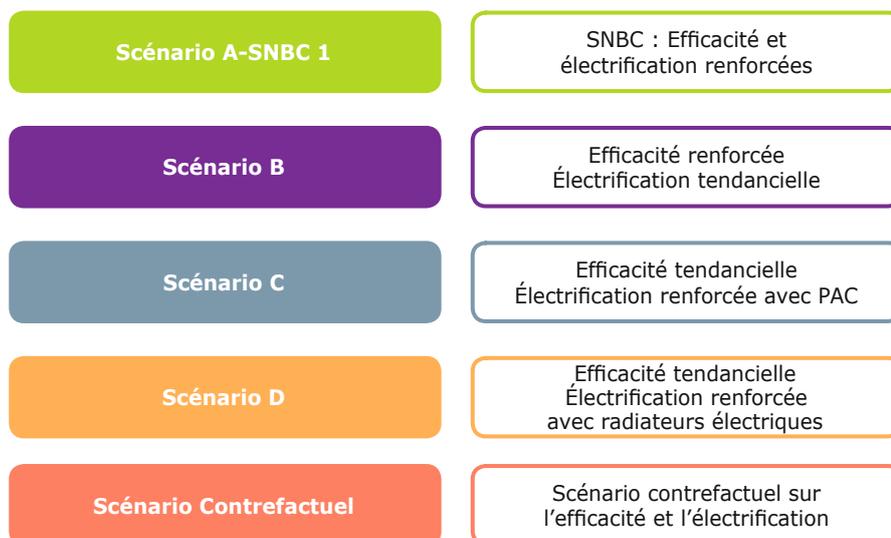
La grande multiplicité des paramètres de référence, exposée au chapitre 2, constitue l'un des intérêts du travail approfondi mené par RTE et l'ADEME et restitué dans ce rapport. Il est néanmoins difficile de restituer de manière compréhensible autant de variantes sans déterminer un cadre général d'analyse. C'est l'objet de la présente partie du chapitre 3 et de la restitution « par scénarios ».

Parmi les différents paramètres, quatre apparaissent de première importance pour évaluer les conséquences du déploiement des solutions électriques : (1) le niveau d'isolation des bâtiments, (2) le niveau de développement des solutions électriques dans chauffage (radiateurs et pompes à chaleur électriques), (3) l'efficacité des systèmes de chauffage (proportion de pompes à chaleur), et (4) le mix électrique associé.

Même après réduction à ces quatre variables de commande principales, de nombreuses combinaisons et croisements demeurent possibles. Pour faciliter la restitution de leur impact et offrir des analyses pertinentes, la restitution privilégie plusieurs clés de lecture.

D'une part, les résultats sont résumés par des scénarios construits principalement autour de deux axes, le niveau de développement des solutions de chauffage électrique d'une part et le niveau d'efficacité énergétique d'autre part (qui englobe à la fois l'aspect « isolation du bâti » et « efficacité du système de chauffage électrique »). Ceci conduit à développer quatre scénarios :

- ▶ le scénario contrefactuel, où aucun des objectifs (électricité dans le chauffage, performance du bâti et des solutions de chauffage) n'est atteint ;
- ▶ le scénario A-SNBC 1, où tous les objectifs sont atteints ;
- ▶ le scénario B, où l'objectif de performance est atteint, mais inflexion sur la part de l'électricité dans le chauffage ;
- ▶ le scénario D, où l'objectif de renforcement de la part de l'électricité est atteint, mais sans inflexion sur la performance des logements ni sur celle des solutions de chauffage (concrètement, des radiateurs électriques sont alors développés plutôt que des pompes à chaleur).



En complément, un scénario avec atteinte partielle des objectifs d'efficacité est également présenté :

- ▶ le scénario C, qui combine une électrification réussie par le biais de pompes à chaleur (donc de solutions de chauffage performantes), mais sans atteinte de l'objectif sur la rénovation des bâtiments.

Enfin, le scénario A-SNBC 1 est complété d'un scénario voisin comprenant un développement plus poussé de l'électricité dans la construction neuve :

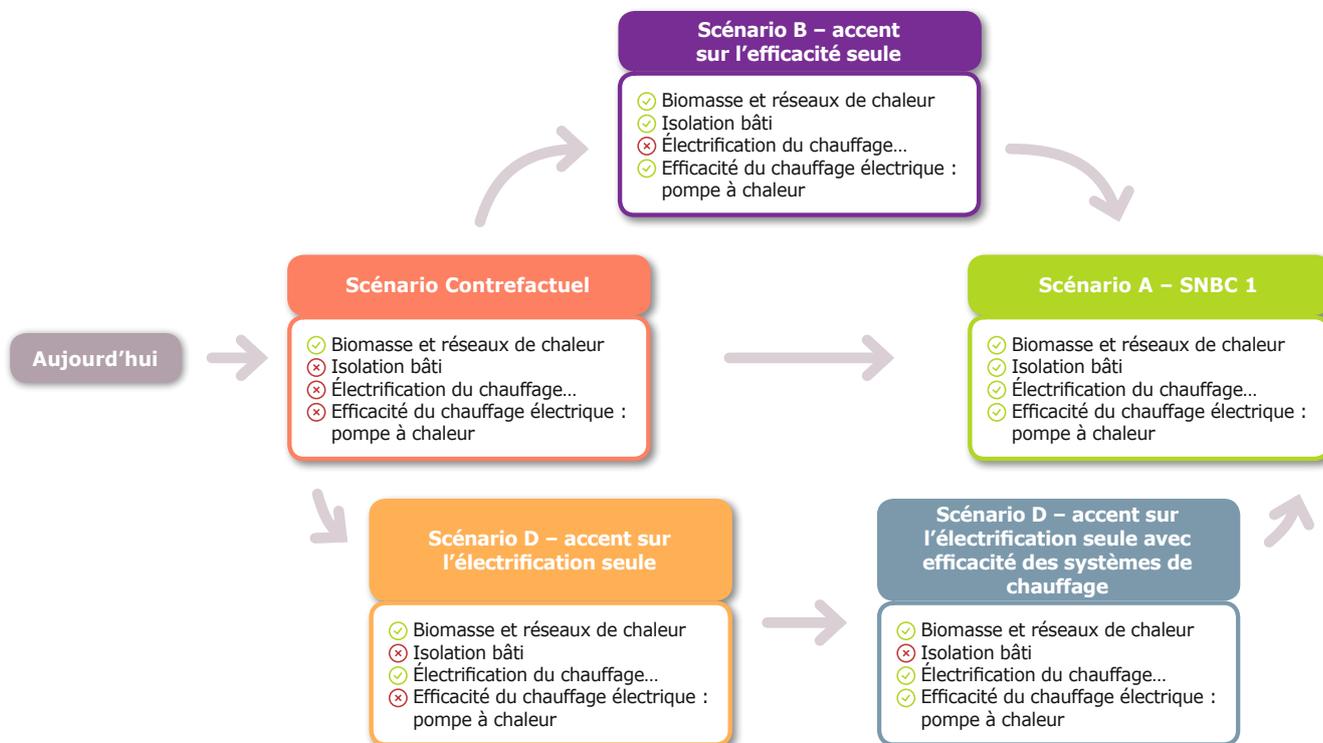
- ▶ le scénario A-SNBC 2 atteint les objectifs d'efficacité et d'électrification, et renforce la part du vecteur électrique dans le neuf par le biais de pompes à chaleur.

Plusieurs variantes spécifiques sont également présentées, afin de tester individuellement différents paramètres :

- ▶ une variante «rénovation ciblée» étudie le ciblage de l'action sur les passoires thermiques ;
- ▶ plusieurs variantes étudient, à la marge du scénario A-SNBC 1, les variations induites par exemple par un mauvais dimensionnement des pompes à chaleur (conduisant à des appoints de radiateurs électriques), une dégradation de leur COP, le déploiement de pompes à chaleur hybrides, etc. ;
- ▶ certaines, enfin, étudient le cas d'un retard dans le développement des énergies renouvelables dans la production d'électricité

D'autre part, les chapitres 4, 5 et 6 du rapport sont consacrés à une analyse thématique des résultats, autour de trois volets : technique, environnemental, et économique.

Figure 3.6 Cartographie des scénarios de l'étude



3.3 Des variantes explorant l'influence du mix de production et d'actions ciblées dans le bâtiment

Différentes variantes ont été construites afin de tester la sensibilité des scénarios à certains paramètres clés.

3.3.1 Les variantes sur l'atteinte des objectifs SNBC

Plusieurs variantes construites à partir du scénario A-SNBC 1 visent à mesurer l'influence de paramètres dans le secteur du bâtiment.

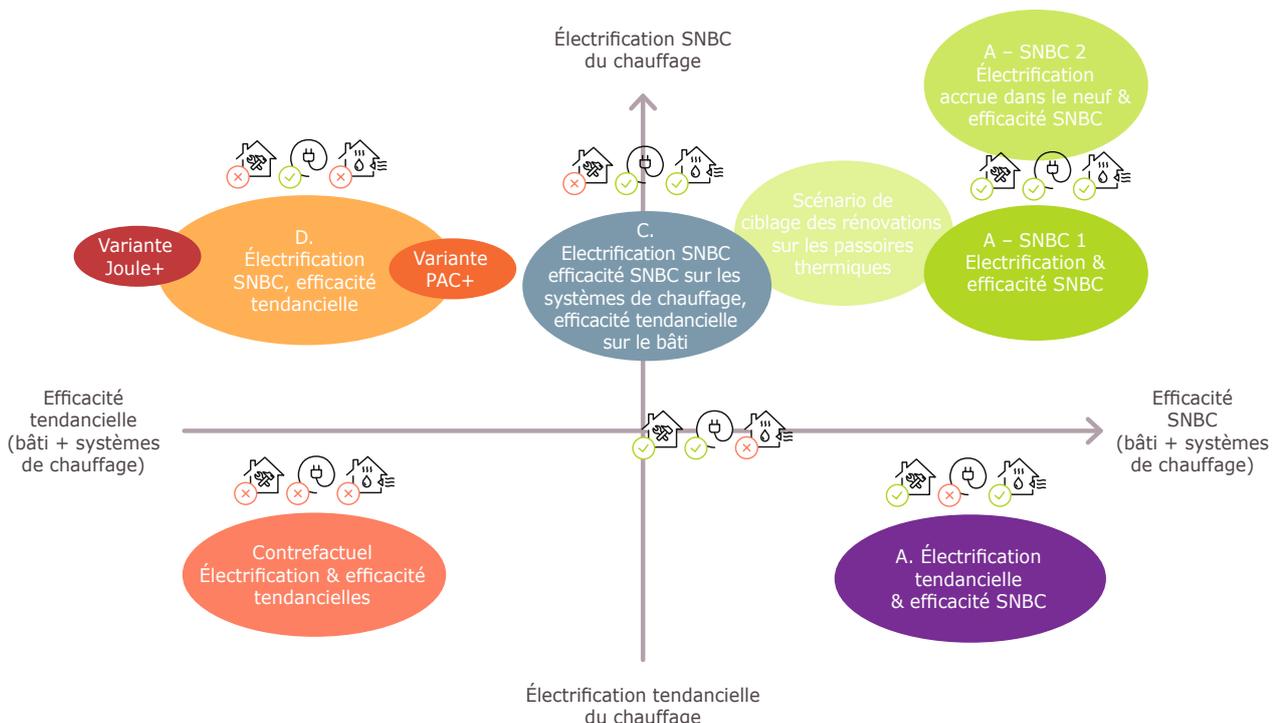
L'installation de pompes à chaleur et les travaux d'isolation sont deux mesures améliorant l'efficacité énergétique, qui peuvent être traitées de manière individuelle ou simultanée dans les variantes. De plus, un scénario «ciblage des passoires thermiques» a également été construite

en partant du scénario A-SNBC 1, afin d'évaluer le bénéfice d'un traitement prioritaire de certains types de logement (en l'occurrence, les maisons construites avant 1975 et la première réglementation thermique).

3.3.2 Les variantes la part de marché des énergies dans la construction neuve

Le scénario A-SNBC 1 retient l'hypothèse d'une part de marché de l'électricité de 70% dans les maisons neuves et de 25% dans les nouveaux immeubles collectifs. Afin de tester les conséquences d'un développement plus important de l'électricité dans bâtiment neuf, le scénario A-SNBC étudie le cas d'une part de marché portée à 90% dans les

Figure 3.7 Cartographie des scénarios de l'étude avec variantes



maisons neuves, et 70 % dans l'habitat collectif, très majoritairement via des pompes à chaleur.

Le cas de figure théorique où le développement des solutions électriques dans le bâtiment neuf se ferait principalement via des radiateurs électriques a également été étudié dans le cadre d'un test de sensibilité (*stress-test*).

3.3.3 Les variantes sur la production d'électricité

La SNBC s'appuie sur la PPE, qui prévoit le développement d'un parc de production d'électricité pouvant faire face aux transformations de la consommation électrique.

Deux variantes permettent de tester les conséquences d'un développement du mix qui serait sous-dimensionné alors que le développement du chauffage électrique se renforcerait.

Dans l'hypothèse de référence de l'étude, le mix électrique considéré correspond à celui prévu par l'application de la PPE. Ce mix de production est dimensionné pour répondre à la consommation d'électricité prévue par la SNBC.

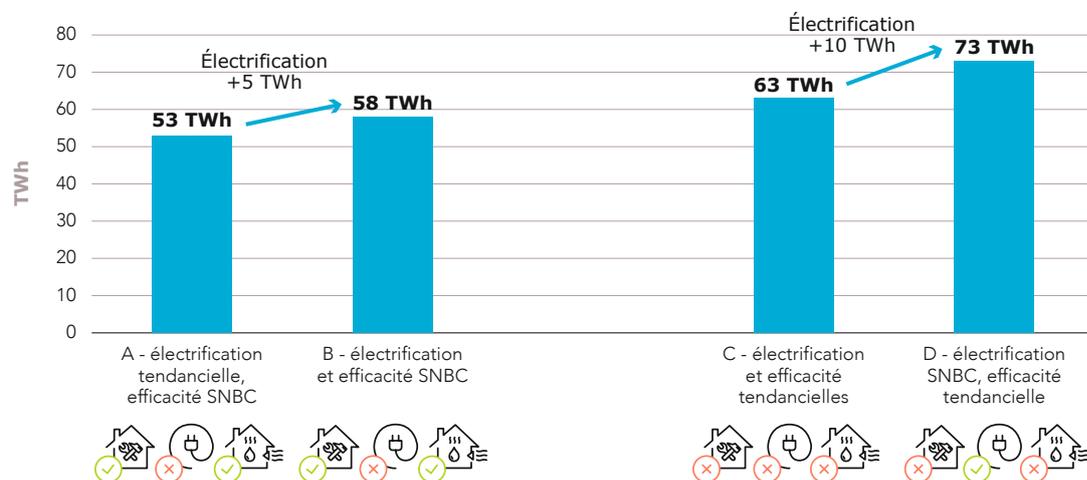
Ce mix de référence a été retenu pour les scénarios A-SNBC 1, A-SNBC 2, C et D dans le cas de référence.

Pour correspondre à l'hypothèse d'électrification tendancielle du chauffage dans le scénario B, un mix de production contrefactuel a également été considéré, en diminuant le volume de production décarbonée du différentiel de consommation entre les scénarios A-SNBC 1 et B, c'est-à-dire 5 TWh. Cela revient à une capacité éolienne réduite de 2,6 GW⁵. Ce mix de production contrefactuel a été appliqué au scénarios B et Contrefactuel.

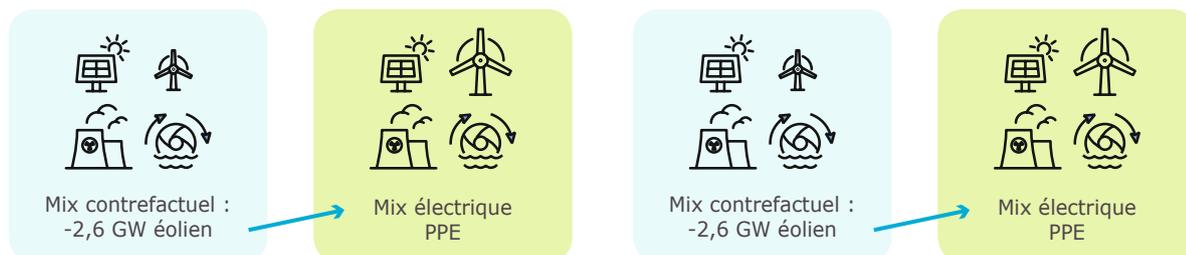
Afin de tester les conséquences d'un retard dans le développement des énergies renouvelables, des variantes des scénarios A-SNBC 1 et D ont également été étudiées. Dans le cas du scénario D associé à un retard de développement des énergies renouvelables, cela revient à tester une situation triplement défavorable pour le système électrique, où la consommation d'électricité augmenterait du fait du développement de solutions électriques moins efficaces, dans des logements dont la performance ne s'améliorerait pas, et par rapport à un parc de production qui évoluerait moins vite que prévu.

5. Pour les études similaires menées par RTE sur l'électrification de la mobilité et de l'hydrogène, les volumes d'électrification avoisinaient la trentaine ou cinquantaine de TWh. Les adaptations de mix électriques à différents niveaux de consommation se faisaient en considérant un mix de capacité décarbonée constitué de nucléaire, éolien et photovoltaïque. Dans le cas de l'étude chauffage, le différentiel de consommation électrique étant de l'ordre de quelques TWh entre les scénarios, l'adaptation du mix entre les deux niveaux de consommation considéré a été fait sur une seule technologie de production décarbonée à la fois, l'éolien.

Figure 3.8 Dimensionnement des variantes sur le mix



Cas de base



Variante avec mix contrefactuel



2018 : état des lieux



Niveau de rénovations d'enveloppe

Isolation : tendance estimée à 400 000 rénovations enveloppe par an avec 30% de gain sur le besoin conventionnel



Pénétration des PAC

Part Joule/PAC : 90%/10%



11 millions

de foyers chauffés à l'électricité
~300 millions de m² tertiaire chauffés à l'électricité

Parc des installations de chauffage



29 millions de résidences principales



Fioul (3,5 M)



Gaz (12 M)



Radiateur électrique (10 M)



Pompe à chaleur (PAC) (1 M)



Bois (1 M)



RCU & autres (1 M)

Effet démographique + décohabitation

Effet démographique + transferts
50 k/an
gaz/fioul → élec



1 milliard de m² tertiaires



Fioul (150 M de m²)



Gaz (450 M de m²)



Radiateur électrique (200 M de m²)



Pompe à chaleur (PAC) (100 M de m²)



RCU & autres (100 M de m²)

400 k rénos/an
Gain de 30% sur le besoin conventionnel
Pas d'inflexion sur les PAC

Impacts sur la consommation



61 TWh
par an de chauffage électrique



99 GW
pointe à 1 chance sur 10



325 TWh
par an de chauffage combustible

Enjeux sociétaux



Confort thermique
/

Hypo. de mix élec.



Mix électrique actuel
(390 TWh nucléaire, 115 TWh EnR, 40 TWh thermique fossile)



Développement des EnR

Émissions de CO₂



~53 MtCO₂
(chauffage combustible bâtiments résidentiels tertiaires)



~20 MtCO₂
(système élec. total France)

Enjeux économ.



~19 Mds€/an
Investissements en installations de chauffage et travaux d'isolation

SCÉNARIO CONTREFACTUEL – Poursuite des tendances actuelles sur l'efficacité des bâtiments, des solutions de chauffage et le chauffage électrique, et atteinte des autres objectifs de la SNBC

Seuls les objectifs SNBC de développement des réseaux de chaleur et de la biomasse sont atteints. *A contrario*, les tendances actuelles sur l'isolation du bâti, l'électrification du chauffage et l'installation de pompes à chaleur se poursuivent sur les 15 prochaines années.

Consistance

Le rythme de rénovations des bâtiments n'augmente pas et demeure situé autour de sa moyenne passée (environ 400 000 par an). La qualité des opérations ne progresse pas non plus et les combinaisons de gestes de rénovation ne sont pas optimisées pour maximiser les économies d'énergie : les effets des opérations de rénovation du bâti sur la consommation énergétique des bâtiments restent ainsi limités (-30% de gain énergétique conventionnel, avant effet rebond, comme aujourd'hui).

Les pompes à chaleur continuent de se développer de manière graduelle dans les bâtiments neufs, mais il n'y a pas de bascule vers les solutions de chauffage électriques (pompes à chaleur ou radiateurs électriques) dans les logements existants, avec un transfert vers l'électricité de 50 000 logements par an.

La part des solutions électriques reste stable, avec autour de 40% des logements équipés. L'essentiel des moyens de chauffage existants est donc renouvelé avec des technologies identiques, à l'exception des réseaux de chaleur et des chaudières à biomasse qui se développent conformément à la SNBC et remplacent 1,5 millions de logements chauffés aujourd'hui au fioul. En l'absence d'électrification, le chauffage au fioul ne disparaît pas complètement et reste présent dans plus d'un million de logements en 2035 et plus de 12 millions de logements sont chauffés au gaz.

Dans le même temps, le mix électrique se développe, mais de façon légèrement moins rapide qu'escompté (mix de production contrefactuel).

Hypothèses sur le chauffage

Efficacité tendancielle

Niveau tendanciel de rénovations d'enveloppe



Isolation : 8 M de logements rénovés avec 30% de gain sur le besoin conventionnel)

Pénétration tendancielle des PAC



Part Joule/PAC : 80%/20%

Électrification tendancielle



~14,4 millions de foyers
~400 millions de m² tertiaire chauffés à l'électricité

Parc des installations de chauffage



34 millions de résidences principales

8 millions de logements isolés (performance -30%)



Fioul (1,5 M)



Gaz (12 M)



Radiateur électrique (11 M)



Pompe à chaleur (PAC) (3,5 M)



Bois (3 M)



RCU & autres (4 M)



1,2 milliard de m² tertiaires



Fioul (110 M de m²)



Gaz (500 M de m²)



Radiateur électrique (150 M de m²)



Pompe à chaleur (PAC) (250 M de m²)



RCU & autres (200 M de m²)

Résultats

Les objectifs de la SNBC sont largement manqués : les émissions dans le secteur du bâtiment (hors électricité) s'établissent à 34 millions de tonnes, contre une cible de 25 millions de tonnes dans la SNBC.

Les émissions diminuent tout de même par rapport à aujourd'hui, notamment car ce scénario ne prolonge pas la tendance actuelle sur toutes les énergies et considère acquise l'accélération des transferts de solutions fossiles vers les réseaux de chaleur ou la biomasse (il ne s'agit donc pas d'un scénario purement tendanciel). Dans une moindre mesure, la poursuite des tendances actuelles sur le développement des solutions électriques et de rénovation du bâti conduisent également à réduire les émissions.

La trajectoire d'évolution du secteur électrique n'est pas perturbée : les émissions diminuent également

en lien avec la décarbonation du mix électrique, en France et surtout en Europe.

La consommation électrique pour le chauffage augmente légèrement sous l'effet de la croissance du parc de bâtiments. Les actions d'isolation sur les bâtiments compensent en partie la hausse mais le rythme de rénovations et leur efficacité restent faibles, ce qui ne permet pas de réduire significativement la consommation électrique associée au chauffage. La pointe électrique est en légère augmentation à l'horizon 2035.

Ce scénario n'implique pas d'investissement supplémentaire par rapport à aujourd'hui, à l'exception de ceux qui portent sur les solutions de chauffage à bois et biomasse (qui sont communs à tous les scénarios). Le niveau de dépense qui lui est associé résulte du remplacement naturel des solutions de chauffage et du rythme tendanciel de rénovation du bâti.

Impacts sur la consommation



63 TWh
par an de chauffage électrique



~100 GW
pointe à 1 chance sur 10



303 TWh
par an de chauffage
combustible

Enjeux sociétaux



**Confort
thermique**
/

Hypo. de mix élec.

**Mix électrique contrefactuel**

-5 TWh d'éolien installé par rapport à la PPE

Émissions de CO₂

Objectif SNBC non atteint
35 MtCO₂ en chauffage combustible
bâtiments (résidentiels-tertiaires)
~11 MtCO₂
(système élec. total France)
(périmètre : chauffage combustible
France et système élec. France)



Trajectoires nationales

Enjeux économ.



19 Mds€/an

coûts annualisés en installations de chauffage,
travaux d'isolation, combustible utilisé

SCÉNARIO A-SNBC 1 – Rénovation et solutions de chauffage bas carbone efficaces

Les objectifs de la SNBC et de la PPE sont intégralement atteints, en matière de progression du chauffage électrique, d'efficacité énergétique (rénovation des logements et efficacité des solutions de chauffage) et de développement des renouvelables.

Consistance

En 15 ans, le parc de bâtiments et de solutions de chauffage évolue graduellement.

Le rythme annuel des rénovations double : 15 millions de logements font l'objet d'une rénovation efficace en 15 ans, point de passage nécessaire pour viser un parc de bâtiments équivalent BBC (bâtiment basse consommation) en 2050. Leur efficacité s'améliore également pour atteindre un gain significatif sur les besoins en chaleur, avant effet rebond). Ceci implique une amélioration de la qualité des travaux et/ou une optimisation des opérations de rénovations, avec par exemple un recours plus important à la rénovation profonde des bâtiments.

La part de l'électricité dans les bâtiments neufs augmente légèrement pour atteindre 25% dans le collectif et 70% en maison individuelle, tandis que de nombreux bâtiments existants, disposant jusque-là d'un chauffage combustible notamment au fioul, s'équipent en chauffage électrique.

La bascule vers des solutions de chauffage bas-carbone s'accélère également dans les bâtiments existants. Les chaudières au fioul des plus de trois millions de logements qui les utilisent encore sont progressivement remplacées, conduisant à sortir de cette énergie dans le secteur résidentiel. En 2035, l'électricité équipe la moitié des bâtiments et le gaz un tiers, mais ce dernier reste dominant en volume d'énergie.

Les solutions de chauffage installées sont efficaces : il s'agit soit de pompes à chaleur, soit de chaudières à biomasse ou à bois, soit de réseaux de chaleur urbains. Parmi les logements historiquement chauffés par des radiateurs électriques, un million sont remplacés par des pompes à chaleur à l'occasion de rénovations énergétiques.

Enfin, les objectifs de la PPE sont atteints avec en particulier un fort développement des capacités de production renouvelable, la fermeture de 14 réacteurs nucléaires et l'électrification de plusieurs usages tels que la mobilité, l'hydrogène ou le chauffage, en vue de réduire les émissions de gaz à effet de serre en France.

Hypothèses sur le chauffage

Efficacité haute SNBC

Niveau haut de rénovations d'enveloppe



Isolation : 15 M de logements et 600 millions de m² tertiaires rénovés avec 50% de gains

Pénétration haute des PAC



Part Joule/PAC : 65%/35%

Électrification haute SNBC



~16,5 millions de foyers
~500 millions de m² tertiaire chauffés à l'électricité

Parc des installations de chauffage



34 millions de résidences principales

15 millions de logements isolés (performance -50%)



Gaz (11 M)



Radiateur électrique (10 M)



Pompe à chaleur (PAC) (6,5 M)



Bois (3 M)



RCU & autres (4 M)



1,2 milliard de m² tertiaires



Fioul (100 M de m²)



Gaz (400 M de m²)



Radiateur électrique (200 M de m²)



Pompe à chaleur (PAC) (300 M de m²)



RCU & autres (200 M de m²)

Résultats

Par rapport à aujourd'hui, les émissions du secteur du bâtiment pour le chauffage diminuent de 28 Mt. Ceci permet d'atteindre les objectifs de réduction des émissions prévus par la SNBC pour le secteur du bâtiment.

Par rapport au scénario contrefactuel, l'économie se situe à 11 MtCO₂ en bilan annuel au niveau français (disparition du fioul dans le résidentiel et réduction du gaz) et à 14 Mt à l'horizon 2035 en bilan européen. Malgré la croissance de certains usages électriques, les émissions du système électrique en France restent très faibles, et la maîtrise de la consommation évite largement la sollicitation de moyens de production d'électricité utilisant des combustibles fossiles en Europe.

La rénovation des logements et la bascule vers des solutions de chauffage plus efficaces permettent une meilleure couverture du besoin thermique pour les consommateurs résidentiels, avec des effets positifs sur la réduction de la précarité énergétique. Il est moins coûteux pour les occupants de chauffer l'ensemble de leur logement à une température donnée, ce qui conduit à un « effet rebond » de la consommation dans les logements plus efficaces et nuance la perspective d'une réduction importante de la consommation énergétique des bâtiments.

Malgré tout, la consommation électrique liée au chauffage diminue légèrement : la meilleure efficacité des

bâtiments et des solutions de chauffage comme la pompe à chaleur font plus que compenser la consommation électrique additionnelle liée à l'électrification du chauffage et à l'amélioration du confort.

L'effet sur la pointe électrique reste maîtrisé : celle-ci est en retrait par rapport au contrefactuel. Dans ces conditions, l'électrification du chauffage électrique ne nécessite pas développer des moyens de flexibilité supplémentaires par rapport à ce qui est prévu par la PPE.

L'accélération du rythme des rénovation et l'augmentation de leur performance impliquent un investissement soutenu par rapport à la trajectoire tendancielle de l'ordre de 12 Md€/an (cas de référence), même si les coûts d'approvisionnement en combustibles et en électricité diminuent pour les ménages.

Sous l'angle économique, les coûts de transition sont de l'ordre de 310 à 430 € par tonne de CO₂ évitée, en intégrant l'effet « rebond » – ils seraient de 160 à 240 €/tCO₂ en le neutralisant.

Les perspectives de réduction du coût de la rénovation (par exemple via l'industrialisation des gestes) et l'arbitrage des habitants dans l'utilisation des gains énergétiques découlant de la rénovation du bâti et des solutions de chauffage (diminution de la facture ou amélioration du confort et réduction de la précarité énergétique) constituent donc les principaux enjeux qui conditionnent l'économie de ce scénario.

Impacts sur la consommation



-5 TWh
par an de chauffage électrique
par rapport au contrefactuel



-3 GW
pointe à 1 chance sur 10
par rapport au contrefactuel



-53 TWh
par an de chauffage
combustible par rapport
au contrefactuel

Enjeux sociétaux



**Confort
thermique**
++

Hypo. de mix élec.



Mix électrique prévu par la PPE

Émissions de CO₂

Objectif SNBC atteint
25 MtCO₂ en combustible

-11 MtCO₂
par rapport au contrefactuel
(périmètre : chauffage combustible
France et système élec. France)



-14 MtCO₂
par rapport au contrefactuel
(périmètre : chauffage combustible
France et système élec.
Europe de l'Ouest y.c. France)

Enjeux économ.



430 €/tCO₂ évitée
Coût d'abattement du CO₂ évité par
rapport au scénario contrefactuel



+12 Mds€/an
Investissements en installations de
chauffage et travaux d'isolation

SCÉNARIO A-SNBC 2 – Nouvelles réglementation environnementales – Rénovation et solutions de chauffage bas carbone efficaces, électrification poussée dans les bâtiments neufs

Les objectifs de la SNBC et de la PPE sont intégralement atteints, en matière d'électrification du chauffage, de développement des renouvelables et d'efficacité énergétique (rénovation des logements et efficacité des solutions de chauffage). Par rapport au scénario SNBC, l'électricité se développe plus fortement dans le bâtiment neuf du fait des nouvelles réglementations environnementales.

Consistance

En 15 ans, le parc de bâtiments et de solution de chauffage évolue graduellement.

Dans les bâtiments existants, des transformations similaires à celles du scénario A-SNBC 1 se produisent : doublement du rythme de rénovations efficaces par rapport au passé, amélioration de leur efficacité (50% en moyenne sur les besoins en chaleur, avant effet rebond).

La spécificité de ce scénario est de prévoir une part très majoritaire de l'électricité dans les bâtiments neufs (70% dans le collectif et 90% en maison individuelle sur 15 ans), au détriment du gaz (qui disparaît de la construction neuve), du bois et des réseaux de chaleur. Ce scénario ne constitue pas une projection des conséquences de la RE2020, dont les textes ne sont pas finalisés : il représente en revanche un test

de sensibilité pour analyser les conséquences d'un développement très majoritaire de l'électricité.

La bascule vers des solutions de chauffage bas-carbone s'accélère également dans les bâtiments existants. Les chaudières au fioul des plus de trois millions de logements qui les utilisent encore sont progressivement remplacées, conduisant à sortir de cette énergie dans le secteur résidentiel. En 2035, l'électricité équipe la moitié des bâtiments et le gaz un tiers, mais ce dernier reste dominant en volume d'énergie.

Enfin, les objectifs de la PPE sont atteints avec en particulier un fort développement des capacités de production renouvelable, la fermeture de 14 réacteurs nucléaires et l'électrification de plusieurs usages tels que la mobilité, l'hydrogène ou le chauffage, en vue de réduire les émissions de gaz à effet de serre en France.

Hypothèses sur le chauffage

Efficacité haute SNBC

Niveau haut de rénovations d'enveloppe



Isolation : 15 M de logements et 600 millions de m² tertiaires rénovés avec 50% de gains

Pénétration haute des PAC



Part Joule/PAC : 60%/40%

Électrification haute SNBC



~19 millions de foyers
~500 millions de m² tertiaire chauffés à l'électricité

Parc des installations de chauffage



34 millions de résidences principales

15 millions de logements isolés (performance -50%)



Gaz
(9,5 M)



Radiateur électrique
(11,5 M)



Pompe à chaleur (PAC)
(7,5 M)



Bois
(3 M)



RCU & autres
(3 M)



1,2 milliard de m² tertiaires



Fioul
(100 M de m²)



Gaz
(400 M de m²)



Radiateur électrique
(200 M de m²)



Pompe à chaleur (PAC)
(300 M de m²)



RCU & autres
(200 M de m²)

Résultats

Ce scénario est celui qui atteint le meilleur bilan en matière de réduction des émissions à l'échelle de la France : les émissions du secteur du bâtiment pour le chauffage diminuent de 29 millions de tonnes. Ce scénario est donc celui qui offre le plus de garantie d'atteindre l'objectif actuel et présente de l'intérêt dans le cadre de la probable révision à la hausse des exigences sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le cadre du Green New Deal européen, conduisant à augmenter l'ambition au point de passage 2030 (de -40 à -55%).

Cette légère accentuation de la diminution n'évalue pas le passage de la RT 2012 à la RE 2020 (celui-ci conduit à un écart plus important sur les émissions car le scénario A-SNBC 1 de l'étude RTE-ADEME intègre déjà une réduction de la part du gaz dans la construction neuve). L'effet différenciant des mesures rendant obligatoire l'utilisation de vecteurs bas-carbone dans la construction neuve croît de manière progressive avec le temps et doit être analysé en intégrant la perspective plus large de la neutralité carbone à horizon 2050.

Sur le plan du bilan européen des émissions, les performances sont très proches de celles du scénario A-SNBC 1.

Sur le plan des indicateurs du système électrique, les indicateurs sont également très proches : une réduction de la pointe de 2 GW par rapport au scénario contre-factuel (contre -3 GW dans le scénario A-SNBC 1), une réduction de la consommation de 3,5 TWh (contre -5 TWh dans A-SNBC 1).

Le scénario d'une électrification très poussée dans la construction neuve majoritairement via des pompes à chaleur ne soulève donc pas d'enjeu particulier de sécurité d'approvisionnement en électricité. Ceci ne fait que traduire le fait que ce sont bien dans les logements existants que se situe l'essentiel de l'enjeu sur les émissions et les impacts sur le système électrique (le parc immobilier se renouvelle lentement et les bâtiments neufs sont beaucoup plus performants que les anciens).

Ces résultats sont atteints dans le cas où le recours à l'électricité se fait via des pompes à chaleur, dans des bâtiments dont les performances réelles sont conformes aux attendus.

D'un point de vue économique, ce scénario est équivalent à celui de la SNBC.

Impacts sur la consommation



-3,5 TWh
par an de chauffage électrique
par rapport au contre-factuel



-2 GW
pointe à 1 chance sur 10
par rapport au contre-factuel



-69 TWh
par an de chauffage
combustible par rapport
au contre-factuel

Enjeux sociétaux



**Confort
thermique**
++

Hypo. de mix élec.



Mix électrique prévu par la PPE

Émissions de CO₂

Objectifs SNBC atteint
24 MtCO₂ en combustible
-12 MtCO₂
par rapport au contre-factuel
(périmètre : chauffage combustible
France et système élec. France)



-14 MtCO₂
par rapport au contre-factuel
(périmètre : chauffage combustible
France et système élec.
Europe de l'Ouest y.c. France)

Enjeux économ.



420 €/tCO₂ évitée
Coût d'abattement du CO₂ évité par
rapport au scénario contre-factuel



+12 Mds€/an
Investissements en installations de
chauffage et travaux d'isolation

SCÉNARIO B – dans le bâtiment et les systèmes de chauffage, sans promotion du chauffage électrique

La rénovation des bâtiments est menée à bien et l'efficacité énergétique se déploie rapidement, mais sans inflexion vers l'électricité s'agissant de la part des différentes solutions de chauffage.

Ce scénario permet d'isoler les effets des politiques publiques associés aux mesures d'efficacité (isolation et efficacité sur le chauffage électrique) et de les distinguer de ceux liés à l'électrification de chauffages utilisant actuellement des combustibles fossiles.

Consistance

Le scénario B est celui d'un effort exclusif sur l'efficacité énergétique, sans accélération sur les transferts entre les différentes énergies (à l'exception du développement du chauffage à bois et des réseaux de chaleur urbains, qui sont réputés acquis dans tous les scénarios).

L'ambition affichée sur la rénovation des bâtiments se traduit dans les faits, et le rythme d'opérations sur le bâti double par rapport à la tendance actuelle. Une quinzaine de millions de logements sont ainsi rénovés d'ici 2035, conformément aux projections de la SNBC, rendant atteignable l'objectif de long terme sur le parc de bâtiment consistant à standard BBC.

Les performances des rénovations et l'isolation des bâtiments neufs s'accroissent également.

Le nombre de ménages, d'entreprises et de collectivités chauffées à l'électricité évolue en revanche lentement, prolongeant le rythme tendanciel d'électrification structurellement associé à la construction neuve, sans inflexion supplémentaire. En 2035, le gaz demeure l'énergie principale de chauffage, en énergie (35%) comme en nombre de logements équipés (34%), et il demeure plus d'un million de logements chauffés au fioul. La nature des solutions électriques déployées a néanmoins en partie évolué : dans le neuf comme dans l'existant, les installations de chauffage électrique correspondent majoritairement à des pompes à chaleur plutôt qu'à des radiateurs à effet Joule, contrairement aux tendances récentes.

Le mix électrique se développe comme dans le scénario Contrefactuel.

Hypothèses sur le chauffage

Efficacité haute SNBC

Niveau haut de rénovations d'enveloppe



Isolation : 15 M de logements et 600 millions de m² tertiaires rénovés avec 50% de gains

Pénétration haute des PAC



Part Joule/PAC : 70%/30%

Électrification tendancielle



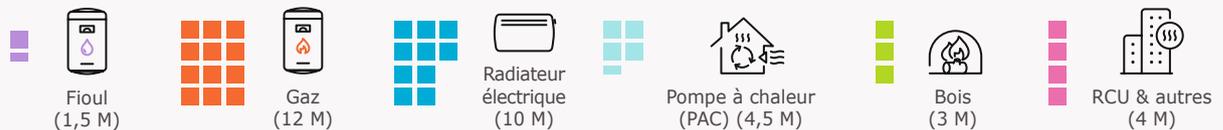
~14,4 millions de foyers
~400 millions de m² tertiaire chauffés à l'électricité

Parc des installations de chauffage



34 millions de résidences principales

15 millions de logements isolés (performance -50%)



1,2 milliard de m² tertiaires



Résultats

L'effort sur l'efficacité des bâtiments et des solutions de chauffage ne suffit pas à atteindre les objectifs de la SNBC : les émissions du secteur du chauffage (hors système électrique) sont de plus de 29 millions de tonnes à horizon 2035. À cet horizon, l'utilisation de combustibles fossiles (gaz, mais aussi fioul) demeure en effet majoritaire dans ce scénario (persistance d'environ 2 millions de chaudières au fioul non converties en pompes à chaleur ou en d'autres solutions bas-carbone), conduisant à s'écarter de la trajectoire nécessaire pour atteindre la neutralité carbone.

Les émissions du système électrique ne diminuent pas pour autant (près de 11 millions de tonnes – un niveau équivalent au scénario de la SNBC).

Évalué au niveau européen, les émissions sont proches du scénario de la SNBC. L'efficacité du bâti comme des systèmes de chauffage permet de réduire la consommation du chauffage électrique en France et d'augmenter les volumes d'électricité disponibles pour l'export, ce qui a finalement pour effet d'éviter la production d'électricité par des moyens carbonés ailleurs en Europe.

S'agissant du système électrique, ce scénario ne présente aucune difficulté particulière. Du fait de l'accélération des mesures d'efficacité énergétique et de l'absence d'inflexion sur le développement des solutions électriques, la consommation d'électricité associée au chauffage est en diminution par rapport

à aujourd'hui, à la fois sur le plan de la consommation annuelle et des appels de puissance à la pointe.

Les montants à engager sont très proches de ceux du scénario de référence A-SNBC 1, avec une augmentation des investissements de onze milliards par an par rapport au scénario contrefactuel, essentiellement tirés par l'effort sur la rénovation du bâti. Les mêmes effets en découlent : réduction des coûts d'approvisionnement en énergie (combustibles et électricité) – mais dans de moindres proportions –, augmentation du confort thermique et réduction de la précarité énergétique, etc.

Néanmoins, les investissements étant très proches de ceux du scénario A-SNBC 1 mais pour un résultat moins favorable sur le plan des émissions, le coût d'abattement « apparent » en 2035 est plus élevé (550 €/tCO₂ évité en tenant compte de l'effet « rebond »).

En neutralisant l'effet rebond, ce coût est réduit à 250 €/tCO₂ évitée, en-deçà de la valeur tutélaire du carbone retenue à cet horizon. Encore plus que dans le scénario A-SNBC 1, ce résultat souligne l'importance (i) des perspectives de réduction du coût de la rénovation et (ii) de l'arbitrage des habitants dans l'utilisation des gains énergétiques découlant de la progression de l'efficacité énergétique, dans l'analyse économique des scénarios comprenant un fort accent sur la rénovation du bâti.

Impacts sur la consommation



-10 TWh
par an de chauffage électrique
par rapport au contrefactuel



-7 GW
pointe à 1 chance sur 10
par rapport au contrefactuel



-36 TWh
par an de chauffage
combustible
par rapport au
contrefactuel

Enjeux sociétaux



**Confort
thermique**
++

Hypo. de mix élec.



Mix électrique prévu par la PPE
-5 TWh d'éolien installé par rapport à la PPE

Émissions de CO₂

Objectif SNBC non atteint
29 MtCO₂ en combustible

-6 MtCO₂
par rapport au contrefactuel
(périmètre : chauffage combustible
France et système élec. France)



-10 MtCO₂
par rapport au contrefactuel
(périmètre : chauffage combustible
France et système élec.
Europe de l'Ouest y.c. France)

Enjeux économ.



550 €/tCO₂ évitée
Coût d'abattement du CO₂ évité par
rapport au scénario contrefactuel



+11 Mds€/an
Investissements en installations
de chauffage et travaux d'isolation

SCÉNARIO C – Effort sur l'électrification seule avec systèmes de chauffage efficaces

L'inflexion vers le chauffage électrique se matérialise par le développement de solutions efficaces (pompes à chaleur électriques). En revanche, les efforts sur les performances des bâtiments et notamment l'accélération de la rénovation des bâtiments existants ne parviennent pas à se concrétiser. Ce scénario permet de tester une configuration intermédiaire dans laquelle l'objectif d'électrification est rempli et les ambitions d'efficacité énergétique partiellement atteintes (efficacité des systèmes de chauffage mais pas des bâtiments).

Consistance

Dans ce scénario, la transformation des bâtiments s'accélère sur le plan des systèmes de chauffage avec le développement des solutions bas-carbone tel que prévu par la SNBC (pompes à chaleur, bois et réseaux de chaleur urbains) dans le neuf et dans l'existant, en remplacement des solutions utilisant des énergies fossiles.

En revanche, malgré les ambitions affichées des pouvoirs publics, les objectifs d'accélération de la rénovation des bâtiments existants ne sont pas atteints et les tendances observées sur les années passées (en nombre de rénovations et en performance moyenne des rénovations) se prolongent sur les quinze prochaines années.

Une telle situation résulte d'une difficulté persistante à favoriser la rénovation des bâtiments existants malgré les incitations financières et les dispositifs de soutien et d'accompagnement mis en place par les pouvoirs publics : par exemple pour des raisons d'acceptabilité (difficulté à imposer des travaux lourds

dans des logements occupés), de capacité de financement limitée des ménages ou encore de difficulté à industrialiser la rénovation et à développer un écosystème d'artisans et de compétences suffisant pour tenir la trajectoire de rénovations.

À l'inverse, le développement des systèmes de chauffage bas-carbone et efficaces, notamment les pompes à chaleur, présente moins de difficultés et parvient à accélérer. Dans le neuf, les paramètres de la réglementation environnementale conduisent à privilégier fortement l'installation de ces solutions. Dans l'existant, les ménages et les entreprises sont incités (via des dispositifs de soutien financier, des normes conduisant à exclure certaines solutions de chauffe, etc.) à installer des systèmes efficaces et bas-carbone à l'occasion du renouvellement de leur installation de chauffage, qui doit intervenir dans tous les cas sur des constantes de temps de l'ordre de 15-20 ans.

Hypothèses sur le chauffage

Efficacité intermédiaire

Niveau tendanciel de rénovations d'enveloppe



Isolation : 8 M de logements et 100 millions de m² tertiaires rénovés avec 30% de gains

Pénétration haute des PAC



Part Joule/PAC : 65%/35%

Électrification haute SNBC



~16,5 millions de foyers
~500 millions de m² tertiaire chauffés à l'électricité

Parc des installations de chauffage



34 millions de résidences principales

8 millions de logements isolés (performance -30% ciblés sur maisons anciennes)



Gaz (11 M)



Radiateur électrique (10 M)



Pompe à chaleur (PAC) (6,5 M)



Bois (3 M)



RCU & autres (4 M)



1,2 milliard de m² tertiaires



Fioul (100 M de m²)



Gaz (400 M de m²)



Radiateur électrique (200 M de m²)



Pompe à chaleur (PAC) (300 M de m²)



RCU & autres (200 M de m²)

Résultats

Ce scénario conduit à une nette réduction des émissions de CO₂ du chauffage et du secteur des bâtiments mais qui n'est pas suffisante pour suivre la trajectoire de la SNBC. Du fait de l'absence d'accélération sur la rénovation des bâtiments existants, et notamment ceux chauffés au gaz, les émissions restent de 6 millions de tonnes par an supérieures à l'objectif 2035 de la SNBC.

En lien avec le déploiement des pompes à chaleur et en l'absence d'inflexion sur les performances des bâtiments, la consommation électrique du chauffage apparaît légèrement plus importante que dans le scénario contrefactuel (+3 TWh). La couverture du besoin en volume annuel ne présente néanmoins aucune difficulté étant donné les orientations de la PPE sur le développement de la production d'électricité décarbonée en France. La pointe électrique

ressort également en légère hausse (+2,5 GW), conduisant à une vigilance sur les besoins de flexibilité, mais qui ne pose pas en tant que telle de difficulté à un horizon de quinze ans.

Enfin, ce scénario présente une très bonne efficacité sous l'angle économique. Les investissements dans les pompes à chaleur sont certes plus coûteux que pour des solutions traditionnelles (chaudières gaz, radiateurs électriques...) mais apparaissent pertinents à long terme pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂. Dans ce scénario, le coût d'abattement du CO₂ ressort à environ 100 €/tCO₂ (avec prise en compte de l'effet rebond) : il s'agit d'un niveau nettement inférieur à la valeur tutélaire du carbone à l'horizon 2035 et à la valeur du coût d'abattement dans les autres scénarios étudiés.

Impacts sur la consommation



+3 TWh
par an de chauffage électrique
par rapport au contrefactuel



+2,5 GW
pointe à 1 chance sur 10
par rapport au contrefactuel



-20 TWh
par an de chauffage
combustible par rapport
au contrefactuel

Enjeux sociétaux



**Confort
thermique
+**

Hypo. de mix élec.



Mix électrique prévu par la PPE

Émissions de CO₂

Objectif SNBC non atteint

30 MtCO₂ en combustible

-5 MtCO₂
par rapport au contrefactuel

(périmètre : chauffage combustible
France et système élec. France)



-5,5 MtCO₂
par rapport au contrefactuel
(périmètre : chauffage combustible
France et système élec.
Europe de l'Ouest y.c. France)

Enjeux économ.

**100 €/tCO₂ évitée**

Coût d'abattement du CO₂ évité par rapport
au scénario contrefactuel
Valable uniquement pour ce niveau de
développement des PAC

**+1 Mds€/an**

Investissements en installations de
chauffage et travaux d'isolation

SCÉNARIO D – Électrification du chauffage sans effort sur l'efficacité

L'inflexion vers le chauffage électrique se matérialise dans le cadre de la bascule vers les vecteurs décarbonés, mais ni la politique de rénovation des logements, ni les mesures de renforcement de l'efficacité des solutions de chauffage ne se traduisent dans les faits. Ce scénario fait office de stress-test pour le système électrique, avec le développement des radiateurs électriques dans des logements mal isolés.

Consistance

Le scénario D teste une situation volontairement contraignante pour le système électrique.

Sur le plan de la performance des bâtiments existants : malgré les annonces sur le plan de rénovation massive des bâtiments, le rythme de rénovation et leur performance demeurent stables par rapport à aujourd'hui.

Parallèlement, l'adoption de nouvelles réglementations environnementales dans le bâtiment neuf perçues comme favorables à l'électricité conduit à un effet d'entraînement sur la rénovation des bâtiments anciens et se traduit par le développement des radiateurs électriques. Ceux-ci constituent en effet un investissement généralement bon marché comparé aux autres solutions de chauffage. Concrètement, le parc de résidences chauffé par des radiateurs électriques, s'établit dans ce scénario à 13 millions en

2035, contre 11 aujourd'hui et 10 dans le scénario A-SNBC 1.

Dans le même temps, les chaudières fioul disparaissent, le parc de chaudière à gaz se rétracte, tandis que les réseaux de chaleur ou l'utilisation de la biomasse en substitution des combustibles fossiles se développent : le scénario D est ainsi l'un des scénarios où le parc de chauffage se transforme le plus.

Le parc électrique se développe selon le rythme prévu par la PPE.

Hypothèses sur le chauffage

Efficacité tendancielle

Niveau tendanciel de rénovations d'enveloppe



Isolation : 8 M de logements et 100 millions de m² tertiaires rénovés avec 30% de gains

Pénétration tendancielle des PAC



Part Joule/PAC : 75%/25%

Électrification haute SNBC



~16,5 millions de foyers
~500 millions de m² tertiaire chauffés à l'électricité

Parc des installations de chauffage



34 millions de résidences principales

8 millions de logements isolés (performance -30%)



Gaz (11 M)



Radiateur électrique (12,5 M)



Pompe à chaleur (PAC) (4 M)



Bois (3 M)



RCU & autres (4 M)



1,2 milliard de m² tertiaires



Fioul (100 M de m²)



Gaz (400 M de m²)



Radiateur électrique (200 M de m²)



Pompe à chaleur (PAC) (300 M de m²)



RCU & autres (200 M de m²)

Résultats

Le scénario D conduit à une réduction des émissions de 22 millions de tonnes par an en France par rapport à aujourd'hui dans le secteur du bâtiment, hors électricité. Ce n'est pas suffisant pour atteindre les objectifs de la SNBC (surcroît de 6 millions de tonnes par an).

Le développement du chauffage électrique dans le scénario D, même avec des radiateurs électriques, permet bien de réduire significativement les émissions au niveau français, en s'appuyant sur un parc de production d'électricité très largement décarboné.

Cet effet baissier demeure attesté en évaluant le bilan au niveau européen par rapport au scénario contrefactuel, même si la performance est alors largement amoindrie par rapport au scénario A-SNBC 1 (-3 MtCO₂/an dans D, contre -14 MtCO₂/an dans A-SNBC 1).

Contrairement à une opinion répandue, cette différence n'est pas majoritairement due à des imports français lors des situations de pointe, qui solliciteraient des centrales thermiques dans les pays voisins, mais surtout (pour plus de 60%) à de moindres exports de la France vers ses voisins : cela fait ressortir l'importante contribution de la France à la réduction des émissions dans les pays voisins tant que son parc électrique, à dominante nucléaire et renouvelables, est fortement exportateur.

Le scénario D est clairement plus contraignant pour la gestion du système électrique. La consommation

d'électricité pour le chauffage augmente de 10 TWh comparé au scénario contrefactuel. Les pointes hivernales (à une chance sur 10) seraient également plus importantes (+6 GW par rapport au scénario contrefactuel). Le mix de production d'électricité prévu par la PPE permet toujours de couvrir largement le besoin en moyenne, mais des flexibilités supplémentaires sont nécessaires pour assurer l'équilibre en puissance du système et respecter le critère de sécurité d'approvisionnement.

Puisqu'il prévoit un moindre investissement dans la rénovation des bâtiments, le scénario D est moins coûteux que les scénarios les plus ambitieux, mais moins performants sur les indicateurs relatifs au confort ou la lutte contre la précarité énergétique. Les investissements sont analogues à ceux du scénario contrefactuel, soit inférieurs de 12 Md€/an à ceux du scénario d'atteinte des objectifs de la SNBC.

Hors des effets en matière de confort ou de précarité énergétique, le scénario présente un coût d'abattement du carbone très performant, mais pour une économie de CO₂ faible. La répartition entre coûts fixes et coûts variables évolue également : ce scénario prévoyant un moindre développement des pompes à chaleur, il implique un investissement initial moindre, pour la collectivité comme pour les propriétaires ou bailleurs, au détriment de coûts plus élevés sur la durée de vie des équipements.

Impacts sur la consommation



+10 TWh
par an de chauffage électrique
par rapport au contrefactuel



+6 GW
pointe à 1 chance sur 10
par rapport au contrefactuel



-20 TWh
par an de chauffage
combustible
par rapport au
contrefactuel

Enjeux sociétaux



**Confort
thermique**
/

Hypo. de mix élec.



Mix électrique prévu par la PPE

Émissions de CO₂

Objectif SNBC non atteint
30 MtCO₂ en combustible

-5 MtCO₂
par rapport au contrefactuel
(périmètre : chauffage combustible
France et système élec. France)



-3 MtCO₂
par rapport au contrefactuel
(périmètre : chauffage combustible
France et système élec.
Europe de l'Ouest y.c. France)

Enjeux économ.



Abattement de CO₂ faibles.
Pas d'abattement dès lors que
l'électrification sous cette forme
se poursuivrait.



/
Investissements en installations de
chauffage et travaux d'isolation

SCÉNARIO Ciblage des rénovations sur les passoires thermiques

L'objectif de la SNBC sur les réductions d'émission est recherché en priorisant la rénovation sur les « passoires énergétiques », c'est-à-dire les bâtiments présentant les moins bonnes performances énergétiques, et en mettant l'accent sur l'amélioration de la performance des opérations. La bascule vers des solutions de chauffage bas-carbone est également encouragée.

Consistance

Afin de traiter directement les gisements d'économies d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre les plus évidents, les logements les plus énergivores font l'objet d'un traitement prioritaire dans le cadre de la rénovation. Dans ce scénario, ce sont les maisons individuelles construites avant 1975 qui sont traitées en priorité (mais d'autres types de paramétrage peuvent se concevoir pour le ciblage).

Dans ce scénario, le rythme annuel des rénovations n'augmente pas par rapport à aujourd'hui. Ce sont néanmoins des rénovations d'ampleur qui traitent l'ensemble de l'enveloppe. Ceci implique une amélioration de la qualité des travaux et/ou une optimisation des opérations de rénovations, avec par exemple un recours plus important à la rénovation complète de certains bâtiments.

En parallèle, la bascule vers des solutions de chauffage bas-carbone s'accélère dans les bâtiments existants,

dans les mêmes proportions que dans le scénario A-SNBC 1 (disparition du fioul dans le secteur résidentiel, progression régulière de l'électricité qui équipe en 2035 la moitié des bâtiments et le gaz un tiers – ce dernier restant dominant en volume d'énergie –, prépondérance des pompes à chaleur dans les nouvelles solutions électriques).

Hypothèses sur le chauffage

Efficacité intermédiaire

Niveau tendanciel de rénovations d'enveloppe



Isolation : 8 M de logements et 100 millions de m² tertiaires rénovés de façon ciblée, avec 50% de gains

Pénétration haute des PAC



Part Joule/PAC : 65%/35%

Électrification haute SNBC



~16,5 millions de foyers
~500 millions de m² tertiaire chauffés à l'électricité

Parc des installations de chauffage



34 millions de résidences principales

8 millions de logements isolés (performance -50% ciblés sur maisons anciennes)



Gaz (11 M)



Radiateur électrique (10 M)



Pompe à chaleur (PAC) (6,5 M)



Bois (3 M)



RCU & autres (4 M)



1,2 milliard de m² tertiaires



Fioul (100 M de m²)



Gaz (400 M de m²)



Radiateur électrique (200 M de m²)



Pompe à chaleur (PAC) (300 M de m²)



RCU & autres (200 M de m²)

Résultats

Les objectifs de la SNBC sont atteints, avec un investissement d'ensemble plus faible car ciblé sur les meilleurs gisements.

Par rapport à aujourd'hui, les émissions dans le secteur du bâtiment diminuent de 28 millions de tonnes, en ligne avec l'objectif. En établissant le bilan à l'échelle européenne, les performances sur les émissions de CO₂ (-12 MtCO₂/an par rapport au contrefactuel) demeurent proches du scénario A-SNBC 1 (-14 MtCO₂/an).

Les indicateurs sur la consommation électrique (en moyenne annuelle et en pointe) sont stables par rapport à aujourd'hui, légèrement supérieurs au scénario central de la SNBC (+2 TWh, +2 GW), sans pour autant occasionner de risque sur la sécurité d'approvisionnement.

Le coût du scénario est largement plus faible car moitié moins de logements seraient rénovés. La rénovation ciblée des «passoires thermiques» apparaît

ainsi comme l'une des actions dont le rendement climatique est le plus important et présente un intérêt économique marqué. Même en tenant compte de l'effet rebond, son coût d'abattement ressort à 290 €/tCO₂. Il serait inférieur à 100 €/tCO₂ sans prendre en compte l'effet rebond.

Ce type de ciblage des rénovations sur les logements les plus énergivores apparaît ainsi un choix économique efficace du point de vue de la collectivité, alors qu'il permet également de réduire la précarité énergétique et présente d'autres externalités positives. Même si les soutiens publics sont bonifiés pour ce type de travaux, la principale difficulté de mise en œuvre de cette politique publique est de pouvoir inciter à la réalisation de ces travaux, notamment pour les propriétaires n'ayant pas de trésorerie ou un accès au crédit difficile.

Impacts sur la consommation



-3 TWh
par an de chauffage électrique
par rapport au contrefactuel



-1 GW
pointe à 1 chance sur 10
par rapport au contrefactuel



-46 TWh
par an de chauffage
combustible par rapport
au contrefactuel

Enjeux sociétaux



**Confort
thermique**
++

Hypo. de mix élec.



Mix électrique prévu par la PPE

Émissions de CO₂

Objectifs SNBC atteint
25 MtCO₂ en combustible
-11 MtCO₂
par rapport au contrefactuel
(périmètre : chauffage combustible
France et système élec. France)



-12 MtCO₂
par rapport au contrefactuel
(périmètre : chauffage combustible
France et système élec.
Europe de l'Ouest y.c. France)

Enjeux économ.



290 €/tCO₂ évitée
Coût d'abattement du CO₂ évité par
rapport au scénario contrefactuel



+6,5 Mds€/an
Investissements en installations de
chauffage et travaux d'isolation

Annexe : Détail sur la répartition PAC-Joule

Le rythme tendanciel de développement du chauffage électrique (qui est prolongé à l'identique dans les scénarios contrefactuel et B) conduit à trois millions d'équivalents-logements supplémentaires chauffés à l'électricité en 2035 par rapport à aujourd'hui :

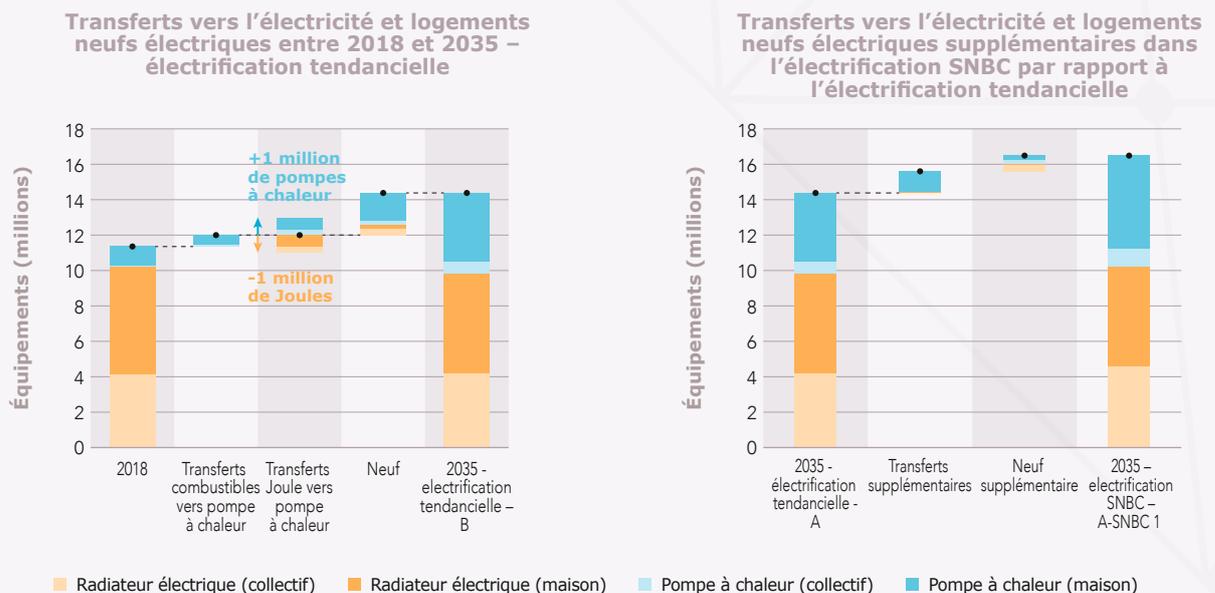
- ▶ un demi-million sont dus au remplacement de chauffages à combustibles fossiles vers des solutions électriques efficaces, comme les pompes à chaleur, dans des logements existants,
- ▶ deux millions et demi à la construction de logements neufs chauffés à l'électricité, utilisant principalement des pompes à chaleur mais pas uniquement (une légère proportion de radiateurs électriques est prise en compte, notamment en logement collectif, dans les logements les plus petits et avec des besoins thermiques les plus faibles).

Les scénarios reprenant les trajectoires de la SNBC (correspondant aux scénarios A-SNBC 1 et D) conduisent à développer davantage le chauffage électrique :

- ▶ un peu plus d'un million de chauffages électriques dans l'existant, issu des transferts de chauffages à base de combustibles fossiles vers des pompes à chaleur,
- ▶ près d'un million de chauffages électriques supplémentaires dans le neuf, réparti pour moitié entre pompe à chaleur et radiateurs électriques, ces derniers étant installés en logements collectifs (dans les logements les plus petits et avec des besoins thermiques les plus faibles).

De plus, dans le contexte d'efficacité énergétique de la SNBC commun aux scénarios A-SNBC 1 et B, un million de radiateurs électriques sont remplacés

Figure 3.9 Évolution du parc de chauffages électriques dans les scénarios d'électrification tendancielle et haute SNBC, dans le contexte d'efficacité énergétique SNBC



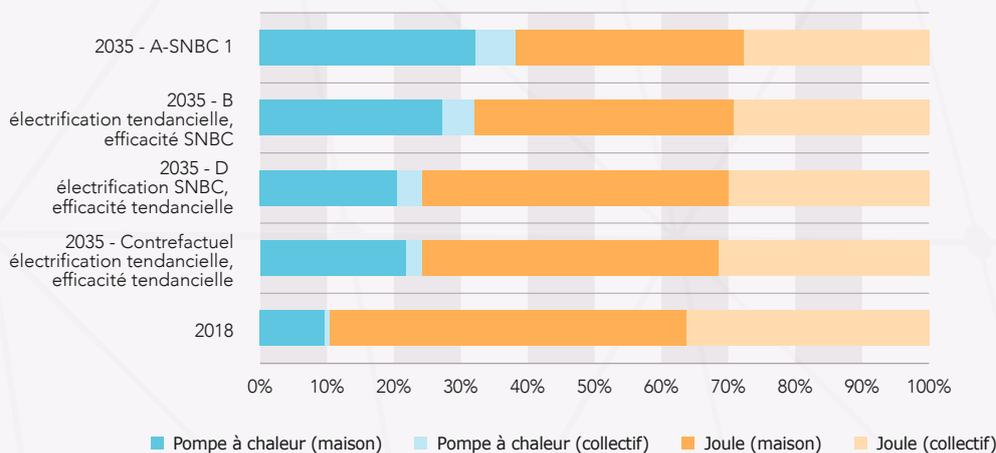
par des pompes à chaleur au titre du renforcement de l'efficacité des solutions de chauffe, augmentant encore la part de pompes à chaleur dans ces scénarios, à même nombre de logements électriques.

Les pompes à chaleur équipent aujourd'hui 4% des résidences principales, soit 7% des logements chauffés à l'électricité. Dans le contexte où l'efficacité énergétique est tendancielle, c'est-à-dire où le rythme des travaux d'isolation comme des installations de pompes à chaleur reste le même qu'aujourd'hui, la proportion de pompes à chaleur évolue de façon quasiment similaire pour le niveau d'électrification tendancielle (scénario contrefactuel) comme pour le niveau d'électrification SNBC (scénario D). Elle atteint environ 10% du parc de logements total, c'est-à-dire un quart du parc des chauffages électriques.

Dans le contexte d'efficacité énergétique renforcée (SNBC), où les objectifs sont atteints en matière de rénovation du bâti et d'efficacité sur les systèmes (i.e. pénétration des pompes à chaleur), le scénario d'électrification tendancielle B voit la proportion de PAC atteindre 30% du parc de chauffages électriques. **Dans le scénario de référence A-SNBC 1, la proportion de pompes à chaleur, tirée par une plus forte électrification, atteint 40% du parc de chauffages électriques, soit près de 20% du parc de logements total.**

Si la plupart des variantes présentent un parc de chauffages identique au scénario A-SNBC 1 ou D⁶, les variantes à électrification accrue dans le neuf explorent les cas limites de la pénétration de radiateurs électriques ou de la pompe à chaleur. Dans le

Figure 3.10 Proportion de radiateurs électriques et de pompes à chaleur dans le parc résidentiel chauffé à l'électricité en 2035, par scénario



6. Toutes les variantes construites autour du scénario central A-SNBC 1 portant sur des questions d'efficacité : COP dégradé, prise en compte d'un appoint Joule, rénovations d'enveloppe ciblées ou non atteintes, présentent le même parc de chauffages que le scénario A-SNBC 1. Seule la variante de A-SNBC 1 à efficacité intermédiaire, avec objectifs de pénétration des pompes à chaleur non atteint, possède un parc de chauffage identique au scénario D : la différence avec le scénario D porte sur le niveau d'isolation des bâtiments, l'objectif de rénovation d'enveloppe ayant été atteint sur l'ensemble du parc résidentiel dans cette variante.

Détail sur la répartition PAC-Joule (suite)

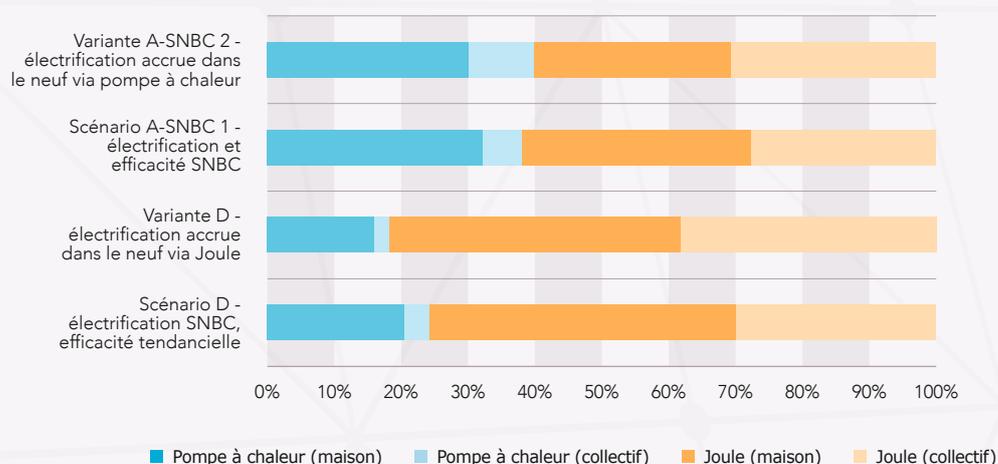
cas d'une telle électrification avec forte proportion de radiateurs électriques (variante «Joule +»), la progression tendancielle de la pompe à chaleur lui fait atteindre 10% du parc total en 2035, à l'identique des scénarios contrefactuel et D. Le cas d'une électrification tout aussi poussée dans le neuf, mais avec forte proportion de pompe à chaleur (variante «pompe à chaleur +»), aboutirait à une part de 22% du parc total 2035, soit légèrement plus haute que pour le scénario A-SNBC 1. Ce focus sur le neuf permet ainsi de rendre compte que l'enjeu de la pénétration des pompes à chaleur dans le parc de bâtiment se joue plus fortement sur la transformation du parc existant, via le remplacement d'installations anciennes comme les chaudières fioul.

Du côté du secteur tertiaire, les pompes à chaleur équipent aujourd'hui 7,5% des surfaces soit un quart des surfaces chauffées à l'électricité. La tendance récente est à une forte pénétration des pompes à chaleur, qui équipent la très grande majorité des

surfaces neuves à l'électricité. Dans un scénario tendanciel en matière d'électrification et de la rénovation des surfaces tertiaires (scénario contrefactuel), les pompes à chaleur connaîtraient donc déjà une forte progression, atteignant autour de 15% des surfaces totales (soit 40% des surfaces électriques). Une électrification au niveau de la SNBC mais sans l'atteinte des objectifs d'efficacité (scénario D) amènerait des parts légèrement plus élevées, de l'ordre de 20% de pompes à chaleur sur le total des surfaces (soit 45% dans les surfaces électriques).

Dans le scénario A-SNBC 1, la poursuite d'une forte pénétration des pompes à chaleur à la fois dans le neuf et en rénovation dans l'existant porterait à 30% des surfaces totales et 60% des surfaces électriques en 2035. En régime tendanciel sur l'électrification (scénario B), la part de pompes à chaleur monterait à 25% du parc total en 2035, soit environ 55% des surfaces électrifiées à cet horizon.

Figure 3.11 Parc radiateurs électriques et pompes à chaleur dans le parc résidentiel chauffé à l'électricité en 2035, pour les variantes à électrification poussée dans le neuf



4

LE FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE

LE FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE

Synthèse

Dans le scénario de la SNBC, la consommation électrique et la pointe électrique sont stables ou en légère baisse à l'horizon 2035

- 1) Le scénario central de ce rapport (A-SNBC 1) conduit à une stabilité, voire une légère baisse, à moyen terme (sur 15 ans) de la consommation d'électricité dédiée au chauffage dans les logements et les bureaux (-3 TWh par rapport à aujourd'hui, -5 TWh par rapport au scénario contrefactuel).
 - 2) Ce résultat central se retrouve sur l'évolution de la pointe électrique : combiner le remplacement de sources d'énergie carbonées (fioul, gaz naturel) par des sources ou vecteurs d'énergie décarbonés (pompes à chaleur électriques, chauffage urbain ou biomasse) à la rénovation énergétique des bâtiments ne conduit pas à faire augmenter les pointes électriques. Dans le scénario A-SNBC 1, la pointe serait même légèrement plus basse (-3 GW) que dans le scénario contrefactuel, conduisant à améliorer la sécurité d'approvisionnement.
 - 3) Dans ces circonstances, le scénario de la SNBC ne pose pas de difficulté en matière de sécurité d'approvisionnement :
 - a. La trajectoire de développement du parc de production d'électricité bas-carbone prévue par la PPE suffit largement à couvrir les besoins supplémentaires qui résultent des transferts d'usage nécessaires pour décarboner l'économie (mobilité électrique pour le transport, hydrogène bas carbone pour l'industrie et la mobilité lourde, chauffage électrique pour le bâtiment).
 - b. La sécurité d'approvisionnement serait assurée dans le cadrage de la PPE (au sens du critère réglementaire).
 - 4) Cette relative stabilité découle de deux effets opposés, qui entraînent des variations elles-mêmes de faible intensité sur la consommation d'électricité :
 - a. La rénovation des bâtiments a un effet baissier mais modéré sur la consommation d'électricité. Cela s'explique principalement par la prise en
- compte de «l'effet rebond» : une partie des gains associés à la rénovation et l'adoption de solutions de chauffage efficace se traduit par un accroissement du confort thermique pour les occupants des logements concernés (concrètement, une augmentation de la température). Ainsi, la consommation d'énergie diminue bien, mais moins qu'escompté.
- b. L'usage préférentiel de l'électricité dans le bâtiment neuf a une influence minime sur la consommation, les normes de construction actuelles devenant plus strictes. De plus, l'électrification dans les logements et bureaux anciens conduit à augmenter la consommation électrique mais dans des proportions restreintes si elle repose majoritairement sur les pompes à chaleur comme le prévoit la SNBC.

Développer l'efficacité énergétique via une meilleure performance du bâti et des solutions de chauffages performantes sur le plan énergétique permet d'accompagner le développement du chauffage électrique parc et de maîtriser les pointes de consommation.

- 5) Les analyses menées dans le rapport permettent de distinguer trois familles de scénarios selon leur impact sur la consommation d'électricité annuelle et lors des pointes :
 - a. Les scénarios où les objectifs de la SNBC sur l'efficacité énergétique sont atteints (scénario A-SNBC 1, A-SNBC 2, B, variante ciblage des passoires thermiques) : ils conduisent à réduire la consommation d'électricité associée au chauffage et la pointe électrique ;
 - b. Le scénario contrefactuel (poursuite des tendances actuelles) et le scénario C (développement de solutions électriques efficaces sans atteinte des objectifs sur la rénovation) : ils conduisent à une consommation et une pointe électrique en augmentation modérée ;
 - c. Les scénarios où l'électrification s'accélère mais où les objectifs d'efficacité ne sont pas atteints (scénario D et ses variantes) : ils engendrent une augmentation plus importante de la consommation d'électricité (+10 à +15 TWh par an par

rapport au scénario contrefactuel, et selon les variantes) et des pointes hivernales (plus de 6 GW par rapport au scénario contrefactuel).

- 6) L'électrification du chauffage envisagée par la SNBC ne soulève donc pas de difficulté sur le système électrique, sauf dans le cas où elle ne s'accompagne d'aucun effort de rénovation sur le bâti et qu'elle passe par des solutions peu performantes (radiateurs électriques).

Le développement de l'électricité dans le bâtiment neuf ne pose aucune difficulté. Dans l'ancien, la performance des rénovations, leur ciblage sur des gisements les plus importants, et son accompagnement par des solutions de chauffage efficaces, sont les facteurs les plus importants pour maîtriser la consommation

- 7) Le développement des solutions électriques dans les bâtiments neufs n'aura qu'un impact modéré, à moyen terme, sur la consommation d'électricité et la pointe. D'une part, le parc évolue lentement et les solutions privilégiées dans le neuf ne portent pas uniquement sur les pompes à chaleur électriques mais également sur le bois et les réseaux de chaleur. D'autre part, les logements neufs sont déjà astreints à des exigences très fortes en matière d'efficacité du bâti. Dès lors, la sensibilité à une électrification très majoritaire par pompes à chaleur ou même par radiateurs électriques est comprise entre 1,5 et 4 TWh selon les variantes – des volumes très faibles sur une durée de 15 années (moins de 1% de la consommation électrique totale).
- 8) Les enjeux sont plus importants sur les bâtiments existants. Il est donc souhaitable que les réglementations « bâtiments » orientent vers les solutions bas-carbone en y associant une bonne isolation du bâti et des équipements de chauffage efficaces pour privilégier le développement des pompes à chaleur.
- 9) Parmi les efforts d'efficacité énergétique, les simulations montrent que la rénovation des bâtiments et l'électrification par des solutions de chauffage efficaces (pompes à chaleur plutôt que chauffage Joule) ont une importance similaire, évaluée chacune de l'ordre de 5 TWh. Il s'agit des deux mesures les plus efficaces pour modérer la consommation et la pointe électrique.
- 10) L'analyse montre également qu'en conservant le même rythme de rénovations qu'aujourd'hui, mais en améliorant leur efficacité et en les ciblant sur les logements les plus énergivores, la consommation et la pointe électriques resteraient proches

des niveaux atteints dans le scénario central de la SNBC (surcroît +2 TWh et +2 GW), sans aucune conséquence sur la sécurité d'approvisionnement.

- 11) Les nombreuses variantes de l'étude illustrent les conséquences respectives d'une moindre performance des pompes à chaleur (en supposant un coefficient dégradé) ou d'un dimensionnement sous-optimal par rapport aux besoins énergétiques des logements (conduisant à recourir à des solutions de radiateurs électriques en appoint). Ces paramètres devront être surveillés, mais leur prise en compte ne modifie pas le diagnostic général.

Encourager la flexibilité de la consommation alors que les usages électriques sont amenés à se développer fortement constitue une politique sans regret

- 12) Le chauffage est un usage thermosensible. Il n'est pas l'origine de la « pointe du soir » observée chaque jour de semaine, en hiver, aux alentours de 19h. En revanche, il constitue le principal facteur pour expliquer le niveau moyen de consommation durant une journée donnée l'hiver.
- 13) Dans le scénario central de la SNBC, l'évolution des pointes de consommation ne pose pas de difficulté. Pour autant, du fait du développement de nombreux usages électriques, encourager la flexibilité des usages rend le système électrique plus robuste à différents aléas et concourt par ce biais à accompagner l'atteinte des objectifs climatiques.
- 14) Plusieurs moyens d'accompagner la croissance des usages thermosensibles sont considérés dans l'étude :
- a. Le pilotage de la recharge des véhicules électriques, qui est susceptible d'offrir jusqu'à 8 GW de flexibilité supplémentaires à condition d'être généralisé massivement
 - b. Le pilotage du chauffage électrique, soit par le biais d'effacements courts « cascade-cycliques » en roulement sur un parc – mais son effet agrégé est limité – soit par des effacements longs. En intégrant les effets de reports, un effet positif sur les marges de l'ordre de 2 GW sur les marges apparaît atteignable.
 - c. Le développement de pompes à chaleur hybrides électricité/gaz. L'étude montre que la pointe pourrait être réduite de l'ordre de 1,4 GW par million de pompes à chaleur hybrides installées en substitution des pompes à chaleur électriques, par rapport au scénario central de la SNBC.

4.1 L'étude vise à éclairer le débat public sur l'effet de l'électrification du chauffage sur le système électrique

La perspective dressée par la SNBC pour réduire les émissions du secteur du bâtiment – utiliser davantage des solutions de chauffe électriques efficaces, comme les pompes à chaleur, dans des logements rénovés – a suscité et suscite toujours un grand nombre de commentaires dans le débat public. Ceux-ci renvoient souvent aux conséquences du recours au chauffage électrique sur le fonctionnement du système électrique. Pour certains, le recours à l'électricité s'impose naturellement car il s'agit d'une énergie déjà très largement décarbonnée. D'autres mettent en avant le phénomène des pointes de consommation, en arguant de difficultés techniques ou environnementales qui y seraient associées.

Le premier volet de l'étude vise à répondre à ces interrogations en quantifiant l'impact des différents scénarios sur le système électrique.

Il conduit d'emblée à distinguer deux types d'effet possibles : en *énergie* et en *puissance*.

Les analyses en énergie consistent à évaluer, à un horizon de 10-15 ans, la consommation électrique annuelle associée au secteur du bâtiment

en général, et au chauffage en particulier. Il s'agit alors de quantifier l'effet spécifique au développement du chauffage électrique dans les différents scénarios, en tenant compte des autres évolutions contextuelles. Celles-ci intègrent le développement d'autres usages électriques selon les trajectoires de référence prévues par la SNBC (la mobilité électrique, évaluée par RTE à environ 40 TWh¹ pour 15 millions de véhicules légers, ou la production d'hydrogène par électrolyse, pour environ 30 TWh²) et les perspectives les plus à jour de développement de l'efficacité énergétique.

Les analyses en puissance conduisent à simuler la dynamique de la consommation au cours de l'année via son profil horaire dans une grande variété de configurations météorologiques possibles. Elles conduisent notamment à évaluer l'évolution de la pointe de consommation nationale à un horizon de 15 ans et du niveau de sécurité d'alimentation fixé par la réglementation à cette échéance. Du fait de la forte thermosensibilité de la consommation d'électricité en France et du long historique de débat sur cette question, cette évaluation de la pointe électrique revêt un enjeu particulier.

1. Consommation correspondant à 15,6 millions de véhicules électriques en 2035, en cohérence avec la SNBC et le scénario de référence de l'étude sur l'électromobilité menée par RTE et l'AVERE (scénario «Crescendo haut») : «Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique», RTE, 2019.

2. Consommation correspondant à l'objectif SNBC et modélisée dans l'étude menée par RTE sur la production d'hydrogène décarboné : «La transition vers un hydrogène bas carbone», RTE, 2020.

4.2 L'électrification progressive du chauffage, si elle est accompagnée de progrès d'efficacité énergétique, ne conduit pas à faire augmenter la consommation d'électricité à moyen terme

La consommation d'électricité annuelle moyenne (c'est-à-dire corrigée des variations météorologiques) associée au chauffage électrique est estimée³ à 61 TWh aujourd'hui (données 2018) : environ 44 TWh dans les logements (secteurs résidentiels) et 17 TWh dans les bureaux, commerces ou bâtiments publics (secteur tertiaire).

4.2.1 Dans le scénario central de la SNBC (A-SNBC 1) : une consommation stable voire légèrement baissière

Le scénario central de ce rapport, celui de la SNBC, conduit à une stabilité à moyen terme (15 ans) de la consommation d'électricité dédiée au chauffage dans les logements et les bureaux. Évalué à environ 61 TWh aujourd'hui, ce poste de consommation atteindrait 58 TWh en 2035 (en données corrigées des variations météorologiques).

Cette relative stabilité découle de deux effets opposés, qui entraînent des variations elles-mêmes de faible intensité sur la consommation d'électricité :

La rénovation des bâtiments a un effet baissier modéré sur la consommation d'électricité.

D'une part, les logements chauffés à l'électricité sont en moyenne plus récents que le parc de logement. Ils sont donc mieux isolés et présentent un potentiel d'économie d'énergie moins important. D'autre part et surtout, une partie significative des progrès d'efficacité énergétique se traduit par un accroissement du confort thermique pour les occupants des logements concernés (concrètement, une augmentation de la température de chauffe) et non par une diminution de leur consommation.

Cet « effet rebond », ainsi pris en compte dans les analyses, réduit le potentiel d'économies d'énergie associées à la rénovation de l'enveloppe des bâtiments. Sur la période 2018-2035, l'écart entre un effort de rénovation tendanciel (4 millions de logements chauffés à l'électricité avec une baisse unitaire de 30 % de la consommation par logement) et l'objectif de la SNBC (8 millions de logements avec une baisse unitaire de 50 % de la consommation par logement) est de l'ordre de 5 TWh.

L'électrification du parc de chauffage prévue par la SNBC est progressive et doit se faire par des solutions électriques efficaces.

L'usage préférentiel de l'électricité dans le bâtiment neuf a une influence minimale sur la consommation, les normes de construction actuelles étant très strictes. L'électrification dans les logements et bureaux anciens conduit à augmenter la consommation électrique mais dans des proportions restreintes si elle repose majoritairement sur les pompes à chaleur comme le prévoient la SNBC et la nouvelle réglementation environnementale des bâtiments.

Dans le secteur résidentiel

Dans le scénario A-SNBC 1, la consommation électrique consécutive au passage au chauffage électrique de 2,2 millions de logements chauffés par un combustible fossile (les trois quarts au fioul et un quart au gaz) est entièrement compensée par le rythme plus soutenu des actions d'efficacité énergétique.

Il est en effet prévu que ces logements soient équipés de pompes à chaleur. Par ailleurs, 1 million de logements chauffés aujourd'hui par des radiateurs

3. Ce volume n'est pas directement mesurable : il est reconstitué à partir d'une modélisation des usages et de modèles explicatifs de la consommation, dont la performance est vérifiée chaque jour pour prévoir la consommation d'électricité du lendemain.

électriques verraient leur installation remplacée par une pompe à chaleur. De plus, ces actions sur les systèmes de chauffage se combinent à la rénovation d'enveloppe de près de 6 millions de logements chauffés à l'électrique. Au total, les mesures prévues par la SNBC aboutiraient à une consommation d'électricité pour le chauffage résidentiel légèrement plus basse qu'aujourd'hui, à hauteur de 41 TWh.

Dans le secteur tertiaire

Le secteur tertiaire est hétérogène et regroupe des bâtiments très différents : bureaux, centres commerciaux ou petits commerces, bâtiments publics comme les écoles ou les hôpitaux... Ce poste de consommation est actuellement évalué à 17 TWh.

Comme pour le secteur résidentiel, un résultat important de l'étude est que la consommation du secteur tertiaire pour le chauffage devrait rester stable à l'horizon 2035 dans le scénario correspondant à la SNBC. Les effets respectifs de l'électrification du chauffage, de l'isolation des bâtiments existants et du remplacement de surfaces existantes par des bâtiments neufs obéissant à des normes de construction beaucoup plus exigeantes,

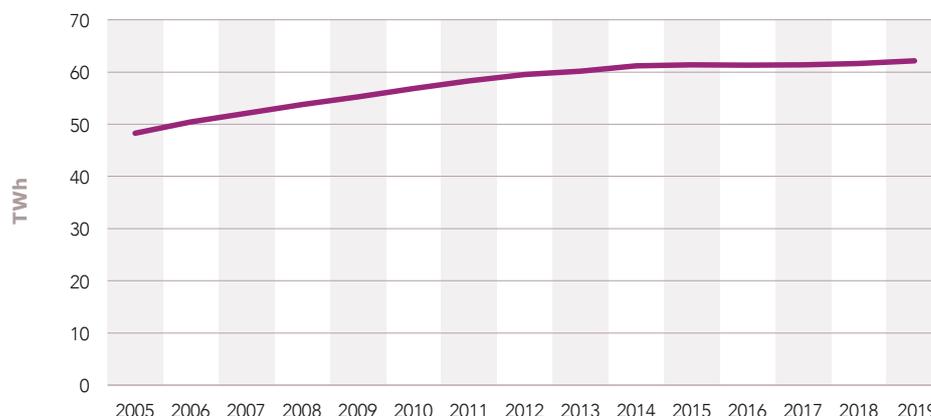
ont ainsi tendance à se compenser. En particulier, le décret de 2019 sur les mesures d'efficacité énergétique dans les bâtiments à usage tertiaire⁴ prévoit des obligations de baisse de la consommation importantes pour les bâtiments de grande taille (plus de 1000 m², qui représentent plus de deux tiers du parc), à hauteur de 40 % de baisse en 2030 et 50 % en 2040 par rapport à 2010. Ces obligations sont assorties d'une obligation de déclaration de la consommation énergétique à partir de 2021.

4.2.2 Dans le scénario contrefactuel : une consommation stable voire légèrement haussière

Poursuivre sur le rythme actuel en matière d'électrification comme d'actions d'efficacité (scénario contrefactuel) mène à une consommation de chauffage électrique légèrement supérieure à celle d'aujourd'hui : 63 TWh en 2035 contre 61 TWh aujourd'hui, pour le secteur du bâtiment dans sa totalité (résidentiel et tertiaire).

Dans ce scénario, l'efficacité énergétique ne se développe pas à la hauteur des attentes de la

Figure 4.1 Consommation annuelle de chauffage (corrégée du climat réalisé)



4. MTES, 2019. Fiche d'impact du 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.

SNBC, mais suffit à compenser en partie l'électrification tendancielle. Il s'agit de la prolongation des tendances actuelles (la consommation associée au chauffage est relativement stable depuis 5 ans).

- ▶ Dans le secteur résidentiel, la consommation demeurerait globalement stable à moyen terme, sous l'effet conjugué d'une légère progression du chauffage électrique et de la poursuite du rythme actuel de rénovations du bâti et des installations de pompes à chaleur ;
- ▶ Dans le secteur tertiaire, la poursuite des tendances actuelles en matière d'électrification et d'efficacité entraînerait une légère augmentation de la consommation annuelle, jusqu'à atteindre 19 TWh.

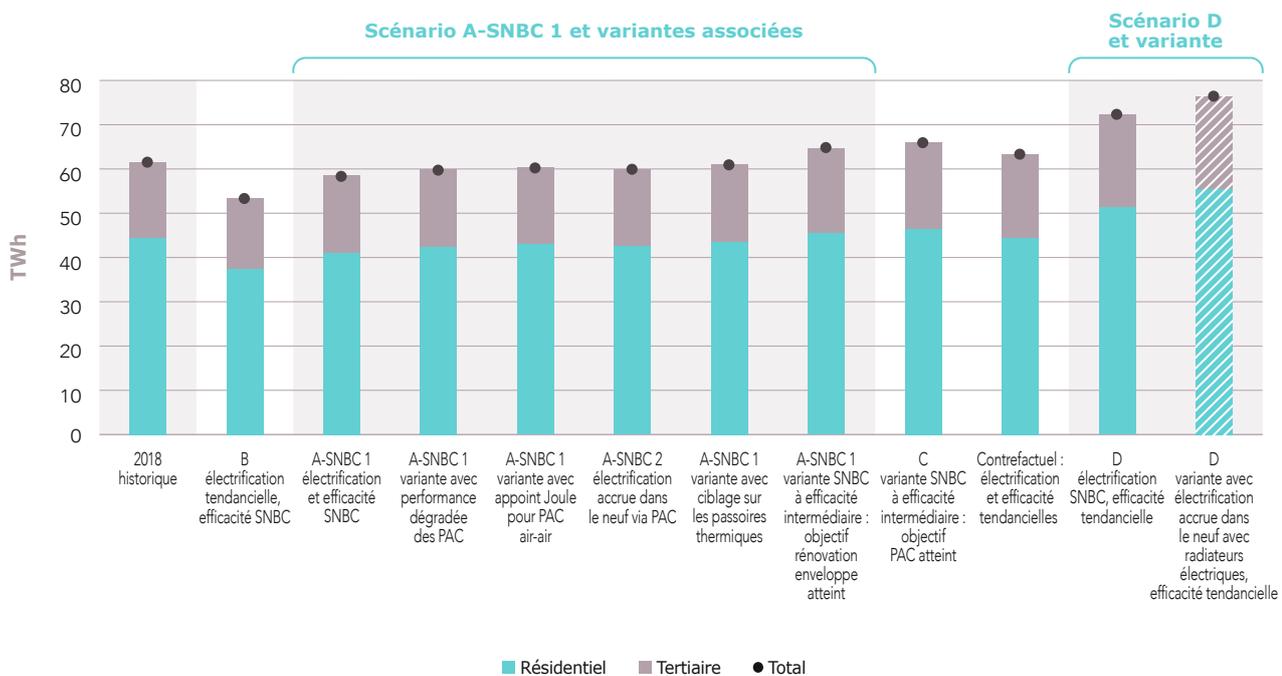
À l'horizon de 15 ans, l'écart entre le scénario A-SNBC 1 (scénario SNBC) et le scénario contrefactuel se situe donc à environ 5 TWh, soit 8% de baisse de la consommation électrique liée à l'usage du chauffage.

4.2.3 En étudiant un grand nombre de variantes, l'incertitude sur l'évolution à moyen terme de la consommation électrique moyenne pour le chauffage apparaît modérée

La dispersion des résultats peut être analysée en mettant en regard les résultats obtenus sur la douzaine de variantes qui ont fait l'objet d'analyses techniques et économiques dans le présent rapport. L'étude d'un nombre important de variables permet de vérifier la robustesse des conclusions et de préciser leur périmètre de validité.

Cette analyse montre que **l'incertitude sur la consommation liée au chauffage électrique est relativement modérée au regard des autres facteurs d'incertitude sur la consommation électrique à cet horizon**. Entre le scénario le plus bas et le plus élevé, l'écart est de 20 TWh, soit +/-16% par rapport au niveau actuel.

Figure 4.2 Projections de consommation électrique du chauffage en 2035, par scénario et variantes



Sans surprise, c'est dans la variante⁵ combinant le plus fort taux d'électrification, le plus faible niveau d'isolation des logements, le plus faible degré de choix des solutions électriques performantes (pompes à chaleur), et le plus fort taux de développement de l'électricité dans la construction neuve, que la consommation est la plus élevée (de l'ordre de 75 TWh pour une année moyenne). Cette variante constitue un cas extrême, où il y a échec sur toutes les dimensions liées à l'efficacité énergétique (que ce soit pour les bâtis via le programme de rénovation ou pour les solutions de chauffage).

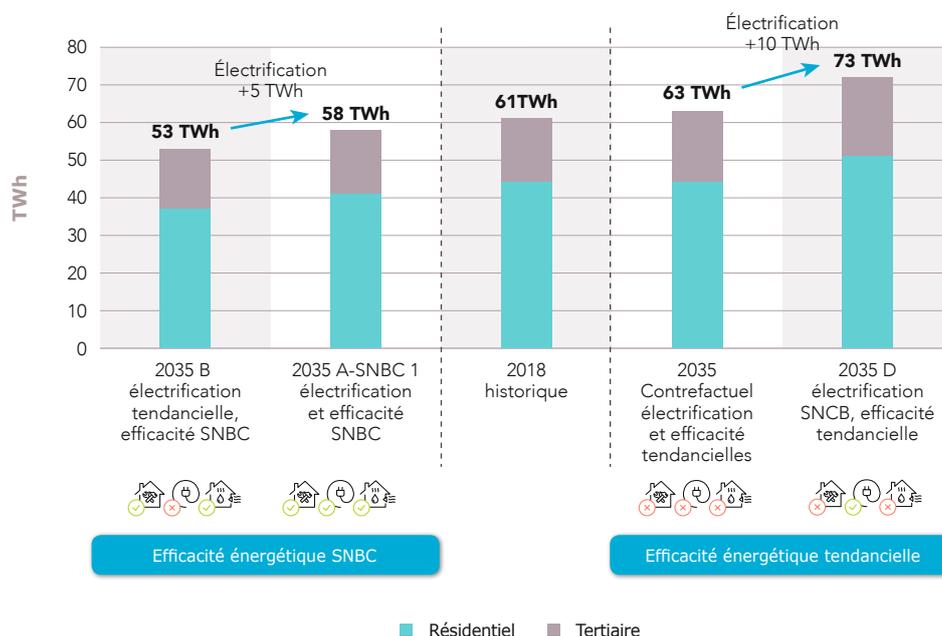
A contrario, la consommation la plus faible est atteinte dans le scénario B, qui combine une

réussite du programme d'isolation thermique et une poursuite du rythme tendanciel de développement du chauffage électrique. Ce scénario présente néanmoins des performances moins bonnes en matière d'émissions au périmètre de l'inventaire national, sans être parmi le plus émetteur (voir chapitre 5).

Entre ces deux extrêmes, de nombreuses variantes conduisent à des résultats proches, autour de 60 TWh et donc à une relative stabilité par rapport à la consommation électrique actuelle.

Le niveau d'incertitude se situe donc à plus ou moins 10 TWh par rapport à la consommation actuelle.

Figure 4.3 La consommation électrique du chauffage en 2035, dans les deux contextes d'efficacité énergétique



5. Dans cette variante, le taux d'équipement en chauffage électrique serait de 90% en maison individuelle et 70% en logement collectif (contre respectivement 70 et 25% dans le cas de référence).

4.3 Dans les bâtiments neufs : un recours accru à l'électricité n'entraînerait pas de forte augmentation de la consommation d'électricité

La nouvelle réglementation environnementale, dont les grandes lignes ont été annoncées en novembre 2020, devrait conduire à ne plus installer d'installations de chauffage utilisant le gaz naturel et les autres combustibles fossiles dans les logements neufs. La mise en œuvre de ces mesures est prévue pour mi-2021 s'agissant des maisons individuelles, pour 2024 en ce qui concerne les logements collectifs (la référence étant le dépôt du permis de construire).

Les études restituées dans le présent rapport ont été réalisées avant l'annonce de ces décisions. Le scénario A-SNBC 1 ne prévoit pas l'utilisation du gaz dans les maisons individuelles, mais prévoit toujours un recours au gaz dans le logement collectif, dans des proportions supérieures à celles qu'une disparition en 2024 autoriserait.

La disparition du gaz comme solution de chauffage dans les bâtiments neufs n'équivaut pas à son remplacement par l'électricité. L'utilisation de la biomasse et des réseaux de chaleur, notamment dans les logements collectifs pour la chaleur, constitue en effet une orientation privilégiée par les pouvoirs publics.

Les variantes sur l'électrification accrue dans le bâtiment neuf permettent de tester des solutions où l'électricité serait extrêmement dominante (70% dans le logement collectif et 90% dans les maisons individuelles, en matière de nombre d'installations).

4.3.1 Une proportion majoritaire de chauffage électrique dans les bâtiments neufs, en intégrant la meilleure performance de ces derniers, a un effet très légèrement haussier sur la consommation

Le développement des solutions électriques dans les bâtiments neufs n'aura qu'un impact modéré, à moyen terme, sur la consommation

d'électricité (cette conclusion vaut également sur la pointe – voir paragraphe 4.8.4).

D'une part, le parc évolue lentement : la quasi-exclusion des combustibles fossiles dans les logements et bureaux neufs proposée dans la future réglementation environnementale ne concerne qu'une partie limitée du parc total de 2035 de bâtiments et les solutions privilégiées dans le neuf ne portent pas uniquement sur les pompes à chaleur électriques mais également sur le bois et les réseaux de chaleur.

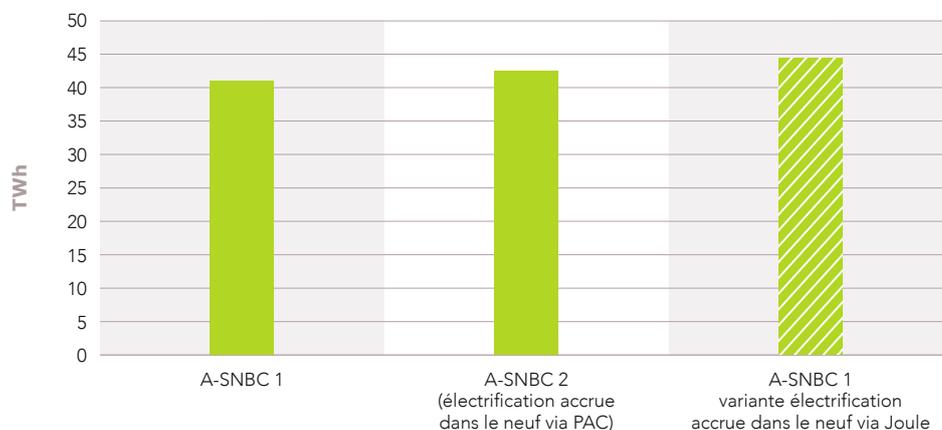
D'autre part, les logements neufs sont déjà astreints à des exigences très fortes en matière d'efficacité du bâti. Dès lors, la sensibilité à une électrification très majoritaire par pompes à chaleur ou même par radiateurs électriques à effet Joule est comprise entre 1,5 et 4,5 TWh selon les variantes – des volumes très faibles sur une durée de 15 années (moins de 1% de la consommation électrique totale).

- ▶ Le scénario A-SNBC 2 permet de tester une bascule très majoritaire dans le bâtiment neuf, où les solutions électriques constitueraient environ 80% des solutions de chauffage dans le neuf (90% dans les maisons, 70% dans le collectif). Pour vérifier l'effet théorique d'un développement de l'électricité dans le bâtiment neuf majoritairement par radiateurs électriques à effet Joule, une variante spécifique a également été testée.

Afin de cumuler les effets théoriques négatifs, et d'explorer l'éventail maximal de l'effet d'un tel développement du chauffage électrique ces effets ont également été ajoutés à ceux du scénario D (cf. ci-après figure 4.8).

De façon attendue, une électrification accrue dans le neuf tend naturellement à augmenter la consommation de chauffage électrique.

Figure 4.4 Consommation de chauffage électrique résidentiel pour les variantes avec électrification accrue dans le neuf sur le scénario A-SNBC 1



Néanmoins ce supplément reste faible lorsque ce surcroît d'électrification se fait avec une proportion importante de pompes à chaleur (variante « pompe à chaleur + ») : d'1,5 à 2 TWh. Il double si elle a lieu avec une proportion majoritaire de radiateurs électriques, représentant donc 3 à 4 TWh/an (cf. ci-après).

Ces volumes sont à comparer avec le supplément d'électrification apporté par le scénario D par rapport au contrefactuel : 10 TWh/an pour 2,2 millions de logements, dont une bonne partie dans l'existant. L'effet sur la consommation électrique liée à l'électrification dans les logements neufs apparaît très nettement inférieur à celui de l'électrification dans l'existant, du fait des écarts importants de performance de leurs enveloppes.

4.4 Dans les bâtiments existants : un développement du chauffage électrique associé à un échec partiel des objectifs d'efficacité entraîne une augmentation de la consommation électrique, mais modérée

Vu l'inertie de l'évolution du parc de bâtiments, ce sont les tendances sur les bâtiments existants qui ont le plus d'influence sur la consommation.

Les études présentées dans ce rapport montrent qu'il est **souhaitable que les réglementations « bâtiments » orientent vers les solutions bas-carbone en y associant une bonne isolation du bâti et des équipements de chauffage efficaces pour privilégier le développement des pompes à chaleur.**

De manière plus précise, les études permettent de conclure du point de vue de l'évolution de la consommation électrique à :

- ▶ l'intérêt d'avoir des systèmes de chauffage efficaces et une bonne rénovation des enveloppes ;
- ▶ l'intérêt d'opérations de rénovations complètes et/ou ciblées sur les logements les plus énergivores ;
- ▶ l'influence de paramètres techniques comme le coefficient de performance des pompes à chaleur et le bon dimensionnement des installations (par rapport aux appoints Joule)

4.4.1 Les objectifs portant sur la rénovation du bâti et sur l'efficacité des systèmes de chauffage sont les plus importants, à parts égales

Parmi les efforts d'efficacité énergétique, les simulations montrent que la rénovation des bâtiments et l'efficacité des solutions de chauffage (pompes à chaleur plutôt que chauffage Joule) ont une importance similaire, évaluée chacune à 5 TWh/an. Il s'agit des deux mesures les plus

efficaces pour modérer la consommation et la pointe électrique.

Ce résultat s'appuie sur les différentes variantes du scénario A-SNBC 1, élaborées afin d'évaluer la sensibilité de ce scénario central à différentes façons d'atteindre les objectifs ou à des atteintes partielles sur un seul objectif.

Réussir seulement à rénover les enveloppes de bâtiment au rythme et à la performance préconisées par la SNBC, sans parvenir à déployer les pompes à chaleur au-delà de leur diffusion tendancielle augmente de 4,5 TWh/an la consommation de chauffage résidentiel par rapport à ce qu'elle serait si tous les objectifs de la SNBC étaient atteints.

Le cas inverse, qui consiste à atteindre un déploiement de pompes à chaleur conforme à la SNBC, mais avec une poursuite seulement tendancielle des rénovations d'enveloppe, à la fois en rythme et performance, ajoute 5 TWh/an de chauffage résidentiel par rapport au scénario A-SNBC 1.

Ces variantes intermédiaires sur l'efficacité énergétique montrent que chacun de ces objectifs compte pour environ la moitié de l'économie d'énergie apportée par les mesures d'efficacité énergétique dans la SNBC (voir figure 4.5)⁶. En effet, dans le scénario d'une électrification réalisée sans mesures supplémentaires d'efficacité (D), la consommation électrique liée au chauffage résidentiel atteint 52 TWh/an, soit 11 TWh/an de plus par rapport à la consommation résidentielle du scénario A-SNBC 1 et 8 TWh/an par rapport au contrefactuel.

6. Étant donné que ces effets sont non linéaires, chaque type de mesure peut occasionner une économie d'énergie différente selon l'enchaînement des opérations : une même mesure dégagera toujours plus d'économies si elle est réalisée en première. Ainsi, en partant du scénario D, atteindre d'abord l'objectif de pénétration des PAC, puis l'objectif de rénovations d'enveloppe, change légèrement les économies d'énergie associées à chaque mesure, tout en restant sensiblement dans les mêmes ordres de grandeur d'environ 5 TWh gagnés par objectif atteint.

Figure 4.5 Projections sur le secteur résidentiel – horizon 2035

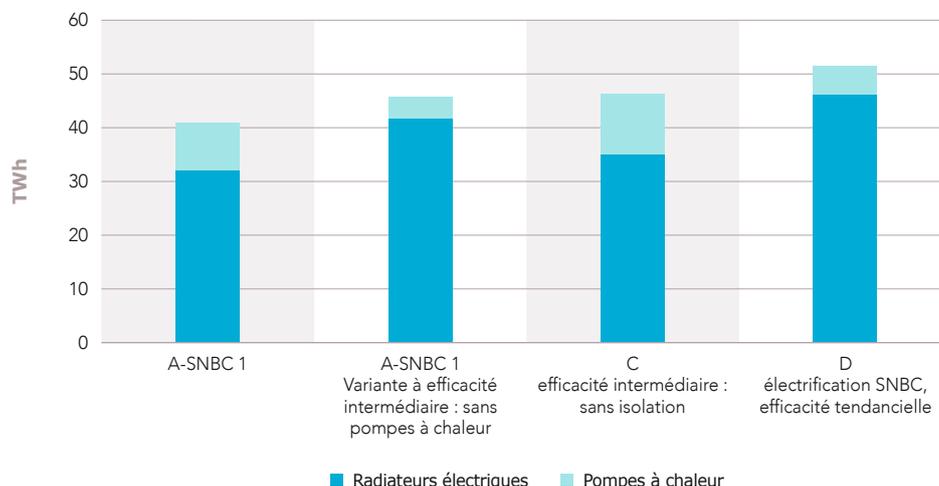
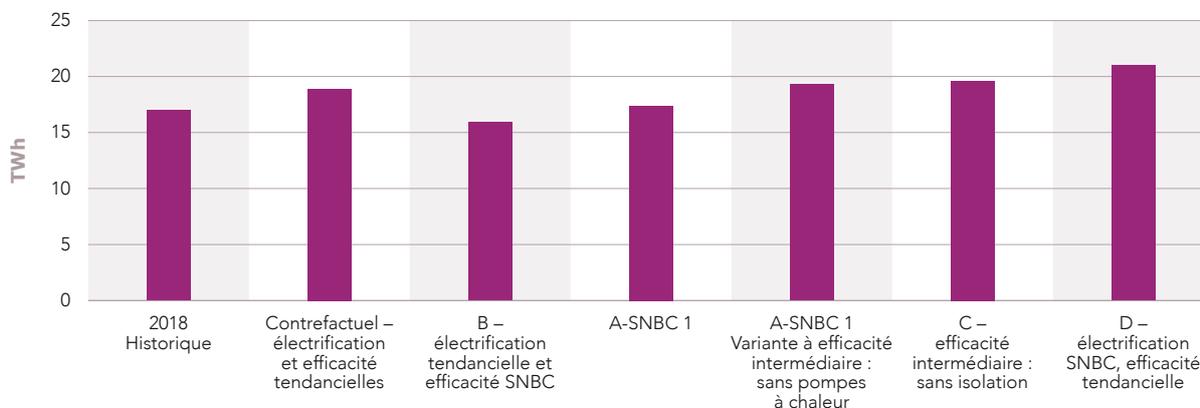


Figure 4.6 Projections sur le secteur tertiaire – horizon 2035



Les résultats sont similaires dans le tertiaire : atteindre partiellement les objectifs d'efficacité (enveloppes ou pompes à chaleur) mènerait à un niveau de consommation légèrement inférieur à 20 TWh au lieu de 17 TWh dans le scénario A-SNBC 1, l'isolation du bâti seule amenant une économie d'énergie légèrement plus importante que le seul déploiement de pompes à chaleur. Le cas d'une électrification aussi poussée que dans la SNBC, mais sans l'atteinte des objectifs d'isolation

du bâti et d'installation de pompes à chaleur (scénario D), amènerait à une consommation de 21 TWh.

Ces variantes intermédiaires sur l'efficacité énergétique montrent que chacun des objectifs d'efficacité énergétique (rénovation d'enveloppe, pénétration des pompes à chaleur) compte pour environ la moitié de l'économie d'énergie apportée par le scénario A-SNBC 1 par

rapport au scénario D où l'électrification serait aussi poussée que dans la SNBC, mais sans l'atteinte des objectifs d'efficacité énergétique.

4.4.2 Le ciblage des logements les plus énergivores et l'accroissement de la performance des rénovations sont des paramètres centraux

Les logements, bureaux, bâtiments publics présentent des caractéristiques énergétiques et climatiques très hétérogènes. Au cours des discussions sur la loi ELAN ou récemment dans le cadre de la convention citoyenne pour le climat, diverses propositions ou incitations ont été débattues pour traiter en priorité les « passoires énergétiques ».

L'intérêt de ce type d'approche est confirmé par la variante associée où les rénovations d'enveloppe, bien que se produisant à un rythme tendanciel avec seulement 400 000 opérations par an, sont performantes et ciblées sur les logements les plus énergivores – principalement les maisons individuelles disposant du bâti le moins performant (cf. chapitre 2, paragraphe 2.4.5). Dans cette variante, la consommation de chauffage électrique résidentiel reste quasiment stable sur 15 ans pour s'établir à environ 43,5 TWh/an (contre 41 TWh/an dans le scénario A-SNBC 1 et plus de 45 TWh si l'objectif d'installations de pompes à chaleur n'est pas atteint). Cette hausse reste modérée car les logements non rénovés dans cette variante sont plus récents donc avec un besoin théorique de chauffage plus faible que celui des « passoires thermiques ». Elle montre néanmoins qu'il est possible d'obtenir de bons résultats en matière de consommation d'énergie en ciblant les opérations de rénovations et en privilégiant les actions performantes.

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de ces analyses, qui rejoignent celles proposées par exemple par l'institut négaWatt ou le Haut Conseil pour le Climat⁷ sur l'intérêt du ciblage sur certains logements et de privilégier les opérations efficaces. Notamment,

- ▶ si le rythme des rénovations d'enveloppe ne parvient pas à décoller, celles-ci devront gagner significativement en performance (quasiment doubler) et être ciblées sur les meilleurs gisements pour atteindre la même réduction de la consommation d'énergie.
- ▶ **l'intérêt de privilégier des rénovations performantes dans un nombre plus restreint de logements les plus énergivores plutôt que d'étaler indistinctement un grand nombre de gestes sur un grand nombre de logements.**

4.4.3 Des points d'attention sur la performance des pompes à chaleur et leur bon dimensionnement aux besoins énergétiques des bâtiments, mais sans message d'alerte

Dans le cadre de la concertation, deux autres interrogations techniques spécifiques ont été remontées à RTE comme devant faire l'objet de variantes : l'influence d'une sous-performance des PAC en conditions d'utilisation réelle par rapport à leurs performances théoriques, et la possibilité que certaines PAC (notamment en logement collectif) soient sous-dimensionnées par rapport aux besoins thermiques.

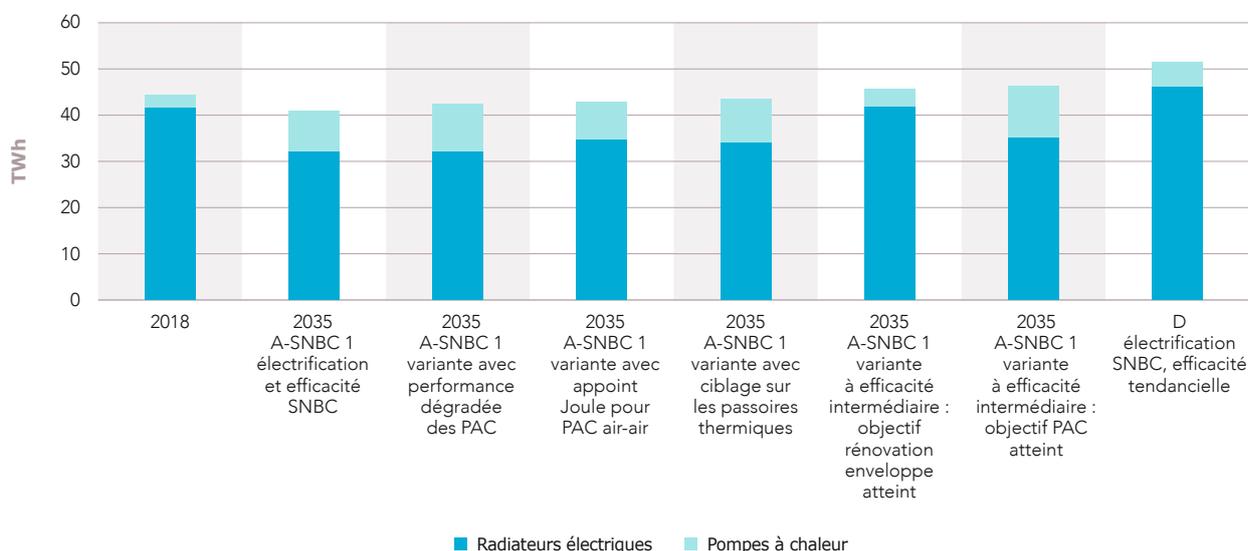
Les analyses permettent de chiffrer les impacts associés : il s'agit de points d'attention, mais non de variables discriminantes susceptibles de modifier l'appréciation générale des résultats.

La performance 2 pompes à chaleur

Le rendement effectif des pompes à chaleur par rapport aux performances théoriques a parfois été pointé du doigt. Une moindre performance, se traduisant par un COP moins élevé, peut avoir différentes explications, comme des réglages erronés, un mauvais dimensionnement, ou tout simplement le fait que les conditions réelles sont bien plus variables que les conditions d'expérimentation en laboratoire des constructeurs de pompes à chaleur.

7. Institut négaWatt, 2018, Résorber la précarité énergétique et rénover les passoires thermiques. Solutions innovantes et prêts à déployer pour rendre accessible à tous, la rénovation performante des maisons individuelles
Haut Conseil pour le Climat, 2020, Rénover mieux : leçons d'Europe. Réponse à la saisine du gouvernement.

Figure 4.7 Variantes du scénario A-SNBC 1, chauffage résidentiel en 2035



Afin de prendre en compte une potentielle généralisation de tels problèmes, une variante a considéré une dégradation du COP moyen de l'ensemble du parc, de 3,0 au lieu de 3,5 en 2035.

L'effet mesuré est de 1,5 TWh/an sur 15 ans : il s'agit donc d'un effet de second ordre par rapport aux autres paramètres analysés.

Le dimensionnement des PAC air-air dans le secteur résidentiel

Certains acteurs estiment que les installations de pompes à chaleur air-air seraient parfois sous-dimensionnées pour répondre aux besoins énergétiques, conduisant à l'installation de chauffages à effet Joule en complément. Ces acteurs craignent ainsi que les politiques de promotion de la pompe à chaleur ne se traduisent par un déploiement « masqué » de solutions électriques moins efficaces.

Sans porter de jugement sur le bien-fondé de cette crainte, une variante a été testée afin d'explorer la sensibilité du système électrique à la généralisation d'une installation pompe à chaleur air-air avec complément Joule. Dans cette variante, 35% de la

chaleur produite par les pompes à chaleur air-air est réallouée à du chauffage Joule ; la consommation des PAC air-air est donc réduite à 65% de son montant initial.

En raison de la différence de rendement entre les chauffages Joule et les pompes à chaleur air-air, le total de consommation de chauffage électrique augmente alors de 2 TWh/an à l'horizon 2035- soit un effet modeste sur 15 ans.

4.4.4 Associée à une électrification forte dans l'ancien et à une mauvaise performance du bâti, la consommation électrique pour le chauffage augmente très fortement par rapport à aujourd'hui

La variante la plus pessimiste, combinant le scénario D à une installation majoritaire de Joule dans le neuf, mène à une consommation de 76 TWh/an de chauffage électrique sur l'ensemble du secteur du bâtiment, soit 13 TWh de plus que le contrefactuel, et 18 TWh de plus que le scénario A-SNBC 1. Il représente l'effet maximal d'un échec des politiques de la SNBC concernant ses orientations sur

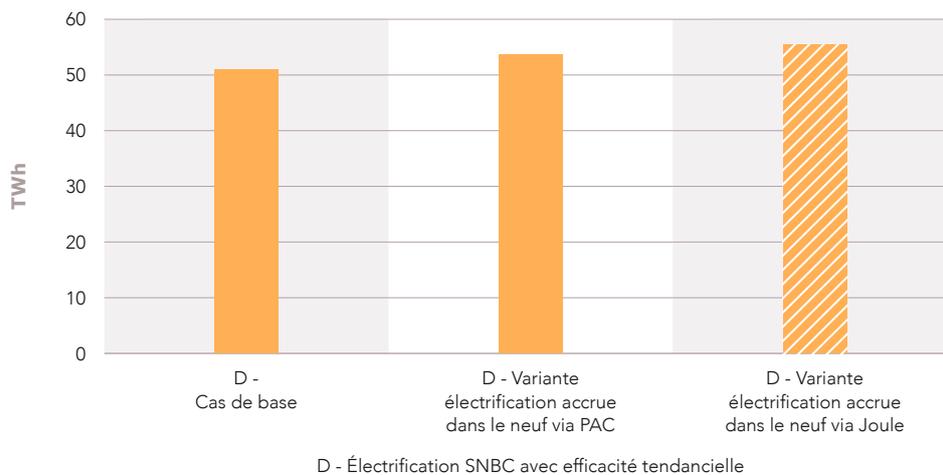
le développement du chauffage électrique : une augmentation d'environ 25% de la consommation. La consommation maximale pour le poste chauffage dans l'étude RTE-ADEME est de 76 TWh/an pour l'ensemble du secteur du bâtiment en 2035, soit 13 TWh de plus que le contrefactuel, et 18 TWh de plus que le scénario A SNBC 1. Ce niveau de consommation est atteint dans le cas théorique où une électrification très majoritaire dans le bâtiment neuf (type scénario A-SNBC 2) se ferait via des radiateurs électriques et s'ajouterait au scénario D – il s'agit donc d'un cumul théorique d'effets haussiers sur la consommation d'électricité, avec

échec simultané de tous les objectifs d'efficacité énergétique prévus par la PPE..

Sans être négligeable, une telle augmentation demeure largement inférieure à celle qui devrait résulter du développement de la mobilité électrique ou de la production d'hydrogène bas-carbone.

Ce type d'augmentation demeure largement en deçà de certaines estimations entendues dans la presse (évoquant un triplement de la consommation actuelle liée au chauffage électrique).

Figure 4.8 Consommation de chauffage électrique résidentiel pour les variantes avec électrification accrue dans le neuf sur le scénario D



4.5 Atteindre les objectifs SNBC en matière d'efficacité sans développer le chauffage électrique au-delà du tendanciel réduit la consommation d'électricité de façon modérée

Rénover 6 millions de logements chauffés à l'électrique et remplacer un million de chauffages Joule par des pompes à chaleur, sans que l'électrification du chauffage ne décolle par rapport à la tendance actuelle, mène à une consommation résidentielle de chauffage électrique autour de 37 TWh (scénario B).

Dans le tertiaire, avec des mesures d'efficacité énergétique sans électrification supplémentaire (scénario B), la consommation de chauffage électrique baisserait d'1TWh par rapport au niveau de consommation du scénario A-SNBC 1.

Le déploiement des rénovations d'enveloppe sur l'ensemble du parc, couplé à de l'efficacité sur les systèmes de chauffage (i.e. le remplacement de radiateurs électriques à effet Joule par des pompes à chaleur) permet donc une économie de 5 TWh sur la consommation de chauffage électrique par rapport au scénario A-SNBC 1 et de 10 TWh par rapport au scénario contrefactuel. L'économie, de plus de 15% par rapport au contrefactuel, bien que non négligeable, est en partie contrebalancée par l'effet rebond qui suit les actions d'efficacité énergétique, ce qui implique un niveau de confort nettement supérieur aux scénarios où ces objectifs ne sont pas atteints.

Figure 4.9 Consommation de chauffage électrique résidentiel dans les différents scénarios

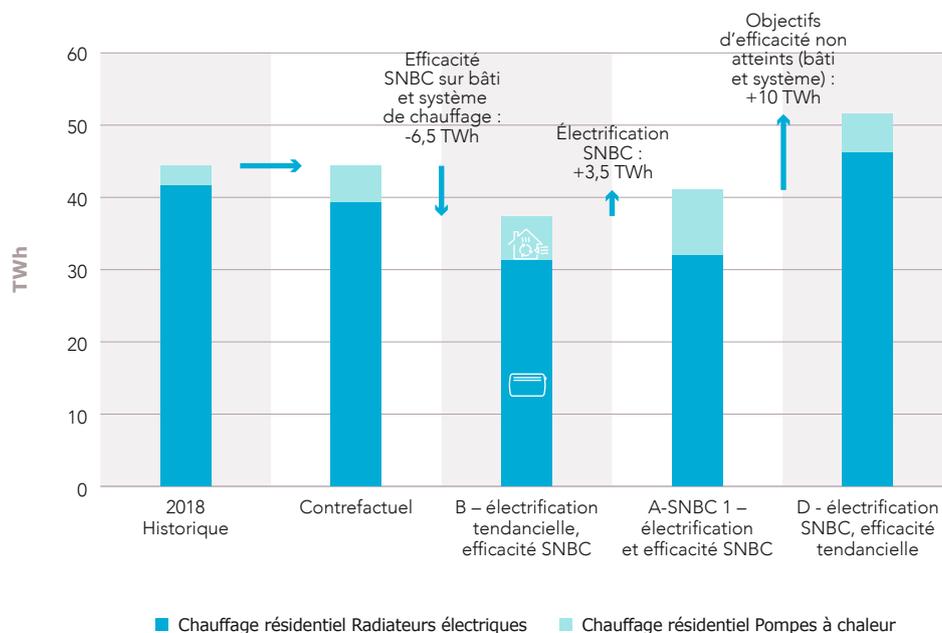
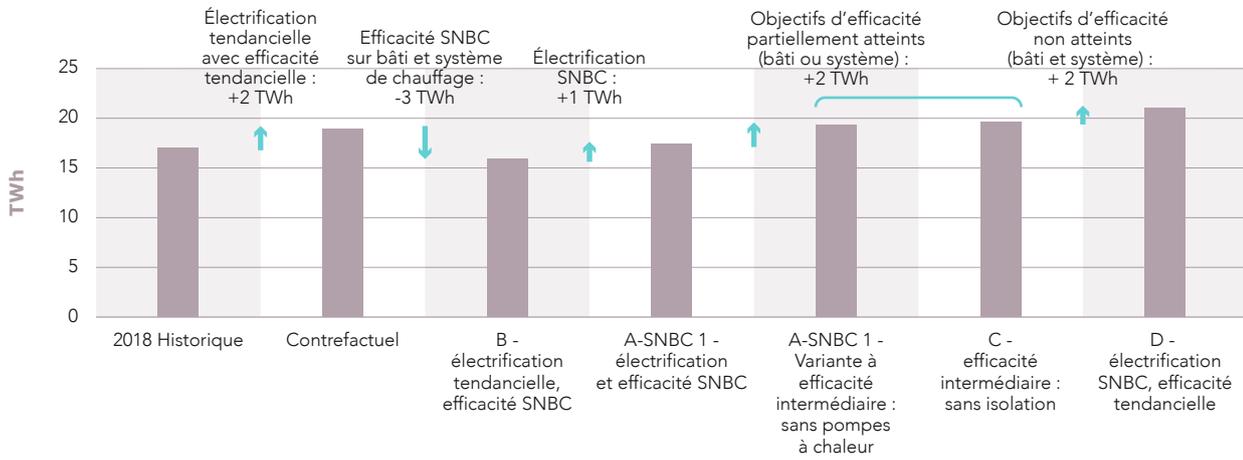


Figure 4.10 Consommation de chauffage électrique tertiaire dans les différents scénarios



4.6 Les évolutions attendues à 15 ans sur la consommation électrique liées aux politiques publiques sur le chauffage sont limitées par rapport à celles qui résultent de l'ensemble des politiques de décarbonation de l'économie

4.6.1 L'influence des politiques de décarbonation du chauffage sur la consommation d'électricité est modeste au regard des autres transferts d'usage prévus par la SNBC

La présente étude se place dans le contexte des travaux engagés à la suite du Bilan Prévisionnel 2017. Ceux-ci portent sur le développement de certains usages sur le système électrique dans trois grands secteurs : les transports (avec la mobilité électrique), l'industrie (avec l'hydrogène), et le bâtiment (avec l'électrification du chauffage, la rénovation des bâtiments et la promotion de solutions de chauffe efficaces).

Reprenant les résultats des analyses précédemment publiées sur la mobilité et la production d'hydrogène décarboné, tous les scénarios de la présente étude ont pour cadre commun :

- ▶ une électrification de la mobilité à hauteur de 15,6 millions de véhicules dans le parc total à l'horizon 2035, consommant environ 40 TWh par an, avec une hypothèse de pilotage modéré de la recharge (60 % des véhicules en recharge pilotée)⁸ ;
- ▶ la production d'hydrogène par électrolyse à hauteur de 30 TWh par an⁹, fonctionnant majoritairement sur des durées longues mais hors périodes de prix de l'électricité élevées sur les marchés, conduisant à un effacement total de l'appel de puissance lié à l'électrolyse en situation de tension.

Le scénario central de la présente étude conduit à la stabilité de la consommation électrique associée au chauffage, et toutes

les variantes étudiées situent la variation de ce poste de consommation à l'intervalle [-10 TWh ; +10 TWh] sur 15 ans.

En comparaison, le développement de la mobilité électrique et du *power-to-gas* induisent une augmentation de la consommation d'électricité d'environ 70 TWh, donc bien plus importante. Les scénarios d'évolution du chauffage électrique ne constituent donc pas le principal facteur de transformation du système à horizon 2035.

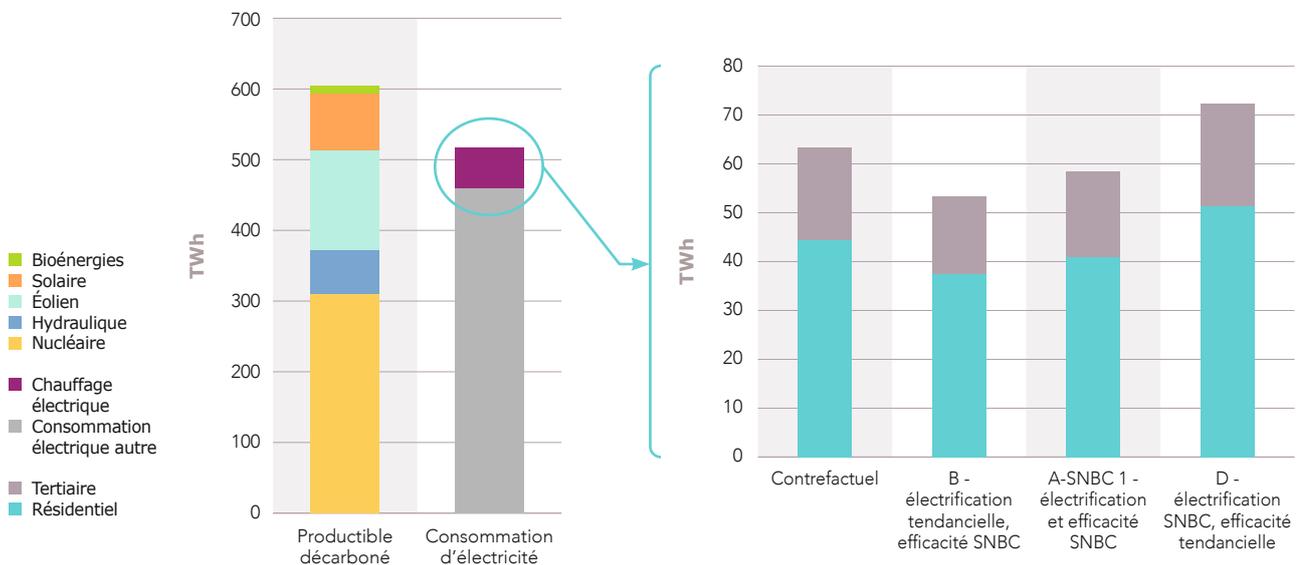
4.6.2 À l'horizon 2035, le productible décarboné est supposé largement suffisant pour couvrir cette demande, même dans les scénarios de croissance du chauffage électrique

La PPE adoptée au printemps 2020 définit une trajectoire énergétique fondée sur une forte croissance des énergies renouvelables (en très grande majorité éolien terrestre et en mer, et solaire photovoltaïque) et une réduction progressive de la capacité de production nucléaire. Dans l'ensemble, le volume de production renouvelable qu'il est prévu de développer en 15 ans est supérieur au volume de production nucléaire qui serait ôté du fait de la fermeture des 14 réacteurs nucléaires (dont les deux de Fessenheim) prévue par la PPE. La projection de ces tendances à l'horizon 2035 est utilisée comme scénario de référence dans les études réalisées par RTE sur la mobilité électrique, l'hydrogène, ainsi que dans la présente étude. Elle conduit à une production d'électricité décarbonée (énergies renouvelables et nucléaire) de l'ordre de 600 TWh à l'horizon 2035.

8. RTE, 2019, Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique, https://www.rte-france.com/sites/default/files/electromobilite_synthese_9.pdf. Scénario Crescendo haut

9. RTE, 2020, La transition vers l'hydrogène bas-carbone – Atouts et enjeux pour le système électrique à l'horizon 2035, https://www.rte-france.com/sites/default/files/rapport_hydrogene_vf_2.pdf

Figure 4.11 Mix de production français et consommation de chauffage électrique dans le scénario A-SNBC 1 en 2035 (à gauche), détail des scénarios de chauffage électrique en 2035 (à droite)



Ce volume est à comparer à une consommation domestique estimée aux alentours de 520 TWh à l'horizon 2035 dans le scénario de référence de la SNBC. Ce niveau excède celui d'aujourd'hui, sous l'effet des nouveaux usages électriques dans les transports et l'industrie notamment, mais la hausse demeurerait modérée par le développement de l'efficacité énergétique. Cette efficacité ne touche pas seulement les nouveaux usages : d'importantes économies d'énergie sont attendues dans l'éclairage avec la pénétration des LED ou les progrès en efficacité énergétique dans l'électroménager par exemple.

Ainsi, même avec en comptant sur un développement significatif du véhicule électrique, de la production d'hydrogène par électrolyse et le renforcement de la part de l'électricité dans le chauffage, la feuille de route énergétique française conduit à un excédent de productible décarboné par rapport à la demande.

Dans les scénarios de référence : une France toujours largement exportatrice à l'horizon 2035

Dans tous les scénarios étudiés, la France se trouverait en situation d'export net comme aujourd'hui. Dans le cas où le développement de la production renouvelable prévu par la PPE serait entièrement réalisé, où le parc nucléaire disposerait d'un bon facteur de charge, et où les interconnexions électriques auraient été développées à hauteur de ce que prévoit la PPE (ce qui implique de réaliser toutes les interconnexions du « paquet 1 » prévu par RTE dans son schéma décennal¹⁰) et enfin où l'efficacité énergétique structurelle prévue dans le scénario de référence pour la consommation d'électricité se produirait, ces exports nets pourraient être importants et aller jusqu'à 100 TWh. Si une ou plusieurs de ces conditions n'étaient pas remplies, le volume d'export serait plus faible, mais ces ordres de grandeurs montrent que le scénario de la PPE/SNBC, même en intégrant des transferts

10. RTE, 2019. Schéma décennal de développement de réseau. Edition 2019. Document de référence.

vers l'électricité, ne conduit pas à une difficulté sur l'approvisionnement au niveau des quantités d'électricité annuelles.

4.6.3 La couverture du besoin serait assurée même avec un moindre développement des énergies renouvelables

Dans les scénarios de moindre développement des énergies renouvelables : une France toujours exportatrice

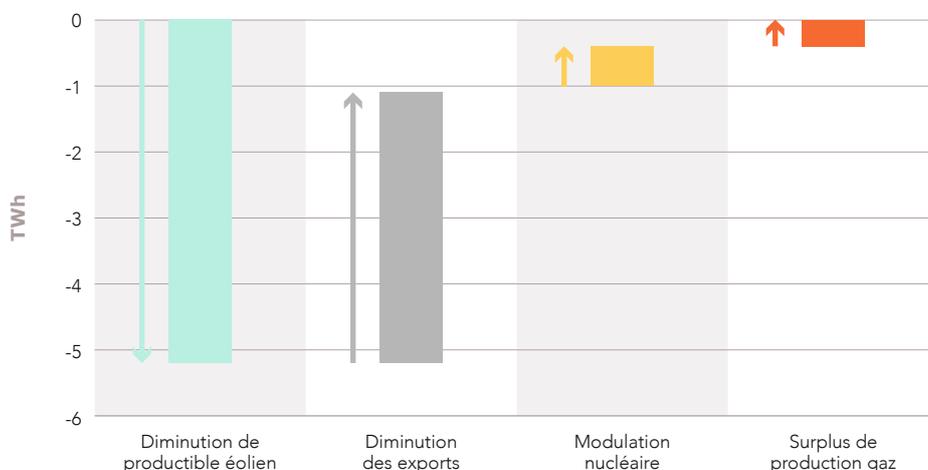
Tout comme les analyses présentées dans le rapport sur la mobilité électrique ou la production d'hydrogène décarboné, celles du présent rapport s'inscrivent dans la perspective d'un développement du productible décarboné en France prévu par la PPE. Dans ce type de scénario (comme le scénario *Volt* du Bilan prévisionnel 2017), le développement de l'éolien et du solaire est plus rapide que la réduction de la production des centrales nucléaires.

Ceci implique deux hypothèses fortes, à savoir (1) un rythme effectif de développement des

renouvelables conforme aux trajectoires de la PPE, qui doit encore se matérialiser et (2) une performance « nominale » du parc nucléaire, alors que les dernières années ont été marquées par une diminution importante du productible.

S'agissant des énergies renouvelables, des variantes ont été examinées en prévoyant un développement moins poussé de l'éolien, correspondant au mix contrefactuel dimensionné pour la situation où le chauffage électrique poursuit son développement de façon tendancielle (scénarios B et contrefactuel). Le mix contrefactuel comporte ainsi 2,6 GW de capacité éolienne en moins par rapport au mix résultant d'un prolongement des trajectoires de développement des énergies renouvelables prévues par la PPE jusqu'en 2035. Cela correspond à un retard de un an et demi sur les objectifs de développement éolien. Ces 2,6 GW de capacité éolienne représentent 5 TWh de productible annuel, soit le même volume (5 TWh) que la consommation supplémentaire occasionnée par l'électrification ciblée dans la SNBC (scénario A-SNBC 1), comparée à la tendance actuelle, toute chose égale par ailleurs, c'est-à-dire à mêmes hypothèses d'efficacité énergétique en rénovation

Figure 4.12 Compensation de la baisse de productible éolien dans le scénario D entre le mix de production PPE et le mix de production contrefactuel (-2,6 GW d'éolien)



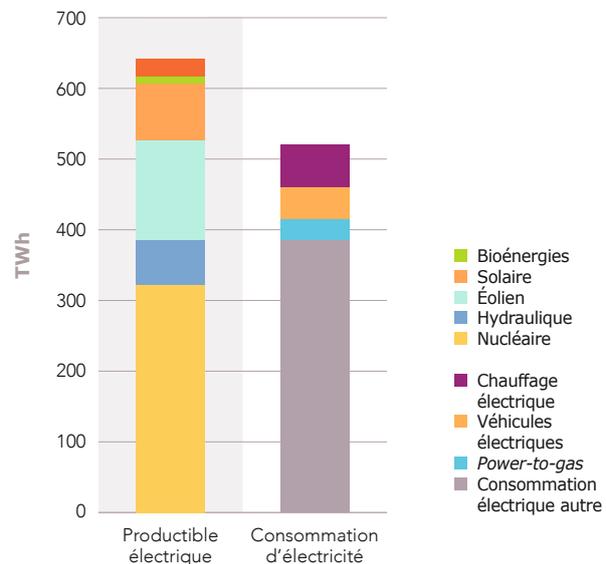
d'enveloppe et de part des pompes à chaleur que la SNBC (scénario B)¹¹.

Même dans les variantes comprenant un moindre développement des énergies renouvelables (mix contrefactuel), la production continue ainsi de couvrir largement la demande d'électricité à l'échelle nationale. Le surplus de consommation électrique est compensé principalement par une baisse des exports de la France vers ses voisins, qui se traduit par une augmentation de la production d'électricité à gaz de combustibles fossiles en Europe (principalement du gaz naturel), et marginalement en France. En énergie, la production continue ainsi de couvrir largement la demande d'électricité à l'échelle nationale.

L'enjeu de la croissance du chauffage électrique, qui dans l'hypothèse haute se limiterait à une quinzaine de TWh supplémentaires par rapport à aujourd'hui, ne porte donc pas sur la capacité du parc de production à couvrir ce besoin en énergie, mais plutôt sur la capacité du système à gérer des appels de puissance potentiellement plus élevés en période hivernale.

Les conséquences du développement du chauffage électrique sur le système est donc très dépendant de la composition globale de la consommation d'électricité. Au-delà du volume d'énergie consommé par les différents usages électriques, la forme de l'appel de puissance peut varier énormément d'un usage à l'autre. La structure de la consommation lors des

Figure 4.13 Structure du mix de production et de la consommation d'électricité dans le scénario A-SNBC 1 en 2035



pointes est donc particulièrement déterminante dans l'évaluation de la sécurité d'approvisionnement, ainsi que l'évaluation des gisements de flexibilité offerte par le parc de production ou par certains usages comme, historiquement, l'eau chaude sanitaire asservie, ou à l'avenir, le pilotage de la recharge des véhicules électriques.

¹¹. Cf. Chapitre 3, section 3.3.3 sur le dimensionnement du mix contrefactuel

4.7 Si elle s'accompagne de mesures d'efficacité énergétique sur le bâti et les systèmes de chauffage, l'augmentation de la part du chauffage électrique ne dégrade pas le niveau de sécurité d'approvisionnement

Dans le débat public et le débat expert, le chauffage électrique est fortement associé à la pointe électrique. Pour autant, la notion même de pointe électrique est souvent mal appréhendée, et est devenu un concept fourre-tout dans lequel se confondent les pointes journalières de consommation chaque soir vers 19h (qui sont principalement causées par d'autres usages que le chauffage) et les niveaux les plus élevés de consommation rencontrés en situation de grand froid.

4.7.1 La pointe hivernale ne doit pas être confondue avec la pointe journalière de consommation l'hiver

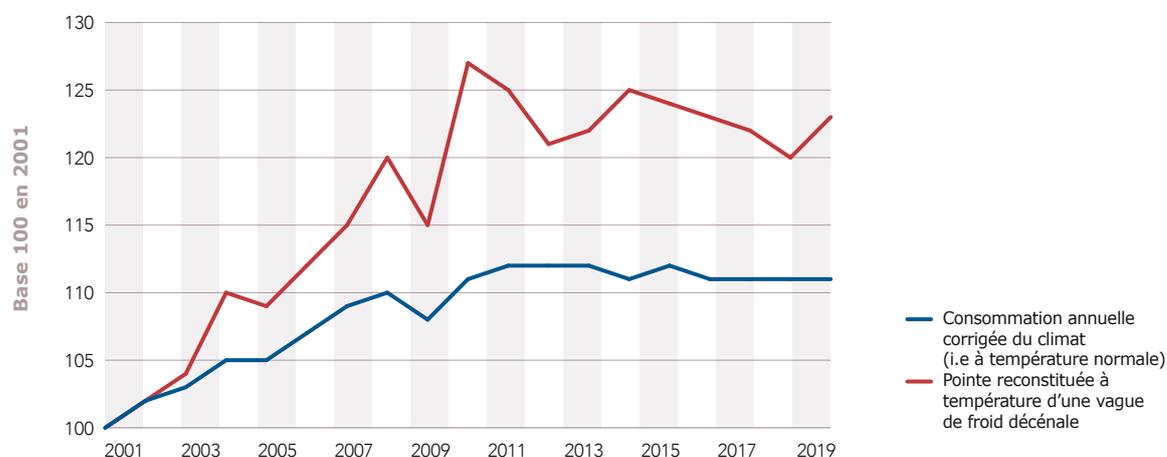
Quelle que soit l'énergie qu'il utilise, le chauffage se concentre essentiellement sur la période hivernale, entre octobre et avril. Sa saisonnalité

est donc importante, avec un pic au cœur de l'hiver. Par conséquent, il influence fortement le profil annuel de la consommation d'énergie et notamment la puissance électrique appelée en hiver.

La notion de «pointe hivernale» renvoie aux maxima de consommation électrique au cours d'un hiver donné. Ces maxima sont bien liés au chauffage électrique, car plus il fait froid, plus la consommation est importante. La pointe hivernale relève ainsi fortement de facteurs conjoncturels, comme les conditions météorologiques.

La pointe hivernale est souvent improprement confondue avec la pointe infrajournalière, qui se produit chaque soir en hiver. Or celle-ci se produit qu'il fasse froid ou pas : elle est le reflet des modes de vie et de la structure de la consommation

Figure 4.14 Évolution comparée de la consommation en énergie et de la pointe de consommation (corrégées des variations climatiques)



(éclairage lorsque la nuit tombe, sortie des bureaux, utilisation de la cuisson).

Les deux notions sont d'autant plus facilement confondues que, l'heure de la journée la plus chargée étant généralement 19h, les pointes hivernales sont généralement atteintes précisément à cette heure-là : le chauffage électrique s'ajoute alors à d'autres usages comme l'éclairage, la cuisson ou l'utilisation des appareils électro-ménagers pour atteindre des niveaux importants.

Entre 2000 et 2010, la pointe annuelle a augmenté plus vite que la consommation, et cette évolution a été largement documentée.

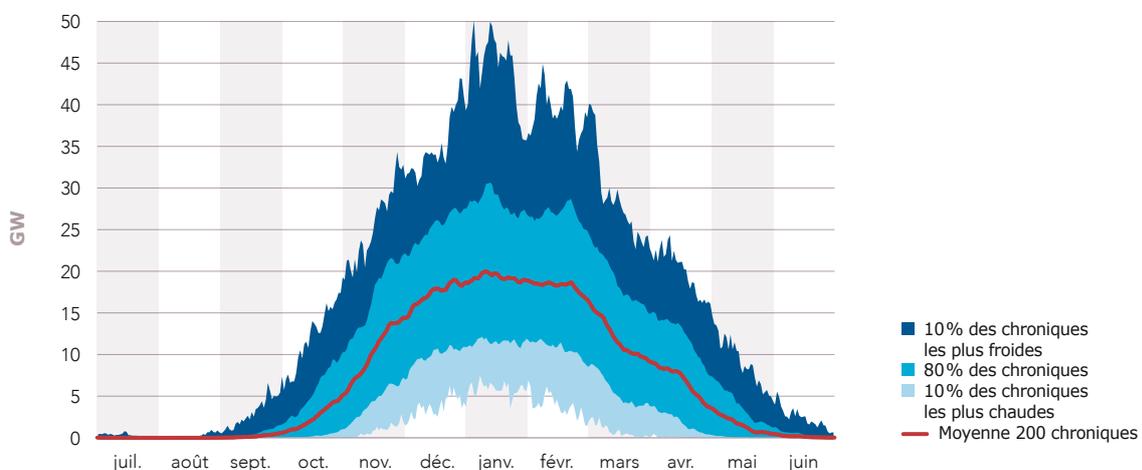
La visibilité médiatique du sujet a atteint un sommet avec la pointe historique de février 2012, où le seuil symbolique des 100 GW (pour la consommation) a été dépassé. Au cours de la décennie 2010, la tendance s'est infléchie, et la pointe de consommation n'est plus orientée de manière structurelle à la hausse. Ceci est notamment le résultat du développement de l'efficacité énergétique, qui tend à compenser les nouveaux usages de l'électricité.

4.7.2 La modélisation de la pointe repose sur un modèle probabiliste

Les analyses réalisées par RTE consistent à simuler la puissance appelée sur le système heure par heure et dans un grand nombre de configurations, en s'appuyant sur un référentiel de 200 chroniques météorologiques fournies par Météo France. Ces chroniques sont représentatives du climat actuel (pour les études portant sur les prochains hivers ou la présente étude sur le bâtiment) et/ou des climats futurs envisageables dans les scénarios décrits par le GIEC (par exemple pour les analyses prospectives à l'horizon 2050 engagées dans le cadre du Bilan prévisionnel).

Pour le climat actuel, l'appel de puissance journalier moyen lié au chauffage évolue entre 10 GW et 30 GW dans 80% des cas (voir figure 4.15), avec une moyenne à 20 GW au mois de janvier, qui est statistiquement le mois durant lequel les températures sont les plus froides. 10% des cas de figure simulés conduisent à des appels de puissance plus significatifs, au-delà de 30 GW et pouvant atteindre jusqu'à 45 GW dans la configuration la plus extrême – celle qui correspond à une vague de froid particulièrement extrême (de l'ordre de

Figure 4.15 Distribution de probabilité de la puissance journalière moyenne thermosensible



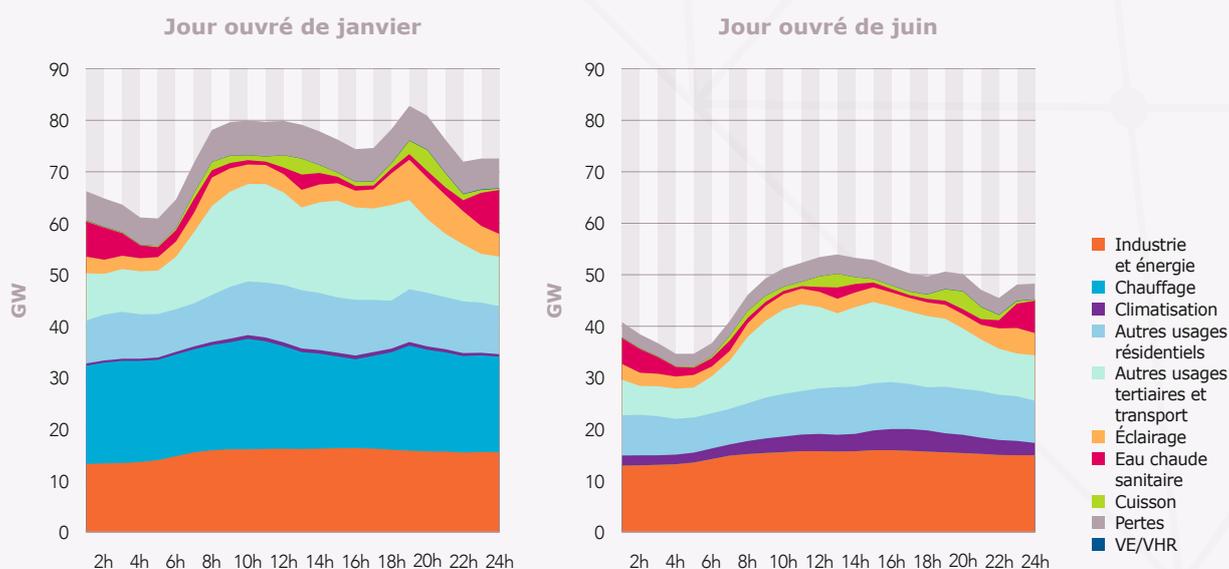
Derrière la « pointe de consommation », des réalités physiques très différentes

La consommation d'électricité fluctue au cours du temps, en fonction des besoins des utilisateurs. Ceux-ci sont largement dictés par le rythme des activités économiques et domestiques et le cycle des saisons : la consommation est plus élevée le jour que la nuit, en jours ouvrés qu'en week-end, en hiver qu'en été. Elle connaît aussi d'amples fluctuations, liées aux températures extérieures, du fait des usages de climatisation en été et surtout de chauffage en hiver.

La notion de « pointe de consommation », souvent utilisée pour parler de la consommation électrique, peut prêter à confusion si elle n'est pas explicitée car elle peut recouvrir des réalités physiques bien différentes, selon que l'on évoque la **pointe infra-journalière** ou la **pointe hivernale**.

La courbe de demande infrajournalière d'un jour ouvré, bien que différente selon les saisons, présente certaines caractéristiques tout au long de l'année : un minimum de consommation atteint en fin de nuit, une montée de charge le matin, conduisant à la formation d'un « plateau du matin » ; une lente diminution à partir de l'après-midi, suivie d'un rebond en fin d'après-midi ou début de soirée. En hiver, des consommations additionnelles d'éclairage, combinées avec la cuisson résidentielle, amènent une charge supplémentaire de l'ordre de 4 GW à la tombée de la nuit, ce qui provoque une pointe à 19h au cœur de l'hiver ; et, symétriquement, l'éclairage induit un supplément de consommation qui positionne la pointe du matin vers 9h.

Figure 4.16 Profils de puissance de la consommation par usages (à températures de référence)



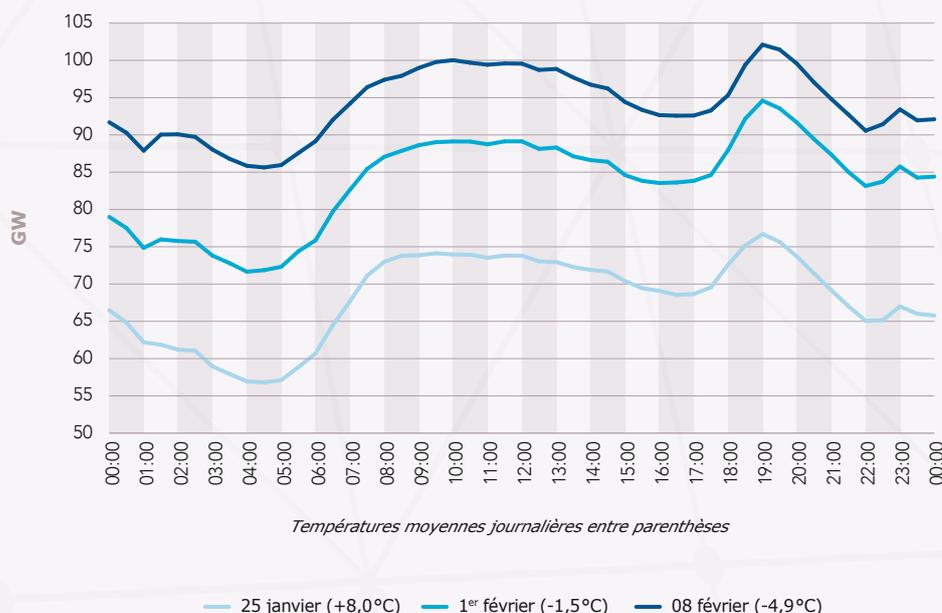
Le chauffage électrique, en revanche, induit une forte variation saisonnière de la puissance appelée : environ 15 GW en plus en moyenne au cœur de la période hivernale, comparé à la période hors chauffe. Cet appel de puissance explique l'essentiel de la différence de niveau entre hiver et été.

Des variations journalières existent également bien que plus limitées : l'appel de puissance du chauffage connaît un creux la nuit et dans l'après-midi, et atteint son niveau le plus élevé autour des pointes du matin et du soir, avec de l'ordre de 4 GW de différence entre ces deux niveaux, soit une variation d'environ un quart comparé à l'appel de puissance moyen du chauffage.

Lors d'une vague de froid intense, ces besoins en chauffage peuvent être beaucoup plus importants : lors de la vague de froid de 2012 – proche d'une situation «à une chance sur 20» –, le surcroît de puissance observé s'est élevé à environ 25 GW le 8 février 2012, jour du pic de froid (température moyenne journalière de -5°C) par rapport à un jour normal comme le 25 janvier 2012 (température moyenne journalière de 8°C).

Enfin, la *forme du profil journalier* d'appel de puissance est peu affectée lors d'une vague de froid : les températures jouent ainsi essentiellement sur le *niveau moyen* de la demande qui peut être fortement accru.

Figure 4.17 Courbes de charges journalières autour de la vague de froid de février 2012 (vague de froid à une chance sur vingt)



1 fois tous les 200 ans tout au plus, correspondant à des températures de 12 °C en dessous des normales pour le mois de janvier).

Pour rendre compte de la sensibilité des appels de puissance aux conditions météorologiques et en particulier à la température extérieure, l'indicateur dit de la « pointe à une chance sur dix » est fréquemment utilisé : il représente le dixième décile de l'appel maximal de consommation annuelle ; dit autrement, la consommation maximale d'une année (sur l'heure la plus chargée) n'a qu'une probabilité de 10% de dépasser la pointe à une chance sur dix.

Cet indicateur correspond à une vague de froid décennale, c'est-à-dire une vague de froid susceptible de se produire environ une fois tous les dix ans (hors effacement de consommation, cf. ci-après). D'autres indicateurs, tels que la « pointe à une chance sur cinq », ou la « pointe à une chance sur vingt » relèvent de la même logique. La vague de froid de février 2012, qui demeure à ce jour la situation de grand froid la plus extrême à laquelle ait été confronté le système électrique depuis sa libéralisation, se situe à proximité de la vague de froid « à une chance sur vingt », et constitue donc un élément particulièrement rare.

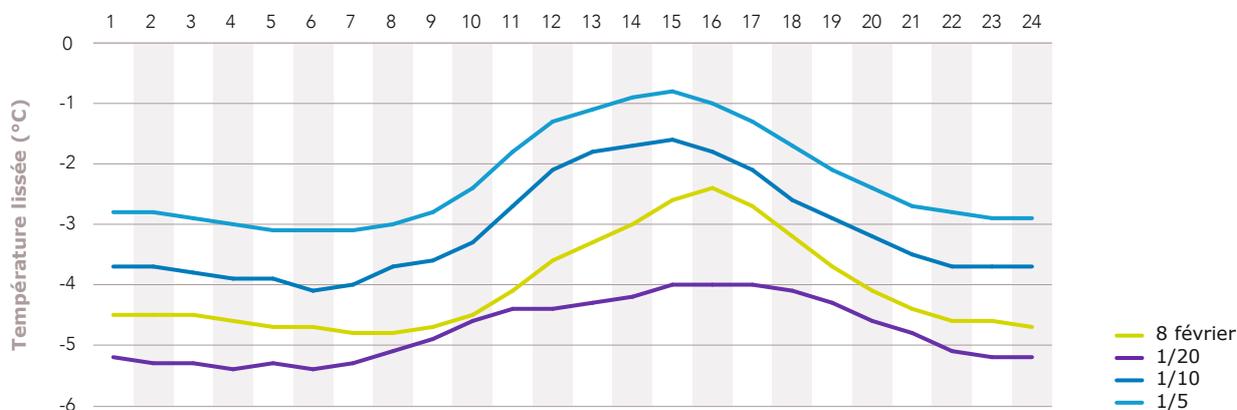
4.7.3 La pointe de consommation n'est que l'un des facteurs à prendre en compte dans une analyse de sécurité d'approvisionnement

La thermosensibilité du système électrique français a trop souvent conduit à résumer les enjeux de sécurité d'alimentation aux pointes de consommation, et de ce fait à centrer les discussions autour du chauffage électrique.

Les analyses publiées par RTE depuis plusieurs années au titre du Bilan prévisionnel ont pourtant souligné à la fois (1) un paysage plus nuancé en matière de sécurité d'approvisionnement et (2) l'écart persistant entre la communication médiatique sur la sécurité d'approvisionnement et le cadre prévu par les pouvoirs publics pour évaluer la sécurité d'approvisionnement.

S'agissant de la sécurité d'approvisionnement, les analyses ont montré que des phénomènes comme la moindre disponibilité structurelle du parc nucléaire (avec la possibilité que plusieurs réacteurs soient indisponibles de manière simultanée) ou le remplacement de centrales de production pilotables par des énergies renouvelables

Figure 4.18 Illustration de la température extrême au regard de l'aléa climatique : vagues de froid à une chance sur cinq, une chance sur dix, une chance sur vingt, et vague de froid 2012



à profil de production variable comme l'éolien (durant les périodes de vent faible sur la plaque européenne) devenaient plus structurants au cours du temps et faisaient évoluer la nature des configurations susceptibles d'être problématiques pour l'équilibre du système. Pour résumer, le système électrique est passé d'une situation où une vague de froid intense conduisait automatiquement à un problème de sécurité d'approvisionnement à une situation où c'est la combinaison entre une vague de froid intense, une situation de vent faible et une faible disponibilité du nucléaire qui pose problème.

De ce fait, **la pointe à une chance sur dix ne peut plus suffire à résumer les enjeux en matière de sécurité d'approvisionnement**, ce qui invite à explorer plus en détail les multiples configurations de l'équilibre offre-demande.

S'agissant des analyses sur l'équilibre offre-demande, il est nécessaire de retenir que la réglementation actuelle considère que la sécurité d'approvisionnement est assurée dès lors que la «défaillance» (au sens du code de l'énergie) du système électrique est en espérance inférieure ou égale à trois heures par an. Ce critère se complète par une exigence sur le niveau de délestage, dont la durée moyenne doit rester inférieure à deux heures par an¹². Dit autrement, les pointes de consommation extrêmes n'ayant qu'une probabilité faible de survenir, de même que les épisodes de production extrêmement faible de l'éolien ou des disponibilités historiquement faibles du parc nucléaire telles que celles qui ont été atteintes à la suite de la crise sanitaire de la COVID-19, sont typiquement considérées comme «hors dimensionnement». Or ce sont précisément ces situations qui engendrent une discussion d'ordre général, dans le débat public, sur la résilience du système électrique, alors que ce ne sont pas elles qui structurent l'atteinte du critère public de sécurité d'approvisionnement. Cette potentielle déconnexion a été pointée par RTE dès le Bilan prévisionnel 2017 dans l'analyse de sécurité d'approvisionnement du scénario *Ampère*.

12. RTE, Bilan prévisionnel 2019.

4.7.4 Le développement des flexibilités conduit à modifier l'appréhension de la pointe électrique

L'indicateur de pointe à une chance sur dix constitue un élément attendu du débat public pour mesurer l'effet des politiques publiques ciblant le secteur des bâtiments et du chauffage sur le système.

Par ailleurs, le développement de la flexibilité de la consommation (effacements de consommation, pilotage de la recharge des véhicules électriques, utilisation d'électrolyseurs flexibles, etc.) conduit mécaniquement à ce que l'indicateur reflète de moins en moins les situations de tension : en effet, lors de celles-ci, la consommation y devient plus faible car des leviers de flexibilité de consommation sont activés.

L'utilisation de cet indicateur dans une configuration de développement de la flexibilité sur la consommation soulève une question de définition. L'indicateur présenté jusqu'ici dans le Bilan prévisionnel représentait la consommation, avant potentielle activation des leviers de flexibilité pour des besoins ponctuels du système. Si l'effet sur la courbe de charge du pilotage du profil de consommation de certains usages (comme l'eau chaude sanitaire) est pris en compte, l'effet du pilotage ponctuel répondant à des besoins liés à la tension du système (effacements tarifaires à pointe mobile, capacités d'effacement explicites sur les marchés) sur la baisse de consommation n'était pas intégré. Ce principe permet d'éviter que le niveau de pointe à une chance sur dix dépende trop fortement des situations vécues par le système électrique et à l'activation effective ou non des leviers de flexibilité ponctuelle et *in fine* de l'état du parc de production.

En pratique, les analyses sur la pointe à une chance sur 10 présentées dans ce rapport reposent sur le même principe, avec un calcul de la pointe de consommation avant la sollicitation ponctuelle d'effacements sur des périodes de tension ou de sollicitation de la flexibilité activable ponctuellement sur

la recharge des véhicules électriques. La consommation d'électricité pour la production d'hydrogène par électrolyse est par contre considérée comme structurellement non présente lors des périodes de pointe.

Compte tenu de la sensibilité de la pointe à une chance sur dix à sa définition détaillée et de l'effet des hypothèses sur le pilotage « structurel » (véhicules électriques, eau chaude sanitaire), le choix a été fait de présenter cet indicateur en différentiel par rapport au scénario contrefactuel. En effet, le présenter en absolu l'aurait rendu par exemple très adhérent au niveau du développement du pilotage des véhicules électriques.

4.7.5 Le dispositif d'analyse prévu dans ce rapport

Le présent rapport reprend :

- des indicateurs sur l'évolution de la « pointe à une chance sur 10 », présentés sous la forme d'écart au scénario contrefactuel, afin de mesurer l'influence des paramètres étudiés dans l'étude sans faire reposer l'analyse de la sécurité d'approvisionnement sur cet indicateur du fait de ses limites, rappelées plus haut ;

- une analyse probabiliste de la sensibilité du niveau de sécurité d'approvisionnement à l'horizon 2035 aux politiques publiques sur le chauffage et l'efficacité énergétique, en comparaison au scénario contrefactuel.

Dans le scénario contrefactuel de l'étude, la sécurité d'approvisionnement est assurée à l'horizon 2035 au sens du critère retenu par les pouvoirs publics. Cependant ce résultat est étroitement associé aux hypothèses de ce scénario, comme l'évolution du parc de production, des capacités d'interconnexion, et le développement de la consommation flexible (par exemple les véhicules électriques pilotés¹³) ou le mode de fonctionnement des électrolyseurs¹⁴.

En conséquence, les résultats qui suivent sont présentés en différentiel par rapport au scénario contrefactuel, sans se référer au respect ou non du critère de sécurité d'approvisionnement en absolu. Présenter ainsi les résultats permet de les insensibiliser aux hypothèses susmentionnées qui peuvent influencer sur le niveau absolu de sécurité d'approvisionnement dans des proportions similaires ou plus importantes que l'effet du développement du chauffage électrique et l'isolation des bâtiments.

13. RTE, 2019. Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique.

14. RTE, 2020. La transition vers un hydrogène bas carbone

4.8 Si elle s'accompagne de mesures d'efficacité énergétique sur le bâti et les systèmes de chauffage, l'augmentation de la part du chauffage électrique ne dégrade pas le niveau de sécurité d'approvisionnement

4.8.1 Le scénario A-SNBC 1 conduit à modérer la pointe électrique par rapport au scénario contrefactuel et améliore la sécurité d'alimentation

La pointe à une chance sur dix est actuellement évaluée autour 100 GW. L'indicateur est demeuré dans l'ensemble stable au cours des dernières années (entre 99 et 101 GW).

Avec les hypothèses considérées sur les autres usages de l'électricité et en définissant le niveau de pointe à une chance sur dix comme indiqué dans le paragraphe précédent, cet indicateur apparaît stable par rapport à la situation actuelle (autour de 100 GW) dans le scénario contrefactuel dans lequel les rythmes actuels de rénovation des bâtiments et d'évolution du parc de chauffage électrique sont supposés se maintenir jusqu'à l'horizon 2035.

Dans le scénario central de la présente étude A-SNBC 1, celui de la SNBC, qui combine un effort important de rénovation thermique et une électrification partielle du chauffage via des solutions efficaces, la pointe à une chance sur dix diminue légèrement toutes choses étant égales par ailleurs, de l'ordre de 3 GW par rapport à celle du scénario contrefactuel.

Ainsi, dans le cas où les objectifs de la SNBC en matière d'électrification, d'efficacité du bâti et des systèmes pour le chauffage électrique sont tous atteints, l'augmentation de la part du chauffage électrique est donc plus que compensée par les mesures d'efficacité.

Au sens des marges vis-à-vis du critère de sécurité d'alimentation, ce scénario présente 3 GW de marges de plus que le scénario contrefactuel. Dit autrement, **le scénario A-SNBC 1 est plus favorable que le scénario contrefactuel** s'agissant de la pointe électrique et de la sécurité d'alimentation.

4.8.2 Les scénarios à forte efficacité énergétique conduisent à une baisse importante de la pointe et offrent ainsi des marges supplémentaires pour la sécurité d'approvisionnement

Les autres scénarios permettent d'obtenir des éléments d'évaluation complémentaires et de situer l'enjeu sur la pointe électrique.

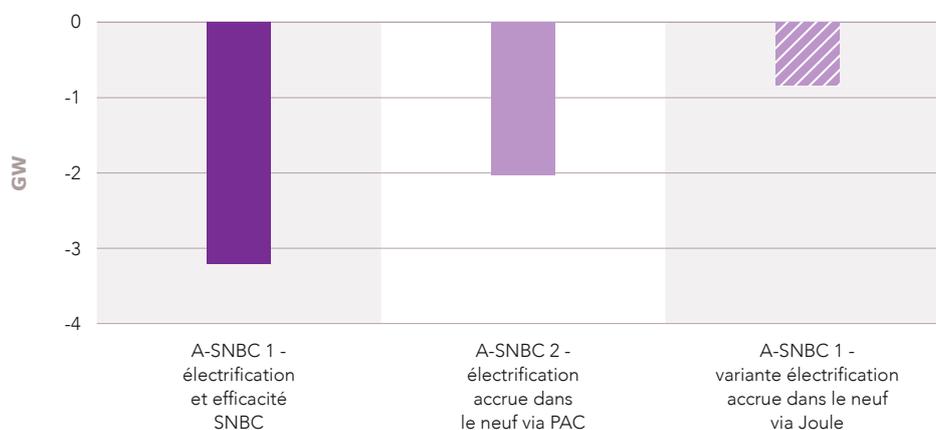
Dans le scénario B – celui où le programme de rénovation thermique serait intégralement mis en place, mais où la part du chauffage électrique n'évoluerait pas au-delà de la tendance actuelle – la pointe à une chance sur dix diminuerait de 4 GW par rapport à celle du scénario contrefactuel. Dans cette configuration, la sécurité d'approvisionnement serait logiquement nettement améliorée, avec près de 6 GW de marges supplémentaires.

4.8.3 Les scénarios d'électrification poussée dans le bâtiment neuf ont une faible influence sur la pointe électrique et sont compatibles avec l'objectif de maîtrise de la pointe de consommation

L'électrification accrue dans les logements neufs explorée dans le scénario A-SNBC 2 tend à ajouter environ 1 GW à la pointe à une chance sur dix lorsque ce surcroît d'électrification se fait avec une proportion importante de PAC, et 2 GW lorsqu'elle a lieu avec une proportion majoritaire de Joule.

Cette augmentation ne détériore pas la sécurité d'approvisionnement dans le cas où les objectifs d'efficacité énergétiques sur le bâti et le développement des pompes à chaleur sont atteints par ailleurs.

Figure 4.19 Effet d'un développement majoritaire de l'électrification dans le neuf, par rapport au scénario contrefactuel



Les orientations consistant à privilégier l'utilisation de solutions efficaces dans le bâtiment neuf ont donc, individuellement, un impact faible sur la pointe.

4.8.4 Même en cas de dégradation des performances sur les PAC ou d'appoints Joule ou d'un ciblage des rénovations, les scénarios relevant du cadrage de la SNBC ne conduisent pas à une augmentation de la pointe de consommation

Un élément rassurant de l'analyse sur le volet de la sécurité d'alimentation est que l'ensemble des variantes relevant du cadrage de la SNBC – c'est-à-dire avec une accélération des rénovations sur le plan qualitatif comme quantitatif –, conduisent à des indicateurs très proches s'agissant de la pointe à une chance sur dix.

Même dans les pires situations dans ce cadrage, c'est-à-dire avec une performance dégradée des pompes à chaleur en raison des mauvais dimensionnements et réglages, ou avec une installation accrue d'appoint Joule en complément de pompes à chaleur air-air, la pointe à une chance sur dix baisse tout de même de l'ordre de 1 GW par rapport à celle du scénario

contrefactuel, ce qui se traduit par une amélioration de la sécurité d'approvisionnement du même ordre de grandeur. Ainsi, **pris isolément, ces possibles effets ne sont donc pas de nature à conduire à une augmentation de la pointe électrique et une dégradation de la sécurité d'approvisionnement par rapport au scénario contrefactuel, dès lors qu'on se situe dans le cadre d'une mise en œuvre de la SNBC et de la politique du logement visant à l'amélioration du bâti.**

Par ailleurs, si les rénovations d'enveloppe se poursuivaient au rythme tendanciel (400 000 opérations par an) tout en étant performantes et ciblées sur les logements les plus énergivores, la pointe électrique à une chance sur dix augmenterait de 2 GW par rapport à celle de la SNBC mais resterait stable par rapport à celle du scénario contrefactuel, et par conséquent ne poserait pas de problème de sécurité d'approvisionnement. Ceci montre qu'il est possible de modérer l'effet du surcroît d'électrification sur la pointe électrique en ciblant l'effort sur les logements les moins performants, mais à la seule condition que les rénovations gagnent significativement en performance, par exemple c'est-à-dire en privilégiant les rénovations complètes, et qu'elles ciblent les meilleurs gisements – c'est-à-dire les logements les moins performants, ou «passoires thermiques».

Figure 4.20 Différentiel de pointe à une chance sur dix de l'ensemble des scénarios et variantes à efficacité énergétique SNBC, par rapport au scénario contrefactuel

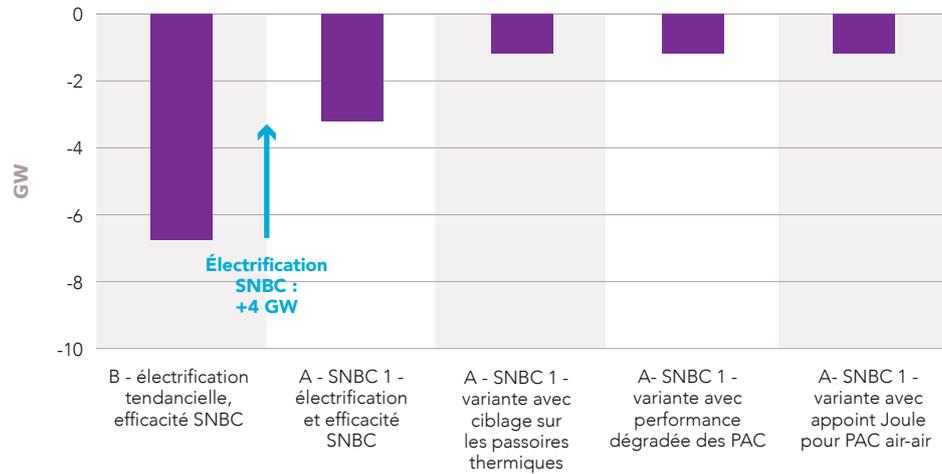
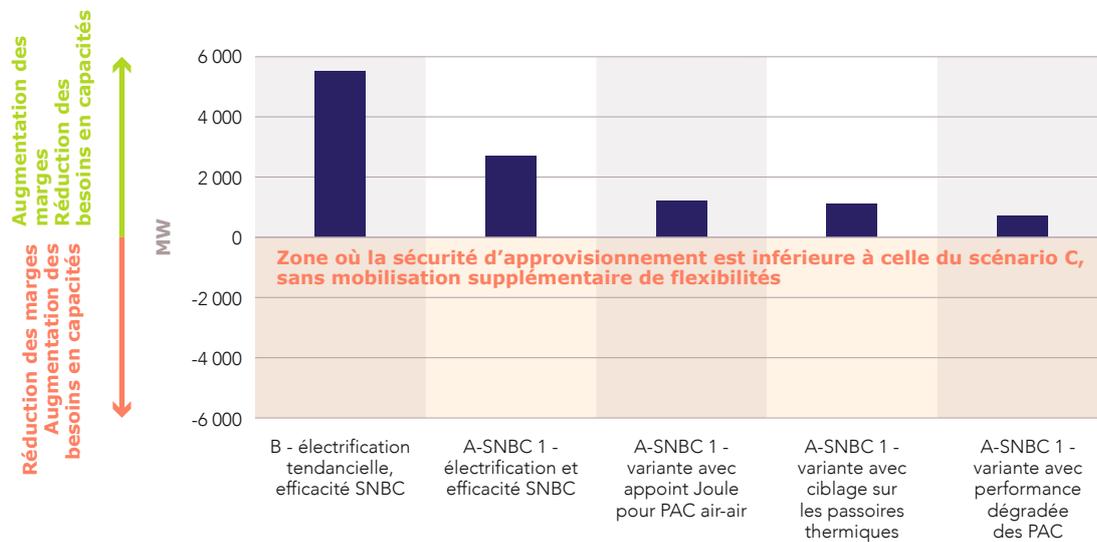


Figure 4.21 Différentiel de marge de l'ensemble des scénarios et variantes à efficacité énergétique SNBC, par rapport au scénario contrefactuel



4.9 Si l'accroissement de la part du chauffage électrique se fait sans atteindre les objectifs d'efficacité énergétique, l'impact sur la pointe devient significatif et nécessite de mobiliser des flexibilités supplémentaires pour la sécurité d'approvisionnement

4.9.1 Les scénarios de type D conduisent à faire augmenter la pointe

Dans le dispositif d'étude mis en place pour le présent rapport, plusieurs scénarios et variantes visent à évaluer les conséquences d'une non-atteinte des objectifs publics en matière d'efficacité énergétique, sur tous les plans (rénovation du bâti, profondeur et qualité des rénovations, efficacité des solutions de chauffage).

Le scénario D combine une électrification du parc de chauffage réussie à un échec sur les deux principales dimensions liées à l'efficacité énergétique :

le bâti et le système de chauffage. Il s'agit donc d'une situation *a priori* particulièrement défavorable du point de vue de la pointe électrique, qui correspond au «scénario repoussoir» présenté dans certaines études par des acteurs ou groupements opposés au développement du chauffage électrique.

L'analyse confirme une augmentation significative de la pointe électrique dans ce cas de figure : celle-ci augmenterait de 6 GW à l'horizon 2035 par rapport à celle du scénario contrefactuel, soit un écart de l'ordre de 9 GW par rapport à celle atteinte dans le scénario A-SNBC 1.

Figure 4.22 Différentiel de pointe à une chance sur dix par rapport au scénario contrefactuel dans les différents contextes d'efficacité énergétique

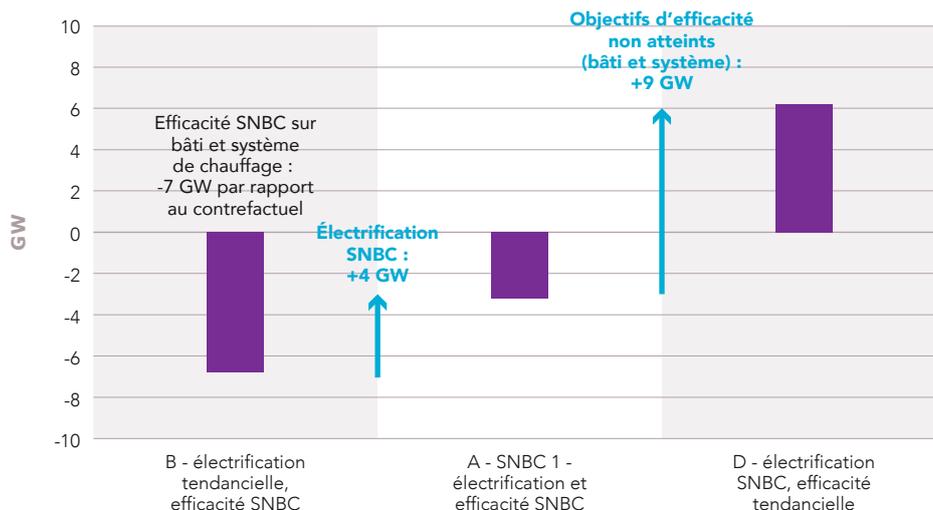
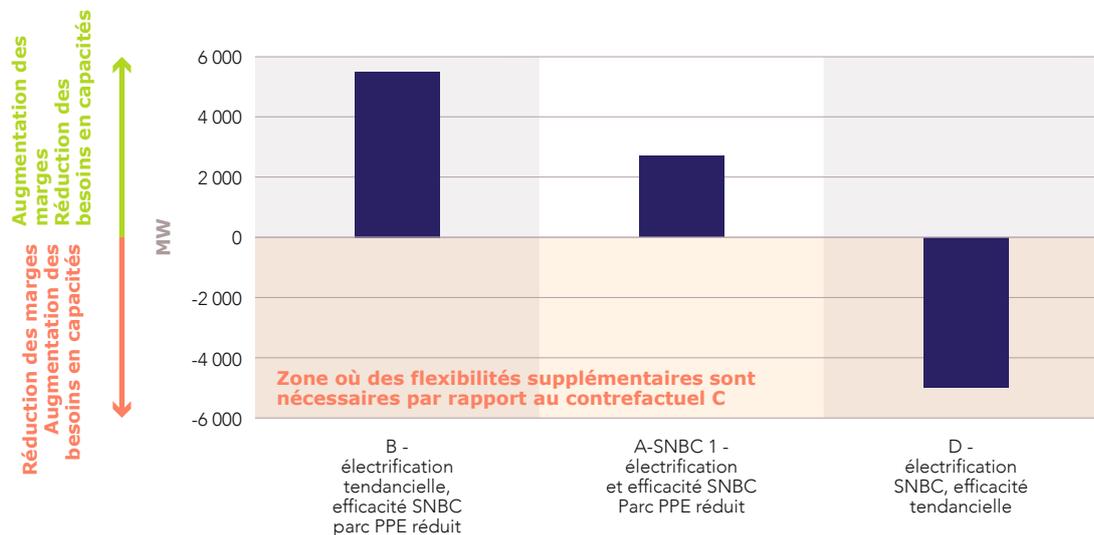


Figure 4.23 Déficit de marge par rapport au scénario contrefactuel pour le scénario D, en comparaison avec les scénarios A-SNBC 1 et B avec le mix de production contrefactuel



4.9.2 Dans les configurations décrites par le scénario D, la sécurité d’approvisionnement dépend plus fortement du développement des flexibilités

Ce que l’étude ne permet pas de confirmer en revanche, c’est l’automaticité entre une élévation substantielle de la pointe et un problème de sécurité d’approvisionnement : tout dépend alors du mix de production et du développement des flexibilités.

À l’horizon 2035, les analyses réalisées par RTE montrent que les évolutions prévues par la PPE et la SNBC (développement des énergies renouvelables, réduction de la part du nucléaire à 50%, interdiction de nouveaux projets de centrales à combustible fossile, développement des usages électriques dans la mobilité, l’hydrogène et le bâtiment) ne posent pas de difficulté pour la sécurité d’approvisionnement dès lors qu’elles s’accompagnent d’un développement raisonnable de la flexibilité sur la demande : pilotage de la recharge d’une partie des véhicules électriques, effacement des électrolyseurs en situation de tension,

développement modéré de l’effacement dans les secteurs résidentiel, tertiaire et industriel, etc.

En conséquence, dans les scénarios A-SNBC 1 et contrefactuel qui intègrent des niveaux de pointe globalement stables par rapport à aujourd’hui (autour des 100 GW), la sécurité d’approvisionnement peut être assurée sans nécessiter un déploiement massif et généralisé de nouvelles solutions de flexibilité. Dans le scénario B qui constitue la configuration la moins contraignante pour la pointe électrique, il n’existe *a fortiori* aucune difficulté de sécurité d’approvisionnement. Dans ces trois scénarios, le développement de la flexibilité constitue un atout et un facteur de sérénité.

Dans le scénario D en revanche, les niveaux de pointe atteignant des niveaux bien supérieurs à 100 GW et il apparaît par conséquent nécessaire d’accroître le développement des solutions de flexibilité pour assurer la sécurité d’approvisionnement. Si ce scénario ne présente pas d’impossibilité technique, la non-atteinte des objectifs d’efficacité énergétique conduit à devoir mobiliser de manière accrue la flexibilité dans tous les secteurs et en particulier dans l’hydrogène,

	Scénario contrefactuel	Scénarios de transition		
		Scénario B	Scénario A SNBC 1	Scénario D
Atteinte des objectifs	 Objectifs non atteints ni sur l'efficacité ni sur l'électrification	 Accélération sur l'efficacité mais pas sur l'électrification	 Accélération sur l'efficacité et sur l'électrification	 Accélération sur l'électrification mais pas sur l'efficacité
Pointe à une chance sur dix	Globalement stable ~100 GW	En baisse -6 GW par rapport au scénario C	En légère baisse -3 GW par rapport au scénario C	En hausse +6 GW par rapport au scénario C
Sécurité d'approvisionnement et besoins de flexibilité	 Critère assuré avec un développement raisonnable de l'effacement et des flexibilités tel que prévu par la PPE (un peu de pilotage simple de la recharge des VE, légère croissance de l'effacement...)	 Aucun problème de sécurité d'approvisionnement même avec un développement limité des flexibilités	 Critère assuré avec un développement raisonnable de l'effacement et des flexibilités tel que prévu par la PPE (un peu de pilotage simple de la recharge des VE, légère croissance de l'effacement...)	 Respect du critère qui nécessite un développement accru des flexibilités (par exemple, pilotage accru de la recharge des VE, croissance forte de l'effacement voire nouveaux moyens de production de pointe)

la mobilité et le bâtiment (généralisation de la recharge intelligente des véhicules ou le pilotage des bâtiments par exemple). Si ces technologies sont adoptées socialement, elles constituent une solution adaptée à la configuration du scénario D (voir section 4.10).

4.9.3 L'exploration d'une atteinte partielle des objectifs d'efficacité énergétique de la SNBC confirme l'intérêt d'une isolation performante pour la maîtrise de la pointe

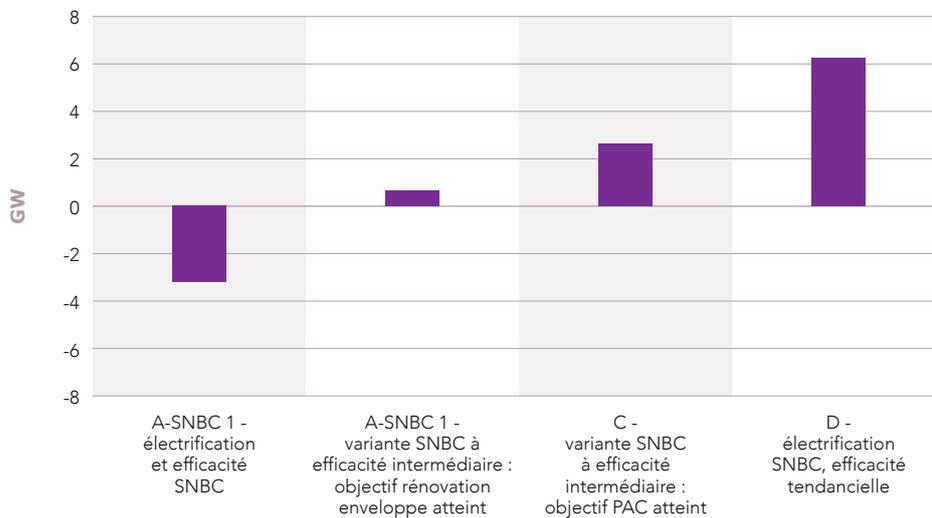
Les variantes intermédiaires entre les scénarios A-SNBC 1 et D portent sur des configurations où seul l'un des objectifs d'efficacité est atteint et permettent d'en mesurer le poids relatif. Dans les deux cas de figure, la pointe égalerait ou augmenterait légèrement par rapport au scénario contrefactuel (et par rapport à aujourd'hui) :

- ▶ **l'atteinte le seul objectif des rénovations d'enveloppe, sans celui d'efficacité des systèmes (i.e. sans la pénétration des pompes à chaleur) conduit une pointe à une chance sur dix égalant quasiment celle du scénario contrefactuel,**
- ▶ **l'atteinte du seul objectif d'efficacité des systèmes de chauffage électrique (scénario C) augmente la pointe à une chance sur dix de 2 GW par rapport à celle du scénario contrefactuel.**

Comme pour la consommation d'énergie, atteindre l'objectif en rénovation d'enveloppe seul semble permettre une maîtrise de la pointe de consommation légèrement supérieure à la variante où seul l'objectif sur la pénétration des pompes à chaleur est atteint.

En particulier, atteindre le seul objectif des rénovations d'enveloppe permet un même niveau de

Figure 4.24 Variantes du scénario A-SNBC 1 avec efficacité intermédiaire – différentiel de pointe à «une chance sur dix» par rapport au scénario contrefactuel



sécurité d’approvisionnement que dans le scénario contrefactuel, tandis que satisfaire l’objectif de pénétration des pompes à chaleur sans atteindre l’objectif de rénovation des enveloppes (scénario C) dégrade la sécurité d’approvisionnement avec une réduction des marges d’environ 2 GW par rapport au scénario contrefactuel. Selon l’évolution du parc et plus généralement du système électrique (consommation, interconnexions, évolution de la consommation des autres usages, parc des pays voisins, etc.), il pourrait être nécessaire de mobiliser des flexibilités supplémentaires.

4.9.4 L’exploration d’une configuration avec une électrification au-delà des objectifs de la SNBC confirme que seule la combinaison des niveaux d’électrification hauts avec une efficacité tendancielle nécessite des marges supplémentaires par rapport au scénario contrefactuel

En définitive, l’analyse des différents scénarios fait clairement apparaître que le scénario D et ses variantes combinant des niveaux d’électrification en ligne avec la SNBC voire au-delà dans le neuf mais avec une efficacité tendancielle sur tous les plans (enveloppe, systèmes de chauffage) conduisent à un niveau de sécurité d’approvisionnement dégradé par rapport au scénario contrefactuel.

Ce type de scénario nécessite la mobilisation de flexibilités supplémentaires.

Figure 4.25 Différentiel de pointe à une chance sur dix par rapport au scénario contrefactuel dans l'ensemble des scénarios et variantes

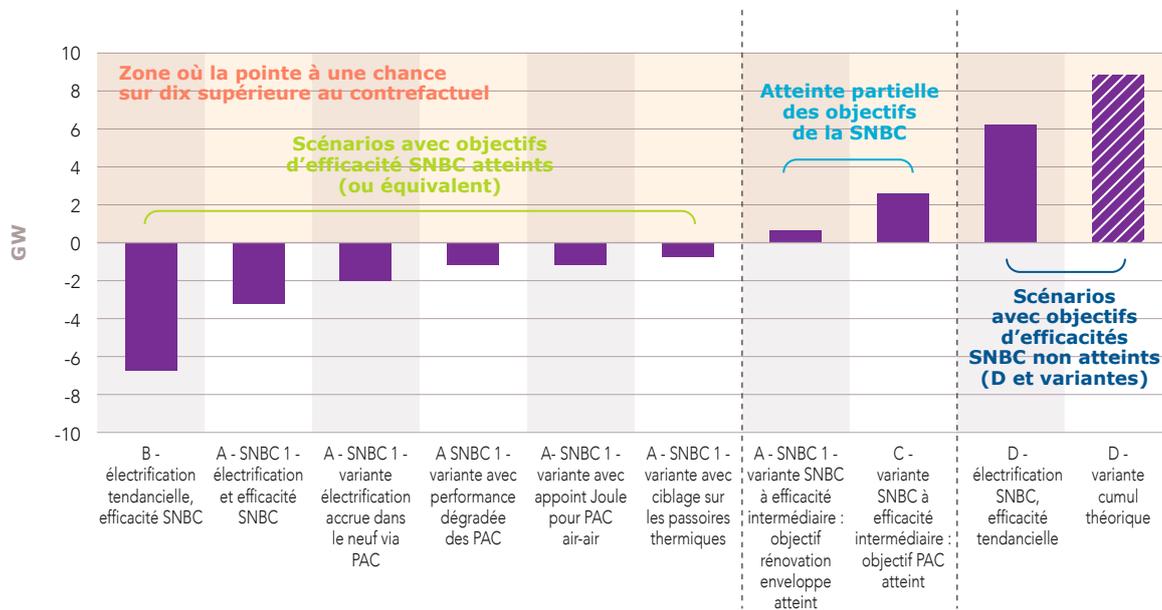
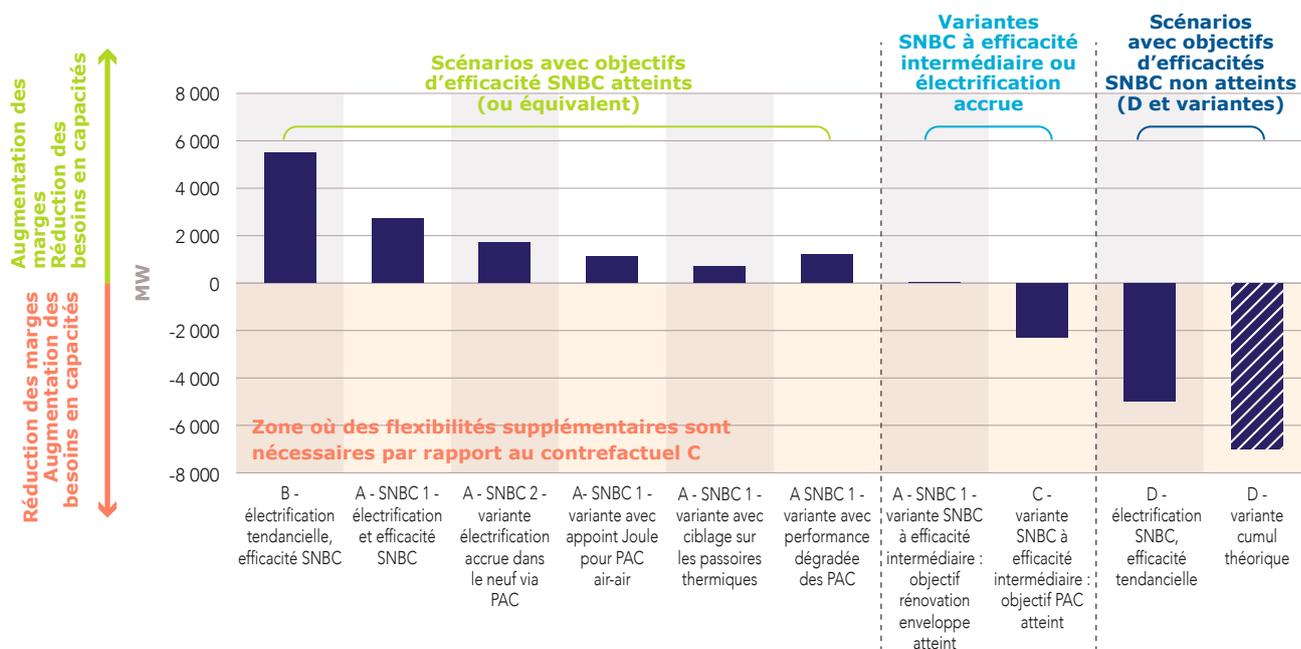


Figure 4.26 Différentiel des marges disponibles par rapport au scénario contrefactuel dans l'ensemble des scénarios et variantes



4.10 Des solutions de flexibilité sont envisageables pour répondre aux situations tendues, notamment via le pilotage de la demande

4.10.1 Le pilotage des usages, en particulier des véhicules électriques, sous réserve qu'il soit massif, pourrait offrir des volumes de flexibilité conséquents

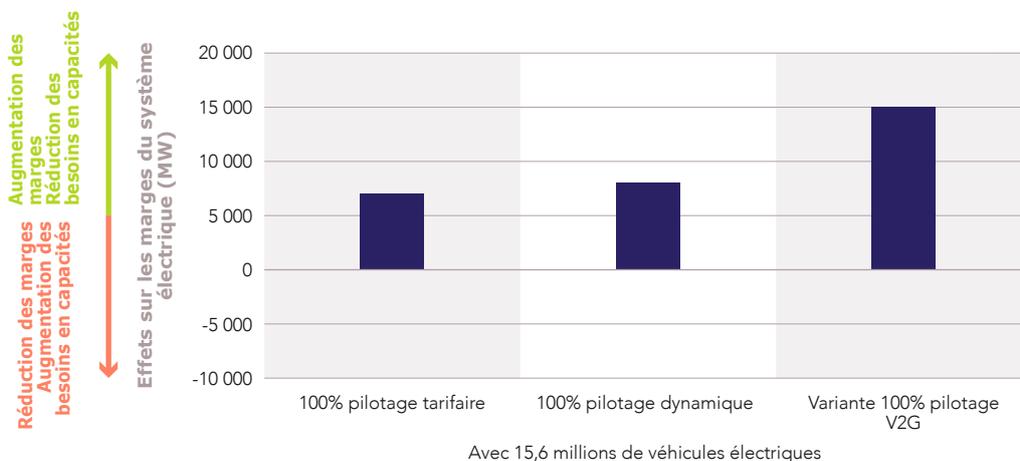
Pour répondre au besoin de flexibilité susceptible d'émerger dans des scénarios de type D, diverses ressources peuvent être mobilisées, du côté de l'offre et de la demande.

Du côté de l'offre, le développement de solutions stockages, comme des batteries de grande capacité est déjà engagé en France (avec de l'ordre de 60 MW installé à fin octobre 2020). Une puissance de l'ordre de près de 500 MW est attendue d'ici fin 2022 (sur la base des projets existants, demandes de raccordement et volumes contractualisés au titre de l'appel d'offres de long terme du mécanisme de capacité). La poursuite de la dynamique est néanmoins incertaine, car ce

volume correspond à un gisement de valeur bien identifié et limité (les services-système).

Du côté de la demande, un potentiel de flexibilité important réside en particulier dans le développement du pilotage des usages électriques. Aujourd'hui, le pilotage concerne déjà largement l'eau chaude sanitaire, 80% des ballons d'eau chaude étant déjà asservis à un signal tarifaire simple heures pleines-heures creuses, ce qui représente de l'ordre de 4 GW de consommation pilotée. De l'ordre de 3 GW d'effacement (avec un pilotage à partir des signaux de marché) sont déjà également développés et la PPE cible 6,5 GW (5 GW d'effacements industriels et tertiaires et 1,5 GW d'effacements résidentiels) à l'aide de différentes politiques publiques (évolution de l'appel d'offres effacement déjà engagée, nouvel appel d'offres pour les effacements tarifaires...). L'exploitation des gisements d'effacement pourrait se poursuivre au-delà de cette cible.

Figure 4.27 Effet du développement de la mobilité électrique sur les marges du système électrique selon le niveau de développement du pilotage de la recharge, pour différentes variantes de pilotage dans le scénario *Crescendo haut*, en différentiel par rapport au cas sans aucun pilotage



Le pilotage de la recharge des véhicules électriques est également identifié comme un levier important de flexibilité à l'avenir. Selon l'hypothèse de pilotage considérée (se situant entre deux situations extrêmes, d'un côté sans aucun développement du pilotage de la recharge et de l'autre où tous les véhicules seraient pilotés, avec accès à la technologie V2G)¹⁵, l'écart sur la contribution à la sécurité d'approvisionnement représente de l'ordre de 15 GW (avec 15,6 millions de VE). Les politiques publiques et les actions de l'ensemble des acteurs de la filière auront un impact important sur la contribution de cette flexibilité à la sécurité d'approvisionnement. Par rapport à l'hypothèse considérée dans le scénario de cette étude, un gisement théorique supplémentaire de l'ordre de 8 GW existe, dont 2 GW sans recours à la technologie V2G.

Globalement, le pilotage de la consommation sera vraisemblablement amené à se généraliser sous différentes formes (pilotage tarifaire simple ou dynamique) pour accompagner les évolutions de la consommation d'électricité, tant sur les nouveaux usages, tels que la mobilité électrique ou le *power-to-gas*, que sur les usages historiques, notamment sur le chauffage¹⁶.

4.10.2 Le pilotage du chauffage électrique offrirait de l'ordre de 2 GW de flexibilité

La demande de chauffage elle-même pourrait offrir des flexibilités, même si le chauffage des bâtiments, censé répondre à un besoin immédiat lié à la température, est par nature bien moins flexible que la recharge d'un véhicule électrique, la production d'hydrogène ou le chauffage d'un ballon d'eau chaude.

En pratique, dans les différents scénarios étudiés, les pointes de chauffage électrique résidentiel se situent en moyenne autour de 2 kW/logement¹⁷ (voir figure 4.28).

Avec l'apparition de radiateurs «connectés» sur le marché ou de dispositifs permettant le pilotage de chauffages «conventionnels» depuis le tableau électrique (via le compteur Linky ou d'autres installations déployées par des agrégateurs d'effacement ou des fournisseurs), il devient envisageable d'effacer ponctuellement le chauffage électrique dans un grand nombre de logements sur besoin du système électrique. Certains opérateurs d'effacement participent déjà aux marchés de l'électricité en valorisant la flexibilité sur un parc de chauffage électrique. Plusieurs modèles sont possibles et peuvent coexister :

- ▶ Un pilotage sous forme d'effacements « courts » (typiquement de l'ordre de 10 à 15 minutes) effectué « en roulement » sur un parc de logement (où chaque logement voit son chauffage effacé sur une période courte et de façon récurrente). Ce mode de pilotage permettrait de profiter de l'inertie thermique du logement/bâtiment de sorte que l'interruption ait peu d'impact sur le confort des occupants. Néanmoins l'effet agrégé est limité car chaque logement n'est effacé qu'une partie du temps et que l'effet de report de l'effacement sur les instants suivant l'effacement réduit l'effet global (ce qui est le pendant de l'absence d'effet important sur le confort).
- ▶ Un pilotage sur une plus longue durée sous forme de coupures du chauffage électrique d'un ensemble de sites pendant une situation de tension. Ce mode de pilotage contribuerait naturellement beaucoup plus à la sécurité d'approvisionnement mais aurait un impact beaucoup plus marqué sur le confort des occupants et soulève une question d'acceptabilité plus importante pour un développement massif, du moins pour les logements ne disposant pas d'alternative de chauffage ponctuelle (cheminée par exemple).

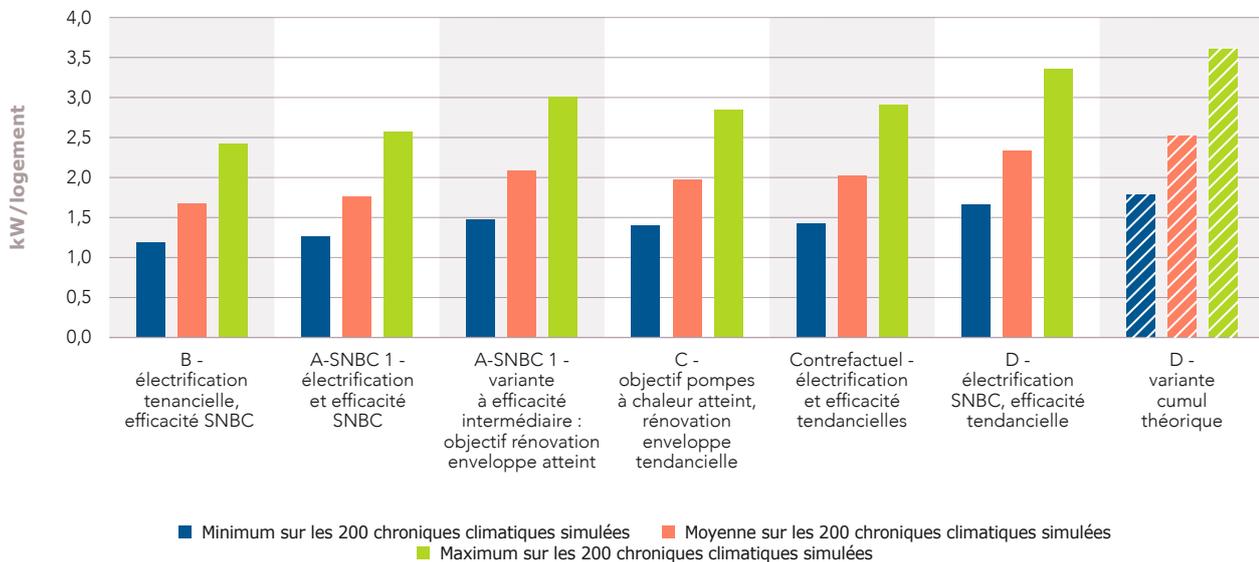
Avec 10 à 15 millions de logements équipés de radiateurs électriques à effet Joule selon les scénarios, la généralisation de ce pilotage pourrait théoriquement représenter une dizaine de GW, en

15. RTE, 2019. Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique.

16. Les évaluations de gisements de flexibilité (réalisés dans le cadre du groupe de travail des scénarios 2050 dédiée à la flexibilité) montrent que les autres usages électriques, notamment les usages blancs, la cuisson et la climatisation ne devraient représenter qu'un volume limité de flexibilité, moins de 1 GW à l'horizon 2030-2040.

17. Moyenne des appels de puissance maximaux de chauffage électrique résidentiel sur les 200 chroniques climatiques simulées, rapportée au nombre de logements chauffés à l'électricité.

Figure 4.28 Contribution moyenne d'un logement à la pointe de chauffage résidentiel en 2035



considérant des effacements tournants où chaque ménage serait effacé au total pendant 20 minutes sur une heure d'activation. Il n'est cependant pas réaliste d'imaginer une généralisation sur l'ensemble du parc, pour des questions d'acceptabilité vis-à-vis du confort thermique et d'éligibilité technique des installations. Notamment, dans son premier retour d'expérience sur les démonstrateurs *smart grid* de 2016¹⁸ l'ADEME a souligné que 15 % à 20 % des habitations ciblées s'étaient révélées inéligibles à l'installation d'un système de pilotage de la consommation pour différentes raisons (difficulté d'accès au compteur, absence de box internet, incompatibilité des systèmes de chauffage existants avec la technologie choisie pour le pilotage).

- ▶ En faisant l'hypothèse que ce type de pilotage concernerait en majorité les radiateurs électriques installés dans le neuf d'ici 2035, disposant des performances nécessaires à la fois en inertie et en connectique, le gisement associé s'élèverait entre un et deux millions de logements dans

les scénarios d'électrification à hauteur de la SNBC (principalement des logements neufs), soit de l'ordre 500 MW d'appel de puissance effaçable lors des périodes de tension.

- ▶ Dans le cas d'une électrification accrue dans le neuf via des radiateurs électriques à effet Joule, le gisement s'élèverait à trois millions et demi de logements neufs chauffés au Joule, correspondant à une puissance effaçable d'un peu moins d'un GW. Une contribution additionnelle d'un GW supplémentaire pourrait être accessible en considérant également la participation d'un million de logements équipés de solutions de chauffage bi-énergie utilisant les radiateurs électriques et des chaudières à bois (sans se limiter aux logements neufs).

La consommation de chauffage des logements équipés de pompes à chaleur peut également être rendue flexible. En particulier les pompes à chaleur air-eau se prêtent bien au pilotage des consommations car le circuit d'eau présente une inertie thermique importante, qui peut encore être accrue

18. ADEME, «Systèmes Électriques Intelligents. Premiers résultats des démonstrateurs» 2016. <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/systemes-electriques-intelligents-premiers-resultats-demonstrateurs-010039-rapport.pdf>.

grâce à un stockage tampon. Certains équipements sont même pourvus de stockages tampon déjà intégrés, puisque dans certains pays il est nécessaire que les pompes à chaleur puissent gérer des périodes d'effacement. Le pilotage des consommations des pompes à chaleur air-air récentes¹⁹ est également possible, même si ces systèmes disposent d'une inertie thermique inférieure à celle des systèmes air-eau. En considérant un pilotage des consommations des pompes à chaleur dans les logements récents avec un bon niveau d'isolation, un gisement additionnel d'environ 500 MW serait accessible.

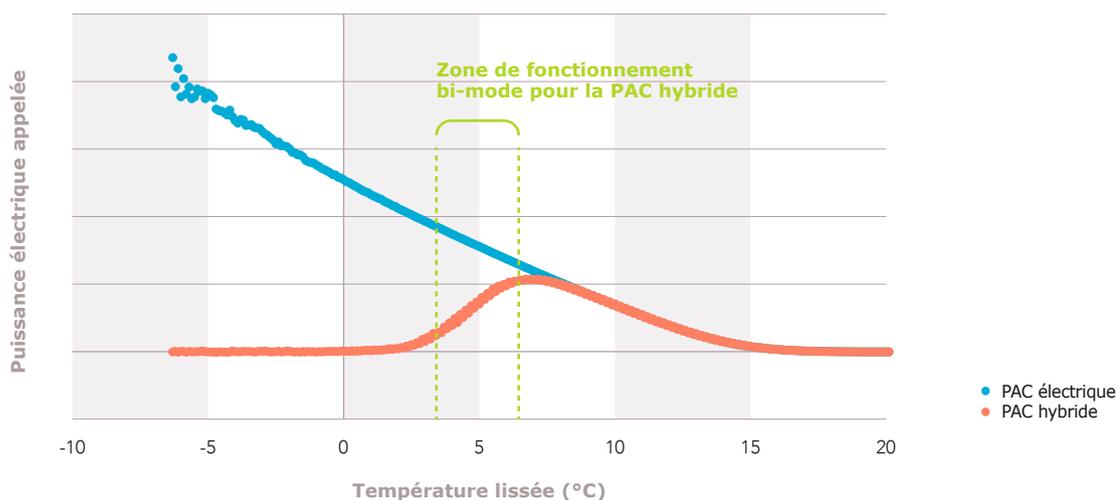
Bien que non négligeable, cette potentielle flexibilité resterait bien inférieure au besoin de marges supplémentaires identifié dans ce cas de figure. De plus, quel que soit le mode de pilotage, des effets de report conduisent à limiter l'intérêt sur le système électrique.

4.10.3 Les pompes à chaleur hybrides constituent une option intéressante pour limiter les points de consommation

La pompe à chaleur hybride gaz constitue une autre solution de flexibilité, déjà disponible sur le marché bien que peu représentée dans le parc aujourd'hui (elle représente quelques pourcents des ventes de pompes à chaleur²⁰).

Cette technologie se compose d'une pompe à chaleur couplée à une chaudière gaz venant prendre la relève de la pompe à chaleur lorsque la performance de celle-ci se dégrade, notamment en période de froid intense. Pour rappel, une pompe à chaleur hybride fonctionne comme une pompe à chaleur électrique au-dessus d'une température extérieure de 5°C, en bi-mode entre 3 et 5°C, c'est-à-dire en sollicitant à la fois la chaudière gaz et la pompe à chaleur électrique pour la production de chaleur, et en chaudière seule en-dessous de 3°C.

Figure 4.29 Évolution de la puissance électrique appelée par les pompes à chaleur électriques et hybrides en fonction de la température lissée²¹

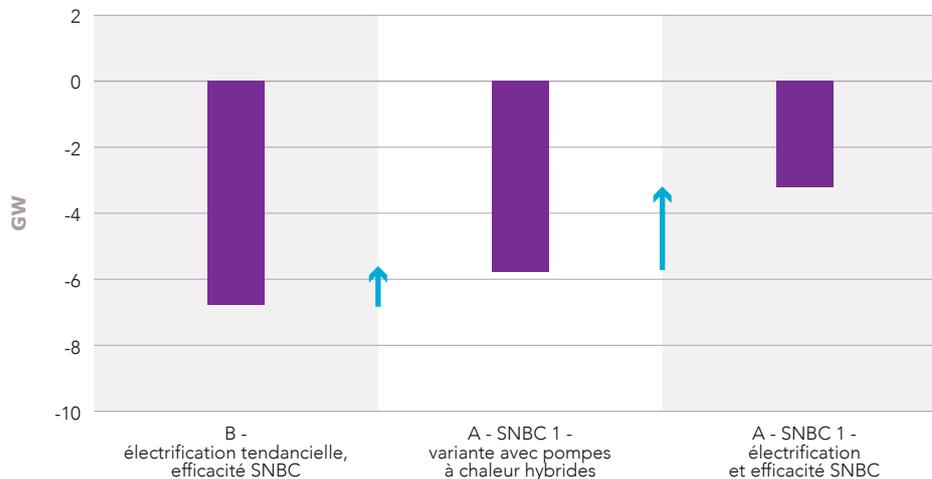


19. Qui disposent de compresseurs inverter à vitesse variable.

20. 2020, UNICLIMA. Bilan 2019 et perspectives 2020 du génie climatique, dossier de presse.

21. Sur ce graphique, les températures sont lissées, ce qui explique que la zone de fonctionnement bi-mode se place sur des valeurs différentes de la plage de températures brutes. En effet, si la température brute extérieure est de 3°C à un instant donné, la température lissée, elle, prend en compte l'inertie thermique des bâtiments au regard des heures précédentes. Pour des températures brutes très froides, donc rares, la température lissée correspondante aura tendance à être plus élevée, car prenant en compte l'inertie des heures plus chaudes ayant eu lieu avant.

Figure 4.30 variante du scénario A-SNBC 1 avec pompes à chaleur et scénarios B et A-SNBC 1 – différentiel de pointe à une chance sur dix par rapport au scénario contrefactuel



En croisant ce fonctionnement avec le référentiel climatique, les pompes à chaleur hybride utilisent ainsi en moyenne **67% du temps la pompe à chaleur seule, 18% la chaudière seule, 15% les deux.**

Une variante du scénario A-SNBC 1 avec des pompes à chaleur hybrides a été construite en supposant que toutes les pompes à chaleur installées en supplément dans le scénario A-SNBC 1 par rapport au scénario d'électrification tendancielle B sont des pompes à chaleur hybrides, c'est-à-dire couplées à une chaudière gaz. Par rapport au scénario de référence A-SNBC 1, le remplacement d'environ 2,5 millions de pompes à chaleur électriques par des pompes à chaleur hybrides conduit à réduire la consommation électrique annuelle de **1,7 TWh**. Dans ce cas **30%** de la chaleur est produite par la partie chaudière de la pompe à chaleur hybride. **L'avantage premier de la pompe à chaleur hybride est son effacement de la consommation électrique lors des épisodes de froid.** En effet, lorsque la température est négative, les pompes à chaleur hybrides utilisent le mode chaudière pour fournir la chaleur nécessaire et ne consomme pas d'électricité.

Concrètement, dans la variante avec pompes à chaleur hybrides, la pointe à une chance sur dix est réduite de plus de 3 GW par rapport au scénario contrefactuel soit plus 3 GW par rapport au scénario de référence B SNBC.

In fine, la variante A-SNBC 1 avec pompe à chaleur hybride permet de quasiment se ramener au niveau de la pointe du scénario B, tout en ayant atteint le niveau d'électrification du chauffage de la SNBC (cf. figure 4.30). Ce scénario permet d'illustrer de façon théorique l'impact des pompes à chaleur hybrides pour le système électrique mais il ne considère pas nécessairement le gisement économique pour cette technologie ni les contraintes d'installation requérant l'accès au réseau de gaz ou la place nécessaire dans le logement.

Enfin, plutôt que d'envisager l'intérêt des pompes à chaleur hybrides dans la perspective d'une substitution à des pompes à chaleur électriques déployés dans le cadre du scénario A-SNBC 1, il serait possible de les considérer en supplément. Dans ce cas, il serait possible d'aller encore plus loin dans la réduction des émissions, en remplaçant davantage de chaudières gaz (les logements ou bureaux concernés ayant par définition déjà accès aux réseaux publics de distribution de gaz).

Combiner de meilleures performances pour l'enveloppe comme le système de chauffage entraîne une nette amélioration du confort

La consommation d'énergie (et en l'occurrence d'électricité) étudiée dans le chapitre 4 a comme pendant le niveau de chaleur produite pour les occupants des bâtiments concernés. Dans l'étude RTE-ADEME, les scénarios étudiés se distinguent nettement en fonction du degré de confort qu'ils procurent aux utilisateurs.

L'analyse met ainsi en évidence une différence importante entre, d'une part, les scénarios ayant atteint tout ou partie des objectifs d'efficacité de la SNBC, et, d'autre part, les scénarios ayant seulement mis en œuvre des mesures de façon tendancielle.

Si une électrification répondant aux attentes de la SNBC mais avec une efficacité tendancielle (scénario D) se détache comme le scénario le plus consommateur en électricité, le scénario où l'électrification comme l'efficacité sont tendancielle (C) est finalement assez proche d'une partie des variantes effectuées autour du scénario B SNBC. Il est néanmoins important de mettre en lumière les sous-jacents de l'efficacité énergétique, au-delà de la seule diminution de la consommation d'énergie.

L'isolation du bâti et l'installation de systèmes de chauffage efficaces (les pompes à chaleur de préférence aux radiateurs électrique à effet Joule) permettent un meilleur confort à dépense d'énergie moindre. L'isolation permet en effet de réduire l'écart entre la température ressentie et la température de consigne du chauffage. Dans une pièce chauffée, la température ressentie correspond ainsi à la moyenne entre la température ambiante de la pièce assurée par la consigne du chauffage et la température des parois. L'isolation des parois, en faisant disparaître la sensation de « parois froides », permet d'augmenter la température ressentie pour une même température de consigne. La pompe à chaleur quant à elle permet de consommer environ trois fois moins d'électricité pour une même production de chaleur.

Comme expliqué au chapitre 2, la plupart des actions d'efficacité énergétique (rénovation de l'enveloppe, remplacement par un système plus efficace) s'accompagnent d'un effet rebond. Celui-ci diminue le gain escompté en matière d'efficacité énergétique (concrètement de moitié environ) mais correspond globalement à une amélioration du confort (cf. Figure 4.31). Néanmoins, l'estimation comparée de la chaleur produite par le chauffage électrique dans les scénarios A-SBNC 1 et D (qui combinent un même niveau de développement des solutions électriques mais des degrés différents de performance dans le bâtiment et les solutions de chauffage), soulignent l'intérêt des actions sur la performance pour augmenter la quantité de chaleur produite par rapport à la quantité d'électricité utilisée. Dans le scénario D, 52 TWh d'électricité sont consommés pour le chauffage résidentiel, pour produire 57 TWh de chaleur, tandis que dans le scénario A-SBNC 1, le chauffage électrique résidentiel consomme 41 TWh pour produire plus de 62 TWh de chaleur, estimées dans chaque cas à partir de la modélisation exposée au chapitre 2. Ainsi le gain en confort lié à l'efficacité énergétique est-il réel (TWh/an de chaleur supplémentaire).

En définitive, les efforts sur la performance des bâtiments et des solutions de chauffage permettent de rendre un bien meilleur service sur le plan thermique :

- ▶ il y a moins de déperdition grâce à l'isolation (à même température de consigne, la température ressentie augmente),
- ▶ il y a davantage de chaleur produite pour moins d'énergie électrique consommée grâce aux pompes à chaleur.

Pour rendre compte de cet effet, les fiches descriptives des scénarios présentées au chapitre 3 contiennent une information sur le niveau de confort thermique (+ dans le cas où l'atteinte des objectifs sur la performance est partielle, ++ dans le cas où elle est totale).

Figure 4.31 Décomposition des effets liés aux pompes à chaleur et à l'isolation : l'isolation permet de réduire le besoin thermique, la pompe à chaleur permet de réduire la consommation d'électricité tout en fournissant plus de chaleur.



5

**ANALYSE
ENVIRONNEMENTALE :
une réduction substantielle
des émissions de CO₂**

ANALYSE ENVIRONNEMENTALE : UNE RÉDUCTION SUBSTANTIELLE DES ÉMISSIONS DE CO₂

Synthèse

Pour aller au-delà des controverses sur les méthodes de calcul de l'intensité carbone du chauffage électrique, l'approche retenue dans le rapport RTE-ADEME consiste à comparer le bilan des émissions de différents scénarios en trois étapes : au périmètre du secteur du bâtiment et du système électrique en France, puis au même périmètre en intégrant les effets induits sur le système électrique des autres pays européens, puis enfin en ajoutant les émissions indirectes dans le cadre d'une analyse en cycle de vie.

Dans le scénario A-SNBC 1, les émissions diminuent de 28 MtCO₂/an en France par rapport à aujourd'hui, en ligne avec la trajectoire de la SNBC, grâce à la combinaison d'actions de progression de l'efficacité du bâti, de décarbonation des vecteurs énergétiques du chauffage et de déploiement de solutions de chauffage efficaces.

- 1) Seule l'activation combinée des leviers de l'étude (performance du bâtiment et des solutions de chauffage, bascule vers des solutions de chauffage bas-carbone) permet d'atteindre les objectifs de la SNBC.
 - a. Au périmètre du secteur du bâtiment, le scénario A-SNBC 1 permet de diminuer les émissions de 11 MtCO₂ par rapport au scénario contrefactuel **et de l'ordre de 28 MtCO₂ par rapport à aujourd'hui en France.**
 - b. Même avec un recours accru au chauffage électrique, la trajectoire de décarbonation du mix électrique français se poursuit.
 - c. Le scénario A-SNBC 2 avec une électrification accrue des logements neufs avec principalement des pompes à chaleur permet de diminuer les émissions d'1 MtCO₂ de plus. Il donne de la sécurité sur l'atteinte de l'objectif et/ou permet de préparer l'augmentation de l'effort pour 2030.

L'ensemble des solutions considérées est nécessaire pour suivre la trajectoire de décarbonation de la SNBC, même s'il apparaît utile de les prioriser en particulier sur les passoires thermiques

- 2) À l'échelle de l'inventaire national d'émissions de CO₂, toutes les actions de développement du chauffage électrique et de renforcement de l'énergétique (du bâti et des solutions de chauffe) ont un effet positif.
 - a. Tous les scénarios améliorent la situation par rapport au scénario contrefactuel. Même les scénarios B, C et D, respectivement orientés uniquement vers la rénovation du bâti ou vers l'électrification, conduisent à une réduction des émissions de CO₂ de l'ordre de 5 à 6 Mt par rapport à ce dernier, soit une réduction de l'ordre de 22 à 23 Mt par rapport à aujourd'hui.
 - b. Les scénarios B, C et D sont néanmoins insuffisants pour atteindre l'objectif de la SNBC. Ils ne permettent d'éviter qu'environ la moitié des émissions séparant le scénario contrefactuel de la SNBC.
- 3) Les actions d'électrification et d'efficacité énergétique sur le bâti doivent être combinées pour atteindre les objectifs de la SNBC, au sens de l'inventaire national d'émissions de CO₂. Le développement de solutions électriques permet de remplacer des chaudières au fioul et au gaz (scénarios C et D). La rénovation du bâti permet principalement de réduire les émissions des bâtiments qui restent chauffés par des combustibles fossiles (et dans une moindre mesure les émissions en France associées au chauffage électrique).
- 4) La substitution de radiateurs électriques par des pompes à chaleur n'a qu'un effet faible sur les émissions évitées en France : l'effet ne porte que sur le système électrique – déjà largement décarboné – et est donc inférieur à 0,5 Mt. En réduisant la consommation électrique et en permettant des volumes d'export d'électricité supplémentaires, elle a néanmoins un effet plus important à l'échelle européenne.

5) Le ciblage des logements les moins performants couplé à l'exigence de performance sur les rénovations présente des atouts pour la lutte contre le changement climatique. Le ciblage des passoires thermiques permet d'éviter pratiquement l'émission de la même quantité de CO₂ (à 1,5 MtCO₂/an près) qu'un scénario de rénovation généralisé (scénario A-SNBC 1), mais avec deux fois moins de rénovations annuelles du bâti, sous les mêmes hypothèses d'électrification et d'efficacité des solutions de chauffage que le scénario A-SNBC 1.

L'analyse à l'échelle européenne ou en cycle de vie confirme l'intérêt de l'accélération sur l'isolation et renforce l'intérêt de l'accélération de l'électrification avec des solutions de chauffage efficaces

6) Pour l'établissement des bilans CO₂ à l'échelle européenne, il existe un arbitrage entre augmenter la consommation d'électricité en France notamment en y accroissant la part du chauffage et exporter l'électricité produite en France pour aider la décarbonation d'autres pays européens

- a. Cet arbitrage est favorable à l'installation de pompes à chaleur en France, quel que soit le combustible fossile (fioul ou gaz) auquel elle se substitue pour le chauffage.
- b. Une fois pris en compte les effets induits, le remplacement des chauffages au fioul par des pompes à chaleur apparaît l'action qui présente le meilleur rendement (son bénéfice est du même ordre de grandeur que d'éviter le fonctionnement d'une centrale électrique au charbon ou le remplacement d'une voiture à moteur thermique par une voiture électrique, en utilisant une électricité bas-carbone). L'action suivante qui a le plus d'effet en matière de réduction des émissions de CO₂ à l'échelle européenne est la substitution de chaudières au gaz par des pompes à chaleur.

7) En tenant compte du bilan européen des émissions, le développement du chauffage électrique en France dans un contexte de développement de la production renouvelable conduit bien systématiquement à réduire les émissions.

- a. Le bilan des scénarios A-SNBC 1 et A-SNBC 2 est encore plus favorable au niveau européen (-14 Mt d'émissions évitées par rapport au scénario contrefactuel).

- b. Même le développement du chauffage électrique en France via des radiateurs et sans effort spécifique sur la rénovation (scénario D) conduit à réduire les émissions de 3 MtCO₂/an par rapport au scénario contrefactuel (soit une réduction des émissions de CO₂ de 20 Mt par rapport à aujourd'hui).
- c. Les scénarios de développement du chauffage électrique par des solutions peu efficaces et sans accompagnement par un effort sur le bâti présentent, sur le temps long, des limites en matière de potentiel de décarbonation.

8) Les pompes à chaleur hybrides peuvent jouer un rôle dans la réduction des émissions, en fonction de leur utilisation

- a. Si elles sont utilisées en substitution à des chaudières au gaz, elles permettent d'améliorer le bilan carbone de l'ordre de 3-4 MtCO₂/an pour 2,5 millions de logements équipés.
- b. Si elles sont utilisées en substitution à des pompes à chaleur électriques, le bilan est voisin en intégrant les effets induits à l'échelle européenne. En effet, l'augmentation des émissions (à l'échelle nationale) liées au surcroît d'utilisation du gaz (qui fournit alors en moyenne 30% des besoins de chaleur) et la diminution (à l'échelle européenne) résultant d'une moindre consommation électrique lors des périodes très froides se compensent à peu près.

9) L'analyse précédente est renforcée en intégrant le cycle de vie des combustibles et des matériels nécessaires aux actions de rénovation du bâti et des systèmes de chauffage.

- a. La prise en compte de la partie amont du cycle de vie des combustibles accroît les gains d'émissions de gaz à effet de serre, de l'ordre de 20%, soit jusqu'à 2 MtCO₂eq/an dans le scénario A-SNBC 1 (le gain associé se situe hors de France).
- b. Malgré l'incertitude autour de l'analyse en cycle de vie des actions de rénovation, l'ordre de grandeur des émissions de ces actions est suffisamment faible pour ne pas modifier l'intérêt relatif des différents scénarios d'un point de vue environnemental.

5.1 La méthode utilisée dans le rapport vise à chiffrer les émissions de chaque scénario en s'affranchissant des débats récurrents sur les méthodes d'attribution du secteur électrique

5.1.1 L'évaluation précise des émissions de l'usage chauffage suscite des questions méthodologiques

Les émissions du chauffage en France sont estimées à 53 MtCO₂ en 2018 d'après les données du CITEPA-Secten¹ et la proportion du chauffage dans ces émissions indiquée par le CGDD². Cela représente de l'ordre de 15% des émissions totales de France. Il s'agit donc d'un secteur sur lequel les efforts de décarbonation doivent s'accroître au cours des prochaines années dans une perspective d'atteinte de la neutralité carbone. Un des objets du rapport RTE-ADEME est ainsi d'évaluer l'effet des politiques publiques sur la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre des bâtiments, notamment en matière de rénovation et de développement des pompes à chaleur électriques.

Les estimations des émissions actuelles associées au chauffage sont comprises dans une fourchette relativement large, qui s'explique par la difficulté à définir le périmètre d'évaluation et à comptabiliser les émissions associées à certaines sources ou vecteurs énergétiques.

Ainsi, la comptabilité des émissions liées au chauffage ne soulève pas d'enjeu méthodologique dès lors qu'une seule source d'énergie de chauffage est utilisée, comme historiquement le fioul ou le gaz d'origine fossile, ou encore le bois.

Cette comptabilisation devient plus difficile lorsque les installations de chauffage utilisent différentes sources d'énergies, dont certaines présentent elles-mêmes des caractéristiques hétérogènes ou changeantes dans le temps sur le plan de leur performance climatique. C'est notamment le cas

du chauffage urbain, catégorie qui recoupe plus de 700 réseaux de chaleur distincts utilisant des sources d'énergies primaires allant de combustibles fossiles fortement émetteurs (fioul) à des énergies bas-carbone, renouvelables ou de récupération.

Le cas des émissions liées au chauffage électrique est plus complexe encore.

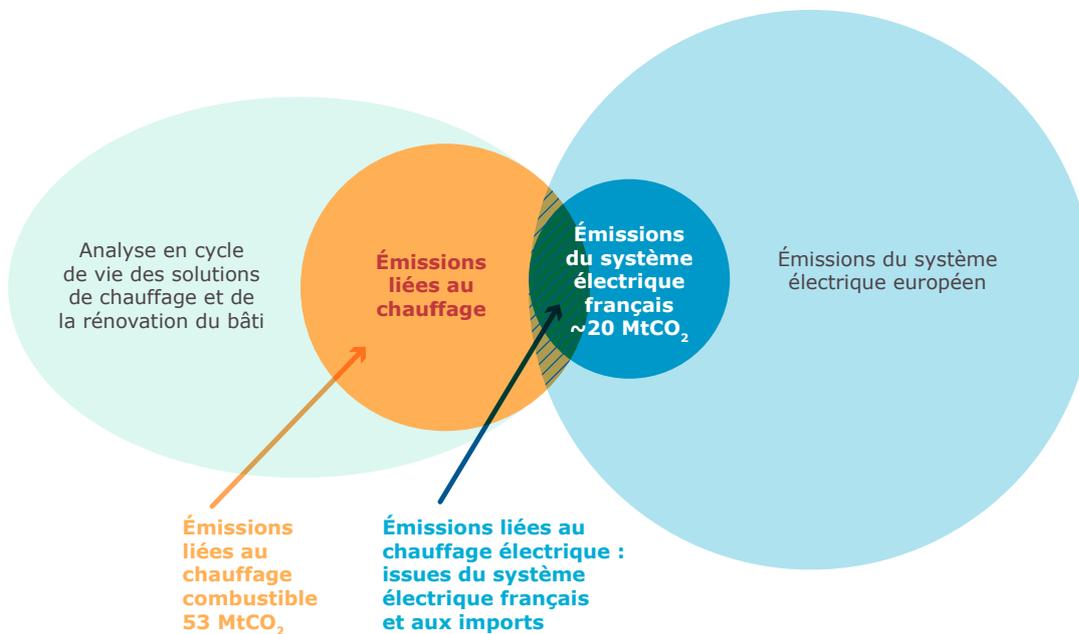
D'une part, du côté de la production, l'électricité voit son contenu carbone varier en fonction des moyens et sources de production sollicités à différents instants en France mais aussi à l'étranger dans les pays interconnectés avec la France. Le système électrique français est aujourd'hui très largement bas carbone (à 93% en 2019), ce qui constitue le fondement des politiques de décarbonation s'appuyant sur les transferts d'usage vers l'électricité, comme dans le secteur des transports, de l'industrie ou du bâtiment. Néanmoins, de nombreuses centrales thermiques fossiles demeurent en fonctionnement en Europe : leur fonctionnement est réduit lorsque la France exporte de l'électricité – ce qui est le cas de figure le plus fréquent –, et elles sont davantage sollicitées au moment d'imports de la France lors des périodes de plus forte consommation.

D'autre part, du côté de la consommation, l'électricité alimente plusieurs usages simultanément, posant ainsi la question de l'attribution des émissions à chaque usage. Le réseau électrique joue en effet un rôle de hub qui mutualise l'ensemble de la production d'électricité pour alimenter l'ensemble des usages électriques. Cette mutualisation permet une bonne optimisation de l'utilisation des moyens de production et de flexibilité électriques. Ce fonctionnement ne permet cependant pas de flécher des sources

1. CITEPA, 2020. Format Secten (données d'inventaires d'émissions).

2. CGDD, 2019. Les émissions de CO₂ liées à l'énergie en France de 1990 à 2017.

Figure 5.1 Périmètres pouvant être pris en compte dans l'analyse des émissions du chauffage (valeurs 2018)



de production spécifiques (et donc les émissions associées) vers certains usages³. L'évaluation des émissions de certains usages nécessite donc de définir et de préciser des méthodes d'allocation de la production électrique aux usages.

Enfin, la question est rendue encore plus complexe par le fait que l'effet de serre implique non seulement les émissions de CO₂ mais également d'autres gaz, non seulement au périmètre national mais également au périmètre européen et même mondial, non seulement durant la phase de combustion des combustibles fossiles (directement dans des chaudières ou dans des centrales électriques) mais également lors de leur extraction et de leur transport et distribution jusqu'au lieu de consommation.

Finalement, plusieurs approches existent pour évaluer le contenu CO₂ des usages électriques et notamment du chauffage. Le large éventail des valeurs obtenues selon ces différentes approches alimente un débat récurrent sur la juste métrique devant être adoptée, notamment dans le cadre des réglementations thermiques et environnementales pour la construction neuve ou pour les bilans de gaz à effet de serre s'appuyant sur les facteurs d'émission faisant référence dans la Base Carbone® de l'ADEME.

Comme l'avait noté l'ADEME dans une note de positionnement⁴ publiée en août 2020, des approches différentes peuvent être utilisées selon le contexte et les objectifs visés. En particulier, la définition des paramètres de la réglementation du secteur

3. Le dispositif de garanties d'origine permet certes d'attester qu'une quantité équivalente d'électricité renouvelable à celle qui est consommée par un utilisateur a effectivement été produite par des moyens renouvelables en France ou en Europe, mais son fonctionnement présente un certain nombre de limites souvent mises en évidence dans le débat public (caractère non horodaté des garanties d'origine, impact limité sur les incitations au développement des installations renouvelables, etc.)

4. ADEME, 2020. Fiche technique. Positionnement de l'ADEME sur le calcul du contenu CO₂ de l'électricité, cas du chauffage électrique.

des bâtiments peut s'appuyer sur des méthodes différentes de celles utilisées pour les études prospectives. La discussion méthodologique présentée ci-dessous reprend les éléments déjà évoqués par l'ADEME dans sa note précitée.

Il convient toutefois de noter que l'objet du rapport RTE-ADEME en général et de la section suivante en particulier ne porte pas sur l'appréciation des méthodes de calcul du contenu carbone du chauffage retenues pour la définition des paramètres de la réglementation des bâtiments. Il s'agit en revanche d'explicitier les principes méthodologiques utilisés dans l'étude pour évaluer l'effet des politiques publiques du secteur du bâtiment sur les émissions de gaz à effet de serre à long terme.

5.1.2 Des approches comptables, aussi appelées « attributionnelles », pour répartir les émissions actuelles du système électrique entre les différents usages

Une première famille d'approches a pour objectif de définir un mode d'allocation des émissions du secteur électrique entre les différents usages. Elles sont aussi appelées « approches attributionnelles » et sont tout particulièrement adaptées pour la réalisation de bilans annuels des émissions associés aux différents secteurs et usages électriques. Ces approches assurent l'attribution de l'ensemble des émissions du système électrique aux différents usages de l'électricité : chaque tonne de CO₂ émise sur par les moyens de production d'électricité est attribué à un usage de l'électricité. Ces méthodes prennent en compte les émissions affectées aux imports et exports : lorsque le système électrique français exporte, des émissions sont attribuées aux exports et non aux usages en France et lorsque le système électrique importe, les émissions dans les pays voisins associées aux volumes importés sont comptabilisées et attribuées aux usages en France.

5.1.2.1 Méthode 1 : les émissions moyennes de la production électrique

Une première méthode très simple consiste à calculer les émissions moyennes du kWh électrique produit en France. En France, ce facteur d'émissions

moyen, de l'ordre de 35 gCO₂/kWh (en comptant uniquement les émissions liées à la combustion dans les centrales électriques), est ainsi très faible en comparaison de celui d'autres pays européens ainsi qu'en comparaison des émissions associées à la combustion de sources fossiles (de l'ordre de 200 gCO₂/kWh pour le gaz et 270 gCO₂/kWh pour le fioul).

Selon cette méthode, tous les usages ont donc le même facteur d'émission qui correspond au contenu carbone moyen de la production d'électricité (éventuellement corrigée du contenu moyen des imports et exports d'électricité). Celle-ci néglige toutefois le fait que tous les usages ne possèdent pas le même profil temporel d'utilisation : en particulier, le chauffage électrique possède une forte saisonnalité avec une consommation concentrée sur l'hiver, à une période pendant laquelle la demande électrique totale et le recours à la production thermique fossile sont plus importants.

Cette méthode n'est donc pas adaptée à l'évaluation du contenu carbone des usages qui présentent une saisonnalité forte comme le chauffage.

5.1.2.2 Méthode 2 : la méthode saisonnalisée par usage (historiquement utilisée dans la Base Carbone®)

Pour surmonter les limites associées à un calcul des émissions moyennes de la production électrique, des méthodes consistant à tenir compte de la saisonnalité des différents usages peuvent être utilisées.

Une première méthode est celle utilisée historiquement dans la Base Carbone® et qui est dite « saisonnalisée ».

Avec cette méthode, chaque usage est décomposé en une part saisonnalisée et une part non saisonnalisée (ou « en base »). La part saisonnalisée se voit attribuer un facteur d'émission élevé, dit saisonnalisé, reflétant la part plus importante de production thermique conventionnelle pendant la période hivernale, tandis que la part non saisonnalisée présente un facteur d'émission faible, dit de base, du fait de la moindre part des énergies fossiles dans le socle de production d'électricité de base tout au long de l'année.

L'identification des parts saisonnalisée et non-saisonnalisée des productions permet de calculer les émissions de CO₂ du kWh en base et saisonnalisé. La notion de «production de base» ou non-saisonnalisée, pour un moyen de production donné, se fonde sur le minimum de production constaté, à la maille mensuelle, sur l'année. La production «dite saisonnalisée» correspond à tout ce qui est produit au-delà de ce talon de production minimum.

Selon le même principe, pour un usage donné, la consommation de base est égale au minimum mensuel multiplié par 12, et la consommation saisonnalisée correspond à tout ce qui est consommé au-delà de ce talon de consommation minimum. Un «pourcentage de saisonnalité» est calculé comme la part de la consommation saisonnalisée dans la consommation annuelle. Par exemple, le chauffage est considéré comme un usage «100 % saisonnalisé» car son minimum annuel est nul.

Les débats au sein du groupe de travail de la Base Carbone® ont permis d'identifier les limites de cette méthode qui ne donne pas des résultats satisfaisants dans un contexte de transition du secteur électrique. D'une part, l'articulation de la méthode autour de la seule distinction «saisonnelisé/non saisonnelisé» ne reflète qu'imparfaitement les variations saisonnières de la production et de la consommation d'électricité. D'autre part, la méthode n'est pas adaptée à l'évolution du mix électrique : même si le «bandeau» de production de base augmentait très significativement dans les prochaines années, grâce notamment aux EnR, l'usage chauffage serait continuellement associé à un usage «100 % saisonnalisé», et par conséquent, dépendant du contenu CO₂ des quelques TWh de production thermique résiduels. Et ce, même si ces derniers venaient à ne représenter que quelques infimes pourcentages de la production totale (tandis que le chauffage représente 10 à 15% de la consommation totale).

Cette méthode est désormais considérée comme obsolète et d'autres méthodes sont ainsi actuellement débattues afin de dépasser les limites identifiées.

5.1.2.3 Méthode 3 : la méthode moyenne mensualisée (ou journalière, voire horaire)

Certaines méthodes reprennent un principe similaire en considérant non pas une part saisonnalisée unique mais une part saisonnalisée différente chaque mois pour mieux intégrer les variations de fonctionnement du système électrique au cours de l'année.

La méthode moyenne mensualisée par usage est donc récemment venue remplacer la méthode saisonnalisée historique. La réglementation environnementale 2020 a également retenu la méthode moyenne mensualisée pour établir le facteur d'émissions du chauffage électrique, évalué à 79 gCO₂/kWh pour l'année 2017 comme l'ont confirmé les services du ministère de la Transition écologique dans un communiqué en date du 14 janvier 2020.

Le principe commun aux méthodes moyennes est de relier le contenu CO₂ moyen du système électrique, au pas de temps temporel considéré, avec un profil d'usage. À titre d'exemple, la méthode mensualisée estime le contenu CO₂ d'un usage selon les étapes suivantes :

- Pour chaque mois, le «facteur d'émission» du parc de production électrique français (en kgCO₂/kWh) est calculé en tenant compte de la part respective de chaque moyen de production et de ses émissions dans la production totale ;
- Pour chaque mois, est également calculée la part mensuelle de la consommation de l'usage par rapport à sa consommation annuelle (en %) ;
- Est ensuite calculé, pour chacun des douze mois, l'émission mensuelle attribuable à l'usage par le produit (a) x (b), i.e. entre le facteur d'émission moyen du parc de production français (a) et la part mensuelle de la consommation de l'usage, ce qui donne une valeur d'émission en gCO₂/kWh ;
- Enfin, les douze valeurs obtenues à l'étape précédente sont additionnées de sorte à obtenir un résultat de contenu CO₂ reflétant le profil annuel de cet usage.

Le calcul au pas de temps horaire fonctionnerait selon le même principe, à ceci près qu'il nécessite des chroniques de production et d'usage beaucoup plus précises (sur les 8760 heures de l'année).

Les méthodes moyennes mensualisée, journalière ou horaire permettent ainsi de bien traduire la variabilité des émissions de CO₂ du parc de production au pas de temps considéré.

5.1.3 Des approches prospectives, ou conséquentielles, pour évaluer l'effet de certaines transformations du secteur énergétique sur les émissions de gaz à effet de serre

Une deuxième famille d'approches vise à évaluer les conséquences de certaines transformations du secteur énergétique sur les émissions de gaz à effet de serre. Pour ce type d'analyse, les méthodes attributionnelles n'ont en effet pas beaucoup de sens : le contenu carbone des nouveaux usages de l'électricité développés au cours des prochaines années n'a pas de raison d'être identique au contenu tel qu'évalué sur la base des méthodes attributionnelles appliquées au système actuel ou futur.

Il convient alors d'utiliser des approches prospectives ou conséquentielles en comparant les émissions entre plusieurs configurations, souvent une configuration contrefactuelle et une configuration prospective intégrant les politiques publiques ou les transformations dont on souhaite évaluer les conséquences sur le plan des émissions.

Ce principe méthodologique peut se décliner selon deux façons différentes concernant le parc de production selon qu'il est considéré comme inchangé ou évolutif.

5.1.3.1 Méthode 4 : la méthode « marginale » ou « incrémentale à parc inchangé »

Les méthodes de type marginal ont souvent été discutées dans le cadre du débat d'experts sur l'évaluation des émissions du secteur électrique. Ce type de méthode consiste à évaluer un usage ou une action relativement à son effet à la marge du système, ici électrique, pour un parc électrique donné. Par exemple, selon ce principe, une action d'efficacité énergétique ou un effacement qui diminue la consommation de quelques MWh permet d'éviter les émissions des derniers moyens appelés, souvent très carbonés.

Cette méthode peut être appliquée à la marge du mix électrique actuel ou encore à la marge d'un mix électrique projeté à un horizon plus ou moins lointain.

La méthode marginale peut paraître utile dans un système présentant peu d'évolutions ou pour des actions se situant à la marge du système, c'est-à-dire représentant des volumes faibles au regard de l'équilibre global du mix électrique. Par contre, elle n'est pas généralisable à un volume important ou à une transformation impliquant de multiples évolutions (un problème qualifié dans le débat d'expert de défaut d'additivité). Ainsi, pour reprendre l'exemple précédent, la réponse marginale du système peut varier en fonction du niveau de déploiement des actions d'efficacité énergétique car le moyen de production marginal n'est plus le même (gaz *versus* charbon). La méthode « incrémentale à parc inchangé » permet de considérer des évolutions non marginales mais souffre des mêmes limites concernant la prise en compte d'évolutions liées sur le système électrique. Ces méthodes ne permettent pas d'évaluer l'influence de l'évolution simultanée des usages de l'électricité et du mix électrique alors que les politiques publiées lient le développement d'usages électriques d'une évolution du mix.

Par ailleurs, dans le cas d'évolutions simultanées du système, les méthodes marginales et incrémentales n'aboutissent pas à la même évaluation suivant l'ordre dans lequel les évolutions sont considérées – ce qui pose difficulté dans le cas du développement de l'électricité dans le transport et le bâtiment.

La méthode marginale n'apparaît donc pas adaptée dans une approche prospective à long terme si le parc de production évolue.

5.1.3.2 Méthode 5 : la méthode « incrémentale avec adaptation du mix électrique »

Ce dernier type de méthode consiste aussi à comparer les émissions de CO₂ d'un scénario de référence (en l'occurrence, le « contrefactuel ») avec un scénario. Contrairement à la méthode précédente toutefois, le calcul intègre à l'analyse un incrément de production électrique annuel correspondant au nouvel usage développé, de manière à tenir

compte du fait que le développement des usages électriques s'effectue dans un contexte de développement du potentiel de production décarboné.

Ce type de méthode permet d'évaluer les conséquences effectives du développement des usages électriques et de l'évolution simultanée du parc de production, tant à l'échelle nationale qu'euro-péenne, en considérant que les politiques publiques liées au développement de l'offre et de la demande électrique sont prises dans le cadre d'une stratégie d'ensemble cohérentes. En effet, il est légitime de supposer qu'en cas de moindre développement des nouveaux usages électriques telles que la mobilité, l'hydrogène ou encore le chauffage, les objectifs de développement de la production électrique décarbonée serait également diminuée (moindre développement de la production renouvelable ou déclassement plus rapide du nucléaire).

La méthode incrémentale avec adaptation du mix électrique est celle qui a été utilisée dans les précédentes analyses de RTE sur les effets associés au développement de la mobilité électrique (rapport de mai 2019) et de l'hydrogène (rapport de janvier 2020). Elle permet de comparer les impacts sur les émissions induits par l'électrification des usages dans un cadre méthodologique d'ensemble cohérent.

C'est donc également ce type d'approche qui est utilisée dans la suite de ce rapport : l'analyse sur les émissions de gaz à effet de serre se fonde ainsi sur la comparaison de plusieurs configurations, impliquant à la fois des transformations du système électrique (davantage de production renouvelable, moins de nucléaire, une consommation d'électricité qui évolue sous l'effet de multiples transferts d'usage) et du secteur du bâtiment (évolution du parc en intégrant la construction neuve, la rénovation des logements et des bureaux).

En particulier, les scénarios considérés présentent des hypothèses différentes d'évolution du mix électrique, construites en cohérence avec l'évolution des usages électriques. Ainsi, si le scénario A-SNBC 1 est fondé sur le mix électrique projeté par la PPE (scénario qui intègre donc l'ensemble des politiques publiques sur l'énergie dans un tout cohérent), les hypothèses de mix électrique du

scénario contrefactuel sont adaptées, à la marge du scénario de la PPE, de manière à refléter une adaptation de la politique d'évolution du mix électrique en cohérence avec la moindre électrification du chauffage. L'adaptation du mix électrique est construite sous l'hypothèse conservatrice que les objectifs de rénovation du bâti et de performance des solutions de chauffage sont effectivement atteints (cf. chapitre 1).

Des analyses de sensibilité ont ainsi été réalisées avec le mix de production contrefactuel pour évaluer les effets sur les émissions avec un parc électrique inchangé («méthode incrémentale à parc figé» présentée ci-dessus). Ceci permet de refléter une situation dans lesquelles les politiques de développement du chauffage électrique seraient menées à bien tandis que les politiques de développement du parc électrique décarboné échoueraient à accroître le potentiel d'électricité décarbonée en France.

L'analyse permet par ailleurs d'étudier les effets sur les émissions de gaz à effet de serre sur un périmètre large qui intègre :

- ▶ les émissions au niveau du secteur du bâtiment, qui comprend l'utilisation des combustibles de manière directe (gaz, charbon, fioul, bois) ;
- ▶ les émissions du secteur électrique, en France mais aussi en intégrant les variations d'émissions induites sur les systèmes électriques des pays voisins, du fait de l'interconnexion du système à l'échelle européenne.

5.1.4 En synthèse, des méthodes de nature différente selon les exercices réalisés

En définitive, des approches distinctes peuvent être mobilisées selon les objectifs des exercices considérés :

- ▶ Pour les bilans sur les émissions actuelles du secteur énergétique et la répartition entre les différents usages, les méthodes dites «comptables» ou «attributionnelles» sont les plus adaptées. Parmi elles, les méthodes moyennes mensualisée, journalière ou horaire sont celles qui permettent de tenir compte au mieux de la variabilité des différents usages au cours de l'année.

- ▶ Pour la définition des paramètres de la réglementation (RE2020...), le débat est parfois vif sur la méthode de calcul à retenir et l'horizon à considérer. En effet, les bâtiments ayant une durée de vie longue, la question se pose de réaliser une évaluation sur la base du système électrique actuel ou sur la base d'un système électrique projeté de manière prospective pour fixer les paramètres relatifs aux émissions des bâtiments et systèmes de chauffage. Ce débat n'entre toutefois pas dans les finalités de l'étude RTE-ADEME. À défaut de proposer une méthode spécifique d'affectation des émissions pour alimenter la réglementation, le rapport RTE-ADEME permet d'évaluer les enjeux et impacts associés à des configurations dans lesquelles les évolutions réglementaires seraient plus ou moins favorables au développement des solutions de chauffage électriques⁵.
- ▶ Pour l'analyse prospective des évolutions et politiques publiques en matière d'énergie, les méthodes dites «prospectives» ou «conséquentielles» apparaissent comme les plus adaptées. C'est dans ce cadre que se place l'étude RTE-ADEME, dont l'objectif est d'analyser les impacts des politiques publiques de décarbonation du chauffage sur les quinze prochaines années telles que prévues par la PPE et la SNBC. Plus précisément, l'étude est basée sur une méthode incrémentale à parc adapté pour analyser de manière conjointe l'évolution des usages électriques et l'évolution du mix électrique.

5. Dans le cas de la RE2020, la méthode moyenne mensualisée a été retenue par les pouvoirs publics. La note de positionnement de l'ADEME montre que cette méthode donne finalement des résultats cohérents avec l'analyse basée sur la méthode incrémentale à parc adapté menée dans le cadre du présent rapport.

5.2 Seule une action résolue et combinée sur l'efficacité dans le secteur du bâtiment, la bascule vers des solutions de chauffage bas carbone permet d'atteindre les objectifs de la SNBC

5.2.1 Le scénario A-SNBC 1 permet d'atteindre les objectifs de réduction d'émissions de CO₂ du chauffage fixés par la SNBC

La stratégie climatique de la France consiste à atteindre la neutralité carbone en 2050.

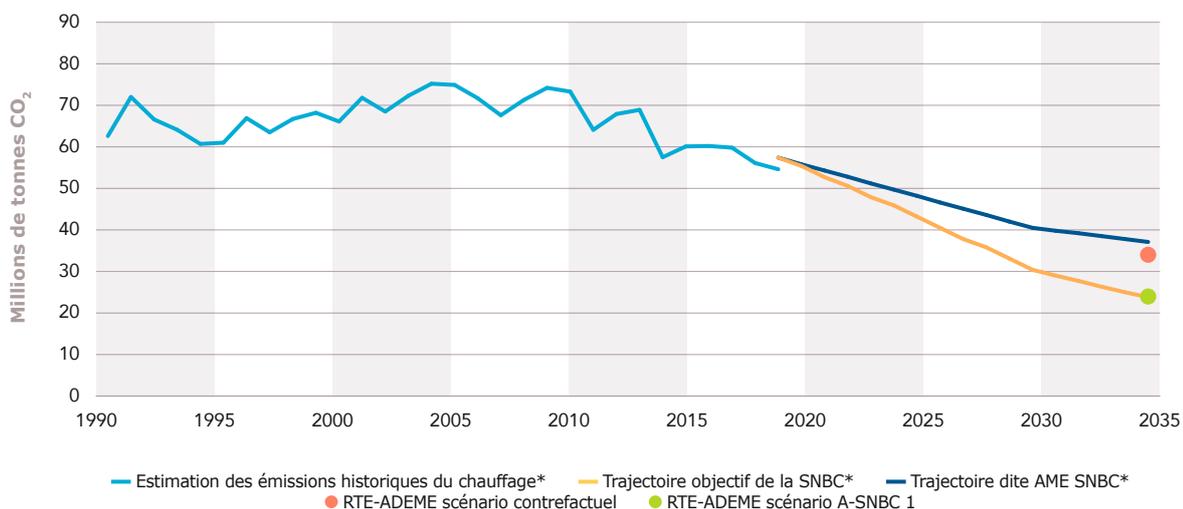
Pour y parvenir, le bilan carbone du chauffage doit être porté à zéro⁶ à cette date. L'atteinte de cet objectif implique de réduire les émissions liées au chauffage au rythme moyen de l'ordre de 2 millions de tonnes chaque année, soit une forte inflexion par rapport à la tendance actuelle, dans

laquelle les émissions du chauffage sont globalement stables, voire en très légère baisse depuis plusieurs années compte tenu des variations climatiques (cf. figure 5.2)⁷.

La stratégie nationale bas carbone fixe un jalon important en 2030, avec un objectif de réduction de 50 % par rapport à 2015 – soit une cible estimée à 30 millions de tonnes.

L'étude RTE-ADEME se situe à l'horizon 2035, à mi-chemin de la neutralité carbone. À cet horizon, la réduction des émissions du secteur du bâtiment est supposée être plus importante que 50 %. En

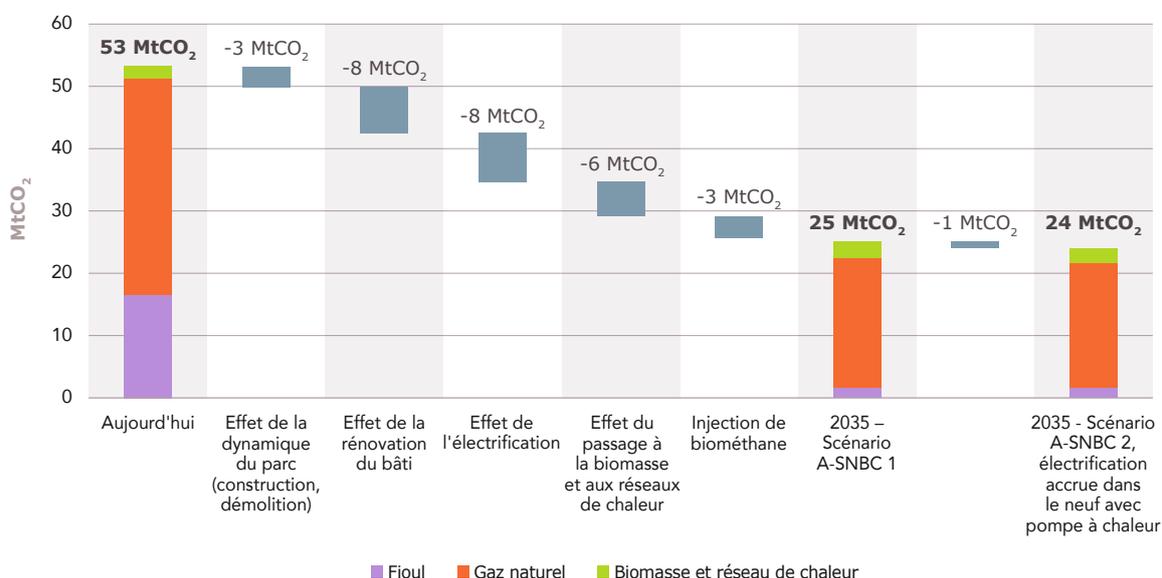
Figure 5.2 Émissions du chauffage du secteur bâtiment, hors électricité, dans les scénarios A-SNBC 1 et contrefactuel (au périmètre de la France métropolitaine) et dans les trajectoires du résidentiel/tertiaire de la SNBC (au périmètre France métropolitaine + Outre-mer)



* Estimations réalisées par RTE sur la base des émissions totales du secteur du bâtiment et de la part attribuée au chauffage (75 %, voir chapitre 1)

- En considérant que le bilan des émissions associées au chauffage bois ou biogaz est neutre sur l'ensemble de cycle de vie du bois (émissions absorbées lors de la croissance de la biomasse et réémises à la combustion).
- Les trajectoires ci-contre sont extrapolées au seul chauffage à partir des trajectoires d'émissions publiées par la SNBC (AME – avec mesures existantes – et AMS – avec mesures supplémentaires) en supposant que 75 % des émissions constatées en 2017 sont attribuables au chauffage.

Figure 5.3 Principales sources de baisse des émissions de CO₂ attendues dans le scénario A-SNBC 1



intégrant la perspective d'un secteur du bâtiment qui doit être neutre en carbone à l'horizon 2050 ainsi que les marges d'interprétation laissées ouvertes par la SNBC, l'étude RTE-ADEME fixe comme référence la cible de 25 MtCO₂/an pour le secteur du bâtiment en 2035 (contre une référence de 53 MtCO₂/an considérée pour le point de départ). Ce point de passage obligé ne figure pas stricto sensu dans la SNBC. La discussion engagée au niveau européen sur la révision des objectifs de réduction des gaz à effet de serre à l'horizon 2030 pourrait plaider pour des objectifs plus ambitieux dès 2030, et donc a fortiori en 2035 : la cible de 25 MtCO₂/an retenue dans l'étude apparaît donc, dans cette perspective, comme dans le haut de la fourchette des points de passage possibles à l'horizon 2035.

Le scénario A-SNBC 1 permet d'atteindre cet objectif. À l'horizon 2035, ce scénario permet d'éviter de l'ordre de 28 Mt de CO₂ par an en France par rapport à aujourd'hui.

Cinq leviers sont mis en œuvre dans la SNBC pour atteindre cet objectif (figure 5.3⁸) :

- ▶ Le rythme naturel de remplacement de logements et bureaux anciens par des bâtiments neufs peu consommateurs, qui dépend de la dynamique démographique et économique conduit à diminuer les émissions de 3 MtCO₂ en bilan annuel à l'horizon 2035 ;
- ▶ L'isolation des bâtiments chauffés aux combustibles fossiles évite l'émission de 8 MtCO₂ en bilan annuel à l'horizon 2035 ;
- ▶ La conversion de chauffage à combustibles fossiles vers des vecteurs décarbonés évite l'émission de :
 - 8 MtCO₂ en bilan annuel via l'électrification du chauffage, en particulier des solutions de chauffage plus efficaces, comme la pompe à chaleur plutôt que des radiateurs électriques,
 - 6 MtCO₂ en bilan annuel via le développement de la biomasse et des réseaux de chaleur qui est une évolution commune à tous les scénarios ;

8. Cf. la référence suivante pour les quatre premiers leviers : CGDD, 2020. Les facteurs d'évolution des émissions de CO₂ liées à l'énergie en France de 1990 à 2018.

- ▶ Un développement du biogaz injecté dans le réseau de gaz suivant les objectifs de la PPE (10% à l'horizon 2030) a été intégré et valorisé à plus de 3 MtCO₂ (sous l'hypothèse d'une attribution moyenne à l'usage chauffage).

5.2.2 Le scénario A SNBC 2 consistant en une électrification accrue dans le neuf avec des pompes à chaleur donne la sécurité d'atteindre les objectifs de la SNBC

Le projet de réglementation environnementale 2020 faisait en décembre 2020, l'objet de consultations publiques, sur la base d'orientations générales précisées en novembre 2020. Celles-ci pourraient conduire à ne plus utiliser le gaz dans les bâtiments neufs (pour les permis de construire déposés à partir de l'été 2021 pour les maisons individuelles et 2024 pour les logements collectifs). Ces logements pourront être alimentés par d'autres énergies, notamment les réseaux de chaleur, le bois-énergie ou le chauffage électrique via des pompes à chaleur.

Le scénario A-SNBC 2 de l'étude RTE-ADEME a été conçu plusieurs mois avant ces annonces et ne vise pas à décliner la RE 2020. Il permet d'illustrer l'effet d'une électrification très poussée dans les logements neufs, en simulant une part de marchés de 70% de l'électricité dans les logements collectifs, et de 90% dans les maisons individuelles. Deux millions et demi de logements neufs supplémentaires seraient ainsi chauffés à l'électricité dont un million supplémentaire par des pompes à chaleur.

Ce scénario permet d'éviter un million de tonnes de CO₂ supplémentaires par an à l'horizon 2035 par rapport à la mise en œuvre de la SNBC en France, pratiquement sans émissions supplémentaires sur son système électrique (+0,1 MtCO₂). Ce gain provient de la substitution de chauffage gaz.

Trois conclusions peuvent donc être rassemblées sur le bilan du scénario A-SNBC 2 (avec électrification accrue dans le neuf) en matière d'émissions de gaz à effet de serre :

- ▶ d'une part, ce scénario permet de disposer d'une légère marge pour atteindre l'objectif de la SNBC à mi-chemin de l'objectif de neutralité carbone ;
- ▶ d'autre part, il semble le plus compatible avec une augmentation de l'effort demandé à horizon 2030 en cas de nouvel engagement européen portant l'objectif de réduction des émissions de -40% à -55% en 2030 ;
- ▶ enfin, il illustre que les logements neufs ne constituent pas – à horizon 2030-2035 – l'enjeu principal de décarbonation du secteur du bâtiment, ces logements étant beaucoup performant thermiquement que les logements existants et la part en 2035 des logements construits après 2020 reste largement minoritaire. La conclusion serait néanmoins différente à horizon 2050 : les réglementations prises aujourd'hui sur le bâtiment neuf ont ainsi pour objectif principal de préparer l'atteinte de la neutralité carbone à horizon 2050, et non d'obtenir des réductions de gaz à effet de serre rapides, pour des volumes conséquents, au cours des prochaines années.

5.2.3 L'évolution tendancielle du parc de logements et des solutions de chauffage, intégrée au scénario contrefactuel, conduit déjà à une réduction de 10 MtCO₂/an

Le secteur du bâtiment obéit à des constantes de temps longues. Moins de un pourcent du parc se renouvelle tous les ans via la destruction d'anciens bâtiments, remplacés par des bâtiments neufs, moins consommateurs en énergie.

Malgré la réglementation thermique 2012, parfois décrite comme « favorable » au gaz et « défavorable » à l'électricité du fait de son exigence en matière de réduction de la consommation primaire d'énergie, la part de l'électricité tend à progresser lentement sur longue période du fait de son poids plus important dans la construction neuve (tant pour ce qui concerne le renouvellement du parc immobilier en valeur absolue que pour sa croissance relative au rythme de l'évolution de la population), notamment via les pompes à chaleur dans les maisons neuves.

Ainsi, la projection de référence utilisée pour la présente étude (évolution démographique et activité économique) intègre « naturellement » une augmentation du parc de bâtiments chauffés à l'électricité, à hauteur de 3 millions de logements pour le secteur résidentiel et de 100 millions de m² supplémentaires dans le secteur tertiaire, qui viennent pour partie remplacer d'anciens bâtiments chauffés par des combustibles fossiles. Le

rythme tendanciel d'évolution du parc de bâtiments conduit à lui seul à éviter des émissions liées au chauffage avec des combustibles fossiles, qui se chiffreront à -3 MtCO₂/an à l'horizon 2035.

La poursuite de la tendance actuelle porte également sur les bâtiments existants, qui font aujourd'hui l'objet (1) d'opérations de rénovation (considérées au niveau de 400 000 par an) et (2) d'évolution de la part de l'électricité dans le chauffage des bâtiments existants (voir chapitre 2). Les opérations de rénovation suivant le rythme et la performance tendancielle permettent d'éviter 2 MtCO₂/an à l'horizon 2035. Le développement de solutions de chauffage électriques permet également d'éviter 5 MtCO₂/an, qui auraient été émises par des chauffages à combustibles fossiles autrement. Globalement, la poursuite de la tendance actuelle sur les bâtiments existants conduit à éviter l'émission de 7 MtCO₂/an à l'horizon 2035.

Ainsi, la prolongation sur 15 ans des tendances historiques d'évolution du parc de bâtiments et des parts de marché des différentes solutions de chauffage, et le renforcement de l'efficacité (à la fois par la rénovation du bâti et la modernisation des solutions de chauffage), bien qu'en retrait par rapport aux objectifs des politiques énergie et climat, devraient contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur du bâtiment à hauteur d'environ 10 Mt CO₂ en bilan annuel à l'horizon 2035.

5.2.4 En combinant l'évolution tendancielle du parc de chauffage électrique, et du développement des réseaux de chaleur et du chauffage au bois suivant la trajectoire prévue par la SNBC, les émissions baissent déjà de 17 MtCO₂ en 2035

Le scénario contrefactuel de la présente étude intègre le rythme tendanciel présenté précédemment, mais également d'autres évolutions (communes à tous les scénarios) qui marquent une forte inflexion par rapport à la tendance : développement des réseaux de chaleur pour les logements collectifs urbains – qui doit s'accompagner d'une modification des énergies qui les alimentent –, recours accru au bois-énergie comme solution de chauffe.

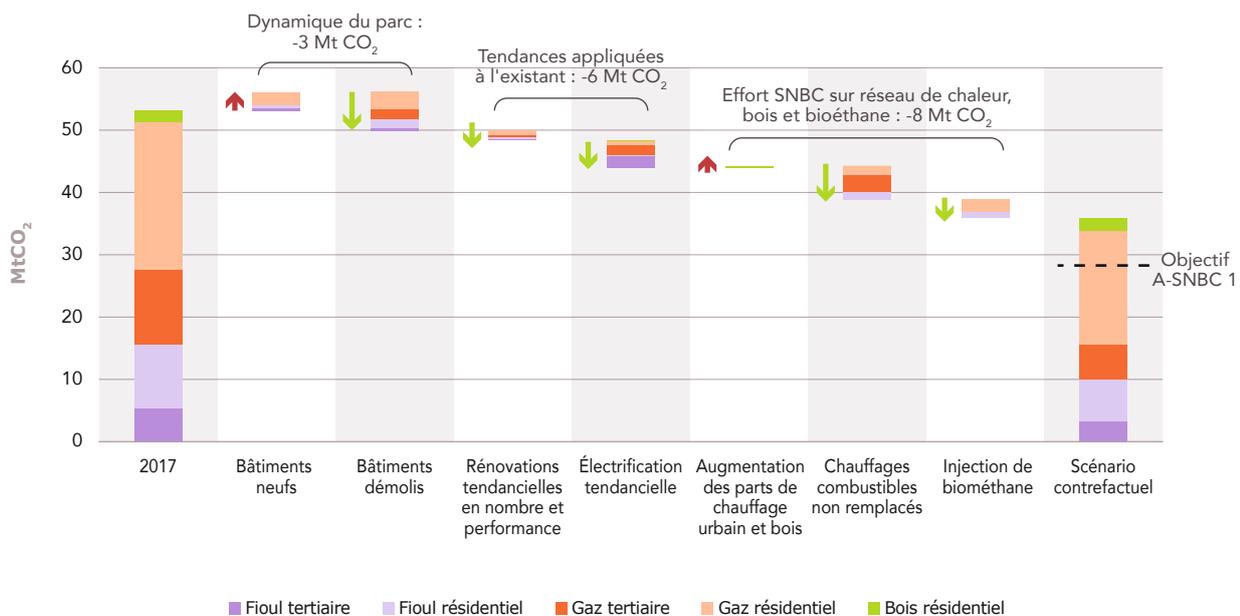
Utilisé comme point de comparaison pour tous les autres scénarios et variantes de la présente étude, le scénario contrefactuel conduit donc à une

diminution des émissions du chauffage hors électricité de 17 millions de tonnes en 2035 par rapport à aujourd'hui.

Cette évolution est insuffisante pour atteindre l'objectif qui découle de la SNBC, qui nécessite de réduire les émissions du chauffage hors électricité en France de 10 millions de tonnes supplémentaires à l'horizon 2035.

Le scénario contrefactuel se situe donc entre la SNBC et la simple poursuite des tendances historiques sur le chauffage. Par conséquent, les émissions de gaz à effet de serre du chauffage hors électricité de ce scénario sont légèrement inférieures à un scénario purement tendanciel (sur l'ensemble des énergies de chauffage et de rénovation des bâtiments) comme le scénario AME (avec mesures existantes) décrit dans la SNBC (cf. figure 5.4).

Figure 5.4 Émissions évitées par la poursuite des tendances historiques d'électrification et de rénovation, et par la pénétration des réseaux de chaleur et du chauffage bois de la SNBC dans le parc de logements entre aujourd'hui et 2035



5.3 Toutes les actions de développement du chauffage électrique et d'efficacité énergétique (du bâti et des solutions de chauffage) permettent de réduire les émissions de CO₂ à l'échelle nationale

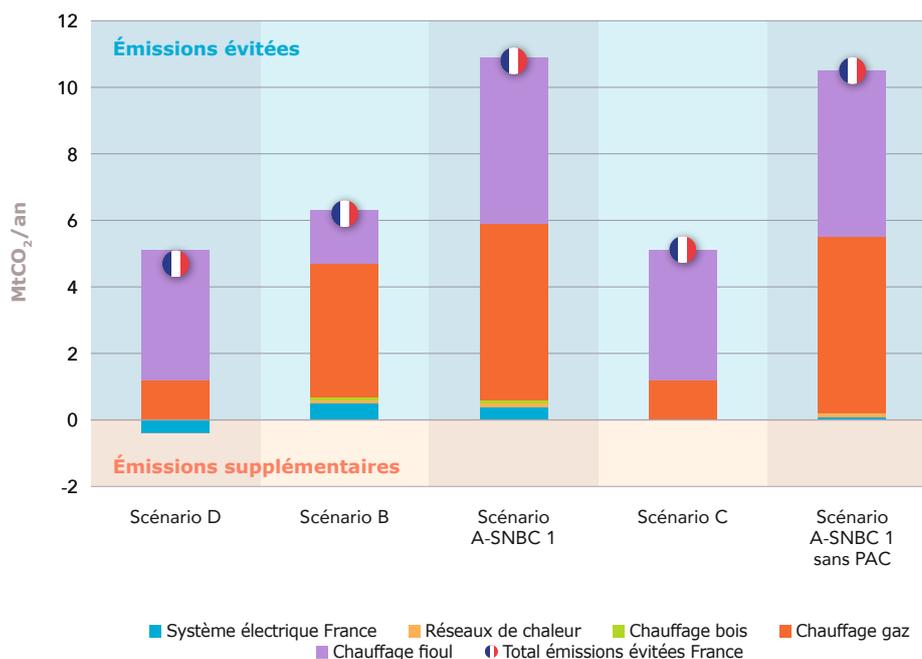
Tous les scénarios et variantes de transition étudiés par RTE et l'ADEME permettent d'éviter des émissions supplémentaires de CO₂ à l'échelle nationale par rapport au scénario contrefactuel, en particulier les scénarios A et D ainsi que dans les variantes du scénario SNBC. L'origine des réductions d'émissions est néanmoins différente selon les scénarios.

Dans les configurations où le recours au chauffage électrique est accru mais sans atteindre dans le même temps les objectifs de performance sur le bâti (scénario D ou scénario C – avec atteinte de l'objectif sur le développement des pompes à chaleur mais non-atteinte de celui sur le bâti), les baisses d'émissions proviennent de la conversion

des 3 millions de chaudières gaz et fioul à des solutions électriques. En effet, bien que les performances énergétiques du bâti, voire des solutions de chauffage déployées ne suivent pas la trajectoire de la SNBC, le remplacement de certains systèmes de chauffage très émetteurs comme les chaudières au fioul par des solutions électriques conduit à un bilan carbone positif.

Ce bilan est d'autant plus positif que les solutions électriques considérées sont des pompes à chaleur mais demeure positif même si les solutions de substitution sont des radiateurs électriques. En effet, le surplus de consommation électrique (jusqu'à +10 TWh dans le scénario D, voir partie 4) conduit à des émissions bien inférieures à l'échelle

Figure 5.5 Émissions de CO₂ évitées en France par l'électrification du chauffage et la rénovation du bâti, par rapport au scénario contrefactuel



nationale à celles évitées par la réduction de l'utilisation du gaz naturel ou du fioul⁹. Ceci s'explique par le caractère faiblement carboné du mix électrique français.

À l'opposé, dans le cas d'un scénario intégrant un effort sur l'efficacité du bâti et des systèmes de chauffage mais pas de transfert significatif vers l'électricité (scénario B), les émissions évitées proviennent essentiellement des rénovations dans les bâtiments se chauffant avec du fioul ou du gaz. Dans ce scénario en particulier, certains bâtiments résidentiels restent chauffés au fioul à l'horizon 2035, ce qui ne permet pas de maximiser les baisses d'émissions.

Alors que la conversion de 3 millions de chaudières en chauffage électrique permet d'éviter plus de 4 MtCO₂ annuellement au périmètre français à l'horizon 2035, l'isolation renforcée des bâtiments permet d'économiser 6 MtCO₂ supplémentaires par rapport au scénario contrefactuel. La part relative des radiateurs électriques et des pompes à chaleur joue de façon importante sur la consommation électrique mais relativement peu sur les émissions nationales car la production électrique est, à l'horizon 2035 encore plus qu'aujourd'hui, fortement décarbonée.

9. Les émissions électriques associées à l'un des objectifs de la SNBC sont calculées en comparant les émissions du système électrique nationale sans et avec l'atteinte des objectifs atteints, selon la modélisation exposée dans le chapitre 2.

5.4 Les actions d'électrification et d'efficacité énergétique doivent être combinées pour atteindre les objectifs de la SNBC

L'analyse d'une grande variété de scénarios permet de conclure que dès lors que l'un des objectifs étudiés dans l'étude n'est pas atteinte (efficacité énergétique dans les bâtiments et les solutions de chauffage, bascule vers les solutions bas-carbone comme l'électricité), les objectifs de la SNBC ne peuvent être atteints.

Évalué au périmètre France, les émissions associées au chauffage sont entraînées à la baisse par deux paramètres :

- ▶ Le recours à des solutions électriques permet de remplacer des chaudières au fioul et au gaz (scénarios C et D).
- ▶ La rénovation du bâti permet principalement de réduire les émissions des bâtiments qui restent chauffés par des combustibles fossiles (scénario B) et dans une bien moindre mesure les émissions en France associées au chauffage électrique.

Le remplacement de radiateurs électriques par des pompes à chaleur est sans incidence sur l'utilisation des combustibles fossiles. Son effet est de réduire la consommation électrique et donc les émissions associées (au périmètre français), qui restent très faibles à un horizon 2035 où les centrales au charbon sont fermées et où les centrales au gaz sont de plus en plus utilisées comme des moyens de «back-up», avec des durées d'utilisation plus courtes. Au périmètre français, cet effet est marginal : il est évalué à moins de 0,6 million de tonnes. Il n'en va pas de même au niveau européen (voir paragraphe 5.5).

Ceci s'explique à nouveau par le caractère faiblement carboné du système électrique français : que les systèmes de chauffage électriques déployés soient performants ou non n'a pas une influence de premier ordre sur les émissions du système électrique français, qui augmentent faiblement dans les deux cas. En revanche, dans le cas où le recours accru à l'électricité pour le chauffage se traduit de manière prédominante par développement de radiateurs électriques, la consommation électrique en France atteint un niveau légèrement plus important, ce qui contribue à réduire d'autant les exports d'électricité vers les pays voisins et conduit, toutes choses étant égales par ailleurs, à davantage solliciter le parc de production thermique.

Enfin, un autre effet doit être intégré dans la perspective de plus long terme de l'atteinte de la neutralité carbone : les limites (économiques, sociétales ou environnementales) au déploiement des modes de production d'électricité décarbonés (renouvelables ou nucléaires). Dans cette perspective, les solutions électriques les plus performantes présentent l'avantage de rendre plus facile le bouclage des scénarios à long terme. La construction de trajectoires de production et de consommation à horizon 2050 fait actuellement l'objet de travaux de concertation poussés dans le cadre du volet long terme Bilan prévisionnel, qui doit être publié vers mi-2021.

5.5 La prise en compte des effets induits à l'échelle européenne modifie les bilans CO₂ nets des différents scénarios

L'analyse du bilan CO₂ d'une intensification de l'électrification du chauffage en France ne peut pas se résumer à une analyse nationale. En effet, le système électrique fonctionne de manière interconnectée.

Toutes choses étant égales par ailleurs, le développement de nouveaux usages en France est ainsi susceptible de modifier les échanges entre la France et ses voisins, et notamment de modifier l'utilisation des moyens de production fossiles dans les pays interconnectés. Pour être complète, l'analyse des émissions doit donc porter sur le système électrique européen dans son entièreté. C'est ce que permet le modèle utilisé par RTE pour le Bilan prévisionnel, qui représente avec précision le parc de production et la consommation à l'échelle européenne.

Du fait de l'interconnexion des systèmes électriques nationaux en Europe, qui a pour corollaire la mise en commun d'une partie des capacités de production à cette échelle, un surplus de consommation en France peut engendrer, selon les moments, de moindres exports ou – plus ponctuellement – des imports, et donc le démarrage de centrales thermiques fossiles ailleurs en Europe. Les émissions ainsi générées ne peuvent être considérées comme des émissions directes en France mais doivent être introduites dans l'analyse dès lors que l'on souhaite mettre en œuvre un raisonnement en empreinte carbone.

RTE a déjà procédé à ce type d'analyse dans les rapports sur la mobilité électrique (mai 2019) et l'hydrogène (janvier 2020). La présente analyse en reprend la méthode.

5.5.1 L'emploi d'électricité décarbonée en France pour alimenter les pompes à chaleur en substitution des chaudières combustibles est plus efficace que l'export d'électricité décarbonée, pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre européens

Le système électrique français est, en tendance, fortement exportateur. Ces exports ont une influence réelle sur les émissions dans les pays voisins, qui a été chiffrée dans le Bilan prévisionnel 2017.

Pour un potentiel de production d'électricité bas carbone donné, le développement de nouveaux usages électriques en France, quels qu'ils soient – cela vaut donc aussi bien pour les transports, le développement de nouvelles industries ou la production d'hydrogène – est donc en concurrence avec des exports électriques. Ceux-ci se substituent à des productions thermiques, qui demeurent une part importante du mix de nombreux Etats européens même à l'horizon 2035.

Dans le cas du chauffage, la substitution de chauffages au fioul ou au gaz par des pompes à chaleur est unitairement plus efficace pour réduire les émissions de CO₂ que d'exporter de l'électricité décarbonée se substituant à de la production électrique à partir de gaz. La substitution de chauffages au fioul par des pompes à chaleur est même unitairement plus efficace pour réduire les émissions de CO₂ que d'exporter de l'électricité décarbonée se substituant à de la production électrique à partir de charbon. Cette substitution est également plus efficace que l'électrification de la mobilité.

En revanche, l'électrification du chauffage qui s'appuie sur des radiateurs alimentés en électricité décarbonée (qu'il soit en substitution de chauffages fioul ou gaz), permet une réduction des émissions plus faible que les

exports d'électricité décarbonée et du même ordre de grandeur (en substitution de chauffages fioul) ou plus faible (en substitution de chauffages gaz) que la substitution du vaporeformage par l'électrolyse de l'eau.

Ces résultats s'expliquent de la façon suivante :

- ▶ les installations de chauffage au fioul ou gaz utilisent directement les combustibles fossiles et atteignent des rendements totaux de l'ordre de plus de 90%. Ces installations se distinguent néanmoins par leur facteur d'émissions d'environ 300 g par kWh thermique pour le gaz et 400 g pour le fioul ;
- ▶ s'agissant du chauffage électrique, les radiateurs électriques ont un rendement total de l'ordre de 90% alors que les pompes à chaleur un coefficient de performance de l'ordre de 200 à 300%.

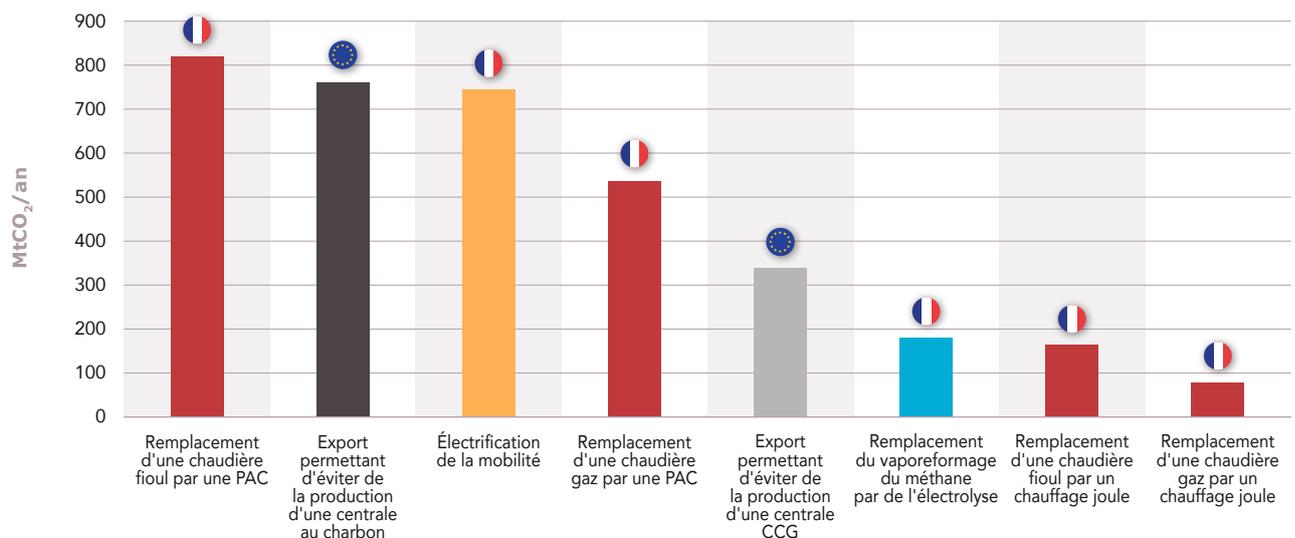
Le type d'analyse présenté ci-dessus est de nature marginale, mais elle permet de prendre en compte

la nature interconnectée du système électrique européen. Elle est néanmoins partielle car elle se situe à la marge d'un système fixe et ne permet pas de prendre en compte l'évolution de la situation au fil des années. L'analyse complète nécessite donc d'intégrer l'évolution de différentes composantes (isolation des bâtiments, composition du parc de chauffage et du mix électrique) sur l'ensemble de la période.

Ces résultats doivent également être mis en perspective avec les différents niveaux de pilotabilité des usages.

Le mix de production résultant de la PPE conduit à des excédents de production décarbonée, qu'elle provienne d'énergie nucléaire ou renouvelable, pendant de l'ordre de 30% du temps en 2035. Les véhicules électriques et les électrolyseurs peuvent ainsi faire l'objet de modes de pilotage qui permettent à ces usages de capter effectivement de tels excédents, comme l'ont montré les études sur

Figure 5.6 Les émissions évitées par la production d'1 kWh d'électricité décarbonée¹⁰ en France peuvent être plus importantes pour des utilisations en Europe hors France que pour des usages domestiques



10. Éolien ou nucléaire (cf. sections suivantes).

Comparaison avec les résultats sur la mobilité ou l'hydrogène

Le résultat présenté dans cette partie du rapport peut être mis en perspective de ceux obtenus pour la mobilité électrique et la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau.

RTE avait conclu en mai 2019 que, toutes choses égales par ailleurs, il était plus avantageux de décarboner la mobilité que d'exporter l'électricité produite en France vers d'autres pays. En effet, le rendement du véhicule électrique est très supérieur au rendement d'un véhicule thermique (facteur 3) et la combustion de pétrole évitée représente des volumes d'émissions importants. Le gain sur les émissions de CO₂ est dans ce cas supérieur à celui obtenu par l'évitement du fonctionnement d'une centrale à gaz et du même ordre de grandeur que

celui de l'évitement du fonctionnement d'une centrale à charbon.

Par ailleurs, RTE a conclu en janvier 2020, que toutes choses égales par ailleurs, l'export d'électricité décarbonée était plus efficace à l'horizon 2035 en matière de réduction des émissions européennes que le remplacement du vaporeformage par l'électrolyse de l'eau. En effet, la production décarbonée exportée se substitue à la production d'électricité européenne à partir de gaz naturel, d'un rendement de l'ordre de 55% pour une centrale à cycle combiné tandis que le vaporeformage utilise directement le gaz naturel avec un rendement identique à celui de l'électrolyse de l'eau (de l'ordre de 70%).

l'électromobilité et la production de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. *A contrario*, le chauffage est un usage beaucoup plus saisonnalisé que les deux autres usages. Par ailleurs, il ne bénéficie pas d'un tel niveau de pilotage. Il est possible de reporter le chauffage sur de courtes durées (de l'ordre de quelques heures au plus) mais il n'est pas possible de gérer cet usage, à l'échelle d'une semaine

par exemple ou sur une période plus longue. Ainsi, même si le développement du chauffage s'accompagne d'un développement de production décarbonée, dans les mêmes proportions énergétiques, de façon instantanée, la production décarbonée peut ne pas servir la totalité du chauffage. De ce point de vue, une analyse à l'échelle du fonctionnement du système électrique est nécessaire.

5.5.2 L'analyse à l'échelle européenne confirme l'intérêt de l'accélération sur l'isolation et sur l'électrification

À l'aune de l'analyse à l'échelle européenne, **l'ensemble des scénarios et variantes avec un niveau d'isolation conforme aux objectifs de la SNBC (A-SNBC 1 et sa variante sans pompes à chaleur, ainsi que B), qui entraînent une baisse de la consommation d'électricité par rapport au scénario contrefactuel, conduisent à une diminution des émissions du système électrique diminuer.** Dans le cas du scénario A-SNBC 1, et de sa variante sans pompes à chaleur, l'électrification supplémentaire est compensée par l'amélioration de la performance des logements.

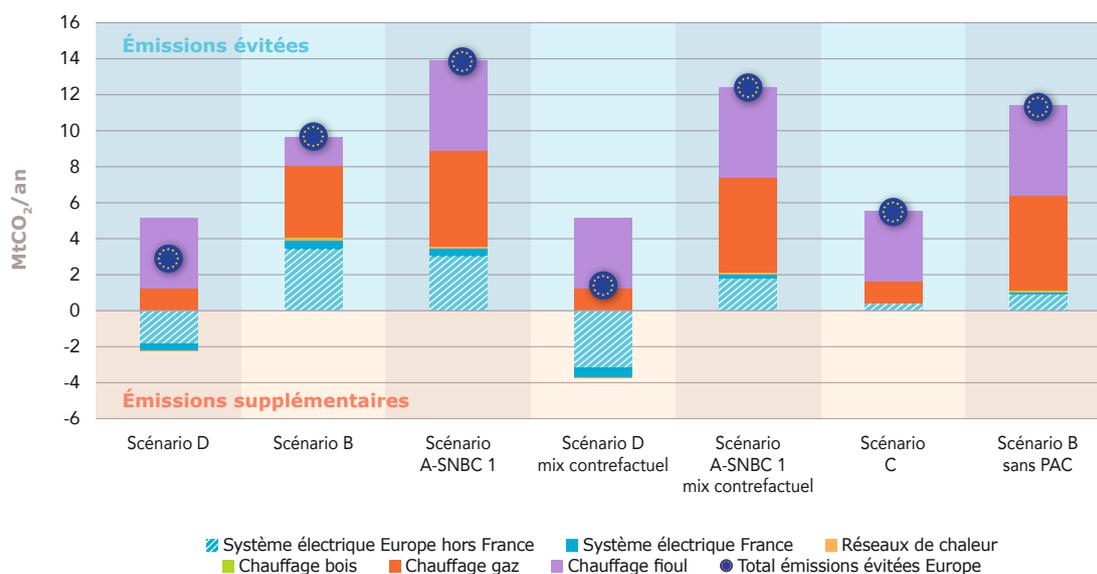
A contrario, le développement du chauffage électrique sans effort sur l'isolation ou l'efficacité des systèmes de chauffage conduit à augmenter légèrement les appels des centrales européennes et donc les émissions de combustibles associées (scénario D et sa variante), de l'ordre de 2 MtCO₂/an.

À l'échelle européenne, les émissions de CO₂ calculées pour les scénarios et variantes prévoyant une électrification accrue dans le neuf (A-SNBC 2, variante du scénario D avec cumul des effets théoriques associés à une part très majoritaire des radiateurs électriques) sont sensiblement identiques à celles du scénario A-SNBC 1 (avec une réduction supplémentaire de l'ordre de 0,5 MtCO₂) et du scénario D (sans réduction ou émission supplémentaire).

L'exploration de variantes à mix de production contrefactuel permet d'explorer le stress occasionné sur le système électrique en cas de retard de déploiement de capacité décarbonée correspondant à 5 TWh de productible.

Dans un cas seulement, celui où l'électrification se combine avec la non-atteinte de tous les autres objectifs SNBC considérés (sans effort sur la rénovation d'enveloppe et l'efficacité des systèmes de chauffage, combinée à un retard de déploiement du mix électrique de la PPE toutes choses égales par ailleurs),

Figure 5.7 Émissions de CO₂ évitées du parc de systèmes de chauffage résidentiel et tertiaire des scénarios de transition à 2035 par rapport au scénario contrefactuel, sans adaptation du mix électrique



les émissions supplémentaires du système électrique européen viennent compenser en quasi-totalité les économies de CO₂ issues de la conversion des 3 millions de chaudières à combustibles fossiles, pour aboutir à un bilan nul (variante «D avec mix de production contrefactuel»). Il s'agit du scénario avec le plus de consommation électrique due au chauffage, du fait du déploiement de radiateurs électriques de façon majoritaire en remplacement des chaudières à combustibles fossiles et de la poursuite du rythme tendanciel des rénovations du bâti. En conséquence, il s'agit du scénario le plus

stressant pour le système électrique, avec un bilan CO₂ dégradé de 2 MtCO₂ par rapport au scénario D. Cette variante «D avec mix de production contrefactuel» conduit finalement à un bilan quasiment neutre sur les émissions à l'échelle européenne.

En définitive, dès lors qu'au moins un des objectifs prévus par la SNBC est rempli (adaptation du parc de production ou efficacité des systèmes ou du bâti), le développement du chauffage électrique au niveau préconisé par la SNBC s'accompagne d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Tableau 5.1 Résumé des scénarios d'électrification du chauffage, définis en fonction de l'atteinte des quatre objectifs PPE - SNBC

Objectifs publics \ Scénarios	D avec mix contrefactuel	D avec mix PPE	C	A-SNBC 1 sans PAC avec isolation	A-SNBC 1 avec mix contrefactuel	A-SNBC 1
Développement du chauffage électrique	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Rénovation d'enveloppe	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Déploiement de pompes à chaleur	Non	Non	Oui	Non	Oui	Oui
Parc de production PPE	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Oui
Bilan des émissions en intégrant les effets induits au niveau européen par rapport au contrefactuel	Nul	Positif	Positif	Positif	Positif	Positif

5.6 Le renforcement de l'efficacité des bâtiments permet au scénario de la SNBC de présenter des gains de CO₂ importants à l'échelle européenne

Les différents scénarios permettent de souligner que l'amélioration de l'efficacité des bâtiments joue de manière importante dans la performance des scénarios une fois que leur bilan carbone est étendu à l'ensemble de l'Europe.

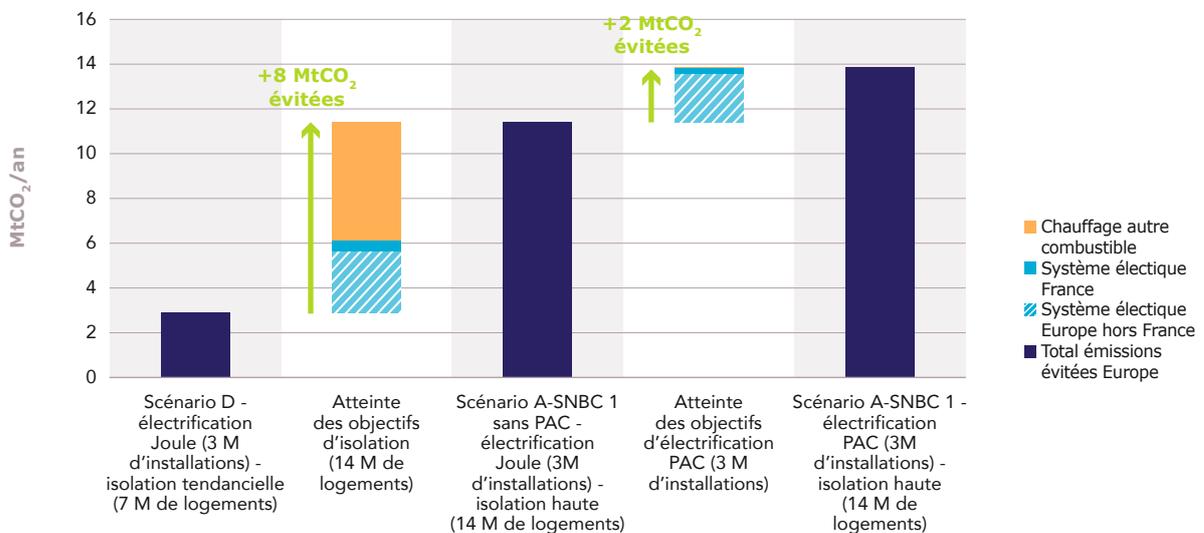
En l'absence d'une politique volontariste d'isolation des bâtiments, la réduction des émissions de CO₂ associée au recours accru au chauffage électrique en France se trouveraient en effet diminuée, à parc électrique inchangé. Si le mix électrique reste inchangé malgré l'intensification de l'électrification du chauffage, les émissions de CO₂ sont réduites en France mais déplacées à l'étranger. La consommation électrique supplémentaire associée à l'électrification du chauffage réduit les exports d'électricité français (sans augmenter substantiellement les imports). Des centrales thermiques doivent en conséquence

être démarrées, très majoritairement hors de France. Dans ce cas spécifique, l'électrification ne semble pas permettre de réduction importante des émissions.

Si le recours accru au chauffage électrique s'accompagne d'un déploiement important de pompes à chaleur, les émissions de CO₂ sont effectivement réduites. En effet, le rendement des pompes à chaleur comparé aux rendements des radiateurs électriques permet de réduire le besoin d'énergie électrique nécessaire à la satisfaction du besoin thermique de chauffage de 5 TWh dans le résidentiel (cf. chapitre 4, paragraphe 4.1).

La figure 5.8 permet de décomposer les effets de l'électrification, du déploiement des pompes à chaleur plutôt que des radiateurs électriques et de l'isolation du bâti.

Figure 5.8 Émissions de CO₂ évitées en Europe par les scénarios de transition du chauffage résidentiel et tertiaire, en fonction de l'atteinte des objectifs de la PPE et de la SNBC (isolation du bâti et déploiement de pompes à chaleur)



L'électrification du chauffage au niveau des objectifs de la SNBC mais sans atteinte des ambitions de rénovation du bâti ou d'efficacité des systèmes de chauffage permet d'éviter environ 3 MtCO₂eq/an qui résulte d'un surcroît de demande électrique (+10 TWh) et d'une baisse de consommation de gaz (-4 TWh) et de fioul (-13 TWh).

Le déploiement des pompes à chaleur au lieu des radiateurs électriques améliore le bilan de l'électrification d'environ 2 MtCO₂/an supplémentaires, du fait des coefficients de performances des pompes à chaleur et de la baisse de demande d'électricité afférente (-9 TWh).

5.7 L'analyse complète du bilan carbone nécessite d'intégrer le développement du parc de production d'électricité en France programmé par la PPE

L'évolution du parc de production d'électricité en France est programmée, dans ses grandes lignes, par la PPE. Celle-ci prévoit notamment une forte augmentation du volume de production décarbonée, avec une croissance de la production d'origine renouvelable qui est supposée faire plus que compenser la décroissance de la production nucléaire. Cette croissance de la production d'électricité bas-carbone participe d'une logique d'accompagnement du développement des nouveaux usages de l'électricité (mobilité, hydrogène bas-carbone, bâtiment) et de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Le développement du parc de production électrique correspondant aux transferts d'usages vers l'électricité doit donc être pris en compte dans l'évaluation des impacts en matière d'émissions de CO₂.

De ce point de vue, l'augmentation de la production décarbonée prévue par la PPE évite alors la diminution des exports qui serait associée au développement du

chauffage en France. Cette adaptation de parc neutralise l'effet qu'aurait pu avoir l'augmentation de la consommation française sur les émissions de CO₂ liée à la production fossile d'électricité dans les pays voisins de la France, si tant est que les objectifs de la SNBC soient atteints en matière d'électrification et d'efficacité énergétique des solutions de chauffage et de rénovation du bâti.

5.7.1 La réduction des émissions de CO₂ liée au recours accru à l'électricité associé à un fort développement des renouvelables résulte tant d'un moindre recours à la production fossile d'électricité l'hiver qu'à la production décarbonée supplémentaire l'été

Pour un même volume d'énergie, la consommation de chauffage électrique et la production décarbonée ajoutée pour la compenser n'ont pas la même

Figure 5.9 Profils de la consommation de chauffage électrique de 3 millions de logements et de la production éolienne ajoutée pour la compenser (soit 5 TWh – en supposant atteints les objectifs d'efficacité énergétique de la PPE)

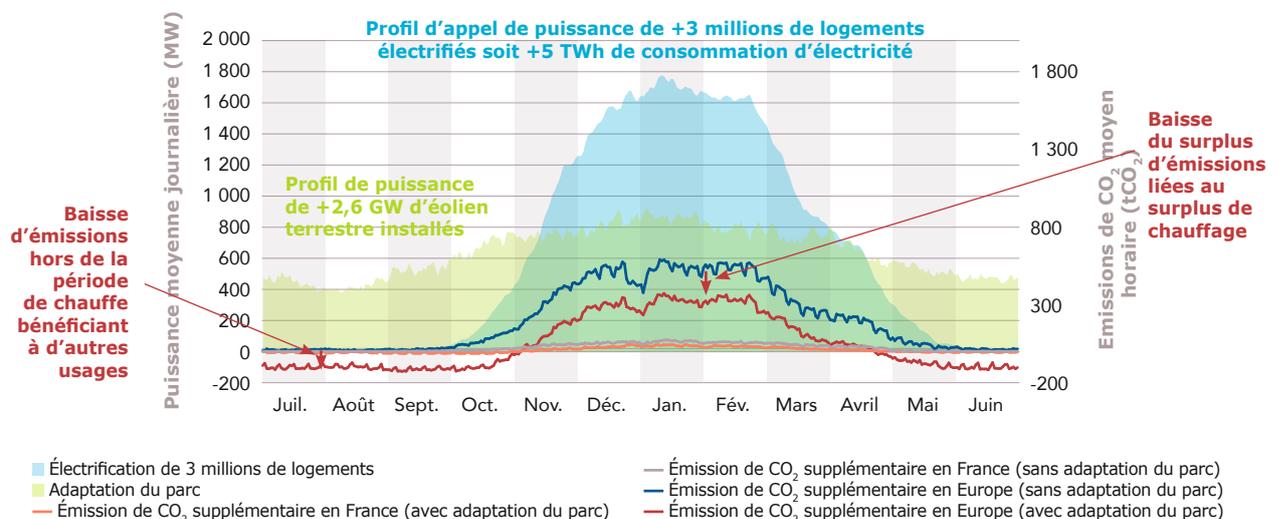
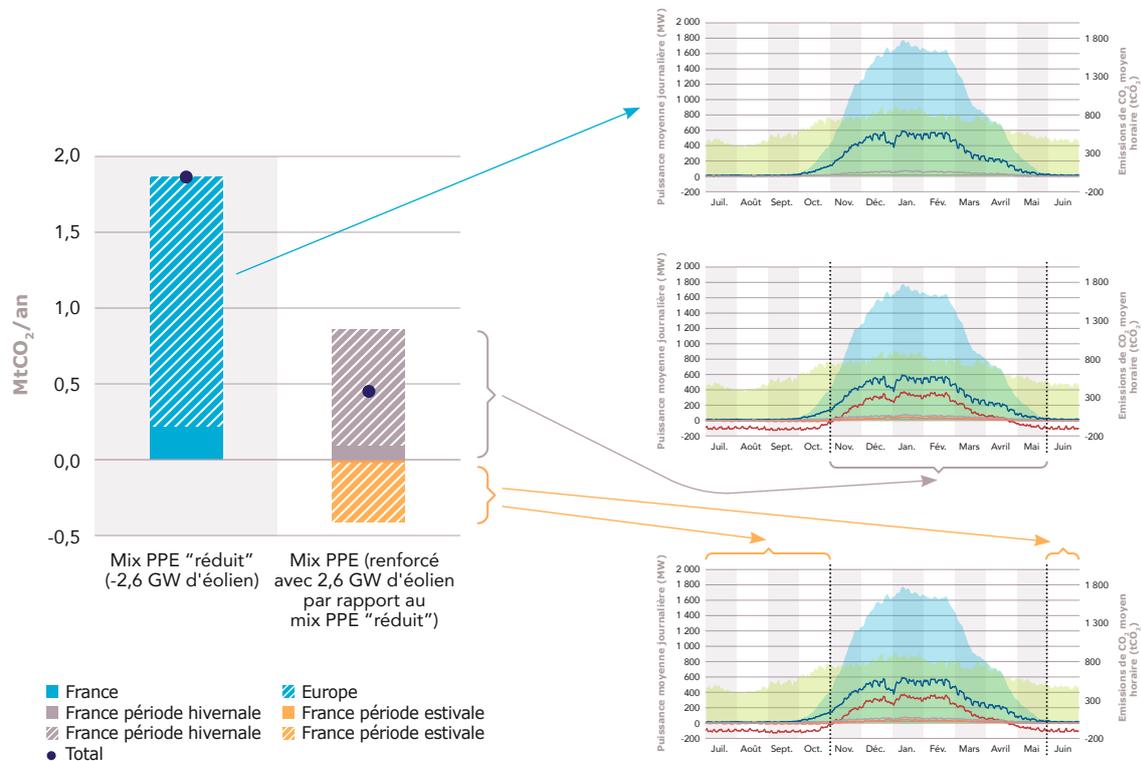


Figure 5.10 Surplus d'émissions lié à l'incrément de chauffage électrique, selon le mix de production (PPE ou contrefactuel) et le périmètre saisonnier considérés



saisonnalité : si la consommation de chauffage électrique se concentre en hiver, la production décarbonée intervient sur toute l'année, avec une production légèrement supérieure en hiver, qu'elle soit d'origine éolienne ou nucléaire (cf. section suivante). En conséquence, pour une même énergie annuelle de production décarbonée que de chauffage électrique, la forme de la courbe de production décarbonée ajoutée n'épouse pas totalement la forme de la demande supplémentaire.

Ainsi, durant l'hiver, l'ajout de productible décarboné permet de compenser environ la moitié du surplus de chauffage électrique, le reste devant être compensé sur le solde des imports et exports. Selon la situation à une heure donnée, il faut exporter moins, ou importer plus. L'ajout de productible décarboné constitue une partie des réductions d'émissions que l'on observe à l'échelle de l'année. Le reste de l'année, ce productible supplémentaire,

qui a lieu alors qu'il n'y a pas de chauffage supplémentaire, vient décarboner le reste de la consommation, en France et en Europe. La réduction des émissions annuelles que l'on observe provient à la fois de la compensation partielle du surplus de chauffage électrique en hiver, et de la décarbonation du reste de la demande hors période de chauffage.

5.7.2 L'origine éolienne ou nucléaire a peu d'effet sur l'ampleur de la décarbonation liée à l'intensification de l'électrification du chauffage électrique

Deux principales options sont possibles pour ajouter de l'électricité décarbonée avec un profil relativement proche du profil de consommation du chauffage : l'éolien et le nucléaire. En effet, la PPE prévoit un développement substantiel de la

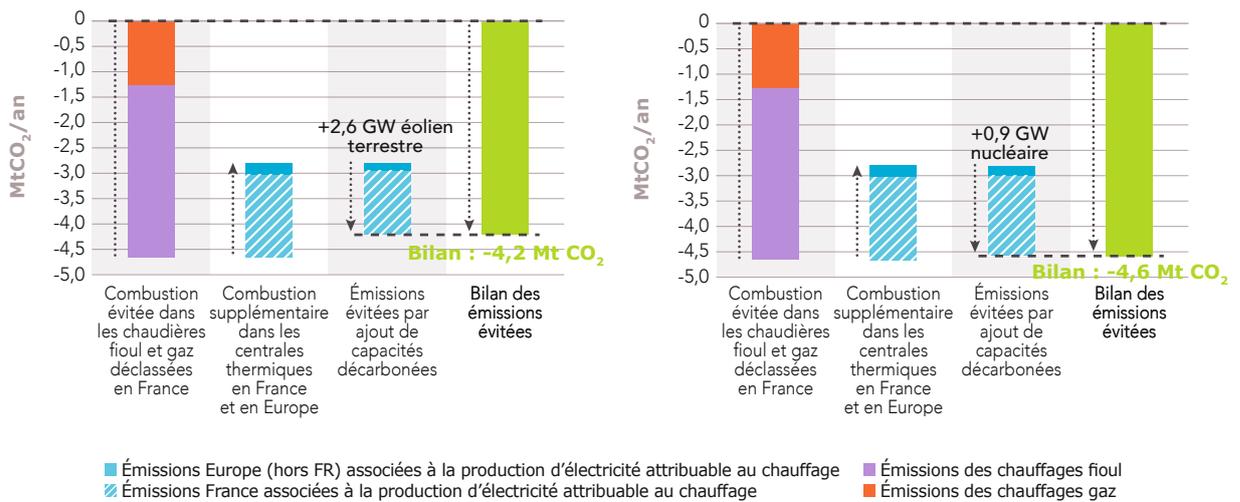
capacité éolienne tant terrestre (+35 GW) qu'en mer (+6,2 GW). Elle prévoit dans le même temps la fermeture de 14 réacteurs nucléaires d'ici 2035, dont les deux de Fessenheim, selon une trajectoire qui débute en 2027 (il existe en outre une option pour la fermeture de deux réacteurs supplémentaires en 2024-2025 si certaines conditions spécifiques sont remplies).

L'éolien est par nature une production non pilotable. Néanmoins, son niveau de production moyen est plus élevé en hiver qu'en été, c'est-à-dire principalement pendant la période de chauffage

(cf. section précédente). À l'inverse, la production d'un réacteur nucléaire est pilotable. Néanmoins, pour l'intérêt de l'ensemble du système électrique, son coût variable faible conduit à l'utiliser autant que possible en substitution des moyens de production thermique européens plus coûteux.

Lorsque la consommation de chauffage de 3 millions de logements est compensée en énergie par de la production nucléaire, les émissions de CO₂ sont similaires. Les éventuels écarts ne sont pas significatifs.

Figure 5.11 Réduction des émissions permises par l'alimentation du chauffage de 3 millions de logements avec une énergie équivalente produite par des éoliennes ou un réacteur nucléaire



5.8 Le ciblage des passoires thermiques conduit à des émissions évitées en combustion de même ordre de grandeur que le scénario SNBC

Le scénario «ciblage des passoires thermiques» considérée dans cette étude (voir chapitre 2, section 5.4.5), représente une situation dans laquelle le nombre de rénovations n'augmenterait pas par rapport à aujourd'hui (400 000 rénovations par an), mais où elles seraient ciblées sur les bâtiments les plus énergivores, avec un objectif d'économie d'énergie de 50 % correspondant au niveau de performance des réhabilitations prévues dans le scénario A-SNBC 1 (avant effet rebond).

Dans ce scénario, le nombre de rénovations est donc divisé par deux pour le résidentiel par rapport à la trajectoire de référence. Ces rénovations se concentrent alors dans les logements anciens, principalement les

maisons. À l'inverse, 7 millions de logements initialement mieux isolés ne sont pas rénovés par rapport au scénario A-SNBC 1. L'électrification et le recours aux solutions de chauffage efficaces sont identiques dans le scénario A-SNBC 1 et la variante ciblant les passoires thermiques.

Par rapport, au scénario A-SNBC 1 **le ciblage des passoires thermiques permet d'éviter pratiquement l'émission de la même quantité de CO₂ (1,5 MtCO₂/an en plus) qu'un scénario de rénovation généralisé, mais avec deux fois moins de rénovations annuelles, ce qui présente un intérêt économique certain (chapitre 6).**

Figure 5.12 Répartition des rénovations d'enveloppe dans le scénario A-SNBC 1 et dans la variante avec ciblage sur les logements énergivores

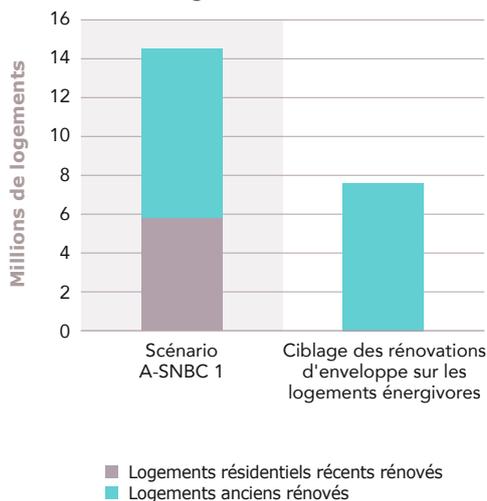
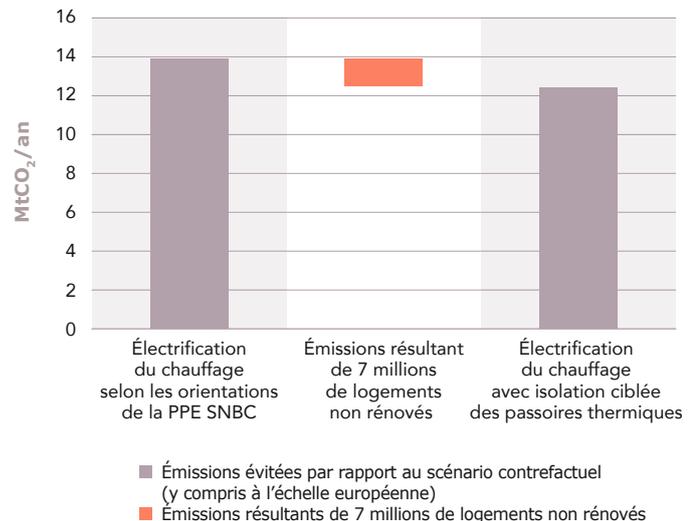


Figure 5.13 Comparaison des émissions évitées dans les scénarios SNBC et ciblage des passoires thermiques par rapport au scénario tendanciel, comprenant les émissions évitées à l'échelle européenne



5.9 Le déploiement de pompes à chaleur hybrides classiques a un effet légèrement négatif sur les émissions de gaz à effet de serre par rapport au déploiement de pompes à chaleur électriques

La variante du scénario de référence A-SNBC 1 intégrant un développement des pompes à chaleur hybrides en lieu et place de 2,5 millions de pompes à chaleur tout électriques ajoutés par rapport au scénario contrefactuel aboutit à une diminution de la consommation d'électricité de 1,7 TWh, principalement au cœur de la période de chauffage entre début novembre et mi-avril.

En contrepartie, près de 5,5 TWh de gaz sont nécessaires pour couvrir 30% du besoin thermique, lorsque la température franchit les seuils de 3 et 5°C. Les gains sur les émissions du système électrique (moindre sollicitation des moyens lors

des pointes), principalement localisés ailleurs en Europe, sont compensés par le surplus d'émissions associé à la combustion de gaz dans les pompes à chaleur hybrides, localisé en France.

Le déploiement de pompes à chaleur hybrides en substitution de chaudières utilisant des combustibles fossiles permet ainsi de réduire les émissions de CO₂ dans les mêmes proportions que les pompes à chaleur tout électriques (de l'ordre de 3-4 MtCO₂/an). Au-delà du bilan (très légèrement négatif), l'impact porte surtout sur la localisation des émissions évitées.

Figure 5.14 Comparaison des émissions évitées du scénario A-SNBC 1 et de sa variante avec le déploiement des pompes à chaleurs hybrides, par rapport au scénario contrefactuel

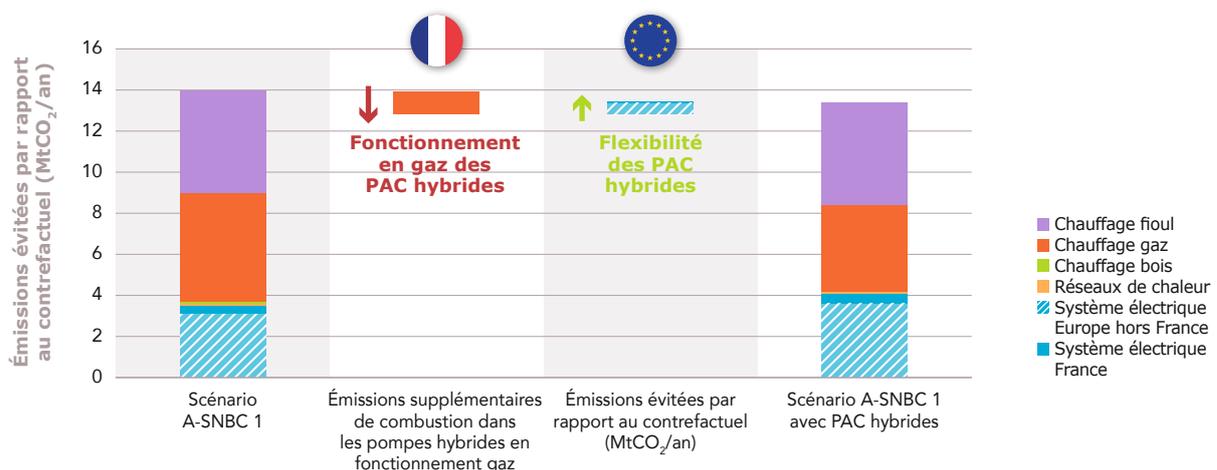
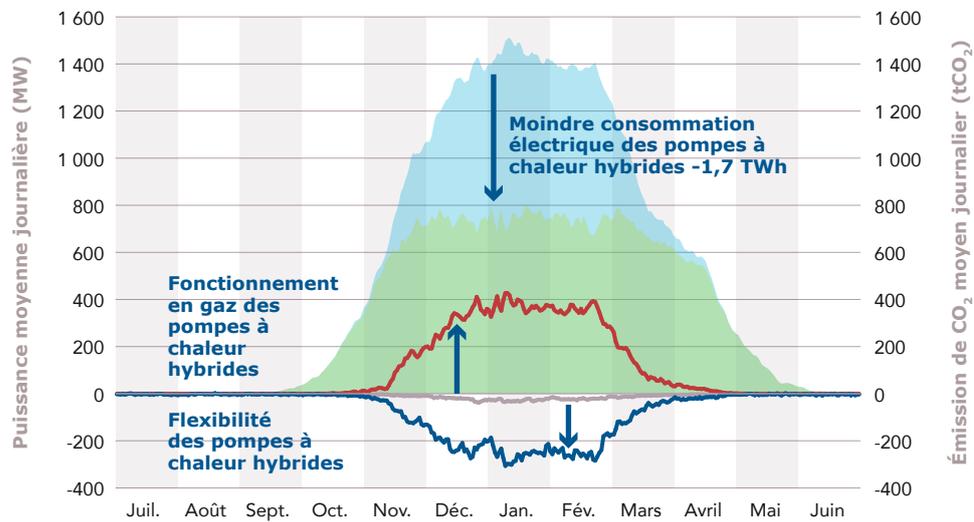


Figure 5.15 Effet de la diffusion de pompes à chaleur hybrides plutôt que de pompes à chaleur sur la demande électrique et les émissions du système électrique européen en 2035, contexte de forte efficacité du bâti



- Consommation électrique de 2,5 millions de pompes à chaleur
- Consommation électrique de 2,5 millions de pompes à chaleur hybrides
- Réduction des émissions de CO₂ du système français en remplaçant des pompes à chaleur électriques par des pompes à chaleur hybrides
- Réduction des émissions de CO₂ du système européen en remplaçant des pompes à chaleur électriques par des pompes à chaleur hybrides
- Émissions supplémentaires en France par la consommation de gaz naturel dans les pompes à chaleur hybrides

5.10 Au-delà des émissions de CO₂ directes, la prise en compte de l’empreinte des différents équipements et combustibles ne modifie pas les résultats de bilan carbone

Au-delà de l’objectif de neutralité carbone de la France (échelle territoriale), la stratégie nationale bas-carbone vise également une réduction globale de l’empreinte carbone. Or depuis 2000, celle-ci stagne alors que les émissions nationales ont baissé, du fait de l’augmentation des produits importés plus carbonés que les produits nationaux.

À l’heure actuelle, le bâti est estimé représenter de l’ordre de 40 % de l’empreinte carbone du chauffage d’un ménage¹¹. La réglementation environnementale 2020 doit ainsi donner une vision plus complète de l’empreinte carbone des bâtiments et intégrer l’analyse en cycle de vie pour l’évaluer. Elle fixera des exigences compatibles avec la stratégie nationale bas-carbone (SNBC) et déclinera au secteur de la construction l’objectif de baisse des émissions des secteurs industriels d’au moins 30 % en 2030 par rapport à 2013.

Pour être complète, l’analyse des émissions des scénarios doit ainsi intégrer, en plus des émissions directes en France et en Europe, les émissions associées à l’amont de la consommation des combustibles fossiles, aux renouvellements des systèmes de chauffage et à leur fonctionnement (notamment les fluides frigorigènes des pompes à chaleur) et à la consommation de matériaux et de travaux pour les rénovations, dans une logique d’empreinte carbone.

L’empreinte carbone de l’amont du cycle de vie des combustibles fossiles représente plus de 20 % de l’impact climatique des combustibles fossiles (Base Carbone® de l’ADEME). Les émissions directes évitées constatées dans l’analyse à l’échelle

européenne s’en trouvent augmentées d’autant en analyse en cycle de vie. Pour les scénarios et variantes permettant les baisses d’émissions de CO₂ les plus importantes (autour de 14 MtCO₂ par rapport au contrefactuel à l’échelle européenne), l’analyse en cycle de vie montre que les gains sont encore accrus de l’ordre de 3 MtCO₂eq par rapport au scénario contrefactuel. Ce bénéfice est néanmoins modéré par l’analyse en cycle de vie des actions de rénovation.

Si les cycles de vie des différents types de matériaux sont bien connus (laine de roche ou laine de verre pour les isolants de parois opaques, par exemple), il est plus difficile de disposer de données représentatives de rénovation du bâti ou de solutions de chauffage de maison individuelle ou de logement collectif¹². Quelques études récentes pour le bâtiment français visent tout de même à préciser les bilans carbone de travaux de rénovation, afin d’éclairer les décideurs s’agissant de l’impact environnemental des rénovations¹³. Leur analyse met en évidence la diversité des types de logements étudiés, des niveaux de performance de rénovation, des périmètres temporels et physiques (pouvant inclure des travaux d’opportunité de la rénovation comme l’aménagement intérieur, extérieur ou encore les isolations acoustiques, sans rapport avec l’efficacité énergétique), et la difficulté d’obtenir des données distinguant la rénovation du bâti et l’installation de chauffage.

Considérant les écarts de périmètre d’évaluation, de performance (jusqu’à des bâtiments basse consommation dans les études d’analyse en cycle de vie), et de types de surfaces considérées

11. Stratégie nationale bas-carbone.

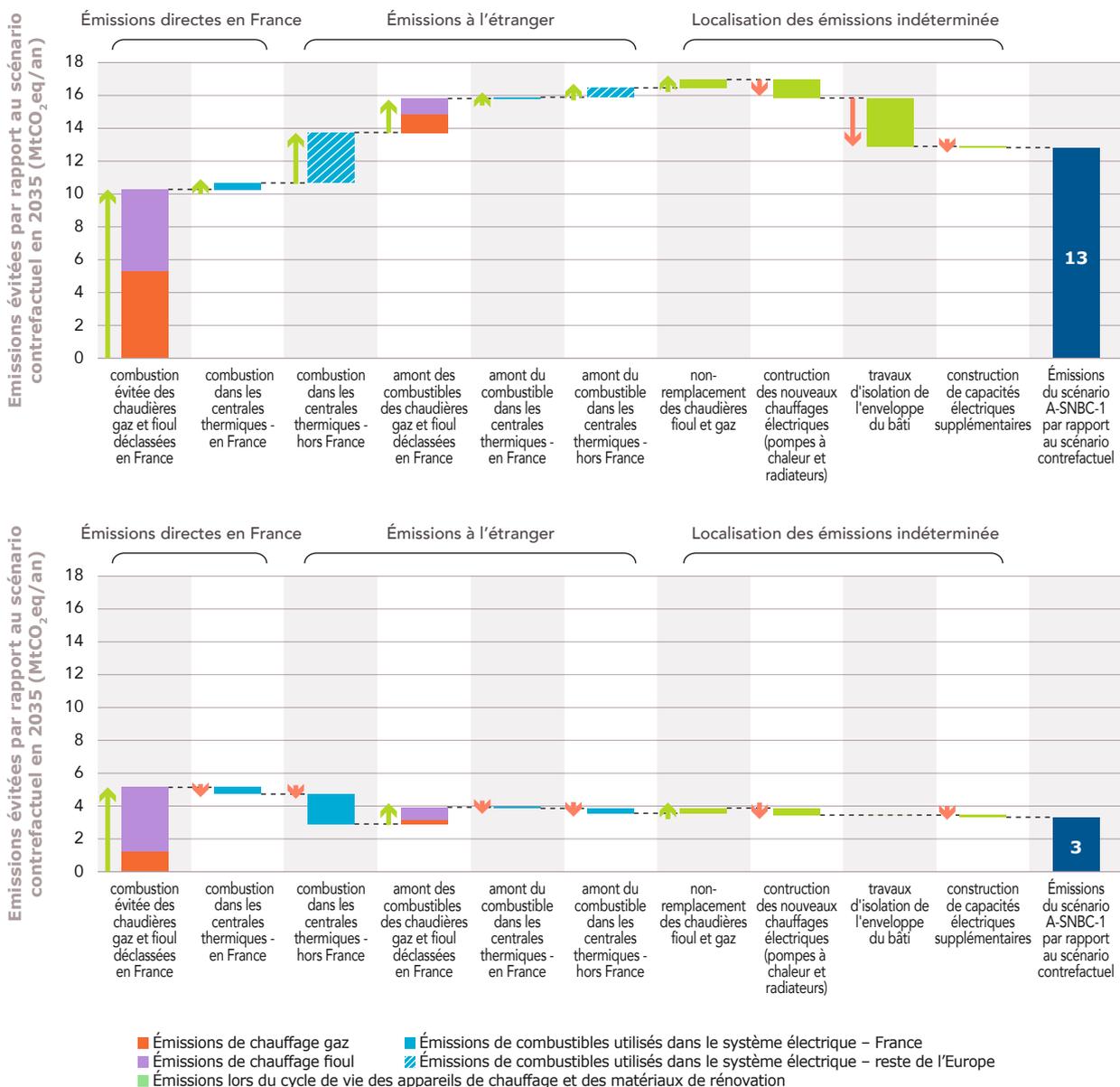
12. Ce constat est partagé, concernant les données économiques. L’initiative Rénovons.org, avec l’étude *Coûts et bénéfices d’un plan de rénovation des passoires énergétiques en 10 ans*, 2020 appelle ainsi à la généralisation des observatoires de la rénovation énergétique, afin de disposer de données statistiquement pertinentes.

13. CEREMA, EDF, 2017, *500 maisons rénovées basse consommation, Enseignements opérationnels des programmes « Je rénove BBC » en Alsace*, Fascicule D : le bilan carbone des rénovations énergétiques.
Ekoconception, 2017, *Rénovation/reconstruction du parc de logements collectifs d’après-guerre*
Alliance HQE GBC France, 2019, *Bâtiments rénovés au regard de E+C- et de l’économie circulaire. Premières observations*

(maisons, appartements, tertiaires), l’empreinte carbone moyenne de rénovation du bâti retenue dans l’étude est estimée à 60 kgCO₂eq/m² avec un gain de 30 % sur la consommation conventionnelle de chauffage et 100 kgCO₂eq/m² avec un gain de 50% (tant pour les maisons individuels que pour les appartements en immeubles).

Appliqués aux 1,1 milliards de m² rénovés dans le scénario SNBC en plus de la tendance passée, ces taux d’émissions conduiraient à dégrader les économies de gaz à effet de serre issues des scénarios A-SNBC 1 et B de l’ordre de 3 MtCO₂eq/an en 2035, en considérant une durée de vie de 50 ans pour les travaux de rénovation. Dans un cas défavorable,

Figure 5.16 Émissions de gaz à effet de serre évitées dans les scénarios A-SNBC 1 et D, en empreinte carbone, par rapport au scénario tendanciel



en supposant que le bilan carbone d'une rénovation moyenne est le même que celui d'une rénovation aboutissant aux performances d'un bâtiment basse consommation et la durée de ces travaux de 35 ans, les émissions annuelles supplémentaires des scénarios de rénovation ambitieux seraient de 6 MtCO₂eq/an. Ces émissions pourront être modérées par le recours aux matériaux biosourcés, notamment au bois comme matériau de construction ou à l'utilisation de matériaux à faible empreinte carbone comme le béton bas-carbone : c'est l'orientation souhaitée dans la réglementation environnementale 2020. Cela nécessitera une évolution conséquente et progressive des modalités de construction des bâtiments.

L'empreinte carbone des systèmes de chauffage (hors utilisation) est plus facilement identifiable¹⁴. Hors pertes de fluide frigorigène, la fabrication, la maintenance et la fin de vie des pompes à chaleur émettent une quantité de gaz à effet de serre jusqu'à 4 fois supérieure à une chaudière gaz pour un même service rendu (selon la base INIES).

Par ailleurs, historiquement, les fluides frigorigènes utilisés dans les pompes à chaleur engendraient un effet de serre conséquent mais différentes

réglementations obligent les professionnels à les substituer par des fluides avec un impact climatique se réduisant progressivement¹⁵. À l'heure actuelle, ceux-ci pèsent encore pour 30 à 40% de l'empreinte carbone des pompes à chaleur (hors énergie électrique consommée), hypothèse maintenue de façon conservatrice jusqu'en 2035.

L'empreinte carbone des technologies de chauffage nécessite donc de comparer les émissions induites par leur fabrication, leur fin de vie, relativement aux émissions induites par leur utilisation.

Avec l'ensemble du cycle de vie des matériaux employés pour la rénovation, des systèmes de chauffage construits et des combustibles, les émissions évitées par les différents scénarios restent principalement déterminées par les émissions de combustion à l'usage des systèmes de chauffage. Ainsi, les scénarios les plus ambitieux en matière d'efficacité du bâti et des systèmes de chauffage produisent le plus d'émissions évitées, même en analyse de cycle de vie. Le scénario A-SNBC 1 en comparaison au scénario contrefactuel permet un gain annuel de 13 MtCO₂eq en 2035.

14. Voir la base INIES <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html> ou les profils environnementaux produits d'Uniclimate syndicat des industries thermiques, aéronautiques et frigorifiques <https://www.uniclimate.fr/documentation.html> pour les pompes à chaleur.

15. Uniclimate, 2020, Fluides HFC quel avenir avec F-gas ? Troisième édition.

6

L'ANALYSE ÉCONOMIQUE à l'échelle de la collectivité

L'ANALYSE ÉCONOMIQUE À L'ÉCHELLE DE LA COLLECTIVITÉ

Synthèse

Évaluation sur le scénario d'ensemble

- 1) **La transition vers un secteur du bâtiment bas-carbone au rythme de la SNBC implique des investissements très soutenus** dans la rénovation du bâti et les systèmes de chauffage. En rythme annuel, l'investissement – très largement porté par les acteurs privés (particuliers, entreprises) représente plus de 30 milliards par an, soit de l'ordre de 12 Md€/an au-delà de la trajectoire tendancielle (fondée sur le passé, sans intégration de l'inflexion récente sur les gestes). Cet effort représente de l'ordre de 0,5% du PIB et un peu moins de 10% des dépenses dans les bâtiments (construction, rénovations, etc.). Ce montant intègre le renouvellement annuel des installations de chauffage, qui est incompressible et ne dépend pas de la politique sur le climat.
- 2) Sur la période de 15 ans à venir, cet effort se répartit à parts égales entre (i) les investissements dans les systèmes de chauffage (pompes à chaleur, convecteurs électriques, chaudière au gaz, systèmes de chauffage au bois, etc.) qui concernent 2,2 millions de logements et 100 millions de m² de surfaces tertiaires et (ii) les investissements en rénovation du bâti qui concernent 15 millions de logements et 600 millions de m² de surfaces tertiaires.
- 3) Dans les scénarios les plus ambitieux, les investissements dans les solutions électriques efficaces et la rénovation ne sont que partiellement compensés par des baisses de dépenses en approvisionnement énergétique (gaz, fioul, électricité, etc.). Par rapport au scénario contrefactuel, le scénario de la SNBC conduit à un surcoût annualisé pour la collectivité correspondant aux investissements dans les systèmes de chauffe et la rénovation de l'ordre de 8,3 Md€/an¹ pour une réduction des coûts variables (gaz, fioul, bois, électricité) de l'ordre de 2,2 Md€/an.
- 4) Ce surcoût relève de l'investissement climatique. Il représente un coût de la tonne de CO₂ évité de 310 à 430 €/tCO₂ selon les hypothèses considérées sur le coût des rénovations, soit du même ordre de grandeur que la valeur tutélaire du carbone à l'horizon 2035 (375 €/tCO₂). Compte-tenu de l'incertitude sur les coûts et la performance des rénovations, en valorisant les émissions de CO₂ évitées à la valeur du tutélaire du carbone à cet horizon, le scénario d'atteinte des objectifs de la SNBC dans le cadre du scénario A-SNBC 1 apparaît économiquement proche du scénario contrefactuel.
- 5) Ces résultats dépendent fortement des hypothèses sur le coût de la rénovation, alors que dans une perspective de massification des gestes, ces hypothèses apparaissent très différenciées dans la littérature. La maîtrise des coûts et l'ambition des gestes de rénovation du bâti jouera un rôle clé dans l'efficacité économique de ces actions.
- 6) Le coût d'abattement relativement élevé au regard d'autres leviers de réductions des émissions de CO₂ (mobilité électrique, production d'hydrogène par électrolyse...) est largement dû à la prise en compte de «l'effet rebond» sur la consommation d'énergie après les mesures d'efficacité énergétique sur le bâti (rénovations) et les solutions de chauffe (pompes à chaleur). Cet effet rebond correspond à une amélioration de la qualité de vie et entraîne des impacts positifs sur le confort des logements et sur la santé des occupants. Cette consommation supplémentaire se traduit par des coûts d'énergie et des émissions de CO₂ supplémentaires dont les bénéfices ne sont pas valorisés économiquement dans l'étude. **À même niveau**

1. +7,5 Md€/an dans la rénovation, +2,7 Md€/an dans les systèmes de chauffage électriques, -1,9 Md€/an dans les systèmes de chauffage au gaz

de confort, le coût d'abattement de la tonne de CO₂ évité dans le scénario de la SNBC s'évalue, selon les hypothèses sur le coût des rénovations, entre 160 et 240 €/tCO₂, une valeur significativement inférieure à la valeur de l'action pour le climat.

Évaluations d'actions plus ciblées

- 7) Les évaluations présentées ci-dessus portent sur l'ensemble des mesures en matière d'électrification des systèmes de chauffage et d'efficacité énergétiques sur le bâti. Chacune de ces actions peut être valorisée séparément. Toutefois le bénéfice de chaque action pris isolément dépend des autres actions mises en œuvre :
- ▶ Le développement de solutions de chauffage électriques, même via des systèmes peu efficaces (radiateurs électriques), permet un premier niveau de réduction des émissions de CO₂ mais limité à 2 à 3 MtCO₂/an, sans surcoût du fait du faible coût d'installation de ces équipements
 - ▶ Le développement de solutions de chauffage électriques efficaces (pompes à chaleur) permet une réduction plus importante des émissions de CO₂ et constitue une solution de décarbonation pertinente sur le plan économique et sans regret pour la collectivité. Elle permet d'atteindre une réduction des émissions de CO₂ de l'ordre de 6 MtCO₂/an pour un coût de la tonne de CO₂ évitée entre 100 et 150 €/tCO₂.
 - ▶ Les actions de rénovation du bâti permettent d'aller plus loin dans la décarbonation (de l'ordre de 8 MtCO₂ évitées supplémentaires) et d'atteindre les objectifs de la SNBC mais le coût apparent des émissions de CO₂ évitées apparaît significativement plus important que les actions d'électrification, de l'ordre de 600 €/tCO₂ évitée.

Ce coût d'abattement «apparent» tient compte de l'effet rebond sur la consommation traduisant une amélioration de la qualité de vie. À qualité de vie inchangée, les actions de rénovation sur le bâti présentent, selon les hypothèses considérées sur les coûts des rénovations thermiques, un coût réel de la tonne de CO₂ évitée de l'ordre de 200 à 250 €/tCO₂, inférieur à la valeur de l'action pour le climat.

Parmi ces actions, certaines sont beaucoup moins chères que d'autres et peuvent présenter un bien meilleur rendement sous l'angle du coût d'abattement.

Au vu des ambitions climatiques fixées, ces différentes actions doivent être mises en œuvre

conjointement. D'autres travaux de l'ADEME montrent par ailleurs l'importance de réaliser des rénovations ambitieuses de façon planifiée et en un nombre d'étapes limité, afin par exemple, d'éviter que le remplacement d'un système de chauffage fait en premier lieu ne se retrouve surdimensionné lors d'une étape ultérieure d'isolation du bâtiment.

- 8) **La rénovation ciblée des « passoirs thermiques », permet d'atteindre un rendement climatique plus important de l'ensemble des transformations (rénovation et systèmes de chauffe), avec un coût de l'ordre de 300 € par tonne de CO₂ évitée (en prenant en compte l'effet rebond), contre 430 €/tCO₂ quand les rénovations ne sont pas ciblées (avec les hypothèses de coût de référence).** À confort inchangé, c'est à dire sans prise en compte de l'effet rebond, le coût d'abattement apparaît très limité, inférieur à 100 € par tonne de CO₂ évitée. Ce type de ciblage des rénovations sur les logements les plus énergivores apparaît être un choix sans regret d'un point de vue économique.

Ce résultat souligne les fortes différences de rendement climatique selon les cibles privilégiées en termes de rénovation. Des travaux complémentaires pourraient porter sur l'analyse plus détaillée des différentes actions, selon les types de logements, leur localisation géographique (ou «zone climatique») ou les gestes de rénovation, pour apporter des éclairages plus détaillés pour la définition des politiques publiques.

- 9) Vu du consommateur, l'adoption des solutions les plus efficaces (pompes à chaleur) peut présenter un intérêt sur le temps long mais nécessite un investissement initial plus important, rendant difficile le recours à ces solutions sur une base seulement économique et financière. Cette difficulté risque de se traduire par un désalignement entre l'intérêt des propriétaires et l'intérêt collectif, de nature à justifier des mesures d'accompagnement spécifiques.
- 10) Du point de vue de l'utilisateur, la solution pompe à chaleur hybride peut s'avérer moins chère à l'investissement qu'une pompe à chaleur classique, mais des analyses supplémentaires seraient nécessaires pour établir le bilan économique précis de ce scénario du point de vue de la collectivité. Il existe en effet une grande hétérogénéité des situations possibles : la pompe à chaleur hybride semble pouvoir présenter un intérêt dans certaines situations et pas dans d'autres.

6.1 L'évaluation des coûts de la transformation du secteur du bâtiment implique de prendre en compte l'ensemble des composantes économiques associées

L'analyse économique de la transition engagée ou programmée dans le secteur du bâtiment en lien avec la production d'énergie représente un enjeu important. En effet, les débats sur la rénovation thermique où le choix des solutions de chauffage mobilisent souvent des arguments sur les coûts, sans que le périmètre de ces débats soit, la plupart du temps, correctement précisé.

Depuis 2017, RTE réalise un chiffrage économique systématique des scénarios étudiés dans ses rapports. Ce chiffrage s'appuie sur une méthodologie concertée, transparente et éprouvée visant à évaluer les coûts de transition du système à l'échelle de la collectivité. Il vise notamment à bien distinguer la métrique d'évaluation des coûts (coûts annualisés, dépenses annuelles, dépenses d'investissement, dépenses d'exploitation, etc.). Cette approche a été présentée dans des instances de concertation (groupes de travail dédiés), et déclinée dans les études successives de RTE publiées récemment (scénarios du Bilan prévisionnel, schéma de réseau, études sur la mobilité électrique et sur l'hydrogène, etc.).

De la même manière, l'ADEME s'attache à réaliser des chiffrages économiques de ses scénarios selon une approche similaire basée sur l'évaluation des coûts complets à l'échelle du système électrique dans les études qui lui sont dédiées, voire des modélisations macroéconomiques dans les exercices de prospective plus complets.

La méthodologie mise en œuvre dans cette nouvelle étude reprend ces fondamentaux. Elle vise, dans un premier temps, à comptabiliser l'ensemble des composantes de coût afférentes au système concerné (c'est-à-dire du système électrique et du parc de bâtiments) du point de vue de la collectivité, indépendamment des acteurs qui portent ces

coûts et des mécanismes de redistribution existants entre les différents acteurs économiques (taxes, subventions...). Ceci constitue le prisme d'analyse de référence pour éclairer la décision publique.

Cette analyse peut ensuite être complétée par une analyse du point de vue des acteurs et notamment de celui du consommateur, afin d'évaluer les incitations économiques auxquelles celui-ci est confronté dans ses choix d'équipements et de rénovation.

L'analyse à l'échelle de la collectivité pose des questions de méthode :

1) D'une part, il s'agit de préciser l'ensemble des composantes de coûts pouvant intervenir dans l'évaluation économique.

S'agissant des transformations du secteur du bâtiment, plusieurs catégories doivent être prises en compte :

- ▶ Les coûts des systèmes de chauffage : équipements en chaudières, pompes à chaleur, poêles, etc. en tenant compte des coûts d'installation et de maintenance ;
- ▶ Les coûts de l'énergie utilisée pour le chauffage : combustibles (gaz, fioul, biomasse...) et production d'électricité². La comptabilisation des coûts de production d'électricité attribuables au chauffage électrique (ainsi qu'à l'effet sur les pertes électriques³) pose une question de méthode, similaire à celle existant pour la comptabilisation des émissions de CO₂ du secteur électrique attribuables à chaque usage.

L'approche incrémentale à parc adapté présentée au chapitre 5, section 5.1.3 du rapport est utilisée car elle permet d'assurer que les différences entre scénarios sur les coûts de production d'électricité affectés au chauffage

2. Les coûts des éventuels besoins de renforcement des réseaux devraient être pris en compte. Les différentiels de coûts sur les réseaux n'ont pas été évalués.

3. Les différentiels de consommation de chauffage électrique impliquent des différences sur les pertes sur les réseaux, qui sont intégrées dans l'analyse.

correspondent aux différences de coûts totaux entre les scénarios.

L'approche intègre ainsi à la fois les coûts associés à la sollicitation des moyens de production d'électricité ainsi que les coûts de gestion de la pointe électrique (en tenant compte des coûts fixes et d'investissement dans des capacités de pointe⁴ et des solutions de flexibilité). La modélisation stochastique, à pas horaire et sur le périmètre de l'ensemble de l'Europe est reprise pour ces analyses (modélisation identique à celle utilisée pour l'élaboration des Bilans prévisionnels).

- ▶ Les coûts potentiels d'évolution des réseaux ne sont pas intégrés à ce stade de l'analyse. Ils sont pertinents à prendre en compte si les transformations étudiées engendrent des coûts d'adaptation et de congestion différents sur les réseaux de transport et de distribution, pour toutes les énergies de réseau concernées (électricité, gaz, chaleur). Des approfondissements ultérieurs pourront avoir lieu sur cet aspect.
- ▶ Les coûts des travaux de rénovation du bâti : isolation, remplacement de fenêtres, etc. Ces travaux permettent par la suite de réduire les coûts de l'énergie de chauffage, même si ces gains sont en partie contrebalancés par un effet rebond⁵, qui est bien pris en compte dans l'analyse. En théorie, ces travaux sont susceptibles avoir un effet sur le dimensionnement nécessaire des systèmes de chauffage et leur coût, mais cet effet est difficile à modéliser car il dépend de la séquence des opérations de rénovation énergétique au sens large (intégrant l'amélioration de la performance du bâti et des solutions de chauffage).

Le périmètre de l'évaluation économique est donc large : il englobe les transformations du secteur électrique, mais également les transformations associées à la totalité du secteur des bâtiments

résidentiels et tertiaires (pas uniquement les bâtiments chauffés à l'électricité). Ce périmètre permet de comparer les scénarios en intégrant l'ensemble des coûts qui les différencient. Seuls les bénéfices liés à la qualité de vie et au confort (qui sont différents entre les scénarios) ne sont pas comptabilisés de façon économique.

Les hypothèses associées à ces différentes composantes sont détaillées dans l'encart «Détail des hypothèses de coût». Les incertitudes inhérentes à cet exercice rendent plus pertinente la comparaison des scénarios entre eux plutôt que le total des coûts de chaque scénario en valeur absolue.

Il existe enfin une question méthodologique sur la valorisation des externalités induites par les transformations étudiées. Cela concerne en premier lieu les émissions de gaz à effet de serre : pour des analyses portant sur des transitions vers des modes de production bas-carbone, la valeur associée à ces émissions peut jouer un rôle important dans l'évaluation économique. Pour prendre en compte les bénéfices en matière de lutte contre le changement climatique, des analyses intégrant la valeur tutélaire du carbone⁶ sont présentées dans la suite.

D'autres externalités sont également susceptibles d'être affectées par les politiques de rénovation énergétique du bâtiment : réduction de la précarité énergétique, santé humaine, emploi local... Ces externalités peuvent jouer un rôle important dans les décisions publiques et ne doivent pas être ignorées ; elles sont toutefois plus difficiles à valoriser.

2) D'autre part, l'évaluation économique doit tenir compte des effets des investissements sur le long terme. En effet, certains investissements dans les systèmes de chauffage ou dans l'isolation des bâtiments représentent des dépenses importantes, mais qui produisent des effets sur le temps long (plusieurs dizaines d'années).

4. Il est fait l'hypothèse normative que les coûts fixes annualisés pour des capacités de pointe s'élèvent à 60 k€/MW/an. Une variante à 120 k€/MW/an est aussi considérée (à ce niveau de rémunération les capacités d'effacements mobilisables sont importantes, de l'ordre de 8 GW selon l'étude publiée par l'ADEME)

5. L'effet rebond dépend du coût des énergies et des systèmes de chauffage (voir chapitre 2)

6. La valeur tutélaire du carbone, rebaptisée valeur de l'action pour le climat, mesure la valeur pour la collectivité des actions permettant d'atteindre l'objectif de neutralité carbone. Voir *La valeur de l'action pour le climat, Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques*, Rapport de la commission présidée par Alain Quinet, France Stratégie, février 2019.

Détails des hypothèses sur les coûts de référence et les variantes

L'établissement d'hypothèses sur les coûts de rénovation ou de systèmes de chauffe se heurte à la diversité de situations, notamment dans les logements existants. D'une part, le coût de modification du système de chauffe dépend des systèmes existants et des systèmes cibles (réutilisation des émetteurs de chauffage, des circuits, etc.). Les coûts des rénovations dépendent aussi fortement des configurations des logements, des matériaux, des gestes et surtout des mutualisations possibles avec d'autres travaux à vocation esthétique. Les hypothèses considérées reposent sur les données issues des enquêtes disponibles à date mais doivent donc être considérées comme normatives, afin d'éclairer les enjeux économiques associées aux transformations dans le secteur du bâtiment.

Systemes de chauffage

Pour la plupart des systèmes de chauffage, les coûts retenus sont les coûts moyens issus des données récoltées en 2018 par l'ADEME sur un grand nombre d'opération de rénovation pour le rapport *Rénovation énergétique des logements : étude des*

prix, publié en novembre 2019⁷. Les types d'installation n'ayant pas fait l'objet d'un relevé dans l'étude des prix conduite par l'ADEME sont valorisés selon des hypothèses appuyées sur diverses sources publiques.

Les hypothèses considérées correspondent aux coûts actuels, reflétant que ces technologies sont aujourd'hui matures. Les hypothèses considérées visent à refléter le coût des systèmes de chauffage uniquement⁸. Pourtant, certaines chaudières mutualisent la fourniture de chauffage et d'eau chaude sanitaire. Cet effet n'est pas directement pris en compte.

L'hypothèse concernant les pompes à chaleur hybrides est entourée d'une plus grande incertitude du fait du faible nombre d'installations actuellement en service. Dans le cas de référence, elle repose sur l'hypothèse d'un dimensionnement optimisé de la partie « électrique » qui devra être vérifié.

Ces chiffres intègrent les coûts de pose.

Type d'installation	Durée de vie	Coût moyen à l'achat (€ HT)	Coût d'entretien (€/an HT)
PAC air/eau	20	13 000	250
PAC air/air	20	8 000	150
Chaudière gaz	20	6 000	180
Chaudière fioul	25	8 500	180
Chaudière bois	25	12 500	500
Poêle à bois bûches/granulés	25	5 000	70
PAC eau/eau ⁹	20	16 000	250
PAC hybride ¹⁰	20	Variante basse : 10 000 Variante haute : 13 000	300
Radiateur électrique à effet Joule ¹¹	20	400 €/kW, soit de l'ordre de 3 600 € pour un logement moyen	0

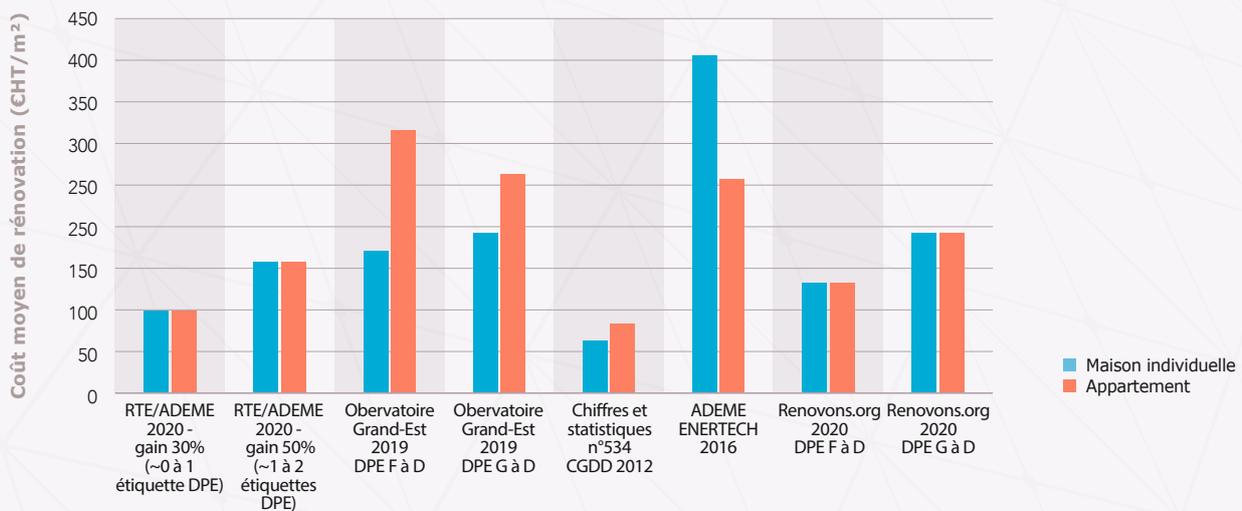
7. Les coûts moyens ne sont pas restitués dans le rapport sur la rénovation énergétique des logements mais ont été partagés par l'ADEME pour les besoins de ce rapport.

8. Les autres coûts que ceux des générateurs de chauffage (pour les installations nécessitant un circuit d'eau ou d'air) n'ont pas été intégrés dans l'étude, en supposant que les choix des changements de systèmes de chauffage dans l'existant tenaient compte de l'existant dans les logements.

9. RTE a pu constater des prix de 8000 à 25000 € (voseconomiesdenergie.fr, effy.fr ou travaux.com)

10. Prix d'achat d'une PAC hybride gaz d'une puissance de PAC air/eau comprise entre 6 et 8 kW (*La pompe à chaleur hybride, quel avenir en maison individuelle ?*, AFPAC, 2016, p. 34) et coût de pose (ADEME).

11. Prix moyen constaté pour un chauffage à effet Joule à inertie de moyenne gamme. Si cette hypothèse peut paraître élevée, elle vise à rendre compte de la sensibilité des propriétaires au confort thermique et aux économies d'énergie, permis par les systèmes à inertie performants, pour les investissements qui auront lieu d'ici à 2035.



Travaux de rénovation du bâti

Les coûts de rénovation du bâti ont été extrapolés à partir de l'étude des prix des gestes de rénovation menée par l'ADEME¹². Afin de reconstituer ces coûts, la méthodologie a consisté à déduire du rapport de l'Observatoire des coûts de la rénovation¹³, centré sur la région Grand Est, un nombre de gestes de rénovation permettant d'atteindre des gains de 30% et 50%. La rénovation à 30% de gain visé combine deux gestes de rénovation

(murs + toitures, planchers + menuiseries, etc.), celle à 50% en combine trois (murs + toitures + planchers, murs + menuiseries + toitures, etc.). Un taux d'apprentissage a été intégré à l'étude en prévoyant une baisse de 10% des coûts d'ici à 2035. Les coûts retenus se trouvent ainsi dans la fourchette des coûts constatés dans la littérature, qui se situeraient entre moins de 100 €/m² pour les petites rénovations et 300 €/m² pour les rénovations les plus performantes.

Coûts de combustible hors réseau (€HT/MWh)	2035	Source
Réseaux de chaleur (combustible principal : biomasse)	36 ¹⁴	Enquête prix de vente de la chaleur et du froid en 2017, AMORCE/ADEME, 2019
Bois	37	Enquête sur les prix des combustibles bois en 2019-2020, ADEME, 2019
Charbon	9	World Energy Outlook 2019
Électricité	~50	Modélisation RTE
Fioul	72	World Energy Outlook 2019
Gaz naturel	24	World Energy Outlook 2019

Pour simuler l'influence d'une possible industrialisation des procédés, une variante conduisant à une baisse de 30% a également été intégrée à l'étude.

Les dépenses de rénovation thermique du bâti sont supposées avoir une durée de vie de 50 ans.

Énergies

Les coûts des combustibles fossiles de chauffage hors électricité sont issus du World Energy Outlook 2019 publié par l'Agence internationale de l'énergie et convertis en €/MWh. Les coûts de production d'électricité sont obtenus grâce à la simulation de l'équilibre offre-demande pour chaque scénario.

Actualisation et durées de vie

L'annualisation des coûts d'investissement s'appuie sur des hypothèses de taux d'actualisation, basées sur les recommandations du rapport Quinet¹⁵, et de durée de vie des équipements.

12. ADEME, 2019. Rénovation énergétique des logements : étude des prix

13. ADEME, MTES, 2017, *Coûts de la rénovation énergétique des logements Grand-Est - Observatoire de la région Grand Est*. Cette étude centrée sur la région Grand Est présente les coûts d'un panel de 350 opérations de réhabilitation, en lien avec les économies d'énergie visées.

14. Part variable (41%) du coût de la chaleur en réseau de chaleur biomasse relevé par l'étude AMORCE.

15. Commissariat général à la stratégie et à la prospective, 2013, *Évaluation socioéconomique des investissements publics*, Rapport de la mission présidée par Émile Quinet

Détails des hypothèses sur les coûts de référence et les variantes (suite)

Plus précisément, les dépenses en installations de chauffage sont supposées avoir une durée de vie d'environ 20 ans (voir tableau), légèrement variable selon le système de chauffage, et les dépenses de rénovation thermique du bâti sont supposées avoir une durée de vie de 50 ans.

Les investissements sont actualisés au taux de 2,5%. Ce taux bas correspond à la recommandation du rapport Quinet pour les investissements qui permettent de réduire l'exposition de l'économie nationale au risque sur les prix des combustibles importés (notamment pétrole et gaz). Le rapport

préconise explicitement ce taux pour les investissements dans des solutions d'économie d'énergies mais ce raisonnement peut s'appliquer aussi aux installations de chauffage électrique qui ont un effet analogue sur l'exposition de l'économie au prix des combustibles. Par soucis de cohérence, ce taux s'applique à l'ensemble des installations de chauffage.

Les hypothèses les plus structurantes de l'analyse portent sur les coûts et l'efficacité des rénovations pour lesquelles une variante est considérée.

Se restreindre à comptabiliser les dépenses d'investissement sur une période donnée sans tenir compte de la valeur de ces investissements au-delà de la période considérée n'est donc pas suffisant. Ceci est particulièrement le cas dans les scénarios de transition du secteur de l'énergie ou du bâtiment, marqué par des investissements importants dans des infrastructures ou équipements à durée de vie longue.

Si le calcul d'un indicateur en dépenses d'investissement reste une donnée intéressante pour évaluer l'effort financier à fournir pour

développer de nouvelles infrastructures dans la période considérée, ce calcul doit être complété par une évaluation des coûts tenant compte des effets de long terme des investissements. **La prise en compte des effets temporels dans l'analyse proposée consiste donc à comptabiliser les coûts annualisés pendant la période considérée**, en amortissant les dépenses d'investissements sur l'ensemble de la durée de vie des équipements ou travaux associés et en tenant compte des coûts d'entretien associés.

6.2 La décarbonation du secteur du bâtiment implique des investissements soutenus dans la rénovation du bâti et les systèmes de chauffage

Les transformations du secteur du bâtiment conduisent à des investissements importants, au sein desquels il est possible de distinguer plusieurs composantes :

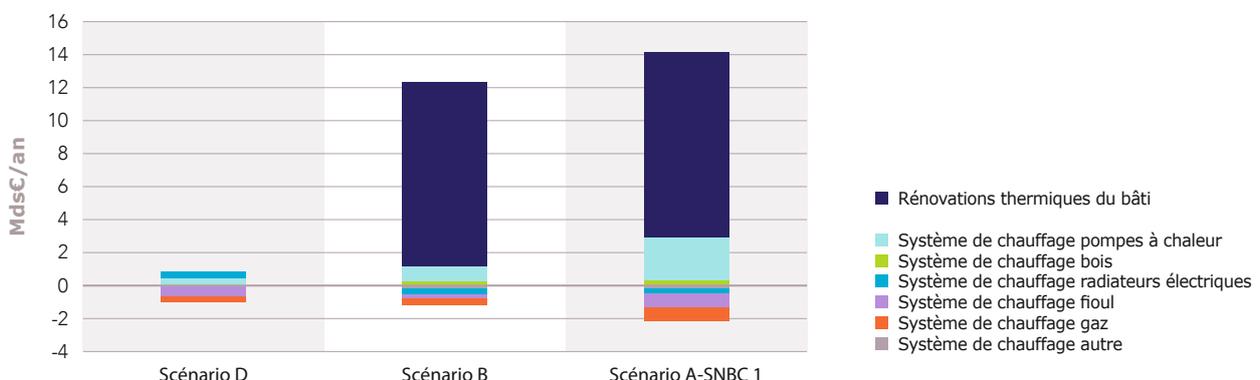
- ▶ Les coûts des travaux d'isolation du bâti, lesquels correspondent exclusivement à des coûts fixes d'investissement ;
- ▶ Les coûts des nouveaux équipements de chauffage, en particulier les pompes à chaleur qui sont caractérisées par des coûts plus importants à l'achat mais qui permettent par la suite une réduction importante de la consommation d'énergie.

Au total, la transition vers le scénario de la SNBC s'agissant du secteur du bâtiment et du chauffage mobilise des investissements totaux (portés en partie par les acteurs publics mais essentiellement par les acteurs privés) de l'ordre de 30 Md€/an¹⁶, soit de l'ordre de 1,2 % du PIB national.

Ce chiffre doit être analysé par rapport aux sommes actuellement investies dans la rénovation et les solutions de chauffage. Par rapport à ces trajectoires tendancielles, l'effort d'investissement correspondant au scénario de mise en œuvre de la SNBC représente de l'ordre de 12 Md€/an, soit de l'ordre de 0,5 % du PIB. Cet effort de 12 Md€/an est important dans l'absolu mais représenterait un peu moins de 10 % des dépenses dans les bâtiments (construction, rénovations, etc.)¹⁷.

Ces investissements se répartissent à parts égales entre les travaux d'isolation du bâti et les investissements dans les systèmes de chauffage. Ceux-ci tiennent compte de l'ensemble des systèmes de chauffage y compris ceux qui sont renouvelés à l'identique durant la période et ne correspondent pas nécessairement à une opération de rénovation performante au sens des objectifs des politiques publiques, bien que l'amélioration des rendements

Figure 6.1 Différentiel de dépenses d'investissement annuelles dans les systèmes de chauffage et l'isolation du bâti par rapport au scénario contrefactuel sur la période 2020-2035 (montants non actualisés)



¹⁶. Et représente une annuité de l'ordre de 28 Md€/an avec les hypothèses de taux d'actualisation considérées.

¹⁷. Selon la fédération française sur bâtiment, le chiffre d'affaire HT du secteur du bâtiment (neuf et entretien/amélioration) représente 148 Md€ en 2019.

des systèmes contribue à la baisse de consommation d'énergie. **La grande majorité des dépenses d'investissement dans les systèmes de chauffage correspond ainsi à des dépenses incompressibles (renouvellement en fin de vie ou systèmes pour nouveaux logements).**

Les montants d'investissement importants mis en évidence ci-dessus ne doivent pas disqualifier les scénarios qui conduisent aux dépenses les plus élevées. En effet, ces investissements produisent des effets sur le temps long. La rénovation énergétique des bâtiments, incluant les travaux sur l'isolation mais également la transition vers des systèmes de chauffage plus performants, permet ainsi de réduire durablement la consommation

d'énergie dédiée au chauffage. Elle offre également des bénéfices sociaux, avec notamment une meilleure couverture du besoin thermique des habitants concernés, et permet de lutter contre la précarité énergétique.

L'analyse économique des scénarios ne peut donc pas se borner à la prise en compte des seuls investissements. L'évaluation en coûts annualisés, qui se base sur un amortissement des coûts d'investissement sur la durée de vie des équipements et intègre les coûts variables de l'énergie nécessaire au chauffage, constitue le cadre méthodologique le plus adapté à l'éclairage des décisions publiques sur le long terme.

6.3 Les scénarios de transformation les plus ambitieux présentent les coûts complets annualisés les plus importants...

La métrique la plus performante pour comparer des scénarios prévoyant des investissements élevés (produisant des effets sur le temps long) à des scénarios prolongeant les tendances actuelles consiste à comparer leurs coûts complets annualisés nets. Cette méthode a été, par exemple, utilisée dans le Bilan prévisionnel 2017 pour comparer le coût des scénarios *Ampère*, *Hertz*, *Volt*, *Watt*, etc.,

Mesurées selon cette méthode, les dépenses (au périmètre de la collectivité) pour le chauffage dans le secteur du bâtiment se situeraient de l'ordre de 30 milliards d'euros pour les scénarios les moins ambitieux à plus de 35 Md€/an pour les scénarios les plus ambitieux, dont celui d'atteinte des objectifs de la SNBC.

En 2035, de l'ordre de 10 milliards d'euros par an de coûts annualisés sont dus aux investissements de rénovation thermique des bâtiments (i.e. rénovation de l'enveloppe).

6.3.1 Évalués en coûts complets annualisés, les dépenses dans les systèmes de chauffage sont prépondérantes par rapport à celles liées à la rénovation

Comptabilisées en coûts annualisés, les dépenses spécifiquement liées aux systèmes de chauffage sont prépondérantes dans tous les scénarios. Elles excèdent notamment les amortissements des coûts des travaux de rénovation du bâti.

Ceci s'explique notamment par les différences de durée de vie des équipements considérés (une vingtaine d'années pour les systèmes de chauffage contre une cinquantaine d'années pour les travaux sur le bâti). Sur la période considérée (2020-2035), la plupart des foyers seront amenés à renouveler au moins en partie leurs systèmes de chauffage, tandis qu'une partie plus limitée

des logements (entre 8 et 15 millions selon les scénarios) devrait être concernée par des travaux de rénovation du bâti.

6.3.2 La transition vers des solutions de chauffage électrique efficaces ne constitue pas, au niveau de la collectivité, un facteur de différenciation de premier ordre

La visualisation en coûts annualisés permet également de montrer que le choix de la solution de chauffage n'est pas un facteur déterminant dans l'évaluation des coûts complets des scénarios.

En effet, les dépenses dans les systèmes de chauffage sont en grande partie incompressibles : le rythme des investissements dans ce type de système est dicté par le renouvellement naturel des installations en fin de vie et le rythme de production de logements neufs. Une variation sur la part relative des différentes solutions de chauffage (pompes à chaleur, solutions à effet Joule chaudière au gaz ou au fioul, ou des solutions s'appuyant sur le bois) ne conduit pas à une modification d'ampleur du coût des scénarios : les différences entre scénarios sur les coûts annualisés des systèmes de chauffage sont inférieures à 1 Md€/an (écart entre le scénario A-SNBC 1 et le scénario B), soit moins de 5% de l'évaluation économique des scénarios.

6.3.3 L'effort sur les rénovations constitue un élément de différenciation important dans le coût des scénarios

Le coût annualisé des rénovations, qui s'échelonne de 2,5 Md€/an à 10 Md€/an selon les scénarios, apparaît comme un facteur de différenciation important dans le coût des scénarios.

Hors externalités, l'effort accru sur les rénovations conduit à une réduction des coûts d'énergie

(combustibles et électricité), mais qui ne couvre pas le surcoût d'investissement. Avec un effort supplémentaire de 7,5 Md€/an sur la rénovation, la variante où le rythme de rénovation resterait tendanciel ne réduit les coûts variables (correspondant aux combustibles et à l'électricité) que de l'ordre de 2 Md€/an. Les bénéfices de la rénovation sont donc essentiellement d'un autre ordre.

6.3.4 Les coûts induits sur la production d'électricité et le développement des flexibilités sont peu différenciés selon les scénarios, y compris en intégrant les coûts de gestion de la pointe électrique

Comparativement aux différentiels de coûts sur les efforts en matière d'investissement en rénovation et systèmes de chauffe, les différentiels de coûts pour la production d'électricité sont relativement limités. Les écarts de coûts de production d'électricité restent inférieurs à 1,5 Md€/an (entre le scénario D où la consommation du chauffage électrique est la plus importante et le scénario B, où elle est la plus faible).

Le scénario D est celui qui présente les coûts de production d'électricité les plus importants, en intégrant les coûts de mobilisation de moyens de pointe pour maintenir le niveau de sécurité d'approvisionnement défini par les pouvoirs publics. Néanmoins, ce poste de coût demeure limité au regard des autres postes de coûts des scénarios. Dans ce scénario, les coûts de gestion de la pointe électrique sont limités à 300 M€/an pour maintenir la sécurité d'approvisionnement (avec une hypothèse normative de mobilisation des flexibilités, ou au plus à 600 M€/an dans une hypothèse pessimiste sur le coût de mobilisation des flexibilités). Ces montants sont significatifs mais ne représentent pas un enjeu économique de premier ordre, comparativement aux autres postes de coûts considérés.

6.3.5 Les scénarios où la rénovation des bâtiments est la moins ambitieuse (contrefactuel, C et D) sont les moins coûteux, hors prise en compte des externalités

Les scénarios les moins ambitieux en termes de transformation du secteur du bâtiment sont ceux pour lesquels les coûts totaux annualisés sont moindres. Ceci s'explique essentiellement par un effort plus limité dans les travaux de rénovation énergétique des bâtiments. En effet, si ces travaux permettent de réduire la consommation énergétique dédiée au chauffage, les coûts associés ne sont que très partiellement compensés par les économies d'énergie, notamment du fait de l'effet rebond (voir ci-après, section 6.5).

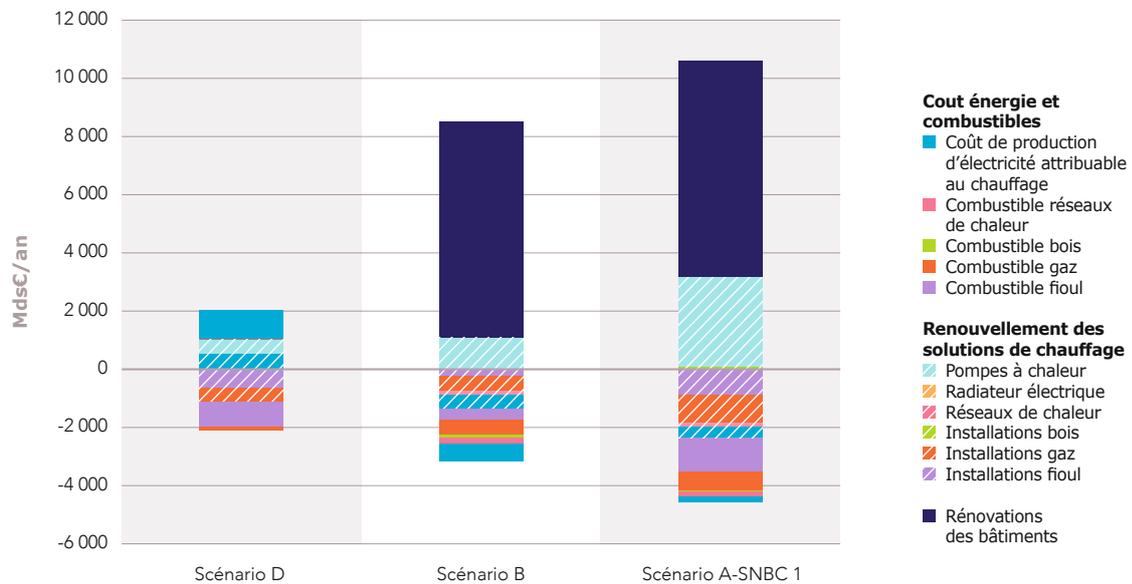
Cette analyse n'intègre pas, à ce stade, les bénéfices associés à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ou à d'autres externalités (confort, qualité de vie...) qui font l'objet de compléments dans la suite de cette partie.

6.3.6 Les scénarios qui prévoient un rythme de rénovation et de développement des PAC plus élevé (A-SNBC 1, B) sont ceux qui conduisent à des besoins d'investissements élevés, mais aussi à des dépenses de fonctionnement plus faibles

Selon les scénarios, il existe des différences importantes sur la nature des dépenses concernées. Les scénarios les plus ambitieux sur l'exigence de rénovation thermique et de développement des solutions de chauffage efficaces (pompes à chaleur) sont marqués par des coûts fixes d'investissement plus importants et des coûts variables (correspondant aux coûts de combustibles et d'électricité) plus limités (25% contre 35% dans les scénarios contrefactuel et D).

Ceci peut constituer une difficulté à atteindre les objectifs de la SNBC, dans la mesure où il est important de s'assurer que les investissements nécessaires peuvent être financés et que les incitations auxquels font face les différents acteurs concernés (particuliers et entreprises) permettent d'encourager ces investissements.

Figure 6.2 Différentiel des coûts complets annualisés à l'horizon 2035 associés aux systèmes de chauffage et à la rénovation du bâti, hors valorisation des émissions de gaz à effet de serre associées, par rapport au scénario Contrefactuel



6.4 ... mais ces coûts de transformation représentent un investissement climatique dont la pertinence économique peut se justifier uniquement par les réductions des émissions de CO₂, sous certaines conditions de maîtrise des coûts des rénovations

Plutôt que de chercher à rentabiliser les transformations projetées dans le secteur du bâtiment dans un cadre purement microéconomique par une réduction des coûts d’approvisionnement en énergie, celles-ci doivent être vues comme un «investissement climatique». Les éléments d’analyse sur les impacts environnementaux (présentés au chapitre 5) ont en effet permis d’identifier que ces transformations sont nécessaires pour atteindre les objectifs de la SNBC sur les émissions associées au chauffage.

Ces orientations sont non seulement nécessaires pour l’atteinte d’un objectif sectoriel de réduction des émissions de CO₂ mais apparaissent aussi économiquement pertinentes sur le temps long.

Le coût de réduction des émissions de CO₂ qu’il est possible de déterminer sur ces bases apparaît de prime abord relativement élevé. Ainsi, dans le scénario de référence où le coût des rénovations du bâti décroît de 10%, le coût pour la collectivité de la tonne de CO₂ évitée (au périmètre européen) est évalué à 430 €/tCO₂, soit une valeur plutôt élevée par rapport à d’autres exemples de politiques de réduction des émissions dans le secteur de la mobilité ou de l’industrie. Cette valeur est ainsi légèrement supérieure à la valeur tutélaire du

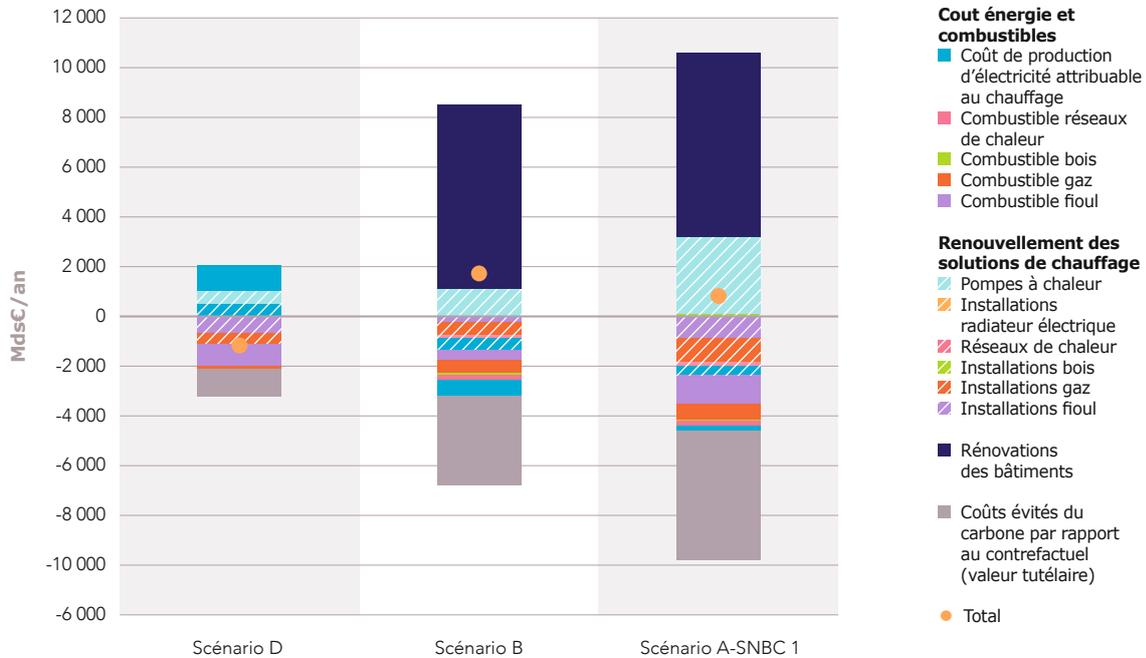
carbone à ces horizons, qui est supposée représenter les dépenses maximales que la collectivité doit consentir dans des actions pour le climat.

En valorisant les émissions évitées à la valeur tutélaire du carbone à l’horizon 2035 (375 €/tCO₂), le coût du scénario correspondant aux objectifs de la SNBC apparaît ainsi légèrement supérieur au coût du scénario tendanciel.

Ce résultat peut néanmoins être fortement amélioré en cas d’évolution favorable du coût des rénovations. Des baisses de coûts plus importantes que l’hypothèse de référence – prudente – apparaissent possibles, dans le cas d’une industrialisation réussie des procédés et d’une montée en compétence de la filière. Avec l’hypothèse d’une baisse de 30% des coûts par rapport aux coûts actuels, le coût d’abattement s’établit autour de 330 €/tCO₂, qui est ainsi inférieur à la valeur tutélaire du carbone.

Ces résultats montrent que ces transformations peuvent se justifier, sur le seul motif de la réduction des émissions associées au secteur du bâtiment, dans un raisonnement socio-économique au périmètre de la collectivité, et ce d’autant plus que les opérations de rénovation peuvent s’industrialiser et gagner en performance.

Figure 6.3 Différentiel des coûts complets annualisés à l'horizon 2035 associés aux systèmes de chauffage et à la rénovation du bâti, intégrant les bénéfices en matière d'émissions de gaz à effet de serre, par rapport au scénario contrefactuel



6.5 Les gains théoriques sur la consommation énergétique liés aux efforts d'efficacité énergétique sont contrebalancés par un « effet rebond » dont les bénéfices se situent au-delà de la réduction des émissions

Les investissements dans l'efficacité énergétique, sur le bâti et les systèmes de chauffage, permettent une réduction théorique de la consommation énergétique nécessaire pour maintenir la température à un niveau donné dans les logements¹⁸.

Pourtant, cette réduction de la consommation énergétique théorique ne se traduit pas en pratique au même niveau sur la consommation effective des logements. La réduction de la facture d'énergie pour les occupants leur permet financièrement d'augmenter la température de leur logement et améliore ainsi leur qualité de vie et le confort. Pour partie, cet effet rebond (voir paragraphe 2.2.2, chapitre 2) correspond à une réduction de la précarité énergétique^{19,20}.

6.5.1 Des externalités positives sont associées à une meilleure isolation des logements

La diminution de la précarité énergétique constitue un des objectifs majeurs de la mise en œuvre d'une politique en faveur de l'isolation, au même titre que la réduction des émissions de CO₂.

Comme il existe une relation directe entre le confort offert par l'habitat et la santé des individus²¹, les

mesures d'efficacité énergétique permettent une amélioration de la santé des individus, ce qui est attesté par plusieurs études. Il apparaît par exemple que le taux de surmortalité hivernale est plus élevé dans les pays où les logements sont mal isolés, que certaines maladies (cardio-vasculaires, respiratoires...) sont associées à des températures intérieures basses et que le manque de chauffage du logement a un impact négatif sur l'apprentissage des enfants²².

Ces améliorations en matière de qualité de vie et de confort engendrent des bénéfices socio-économiques. Une partie des coûts directs de santé imputables à la précarité énergétique (qui sont estimés à près de 1 Md€/an^{23,24}) pourrait par exemple être évitée. La surface habitable toute l'année peut être augmentée (certaines pièces pouvant être « abandonnées » en hiver car trop onéreuses à chauffer). L'amélioration du confort thermique lié à certains gestes de rénovation permet aussi une amélioration du confort phonique.

Par ailleurs, un effet positif sur le prix à la revente d'un bien immobilier ayant bénéficié de travaux de rénovation a été observé^{25,26}. En outre, une politique publique de rénovation massive a des conséquences positives sur l'emploi. En effet, le bâtiment

18. Bien que ce paragraphe porte sur les investissements de rénovation thermique du bâti, il est à noter que l'effet rebond a lieu quel que soit le type d'investissement conduisant à réduire le coût de fourniture en énergie de chauffage du ménage. Par exemple, le passage d'une chaudière fioul à une pompe à chaleur donne aussi lieu à un effet rebond.

19. D'après la loi Grenelle 2 : « Est en précarité énergétique au titre de la présente loi, une 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 notamment de l'inadaptation de ses ressources ou de ses conditions d'habitat »

20. Par ailleurs, la rénovation du bâti apporte une amélioration de la qualité de vie et du confort, à niveau de chaleur identique car la température ressentie correspond à la moyenne entre la température des parois et la température produite par le chauffage : à même température de consigne, l'isolation améliore le confort.

21. Le confort thermique au cœur de la rénovation des logements : norme ou stratégie d'adaptation ?, Isabelle Roussel, Pollution atmosphérique n° 225 – Avril 2015

22. Ezratty, 2009

23. SIA PARTNERS, pour l'Initiative « Rénovons – Coûts et bénéfices d'un plan de rénovation des passoires énergétiques à l'horizon 2025 », www.renovons.org

24. Les coûts médicaux indirects pourraient être 20 fois plus importants (selon l'étude Eurofound, *Inadequate Housing in Europe: costs and consequences*, 2016)

25. Définition : valeur nette additionnelle d'un bien immobilier dégagée grâce à une meilleure performance environnementale (ADEME, 2011)

26. Dominique Osso, Stanislas Nösperger, Maxime Raynaud. Regional efficiency programme valuating energy and multiple benefits: a balance between bill and comfort and far beyond. International Energy Policies & Programmes Evaluation Conference, June 2016, Amsterdam, Netherlands.

est l'un des secteurs avec le plus fort contenu emploi (ETP/M€ de demande finale), estimé à 9 emplois directs et 7 emplois indirects par million d'euros de demande²⁷. Selon les scénarios envisagés, le nombre d'équivalent temps plein (ETP) créé pourrait s'élever entre 100 000 et 300 000 ETP d'ici à 2035.

Enfin, l'isolation permet de réduire l'usage de combustibles fossiles et améliore la balance commerciale et la sécurité énergétique de la France.

La prise en compte de l'ensemble de ces externalités positives générées par l'efficacité énergétique des logements permettrait de valoriser l'ensemble des enjeux économiques associés aux transformations du secteur du bâtiment.

Néanmoins, la valorisation de ces externalités apparaît complexe et ne peut pas se baser sur un socle d'études suffisant pour disposer de valeurs

chiffrées pouvant faire consensus. Cela pourrait constituer un des axes de prolongement des résultats présentés dans cette étude.

6.5.2 L'étude RTE-ADEME présente une évaluation du coût d'abattement des scénarios après retraitement de l'effet rebond

Afin de contourner cette difficulté méthodologique, l'étude propose une évaluation économique n'intégrant pas l'effet rebond, permettant ainsi de mesurer les impacts économiques et environnementaux à niveau de confort et qualité de vie inchangé. Cette approche conduit à ne comptabiliser ni les coûts, ni les bénéfices liés à l'amélioration de confort.

Le scénario d'atteinte des objectifs de la SNBC permet en pratique une amélioration significative

Figure 6.4 Différentiel des coûts complets annualisés du scénario B avec et sans effet rebond, par rapport au scénario contrefactuel

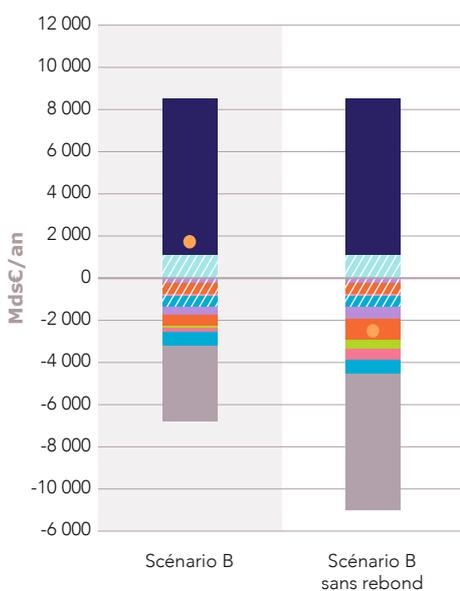
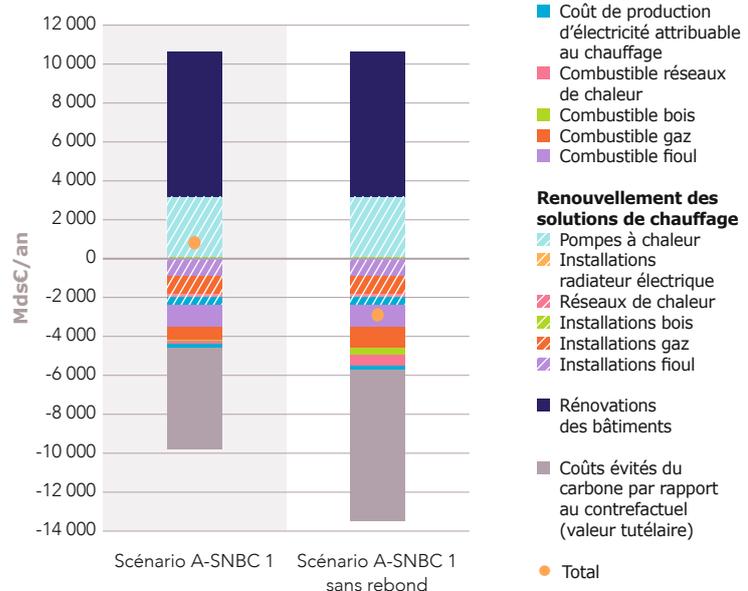


Figure 6.5 Différentiel des coûts complets annualisés du scénario A-SNBC 1 avec et sans effet rebond, par rapport au scénario contrefactuel



²⁷. L'effet net sur l'emploi de la transition énergétique en France : Une analyse input output du scénario négaWatt, Philippe Quirion, septembre 2013

du taux de couverture du besoin thermique par rapport au le scénario contrefactuel.

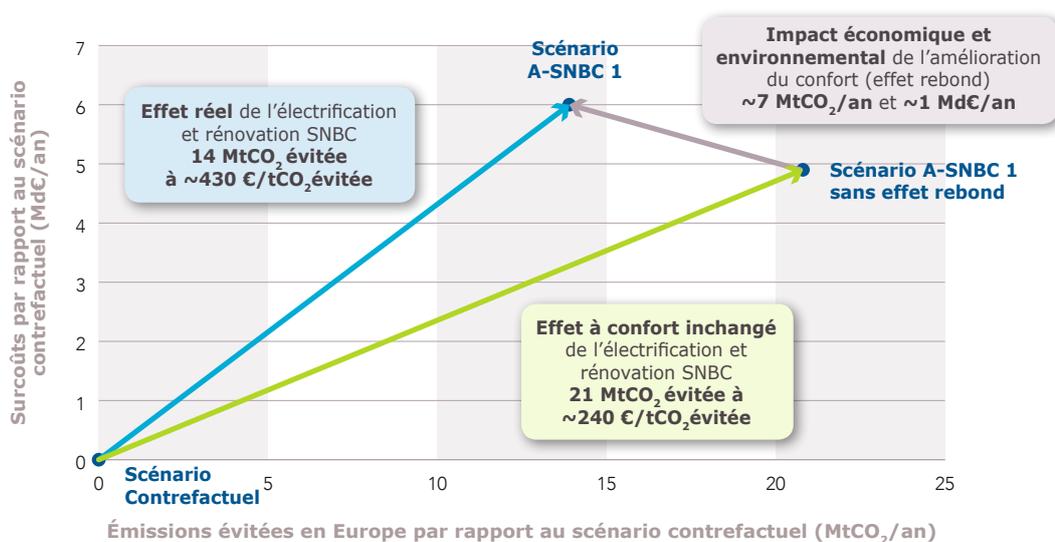
En neutralisant l'effet rebond, les besoins en combustibles et en électricité des installations de chauffage sont nettement inférieurs (de l'ordre d'une dizaine de TWh) et la réduction des émissions de CO₂ est plus importante de l'ordre de 7 MtCO₂/an dans le scénario de la SNBC. Les scénarios les plus ambitieux en matière de rénovation apparaissent ainsi nettement les plus favorables du point de vue des coûts collectifs, une fois les réductions des émissions de CO₂ valorisées à la valeur tutélaire du carbone.

Ainsi l'efficacité brute des sommes investies rapportées aux émissions évitées à l'horizon 2035, qui apparaît relativement basse en prenant en compte de « l'effet rebond » sur la consommation d'énergie (coût d'abattement à hauteur de 430 €/tCO₂ dans le scénario A-SNBC 1), devient nettement plus élevée (coût d'abattement à hauteur de 240 €/tCO₂) quand l'effet rebond est neutralisé.

L'évaluation de ce coût d'abattement à confort thermique inchangé offre un éclairage différent sur l'intérêt de viser une performance élevée dans le bâti et les solutions de chauffage. Le coût d'abattement une fois retraité de l'effet rebond apparaît ainsi inférieur à la valeur tutélaire du carbone retenu par les pouvoirs publics à l'horizon 2035, ce qui permet de « décomposer » en deux étapes les effets d'une politique publique conduisant à renforcer l'isolation des logements et les solutions de chauffage électriques efficaces :

- ▶ d'une part, un premier effet de réduction des émissions, à confort électrique inchangé (valorisé à 240 €/tCO₂) : celui-ci consiste en une action efficace au plan de la lutte contre le réchauffement climatique ;
- ▶ d'autre part, une « utilisation » d'une partie de ces gains pour augmenter le confort et réduire la précarité énergétique : ceci réduit l'efficacité de la politique sur le plan de l'efficacité par rapport à la trajectoire de la SNBC, mais apporte des bénéfices sur un autre plan.

Figure 6.6 Coûts et réductions des émissions de CO₂ associées aux efforts sur l'efficacité énergétique et l'électrification dans le bâtiment (scénario A-SNBC 1), comparativement au scénario contrefactuel : effet à confort et qualité de vie inchangés et impact de l'amélioration du confort et de la qualité de vie des ménages



La justification socio-économique du scénario est d'autant plus nette que les hypothèses sur les prix de la rénovation du bâti seront maîtrisés et de leur efficacité thermique garanties. Dans la variante du scénario A-SNBC 1 intégrant une maîtrise des coûts collectifs des rénovation, le coût d'abattement net de l'effet rebond apparaît de l'ordre de 160 €/tCO₂, soit une valeur très inférieure à celle retenue par le rapport Quinet pour le carbone à cet horizon.

La montée en compétence de toute la filière et l'accompagnement des petites et moyennes entreprises qui forment la majeure partie des acteurs de la rénovation devrait participer à cette réussite. À ce titre, l'instauration d'un observatoire des coûts de la rénovation énergétique²⁸ et d'un

plan anti-fraude à la rénovation devrait contribuer à l'atteinte des objectifs des politiques publiques, sous réserve d'une mise en œuvre efficiente²⁹.

Les perspectives de réduction du coût de la rénovation (par exemple via l'industrialisation des gestes dans le cadre d'un grand programme national) et l'arbitrage des habitants dans l'utilisation des gains énergétiques découlant de la rénovation du bâti et des solutions de chauffage (diminution de la facture ou amélioration du confort et réduction de la précarité énergétique) constituent donc les principales variables à prendre en compte dans l'analyse économique des scénarios.

²⁸. Projet de stratégie à long terme pour mobiliser les investissements dans la rénovation du parc national de bâtiments à usage résidentiel et commercial, public et privé, Ministère de la transition écologique et solidaire, février 2020.

²⁹. Le gouvernement a mis en place une mission interministérielle de coordination anti-fraude afin de coordonner les activités de différents organismes locaux chargés de lutter contre la fraude et afin d'élaborer une stratégie globale de lutte contre la fraude.

6.6 Considérées séparément, les actions d'électrification et d'efficacité énergétique présentent toutes deux un intérêt économique pour la collectivité

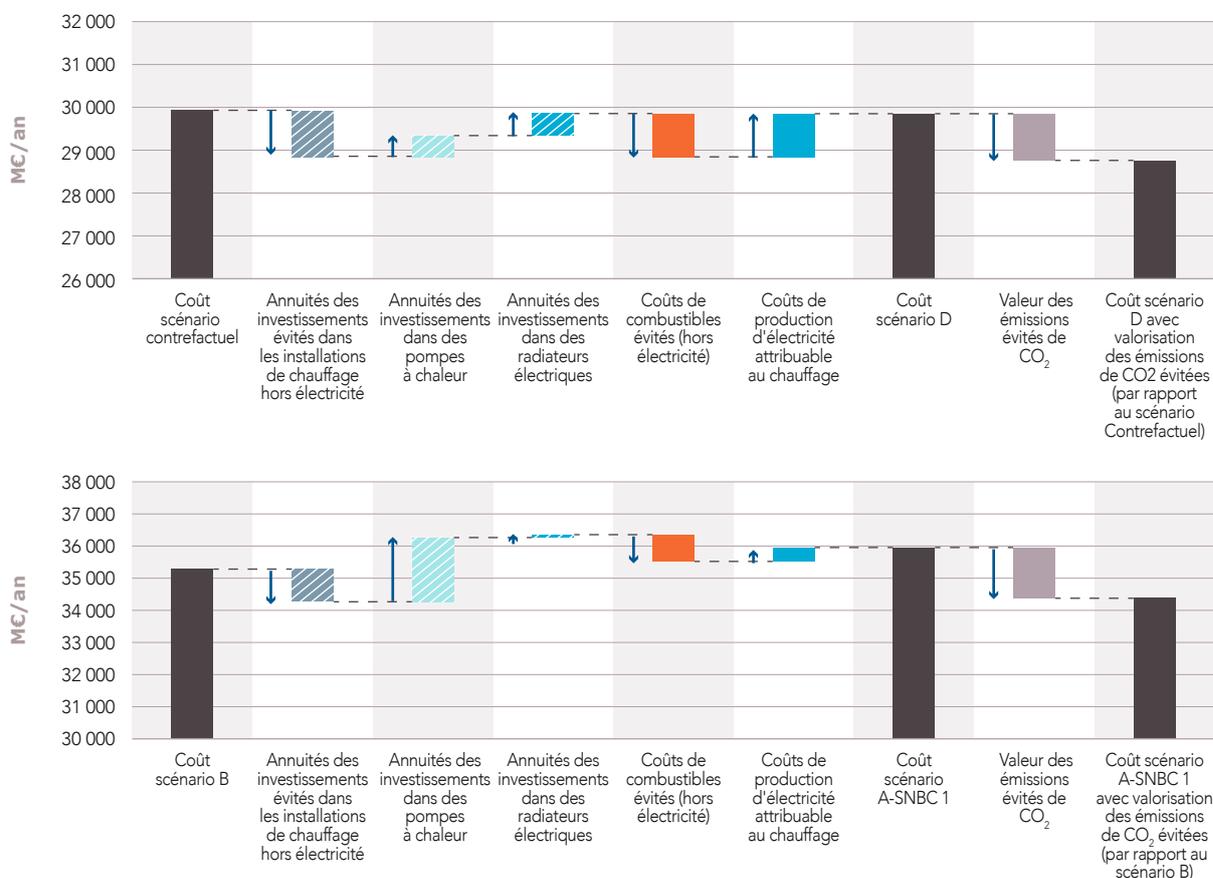
L'analyse économique du scénario d'atteinte des objectifs de la SNBC a permis d'identifier que le paquet «électrification, systèmes performants (pompes à chaleur) et rénovation du bâti» est économiquement pertinente dans son ensemble.

L'analyse plus détaillée des différents scénarios permet de tirer des conclusions sur l'intérêt spécifique de l'électrification des systèmes de chauffage et celle des actions d'efficacité énergétique.

6.6.1 Les actions d'électrification du chauffage constituent une solution économiquement pertinente, notamment quand les solutions de chauffage privilégiées sont efficaces (pompes à chaleur)

L'analyse permet de conclure que la transition vers des systèmes de chauffage électrique constitue en soi une option économiquement pertinente pour

Figure 6.7 Décomposition des effets sur les coûts complets annualisés liés à l'électrification du chauffage dans deux contextes d'efficacité énergétique : efficacité basse (scénarios Contrefactuel et D) et efficacité haute (scénarios B et A-SNBC 1)

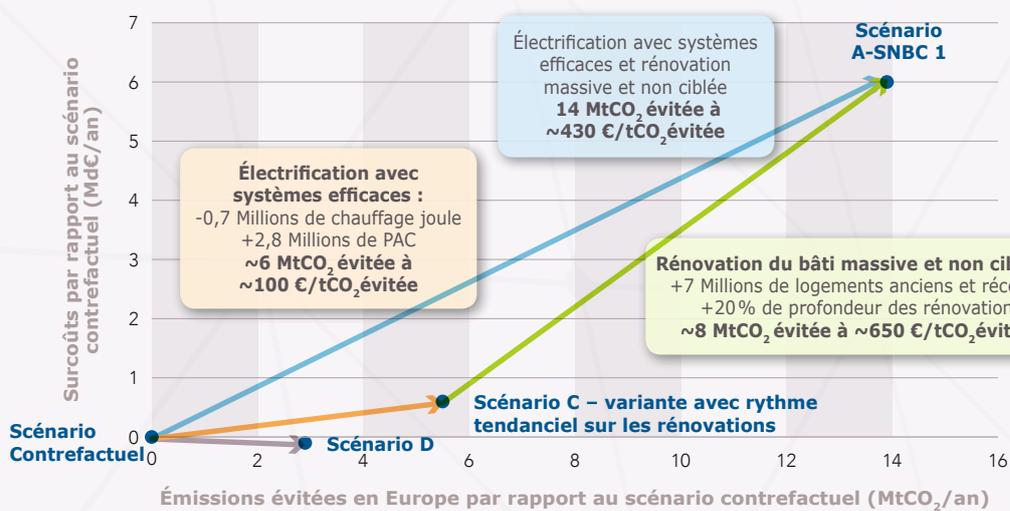


L'évaluation séparée des actions d'électrification et d'efficacité énergétique

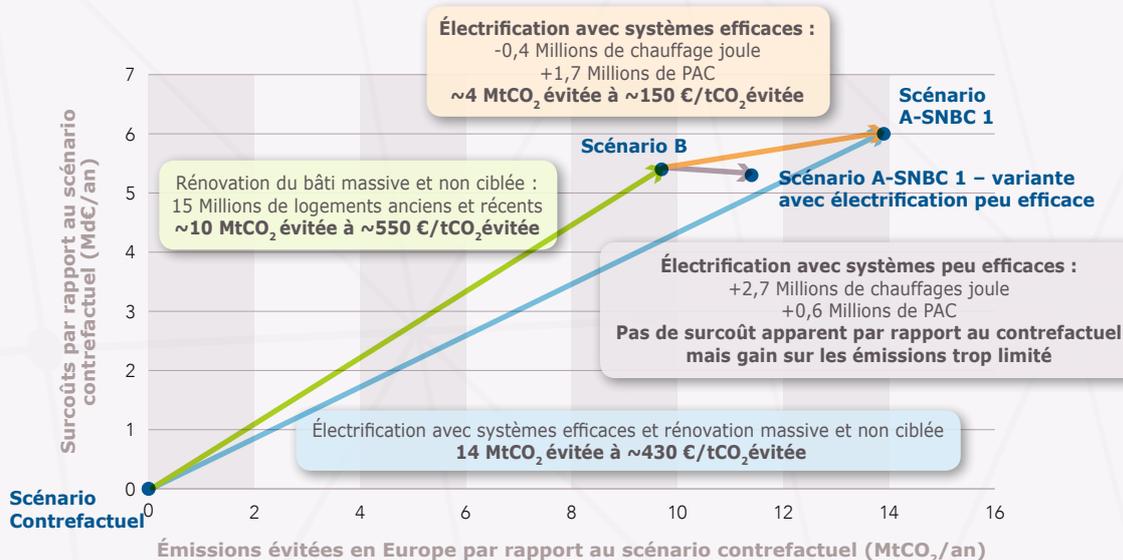
L'analyse des coûts et bénéfices environnementaux des actions prises isolément dépend de « l'ordre » de prise en compte : Après une rénovation, l'effet de réduction des émissions de CO₂ lié à l'électrification est moindre. *A contrario*, après une action d'électrification, l'effet environnemental d'une action de rénovation est moindre. Les analyses ci-dessous permettent de mesurer cet effet, qui reste

relativement limité sur les coûts d'abattement des actions d'électrification et de rénovation thermique.

En pratique, les actions sont fréquemment réalisées conjointement. Afin d'éclairer les politiques publiques, il apparaît cependant intéressant d'analyser les effets d'électrification et de rénovation de façon séparées.



Électrification avec systèmes peu efficaces :
 +1,6 Millions de chauffages joule
 +0,5 Millions de PAC
Pas de surcoût apparent par rapport au contrefactuel mais gain sur les émissions trop limité



la décarbonation, même en absence d'effort sur la rénovation. En effet, quelles que soient les hypothèses considérées sur les investissements dans la rénovation du bâti et les choix des solutions de chauffage électrique, les scénarios de renforcement de la part de l'électricité présentent des coûts complets inférieurs à ceux de leurs contrefactuels dès que les émissions de carbone sont valorisées à plus de 200 €/tCO₂ (comparaison du scénario D avec le scénario contrefactuel, comparaison du scénario C avec le scénario D, comparaison du scénario A-SNBC 1 avec le scénario B).

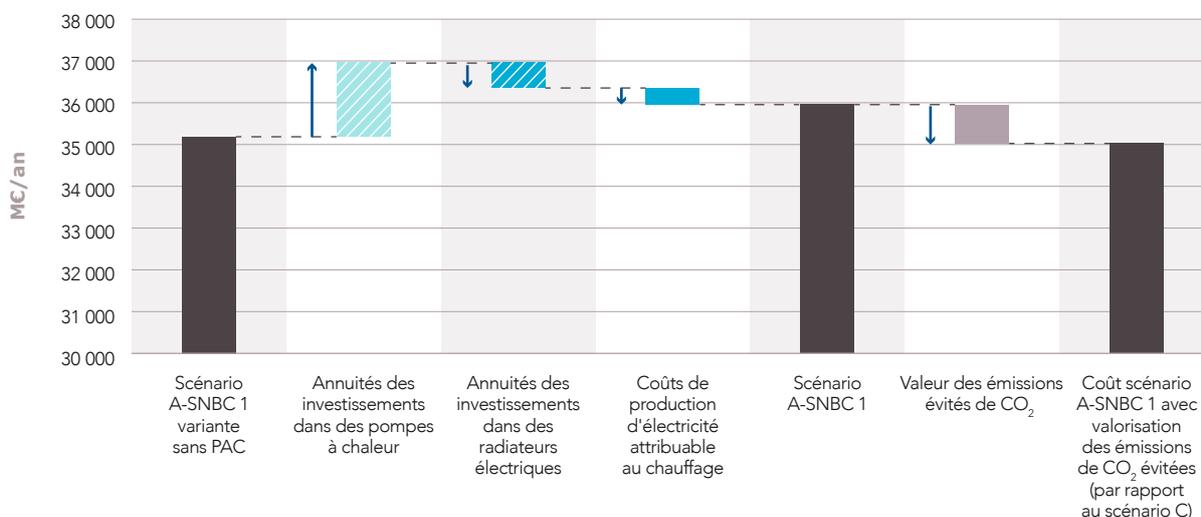
Les analyses permettent d'identifier, sur la base de la comparaison du scénario D avec le scénario contrefactuel que même une électrification basée sur des solutions peu performantes présente un intérêt économique pour la collectivité (avec en pratique un coût d'abattement voisin de zéro, qui traduit simplement le fait que les radiateurs électriques sont des solutions compétitives, en économie générale, par rapport à des solutions fossiles, du fait de leur faible coût). Cependant ce type d'électrification n'est pas efficace pour l'atteinte de l'objectif de réduction des émissions (réduction de l'ordre de 2 à 3 MtCO₂/an en intégrant l'impact sur les autres pays européens). Par ailleurs, ce type

d'électrification conduit à des hausses de facture pour les consommateurs et donc une moindre couverture des besoins de chaleur.

Une électrification basée sur des solutions plus performantes permet d'aller plus loin en matière de réduction des émissions de CO₂ (pour une réduction supplémentaire de l'ordre de 3 MtCO₂/an). La comparaison de plusieurs scénarios permet de conclure que le choix de systèmes efficaces est économiquement justifié que ce soit :

- ▶ en comparant un scénario de développement de l'électrification basé sur des solutions efficaces avec un scénario d'électrification tendancielle ; Le scénario C (électrification via des solutions efficaces comme les pompes à chaleur, mais sans accélération du rythme de la rénovation du bâti) permet d'éviter de l'ordre de 6 MtCO₂ par rapport au scénario contrefactuel pour un coût d'abattement de ~100 €/tCO₂. Le scénario A-SNBC 1 permet d'éviter de l'ordre de 4 MtCO₂ par rapport au scénario B pour un coût d'abattement de ~150 €/tCO₂ ;
- ▶ ou en comparant un scénario de développement de l'électrification basé sur des solutions efficaces avec un scénario de développement de l'électrification basé sur des solutions peu efficaces

Figure 6.8 Coûts complets du scénario A-SNBC 1 par rapport au scénario A-SNBC variante sans PAC



Le scénario A-SNBC 1 permet de réduire les émissions de CO₂ de plus de 2 MtCO₂/an par rapport à sa variante où l'électrification est essentiellement basée sur des radiateurs électriques, pour un coût d'abattement de 300 €/tCO₂, résultant essentiellement du surcoût des pompes à chaleur par rapport aux radiateurs électriques.

Cela signifie qu'en valorisant les réductions d'émission de CO₂ à la valeur tutélaire du carbone, un scénario basé sur l'électrification avec des systèmes de chauffage efficaces (et donc plus onéreux à l'investissement) est au moins aussi pertinent économiquement pour la collectivité qu'un scénario basé sur des solutions de chauffage électrique moins efficaces. Par ailleurs, l'utilisation de systèmes de chauffage efficaces s'accompagne d'un effet rebond, traduisant une amélioration du confort et de la qualité de vie.

Ces résultats soulignent la pertinence économique pour la collectivité du recours à l'électrification, dans le cadre de la politique d'électrification considérée (augmentation de la part de l'électricité dans le neuf, électrification de l'existant, en priorité sur les logements les moins énergivores) et compte-tenu de l'évolution du mix de production d'électricité projeté par la PPE. Ce résultat ne signifie pas que toute action d'électrification (notamment via des radiateurs à effet Joule) sur n'importe quel logement est économiquement pertinente.

Enfin, cette pertinence économique pour la collectivité n'est pas nécessairement garantie pour les propriétaires de logements et peut soulever une question sur l'alignement entre l'intérêt individuel et l'intérêt pour la collectivité.

6.6.2 Les actions de rénovation du bâti constituent une solution économiquement pertinente, sur le plan de la réduction des émissions de CO₂ si des gains d'efficacité interviennent

Les actions de rénovation du bâti permettent d'aller plus loin dans la décarbonation (jusqu'à 14 MtCO₂ évitées dans le scénario A-SNBC 1, par rapport au scénario contrefactuel, soit une réduction supplémentaire de 8 MtCO₂/an par rapport une électrification efficace mais sans ambition sur la rénovation – scénario C) mais le coût apparent des émissions de CO₂ évité apparaît significativement plus important que les actions d'électrification, de l'ordre de 600 €/tCO₂ évitée, hors neutralisation de l'effet rebond.

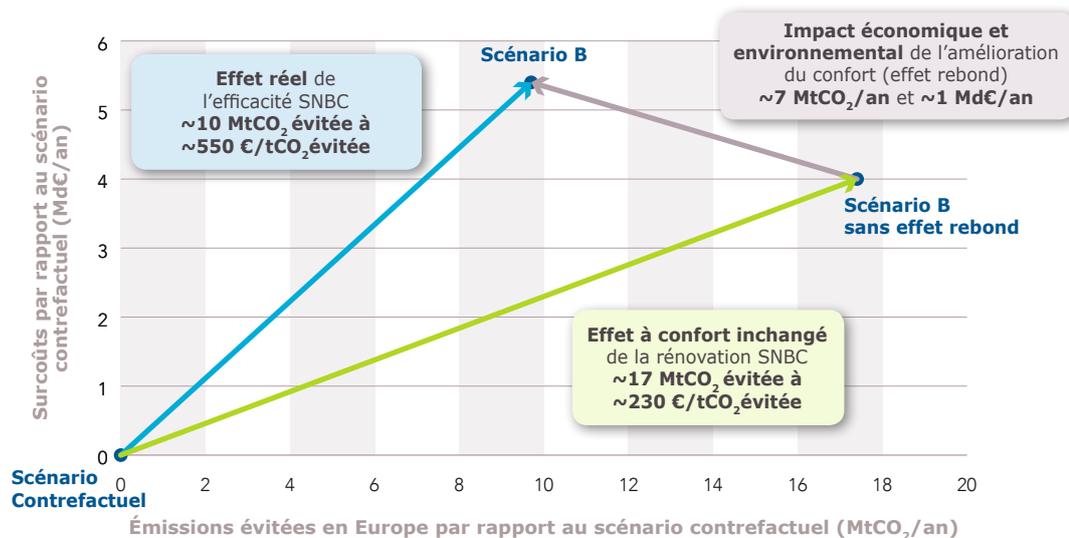
En utilisant la méthodologie présentée au paragraphe 6.5.2 (à qualité de vie et confort inchangés), les actions de rénovation sur le bâti présentent un coût réel de la tonne de CO₂ évitée nettement plus

faible, de l'ordre de 250 €/tCO₂ (et donc inférieure à la valeur de l'action pour le climat), avec les hypothèses de référence considérées sur les coûts et les gains d'efficacité des rénovations.

Ce résultat souligne que les actions de rénovation du bâti sont justifiées économiquement avec les hypothèses de référence considérées sur le coût des rénovations. En pratique, ce résultat reste valable tant que le coût d'une rénovation profonde (permettant une baisse du besoin thermique de 50%) est inférieur à 200-250 € HT par m² de surface habitable. La plupart des hypothèses identifiées dans la littérature situent le coût de rénovations du bâti permettant d'atteindre une même baisse de besoin thermique à un niveau inférieur.

Dans la configuration où des baisses de coûts des rénovations plus importantes sont atteintes (de l'ordre de 30%), grâce à l'industrialisation des procédés et une montée en compétence de la filière, le coût d'abattement à confort inchangé s'établit à moins de 200 €/tCO₂.

Figure 6.9 Coûts et réduction des émissions de CO₂ associées à la rénovation thermique : effet à confort et qualité de vie inchangés et impact de l'amélioration du confort et de la qualité de vie des ménages



6.7 Le ciblage des actions de rénovation sur les passoires thermiques permet d'obtenir des bénéfices similaires (réduction d'émissions, consommation d'énergie) par rapport au scénario de la SNBC, pour un coût plus faible

6.7.1 Le ciblage présente des bénéfices économiques

Le scénario de référence de l'étude RTE-ADEME (A-SNBC 1) reprend une trajectoire d'accélération des opérations de rénovation sans les cibler de manière spécifique sur certaines catégories de logements ni sur certains gestes. Dans ce scénario de référence, seuls les logements de classe énergétique A ou B (au sens du DPE) ne sont pas concernés par des opérations de rénovation au cours des 15 prochaines années.

A contrario, il est intéressant d'évaluer les performances de scénarios reposant sur des politiques ciblées (par rapport à la catégorie de logement, la zone climatique ou encore les gestes privilégiés). L'étude RTE-ADEME apporte un premier éclairage sur les enjeux associés via sa variante « ciblage des passoires thermiques ».

Cette variante, présentée dans la partie 2.4.5, porte sur une rénovation ciblée sur des bâtiments construits avant 1975 (principalement des maisons individuelles), soit antérieurement au choc pétrolier et aux premières normes de construction thermique. La rénovation des bâtiments se déroule à un rythme similaire à celui du passé mais augmenterait en efficacité et serait rigoureusement ciblée sur les bâtiments concernés plutôt que répartie de manière plus homogène sur le parc immobilier existant.

Dans cette variante, le nombre de rénovations diminue de moitié par rapport au scénario de référence A-SNBC 1, mais les rénovations portent en

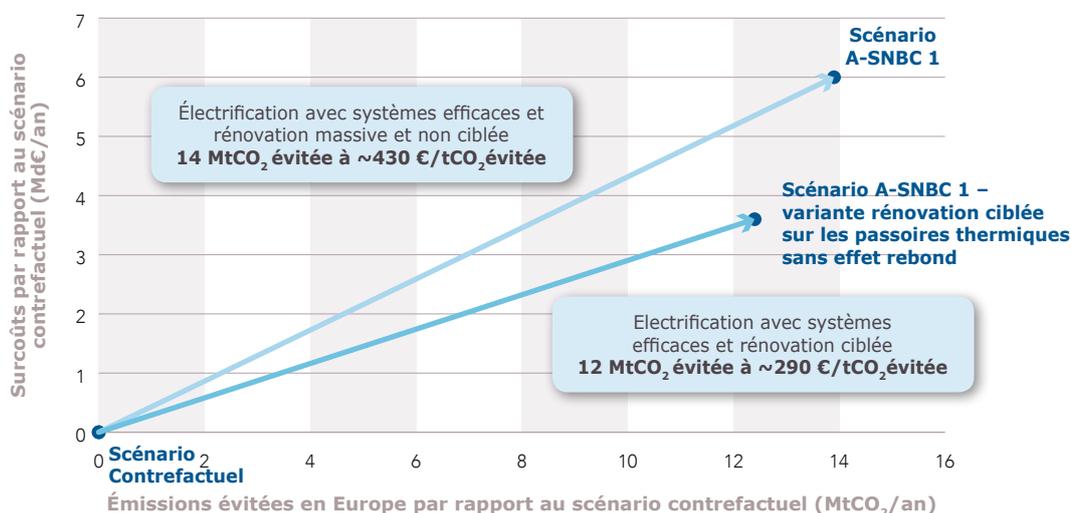
moyenne sur des logements de plus grande superficie : le coût total de la rénovation diminue, mais pas d'un facteur deux. Les investissements correspondants se situent à environ 11 Md€/an (contre 15 Md€/an dans le scénario de référence de la SNBC), soit une réduction de trois milliards d'euros par an une fois ces coûts évalués selon la métrique des coûts annualisés nets.

La réduction du nombre de rénovations conduirait dans ce cas à une moindre baisse des consommations énergétiques (combustibles fossiles ou bas-carbone, électricité) par rapport au scénario de référence de la SNBC, pour un montant de l'ordre de 300 M€/an en 2035. Le scénario est également moins performant par rapport à l'atteinte de l'objectif SNBC (surcroît d'émissions de l'ordre de 1,5 Mt de CO₂).

En valorisant les émissions supplémentaires à la valeur tutélaire du carbone, le scénario de transition avec ciblage des passoires thermiques présente une économie de plus de 2 Md€/an en 2035. **Cet écart est substantiel et confirme l'intérêt du ciblage des passoires thermiques sur le terrain de la réduction des émissions.**

Le ciblage des rénovations sur les passoires thermiques permet de porter le coût d'abattement à 290 €/tCO₂, contre de l'ordre de 430 €/tCO₂. À confort inchangé (et sans prise en compte de l'effet rebond), le coût d'abattement devient de l'ordre de 100 € par tonne de CO₂ évitée. **Dans tous les cas, ces valeurs sont nettement inférieures par rapport à la valeur tutélaire du carbone retenue à l'horizon 2035.**

Figure 6.10 Coûts et réduction des émissions de CO₂ de la variante avec ciblage sur les passoires thermiques, comparé au scénario A-SNBC 1



6.7.2 Les études sur l'articulation entre une priorisation de certains logements et la politique générale de rénovation pourront faire l'objet de développements ultérieurs

Sur la base des éléments présentés aux paragraphes précédents, le ciblage des rénovations sur les logements les plus énergivores apparaît un choix économique efficace du point de vue de la collectivité, alors qu'il permet de réduire la précarité énergétique et présente d'autres externalités positives. Même si les soutiens publics sont bonifiés pour ce type de travaux, la principale difficulté de mise en œuvre de cette politique publique est de pouvoir inciter à la réalisation de ces travaux, notamment pour les propriétaires n'ayant pas de trésorerie ou un accès au crédit difficile. Il peut également se concevoir dans le cadre d'une augmentation du nombre de rénovations par an, élargie à l'ensemble des types de bâtiments, mais avec un accent sur les logements et bâtiments tertiaires

les plus énergivores et/ou présentant les performances climatiques les moins élevées.

Une politique de traitement prioritaire des logements et bâtiments tertiaires présentant les moins bonnes performances énergétiques ou climatiques (en intégrant la nature de la solution de chauffage) peut également se concevoir même en maintenant l'objectif d'augmenter fortement le nombre annuel de rénovations comme prévu par la SNBC. Le scénario « ciblage » conduit en effet à traiter une partie des logements anciens non isolés, et n'épuise pas le gisement des logements énergivores et/ou fortement émetteurs.

Ce type d'étude pourrait être prolongé afin d'identifier les meilleures combinaisons pour maximiser l'efficacité de l'action collective dans le secteur du bâtiment, ainsi que les effets de seuils concernés (notamment les classes de logement au-delà desquelles l'effet marginal d'une amélioration de l'enveloppe décroît).

6.8 L'intérêt du déploiement de PAC hybrides est conditionné par des coûts des systèmes de PAC hybride significativement inférieurs aux coûts des PAC

Les pompes à chaleur hybrides sont présentées par certains acteurs comme une solution permettant d'allier les avantages de l'électricité (énergie essentiellement bas-carbone en France, rendement énergétique très élevé pour la pompe à chaleur) et ceux du gaz (influence nulle sur la pointe électrique, caractère facilement stockable du gaz).

Dans l'étude RTE-ADEME, une variante du scénario de référence est consacrée à l'étude du développement des pompes à chaleur hybrides³⁰. Ce scénario diffère du scénario de référence en ce sens que 2,5 millions de pompes à chaleur électriques sont remplacées, dans les bâtiments existants, par des pompes à chaleur hybrides. Ce scénario aboutit à une diminution de la consommation d'électricité de 1,7 TWh et de la pointe de consommation électrique à une chance sur dix de 3,4 GW.

Le bilan total sur les émissions de gaz à effet de serre, présenté dans le chapitre 5, section 5.9, est légèrement supérieur à celui du scénario de la SNBC. Ceci traduit le fait que lors des périodes de froid, la chaîne de production d'électricité dans un cycle combiné au gaz (rendement autour de 50%, donc perdant une bonne partie de la chaleur produite) suivie par la consommation électrique d'une PAC (rendement de l'ordre de 200% dans les périodes de froid relatif) présente un rendement énergétique global finalement analogue au rendement énergétique global du chauffage au gaz.

6.8.1 Sur le plan des coûts de production d'électricité et de fourniture en gaz

Dans la variante sur les pompes à chaleur hybrides, les coûts de production d'électricité sont légèrement réduits de l'ordre de 100 M€/an (l'essentiel correspond à de la combustion de gaz évitée

dans les centrales thermiques) par rapport au scénario de référence, mais cette légère réduction est plus que compensée par l'accroissement des coûts associés à la consommation de gaz dans les pompes à chaleur hybrides lors qu'elles fonctionnent en mode «chaudière à gaz» (pour un montant du même ordre de grandeur). Ce mode de fonctionnement couvre en effet environ 30% du besoin thermique dans les logements équipés.

Des coûts de gestion spécifiques de la pointe électrique peuvent être pris en compte dans l'hypothèse où le parc de production ne serait pas développé au rythme des orientations de la PPE (développement de flexibilités supplémentaires). Dans une telle configuration, l'intérêt des PAC hybrides par rapport à la réduction serait renforcée, avec une économie supplémentaire de 100 M€/an, correspondant aux coûts évités de mobilisation des flexibilités qui seraient nécessaires au respect du critère de sécurité d'approvisionnement.

Les coûts évités pour le système électrique étant compensés par des surcoûts en gaz, l'essentiel de l'enjeu économique du développement des pompes à chaleur hybrides porte sur le différentiel de coût des installations, sur lesquels de fortes incertitudes existent.

6.8.2 Sur le plan des coûts des installations

L'installation d'une pompe à chaleur hybride peut en théorie présenter un coût inférieur à celle d'une pompe à chaleur air/eau tout électrique. En effet, le recours à une chaudière gaz en complément permet de sous-dimensionner la pompe à chaleur (par rapport à l'installation classique) et d'en tirer ainsi des économies sur son coût, même si une partie de ce gain est compensé par le coût de la chaudière au gaz.

³⁰. Comme précisé à la section 2.5.8, le comportement des PAC hybrides est ici modélisé par un couple de températures de bascule (bascule PAC seule/bi-mode et bascule bi-mode/chaudière seule) fixé respectivement à 5°C et 3°C.

Figure 6.11 Coûts complets annualisés du scénario de déploiement de 2,5 millions de pompes à chaleur hybrides, par rapport au scénario avec déploiement de pompes à chaleur tout électrique – avec hypothèse de référence sur les coûts des pompes à chaleur hybrides

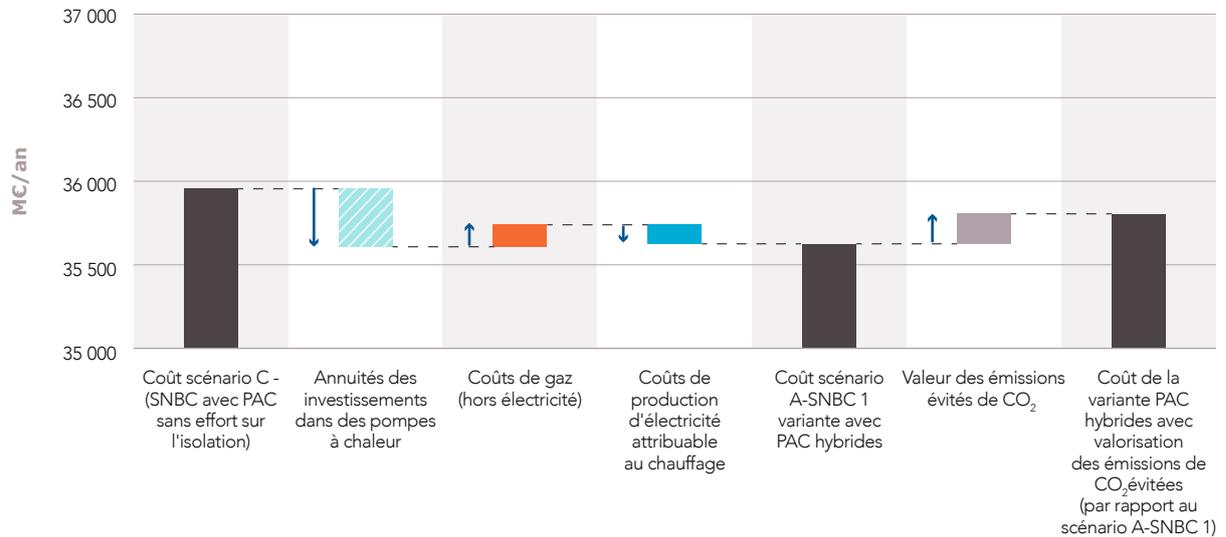
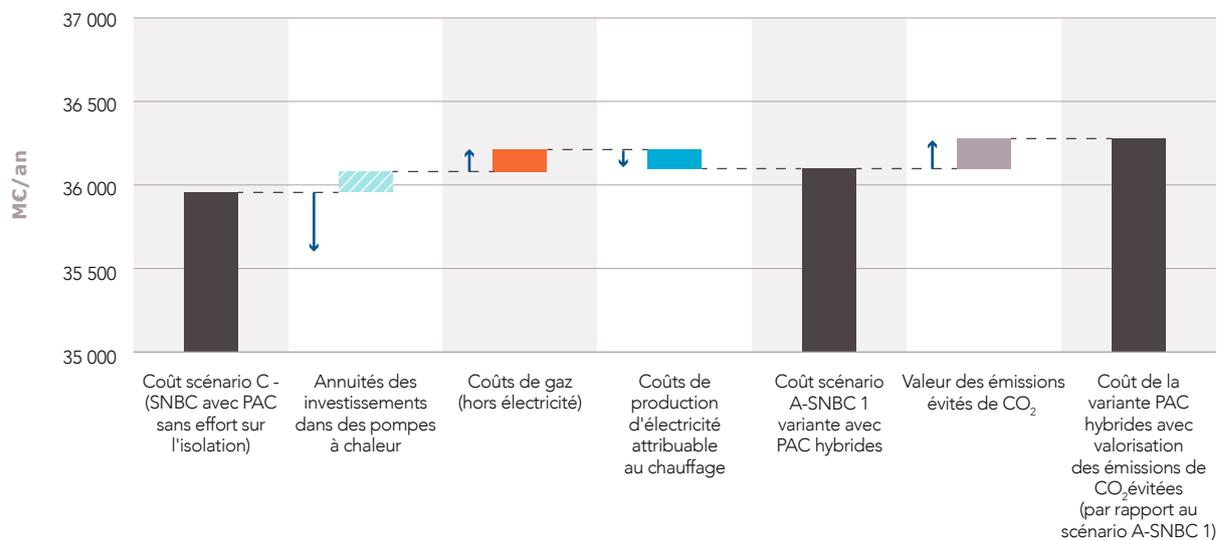


Figure 6.12 Coûts complets annualisés du scénario de déploiement de 2,5 millions de pompes à chaleur hybrides, par rapport au scénario avec déploiement de pompes à chaleur tout électrique – avec la variante sur les coûts des pompes à chaleur hybrides



Cette économie ne peut être obtenue qu'à condition que le dimensionnement de la pompe à chaleur soit effectivement réduit lorsque celle-ci est associée à une chaudière à gaz. En pratique, ce n'est pas toujours le cas dans les offres actuelles. Afin de refléter cette incertitude, dans un contexte où le développement de ces installations est confidentiel, deux variantes de coût sont considérées.

Les résultats reflètent ces incertitudes :

- ▶ dans l'hypothèse où les pompes à chaleur hybrides sont moins onéreuses de 3000 € par rapport à une pompe à chaleur air/eau tout électrique, le développement des pompes à chaleur hybrides apparaît intéressant avec un gain pour la collectivité de l'ordre de 150 M€/an (en intégrant la valeur des émissions de CO₂ supplémentaires).
- ▶ dans l'autre hypothèse, le développement des pompes à chaleur hybrides engendre un surcoût pour la collectivité de l'ordre de 300 M€/an.

Dans tous les cas, les hypothèses de coûts apparaissent assez proches.

Si les prix des pompes à chaleur s'avéraient effectivement inférieurs à celui des pompes à chaleur

air/eau tout électriques, l'installation de pompes à chaleur hybrides pourrait permettre de toucher un public contraint en matière de financement et d'investissement, qui n'aurait pas pu opter pour une pompe à chaleur air/eau tout électrique.

Des analyses supplémentaires seraient nécessaires pour établir le bilan économique précis de ce scénario du point de vue de la collectivité. Il existe en effet une grande hétérogénéité des situations possibles : la pompe à chaleur hybride semble pouvoir présenter un intérêt dans certaines situations (maison individuelle difficile à isoler, avec présence d'un approvisionnement gaz, permettant d'obtenir un véritable effet de sous-dimensionnement de la pompe à chaleur électrique en cas d'utilisation d'un modèle hybride) et pas dans d'autres (logements existants non raccordés au réseau gaz ou sans boucle d'eau chaude).

La compatibilité de ces installations avec les objectifs de neutralité carbone au-delà de l'horizon 2035 devra également être interrogée, en lien avec les éventuelles contraintes de gisement sur la production de « gaz vert ».



ABRÉVIATIONS

AFPAC	Association française pour la pompe à chaleur
ANAH	Agence Nationale de l'Habitat
BBC	Bâtiment basse consommation
CEP	Coefficient d'énergie primaire
COP	Coefficient de performance
DPE	Diagnostic de performance énergétique
ECS	Eau chaude sanitaire
FEDENE	Fédération des Services Energie Environnement
HCC	Haut Conseil pour le Climat
INSEE	Institut National de la Statistique et des Études Économiques
LTECV	Loi sur la transition énergétique pour une croissance verte
MTES	Ministère de la Transition Écologique et Solidaire
PAC	Pompe à chaleur
PACTE	Programmation d'action pour la qualité de la construction et la transition énergétique
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PIB	Produit intérieur brut
PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie
RCU	Réseau de chaleur urbain
SNBC	Stratégie nationale bas-carbone
SNCU	Syndicat National du Chauffage Urbain
TYNDP	Ten-year network development program



Le réseau
de transport
d'électricité

RTE
Immeuble WINDOW - 7C Place du Dôme,
92073 PARIS LA DEFENSE CEDEX
www.rte-france.com

