

Document de travail n° 83

Les enjeux économiques de la décarbonation de la France

*Une évaluation des investissements
nécessaires*

**Ce document de travail a été réalisé
par Michel DIDIER, Gilles KOLEDA, Raphaël TROTIGNON**

Rexecode

COMITÉ DE DIRECTION

Michel DIDIER, président
Denis FERRAND, directeur général
Emmanuel JESSUA, directeur des études
Charles-Henri COLOMBIER, directeur de la conjoncture
Raphaël TROTIGNON, responsable du pôle énergie-climat

CONJONCTURE ET PRÉVISIONS

Jean-Alain ANDRIVON : Etats-Unis, Royaume-Uni, Japon
Tél. 01 53 89 20 75 - jaandrivon@rexecode.fr
Charles-Henri COLOMBIER : Pétrole, Zone euro, Allemagne, Italie, économies émergentes
Tél. 01 53 89 20 77 - hcolombier@rexecode.fr
Denis FERRAND : France, Espagne, économies émergentes
Tél. 01 53 89 20 86 - dferrand@rexecode.fr

ETUDES ET MODÉLISATION

Emmanuel JESSUA : France, politique économique, études sectorielles, marché du travail
Tél. 01 53 89 20 87 - ejessua@rexecode.fr
Rhéda CHABA : politique économique, Tél. 01 53 82 20 89 - rchaba@rexecode.fr

POLE ENERGIE CLIMAT

Michel DIDIER : Partenaires, programme
Raphaël TROTIGNON : Etudes coûts efficacité
Tél. 01 53 89 20 76 - rtrotignon@rexecode.fr
Gilles KOLEDA : Modèles, enjeux macroéconomiques
Tél. 01 53 89 20 81 - gkoleda@rexecode.fr
Guillaume ALLART : Investissement industriel : 01 53 89 20 81- gallart@rexecode.fr

SYSTÈMES D'INFORMATION

Murielle PREVOST - directrice des systèmes d'information - Tél. 01 53 89 20 83 - mprevost@rexecode.fr

STATISTIQUES

Dominique DALLE-MOLLE - Tél. 01 53 89 20 95 - ddalle-molle@rexecode.fr

DOCUMENTATION - INFORMATIQUE - SITE WEB

Fabienne BESSON-LHOSTE - Tél. 01 53 89 20 92 - fbesson-lhoste@rexecode.fr
Sylvie FOUTRIER - Tél. 01 53 89 20 98 - sfoutrier@rexecode.fr
Dominique DALLE-MOLLE - Tél. 01 53 89 20 95 - ddalle-molle@rexecode.fr

ADMINISTRATION ET GESTION

Administration générale - Tél. 01 53 89 20 99
Régine GAYET : diffusion et relations adhérents, secrétariat et publications - Tél. 01 53 89 20 71 - rgayet@rexecode.fr
Françoise SAINT-LOUIS : secrétariat - Tél. 01 53 89 20 89 - fsaint-louis@rexecode.fr

CONSEIL D'ADMINISTRATION

Pierre GADONNEIX : Président ; Jacques-Henri DAVID : Président d'Honneur
Vice-président : Michel CICUREL ; Trésorier : Antoine GENDRY
Administrateurs : Christophe BEAUX, Olivier BOGILLOT, Olivier COSTA de BEAUREGARD, Pierre-André de CHALENDAR, Michel de ROSEN, Christian DARGNAT, Michel DIDIER, Christine FABRESSE, Xavier FONTANET, François JACKOW, Olivier KLEIN, Philippe LAMOUREUX, Patrick MARTIN, Hubert MONGON, Henri MOREL, Natacha VALLA, Christian NIBOUREL, Olivier SALLERON, Amaury de WARENGHIEN

Centre de Recherche pour l'Expansion de l'Economie et le Développement des Entreprises

Rexecode : association régie par la loi du 1^{er} juillet 1901 - Siret : 784 361 164 00030 - APE 9412Z
Siège social : 29 avenue Hoche - 75008 PARIS - Tél. (33) 01 53 89 20 89 - www.rexecode.fr - www.twitter.com/Rexecode

Les enjeux économiques de la décarbonation de la France

Résumé et principales conclusions	5
Introduction	9
1. Coût de la décarbonation : une problématique complexe	10
2. Stratégie Nationale Bas Carbone et perspectives d'émissions tendancielle	14
3. Les investissements supplémentaires nécessaires pour l'objectif zéro carbone	22
4. Investissements nécessaires, politiques climatiques et perspectives macroéconomiques : des interactions controversées . .	25
Conclusions	29
<i>Dossier</i> <i>Les investissements nécessaires dans les sept secteurs d'émissions . . .</i>	<i>31</i>

Les enjeux économiques de la décarbonation de la France

Les enjeux économiques de la décarbonation de la France

Résumé et principales conclusions

L'objectif de neutralité carbone en 2050 place la France devant la nécessité d'une transformation profonde. Il s'agit tout à la fois d'adapter notre système énergétique, de renouveler ou rénover nos parcs de bâtiments et de véhicules, de transformer nos infrastructures de mobilité et une grande partie du capital industriel. Des changements importants et nécessaires devraient être entrepris dès les années prochaines, toute accumulation supplémentaire de gaz à effet de serre dans l'atmosphère en augmente en effet le stock et présente un caractère largement irréversible.

Par rapport à son produit intérieur, la France est un des pays du monde dont les émissions sont les plus faibles, et ses émissions diminuent tendanciellemment. Mais la prolongation des tendances actuelles ne conduit pas aux objectifs. La baisse des émissions doit être accélérée.

Ce document de travail présente les perspectives « tendancielle » d'émissions estimées selon deux approches : une hypothèse haute et une hypothèse basse. Il évalue les investissements à réaliser, selon l'hypothèse d'émissions tendancielles retenue, pour parvenir aux objectifs de la neutralité carbone, en se concentrant sur le point de passage 2030. Il considère comme « investissements supplémentaires » les écarts entre les investissements calculés précédemment, et les investissements tendanciels des secteurs d'émissions, c'est-à-dire les suppléments d'investissement qui seraient à engager, toutes choses égales par ailleurs.

L'approche sectorielle consiste à prolonger directement la tendance passée des émissions par secteurs. L'agrégation des résultats sectoriels conduit à des prévisions d'émissions brutes (avant absorptions et captations) de 365 MtCO₂ en 2030 (262 MtCO₂ en 2050).

L'approche globale se fonde sur un modèle simple dérivé de l'équation de Kaya appliquée à la France, en combinant nos perspectives de croissance économique et les tendances d'évolution de deux ratios : l'intensité énergétique du PIB de la France, et l'intensité carbone de l'énergie consommée. Selon cette approche, les prévisions d'émissions tendancielles brutes (avant déduction des absorptions), (en tenant compte des actions engagées dans le plan de relance et le plan « France 2030 » mais hors actions supplémentaires), seraient de 349 millions de tonnes d'équivalent CO₂ en 2030 (elles étaient de 436 millions en 2019).

Dans les deux approches, les émissions projetées sont supérieures au point de passage de la SNBC pour 2030, qui est de 310 millions de tonnes de CO₂e. Il resterait donc à accélérer le découplage entre croissance et émissions par une réduction supplémentaire des émissions de CO₂e d'ici 2030 comprise entre 39 millions et 55 millions de tonnes de CO₂e. Pour 2050, l'écart augmenterait

fortement et serait compris entre 102 et 180 millions de tonnes, mais la zone d'incertitude s'élargit.

Le calcul des investissements nécessaires, puis des investissements supplémentaires, est établi à partir d'une représentation des changements « physiques » qui devraient avoir lieu dans chaque secteur pour provoquer une inflexion des tendances. Il en résulte que les « dépenses d'investissements supplémentaires » devraient être en 2030, comprises entre 2,1 % du PIB (hypothèse basse) et 2,9 % du PIB (hypothèse haute), soit entre 58 et 80 milliards d'euros.

En imputant l'effort d'investissement par secteurs d'émissions aux trois acteurs que sont les ménages, les entreprises et les administrations, il résulte que l'effort devrait être en 2030 de 37 milliards d'euros pour les ménages, de l'ordre de 43 milliards pour l'ensemble des entreprises. Cet effort serait à engager rapidement. Il représente pour les ménages une marche d'escalier (révision en hausse par rapport au flux courant) de 16 à 22 %. Pour les entreprises, l'effort serait de 9 à 12 %.

Il convient donc de s'interroger plus que jamais sur les actions volontaristes qui seraient nécessaires pour que le jeu naturel des acteurs aboutisse à l'accélération souhaitée du découplage, c'est-à-dire sur les instruments des politiques de décarbonation et sur les conséquences économiques éventuelles de ces actions.

Les mesures de réduction des émissions constituent à court terme un « choc d'offre négatif ». Elles impliquent qu'il faudra accepter, en contrepartie d'un effort accru d'investissement et d'un avantage écologique, une moindre consommation. En outre, quelles qu'elles soient, ces mesures poseront durablement à la hausse sur l'inflation. Ce sont là les enjeux économiques et les vrais coûts de la décarbonation.

Les politiques pour la neutralité carbone devraient reposer sur un large éventail d'instruments comportant à la fois des mesures générales et des mesures sectorielles. Elles devront trouver un équilibre entre la réglementation, des taxes spécifiques, le soutien aux investissements des ménages et des entreprises, et une prise en charge directe par l'Etat, mais elles devront aussi s'inscrire dans une politique macroéconomique soutenable financièrement et socialement.

La multiplicité des interactions est telle qu'aucun outil d'optimisation *a priori* de ces politiques n'est pas envisageable. La démarche devra être plutôt une démarche itérative et pragmatique tirant régulièrement des enseignements des actions mises en œuvre et apportant les corrections nécessaires. Par ailleurs, quelle que soit la combinaison d'instruments qui sera privilégiée par les pouvoirs publics, compte tenu du niveau de déficit structurel et de la situation actuelle très déséquilibrée des finances publiques, il est crucial que les coûts économiques comme les coûts budgétaires fassent régulièrement l'objet d'évaluations documentées en termes d'efficacité et de coûts de la tonne de carbone évitée. Ces deux orientations devraient être au centre de toute planification écologique.

La préservation de la compétitivité industrielle de la France, en recul depuis une vingtaine d'années, nécessitera des instruments de compensation pour les secteurs les plus touchés. Pour garantir un partage équitable de la charge entre les ménages, des mesures sociales de compensation sont nécessaires. Ces me-

sures devraient être ciblées et ne pas neutraliser les incitations à la sobriété énergétique.

En outre, compte tenu de l'effort de financement nécessaire et des limites imposées par l'endettement public, la situation invite à renforcer fortement l'orientation de l'épargne privée vers l'investissement. Rexecode rappelle à cet égard ses propositions de mesures fortes d'incitation pour orienter l'épargne moyenne vers l'investissement productif en limitant le risque au travers de fonds à capital garanti.

Il faut aussi avoir à l'esprit que les émissions françaises représentent 0,74 % des émissions mondiales, pourcentage qui diminue. L'effort de décarbonation de la France ne peut donc avoir un impact perceptible sur le changement climatique mondial que s'il s'intègre dans un ensemble d'actions internationales au premier rang desquelles une politique climatique européenne. Celle-ci devrait comprendre une taxation du carbone aux frontières de l'Europe, afin d'inciter la consommation intérieure à se porter sur des productions intérieures moins émettrices de carbone.

Enfin, le changement climatique étant un problème mondial, il conviendrait de prendre en compte non seulement la baisse des émissions françaises mais aussi la contribution des politiques françaises à la réduction des émissions mondiales. L'effort public déjà entrepris et à renforcer devrait donc être focalisé de façon significative sur les innovations énergétiques et industrielles susceptibles d'être exportées et utilisées dans d'autres pays, afin de faire de la France un pays leader en innovation des technologies climatiques.

Introduction

Ce document de travail s'inscrit dans le cadre des travaux du pôle Energie-Climat créé en 2020 à Rexecode. La démarche du pôle est d'intégrer les politiques climatiques et les politiques macroéconomiques, afin d'en assurer la meilleure cohérence.

Les premiers travaux du pôle ont consisté à associer à chacune de nos perspectives économiques traditionnelles des perspectives d'émissions de gaz à effet de serre. Ils ont montré qu'il pouvait s'avérer illusoire d'afficher en même temps des objectifs de croissance élevée et de neutralité carbone, sans expliciter clairement les moyens pour accélérer le découplage entre les deux. Ils ont ainsi fait apparaître un dilemme entre les objectifs climatiques et les objectifs de maîtrise de la dette publique, que nous avons nommé le dilemme des émissions¹. Le présent document de travail s'interroge sur les enjeux macroéconomiques de la décarbonation des émissions françaises de gaz à effet de serre.

Il comporte des évaluations des « investissements nécessaires » pour parvenir aux objectifs de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC). Il ouvre la discussion sur les interactions entre politiques climatiques et les perspectives macroéconomiques dans le contexte actuel, fortement perturbé par le retour de l'inflation et un déficit élevé des finances publiques.

La France est parmi les pays du monde les moins émetteurs de carbone et les émissions diminuent depuis plus de vingt ans. L'OCDE note cependant dans son étude annuelle sur la France que « la baisse de ses émissions est lente »² et que la prolongation des tendances actuelles ne suffirait pas pour atteindre l'objectif de neutralité carbone en 2050. La décarbonation de l'économie implique donc des décisions des pouvoirs publics afin de modifier les comportements des acteurs économiques.

Si les comportements des acteurs économiques conduisaient de façon naturelle d'ici 2050 à annuler les émissions nettes nulles de CO₂ (et de gaz à effet de serre équivalents), il n'y aurait pas de raison de parler de « coût économique » de la décarbonation. La question du coût économique se pose parce que des politiques plus ou moins contraignantes sont nécessaires pour infléchir les tendances, et que ces politiques sont susceptibles d'avoir un impact sur les perspectives économiques. Le coût (éventuel) de la décarbonation est l'impact de ces mesures sur les principales grandeurs économiques : PIB potentiel, emploi, pouvoir d'achat, inflation. Il dépend donc non seulement de l'ampleur des objectifs à atteindre mais aussi de la combinaison de mesures qui seraient mises en œuvre pour rechercher au travers d'une large gamme d'instruments de politique publique, dépenses publiques directes, taxes, incitations, normes, interdictions.

¹ Document de travail n° 78, Rexecode, *La soutenabilité de la dette publique ou le dilemme des émissions*, avril 2021.

² *Etudes économiques de l'OCDE : France*, Novembre 2021.

Ce document de travail s'interroge sur les objectifs des politiques de décarbonation. Il propose une première étape, dans une recherche qui sera permanente. Il évalue par deux approches différentes les dépenses supplémentaires d'investissements qui seraient nécessaires pour atteindre les objectifs. Ces investissements supplémentaires ne sont pas les coûts de la décarbonation car ils ne sont, pas plus que la croissance, décidés par décrets de la puissance publique. Ils relèvent, de décisions de ménages et d'entreprises, c'est-à-dire pour reprendre l'expression de Christian Gollier³, d'une « myriade d'intérêts individuels ». Ce sont toutefois des repères intermédiaires utiles.

En toutes hypothèses, il apparaît clairement que pour ramener les perspectives d'émissions à la trajectoire de la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC), il faudra que les acteurs économiques, entreprises, ménages, administrations, augmentent sensiblement leurs dépenses d'investissement.

Ce document de travail est une étape qui se propose d'évaluer les efforts à réaliser, mesures en termes d'investissements supplémentaires nécessaires. La section 1 s'interroge sur la notion de coût de la décarbonation et sur les objectifs à privilégier. La section 2 décrit la méthode d'estimation, selon deux approches, des perspectives tendancielle d'émissions et les objectifs de la Stratégie Nationale Bas Carbone. La section 3 propose des évaluations des investissements supplémentaires à envisager, au-delà de la prolongation des tendances actuelles, afin de parvenir à la neutralité carbone. La section 4 s'interroge sur les enjeux macroéconomiques. La conclusion résume les résultats et les orientations qui ressortent de nos analyses. Les calculs détaillés des investissements nécessaires par secteurs d'émissions sont présentés dans un dossier analytique en deuxième partie du document.

1. Coût de la décarbonation : une problématique complexe

L'intégration des politiques de décarbonation dans les perspectives macroéconomiques pose plusieurs questions. Certaines questions concernent les objectifs à privilégier, d'autres questions concernent les interactions entre les politiques climatiques, les objectifs macroéconomiques et les contraintes des finances publiques.

1.1. La décarbonation : coût ou bénéfice ?

Il est admis que la décarbonation entraînera des dépenses supplémentaires d'investissements pour les acteurs économiques. Mais peut-on vraiment parler d'un coût de la décarbonation dans la mesure où l'alternative, c'est-à-dire l'inaction climatique, aurait, selon toutes les études actuelles, un coût économique bien plus élevé que l'action de décarbonation.

³ Interview au magazine L'Opinion, le 17 janvier 2022.

Le coût de l'inaction climatique est le coût économique des dommages liés aux changements du climat du globe et à leurs conséquences, directes et indirectes, sur les systèmes naturels et humains. Les effets négatifs du dérèglement climatique touchent en effet la planète entière. Ils sont progressifs et étalés dans le temps, mais largement irréversibles. Le GIEC recense dans son dernier rapport⁴ 127 « principaux risques » qui auraient des conséquences néfastes potentiellement graves pour les humains.

Les estimations de ces coûts économiques varient en raison des méthodologies privilégiées et des hypothèses de hausse des températures acceptées. En dépit d'écarts importants entre les estimations, un consensus existe sur l'existence d'un « coût de l'inaction climatique » très élevé. Le rapport Stern⁵ [], estimait, en 2006 que, sur la base des modèles économiques de l'époque, les coûts du changement climatique seraient de l'ordre de 5 % du produit intérieur brut mondial, et pourraient même atteindre 20 %. Les coûts de l'action climatique pourraient en revanche selon ce rapport être limités à 1 % du PIB mondial. Dans une étude de 2015⁶, l'OCDE estimait qu'en l'absence de nouvelles actions pour s'attaquer au changement climatique, les effets négatifs seraient de 1 à 3,3 % sur le PIB en 2060, et augmenteraient jusqu'à 10 % en 2100. Les études les plus récentes essaient de tenir compte plus précisément des effets sur le système économique mondial. Notamment, l'étude du *Network for Greening the Financial System* (le Réseau des banques centrales et superviseurs pour le verdissement du système financier) donne selon les scénarios une estimation de baisse du PIB mondial de 2 à 5 % en 2050 et de 4 à 13 % en 2100 dans l'hypothèse de continuité des politiques actuelles⁷.

Il n'existe pas pour la France, à notre connaissance, de chiffrage exhaustif du coût des dommages qui résulteraient de l'inaction climatique. Certaines études sectorielles ou locales notamment de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC)⁸ apportent des éléments partiels. Les impacts directs pour la France seraient plus « faibles » que la moyenne mondiale mais néanmoins très significatifs. On peut donc légitimement considérer que, si la décarbonation implique des transformations, elle procurera plutôt un bénéfice économique. Cela justifie pleinement d'agir pour la décarbonation, et de le faire rapidement comme nous y invite le GIEC. Cela conduit à rechercher les politiques, c'est-à-dire les interventions publiques, les plus efficaces, et de prendre en compte l'ensemble de leurs conséquences économiques. Le présent document tente d'en apprécier l'ampleur.

⁴ *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability, Summary for Policymakers.*

⁵ *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, octobre 2006

⁶ *The Economic Consequences of Climate Change*, 2015.

⁷ *NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors* (2021)

⁸ *Changement climatique : Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, 2009.
Changement climatique : impacts en France, 2018.

1.2. Politiques de décarbonation : quels objectifs privilégier ?

Les politiques de décarbonation, et par conséquent leurs impacts économiques dépendent de l'objectif privilégié. **S'agit-il de concentrer l'effort sur la décarbonation des émissions françaises ou bien sur la décarbonation de l'empreinte carbone de la France**, voire, dans la mesure où l'enjeu est le niveau des émissions mondiales, de chercher la plus forte contribution possible de la France à la réduction mondiale des émissions de gaz à effet de serre ?

Les émissions de l'économie française sont les émissions qui résultent de l'activité sur le territoire français. L'empreinte carbone de la France évalue l'ensemble des émissions qui résultent de l'utilisation en France de biens et de services par des acteurs sur le territoire, quel que soit le lieu de production de ces biens et services. La différence principale tient aux importations (qui induisent des émissions ailleurs dans le monde) et aux exportations, qui résultent de décisions prises dans d'autres pays. Les émissions de carbone occasionnées par la production et l'acheminement des produits importés en France depuis l'étranger ne sont pas comptabilisées dans les émissions françaises. Elles contribuent en revanche à l'empreinte carbone de la France car elles résultent de décisions prises par des acteurs du territoire français. Inversement, le carbone émis lors de la production en France de biens par la suite exportés fait partie des émissions françaises mais doit être rattaché à l'empreinte carbone des pays vers lesquels ces biens sont exportés.

La France étant moins émettrice que la plupart de ses partenaires pour chaque euro de PIB, le gain en termes d'émissions pour le climat mondial est plus élevé si on privilégie l'objectif consistant à réduire l'empreinte plutôt que l'objectif de réduction des émissions du territoire. Il y a là un argument pour localiser plus de production de biens sur notre territoire plutôt que de les faire produire ailleurs et de les importer ensuite.

La différence entre les émissions et l'empreinte carbone est importante tant en niveau qu'en évolution. Pour l'année 2019, avant la forte récession due à la crise sanitaire, l'inventaire d'émissions réalisé par le CITEPA indiquait des émissions brutes de gaz à effet de serre de 436 MtCO₂e (captations des puits de carbone non déduites) et des émissions nettes de 405 MtCO₂ (captation des puits de carbone déduites)⁹. L'empreinte carbone était alors estimée à 663 millions de tonnes d'équivalent CO₂ d'après les calculs du service des données et études statistiques du Ministère de la transition écologique¹⁰. L'écart entre émissions et empreinte est donc important. Il s'explique en partie par la perte de compétitivité et notre déficit commercial.

Deux raisons conduisent à privilégier dans cette étude l'objectif en termes d'émissions du territoire plutôt que l'objectif en termes d'empreinte. La première raison tient aux larges incertitudes d'estimation de l'empreinte, comme l'a montré la récente révision, qui a conduit à réduire l'estimation de

⁹ Inventaire de gaz à effet de serre de la France, CITEPA, 2022.

¹⁰ L'empreinte carbone de la France entre 1995 et 2020, MTE, SDES, 2022.

l’empreinte carbone de 10 %. Les estimations de l’empreinte sont assez incertaines en raison des difficultés de mesure du contenu carbone des produits importés. La seconde raison est que la Stratégie Nationale Bas Carbone, sur laquelle reposent en partie nos estimations, se réfère elle-même aux émissions.

1.3. Les enjeux de la décarbonation : une approche en plusieurs étapes

Quelques rares travaux ont tenté d’évaluer le coût de la décarbonation : le second rapport Quinet (2019) [], la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC, 2020) [] et récemment pour l’Allemagne une étude réalisée par le *Boston Consulting Group* pour le BDI¹¹. Ces études raisonnent en termes d’investissements « supplémentaires » ou « additionnels » à engager pour cela. Le concept est flou et ne détermine pas un coût (un investissement n’est pas un coût). Malgré son caractère théorique, ce calcul est une étape utile intermédiaire du raisonnement. Mais il ne s’agit que d’une étape intermédiaire et théorique. Les investissements sont en effet réalisés pour l’essentiel par des acteurs privés, entreprises et ménages. Ce ne sont pas des « variables de commandes » de l’action publique. Il conviendrait donc pour être complet d’identifier et de formuler des scénarios d’actions des pouvoirs publics pour que ces investissements soient réalisables, et de mesurer l’impact de ces actions sur l’économie dans son ensemble. La difficulté évidente est de distinguer pour l’avenir ce qui tiendrait aux décisions spontanées et ce qui résulterait des contraintes imposées par l’action publique.

Ce document décrit les étapes suivantes :

- Il présente en premier lieu par deux approches ce que l’on peut considérer comme des perspectives « tendanciennes » d’émissions dans deux hypothèses correspondant à deux approches distinctes : une hypothèse haute et une hypothèse basse.
- Il évalue les investissements à réaliser, selon l’hypothèse d’émissions tendanciennes retenue, pour parvenir aux objectifs de la neutralité carbone des émissions françaises, en se concentrant sur le point de passage 2030.
- Il considère comme « investissements supplémentaires » les écarts entre les investissements calculés précédemment, et les investissements tendanciels des secteurs d’émissions, c’est-à-dire les suppléments d’investissement qui seraient à engager toutes choses égales par ailleurs.

¹¹ Etude BDI : *Climate Paths 2.0 : A Program for Climate and Germany’s Future Development*, octobre 2021.

2. Stratégie Nationale Bas Carbone et perspectives d'émissions tendanciennes

La présente section compare les perspectives d'émissions tendanciennes afin d'estimer les écarts à combler en termes d'émissions. Elle rappelle en premier lieu brièvement les objectifs de la SNBC. Elle propose ensuite deux approches des perspectives d'émissions tendanciennes. Elle compare enfin ces perspectives avec les objectifs de la SNBC au niveau des sept principaux secteurs d'émissions de gaz à effet de serre. Le détail des calculs par secteurs est présenté dans le dossier sectoriel en deuxième partie du document.

2.1. La Stratégie Nationale Bas Carbone

La Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) est la feuille de route de la France pour lutter contre le changement climatique. Elle a été introduite dans le Code de l'Environnement par la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV, publiée au Journal Officiel du 18 août 2015). Elle propose des orientations pour mettre en œuvre, globalement et dans plusieurs secteurs d'émissions, la transition vers une économie bas-carbone. Elle définit une trajectoire de réduction des émissions de gaz à effet de serre jusqu'à 2050, et fixe des objectifs à court-moyen terme, les « budgets carbone » par secteur d'émissions.

Adoptée pour la première fois en 2015, la SNBC a été révisée en 2018-2019, en visant d'atteindre la neutralité carbone en 2050, ambition rehaussée par rapport à la première SNBC qui visait le « facteur 4 », soit une réduction de 75 % des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 par rapport à 1990. La SNBC 2 et les budgets carbone associés ont été adoptés par décret le 21 avril 2020. Une nouvelle révision est en cours. Elle sera intégrée dans un paquet appelé la « Stratégie Française pour l'Énergie et le Climat » (SFEC). La SFEC constituera la feuille de route globale pour atteindre la neutralité carbone en 2050 et pour assurer l'adaptation de notre société aux impacts du changement climatique. Elle comportera quatre textes : la Loi de programmation énergie climat (LPEC), la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC 3), un Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC 3) et la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE 3, 2024-2033).

La neutralité carbone est définie par la loi énergie-climat comme « un équilibre, sur le territoire national, entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre ». En France, atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 implique une division par 6 des émissions de gaz à effet de serre sur son territoire par rapport à 1990, et des émissions résiduelles de gaz à effet de serre en 2050 d'environ 80 MtCO₂e, compensées par des captations équivalentes naturelles ou provoquées.

La SNBC s'appuie sur un scénario conduisant à la neutralité carbone à l'horizon 2050, appelé « scénario de référence ». Celui-ci, élaboré sur la base

des connaissances actuelles, définit un chemin de la transition vers cet objectif. A partir de cette trajectoire cible, la SNBC définit pour le territoire français des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour les quinze prochaines années : les « budgets carbone ». Ce sont des plafonds d'émissions à ne pas dépasser, exprimés en moyenne annuelle par période de 5 ans en millions de tonnes de CO₂ équivalent. Ils sont déclinés par secteurs d'activité et par gaz à effet de serre.

Pour cela, la SNBC formule un mélange d'orientations générales, d'objectifs intermédiaires (par exemple un nombre de logements à isoler, etc...), et d'éléments de politiques publiques concernant les acteurs, en particulier les décideurs publics. Compte tenu du nombre et de la complexité des interactions, elle ne formule pas un dispositif complet d'actions conduisant aux objectifs et les perspectives macroéconomiques qui leur seraient associées. Le tableau suivant présente les objectifs d'émissions pour les sept grands secteurs d'émissions en 2030, et en 2050.

Les objectifs d'émissions de gaz à effet de serre selon la SNBC
(en millions de tonnes de CO₂ équivalent)

	2019	Objectif 2030	Objectif 2050
Transports	136	98	0
Industrie (hors énergie)	84	53	27
Industrie de l'énergie	42	31	0
Agriculture	83	73	50
Bâtiments	75	46	0
Déchets	15	10	5
Usage des terres, changements d'affectation des terres et forêts (UTCATF)	-31	-41	-82
Total brut (UTCATF non déduites)	436	310	82
Total net (UTCATF déduites)	405	269	0

Source : CITEPA, SNBC

2.2. Les perspectives tendancielles

Pour estimer les « efforts supplémentaires » à réaliser, il est classique de se référer à des hypothèses tendanciennes souvent qualifiées de scénario de référence, ou scénario *baseline*. Dans un contexte économique et énergétique particulièrement évolutif, tracer une tendance ne peut pas aller sans incertitude. Deux approches ont été conduites, une approche sectorielle et une approche globale, déjà utilisée dans nos documents antérieurs¹².

¹² Document de travail n° 76, Rexecode, *Les émissions françaises de gaz à effet de serre d'ici 2030*, janvier 2021.

Sept grands secteurs d'émissions de CO₂ et équivalent

- **Le transport** est la première source d'émission du pays (31 % des émissions totales du territoire français) et représentait des émissions de 136 MtCO₂e en 2019. Il regroupe les émissions associées à la combustion de carburants fossiles pour le transport de passagers et de marchandises. Celles-ci proviennent pour moitié environ des véhicules particuliers, du transport de marchandises par la route (23 %), des véhicules utilitaires professionnels (15 %) et pour 6 % des transports ferroviaires, fluviaux, maritimes et aériens.
- **L'industrie manufacturière** est la seconde source d'émission du pays (19 % des émissions totales du territoire français). Elle représentait des émissions de 84 MtCO₂e en 2019. Elle regroupe les émissions associées à la combustion de sources d'énergie fossiles et les émissions de processus chimiques liés à certaines activités de production industrielle (chimie, métallurgie, minéraux et matériaux de construction...).
- **L'agriculture** est la troisième source d'émission du pays (19 % des émissions totales du territoire français) et représentait des émissions de 83 MtCO₂e en 2019, à peu près autant que l'industrie manufacturière. Ce secteur regroupe les émissions associées à l'élevage (pour la moitié du total environ), de l'usage d'engrais (20 %), des engins et chaudières (12 %), et des émissions des sols et d'autres activités (pâtures...).
- **La production d'énergie** est la quatrième source d'émission du pays (10 % des émissions totales du territoire français) et représentait des émissions de 42 MtCO₂e en 2019. Ce secteur regroupe les émissions associées à la combustion de sources fossiles pour la production d'électricité et de chaleur (57 % du total), et pour l'extraction, le raffinage et la distribution de carburants et combustibles (30 %).
- **Les bâtiments** sont la cinquième source d'émission du pays (17 % des émissions totales du territoire français) et représentaient des émissions de 75 MtCO₂e en 2019. Ce secteur regroupe les émissions associées à la combustion de sources d'énergie fossiles pour le chauffage et les autres usages énergétiques dans les bâtiments, pour deux tiers par les ménages (bâtiments résidentiels) et pour un tiers par les entreprises (bâtiments tertiaires).
- **Le traitement des déchets** est la sixième source d'émission du pays (4 % des émissions totales du territoire français), et représentait des émissions de 15 MtCO₂e en 2019. Il regroupe les émissions associées au stockage des déchets (83 % du total), l'incinération sans récupération d'énergie et les émissions liées au traitement des eaux usées.
- **L'utilisation des terres, les changements d'affectation des terres et la forêt** (souvent abrégé en UTCATF), regroupe à la fois des sources d'émissions (artificialisation de nouvelles zones, sols cultivés) et des captations d'émissions comptabilisées comme des émissions négatives (croissance des forêts et prairies). Au global, ce secteur est pour la France une source nette de captation de gaz à effet de serre d'environ 31 MtCO₂e en 2019. Il permet donc de diminuer les émissions brutes du territoire français d'environ 7 %.

a. Les perspectives sectorielles

Une première approche que l'on pourrait qualifier de *bottom-up*, consiste à prolonger les tendances passées pour des secteurs d'émissions de la SNBC.

Les émissions des différents secteurs ont connu des évolutions différentes depuis le début des années 1990. Si l'on met à part l'année 2020, exceptionnelle du point de vue des émissions en raison des contraintes liées à la crise sanitaire, de 1990 à 2019 les émissions de gaz à effet de serre de la France ont baissé de près de 108 MtCO₂e, soit de 20 %. La quasi-totalité (90 %) des réductions d'émissions de la France sur cette période ont été obtenues dans le secteur de l'industrie (pour deux tiers dans l'industrie manufacturière et un tiers dans les industries de l'énergie). Sur cette même période, les émissions de l'industrie manufacturière ont baissé de 41 % et celle des industries de l'énergie de 46 %. De faibles baisses ont été observées dans le secteur des bâtiments et dans l'agriculture. Les émissions du secteur des déchets ont augmenté puis décliné pour revenir à leur niveau de 1990. Dans le même temps les émissions du secteur du transport ont en revanche augmenté de 11 %.

La prolongation des tendances passées pour les différents secteurs conduit aux résultats suivants :

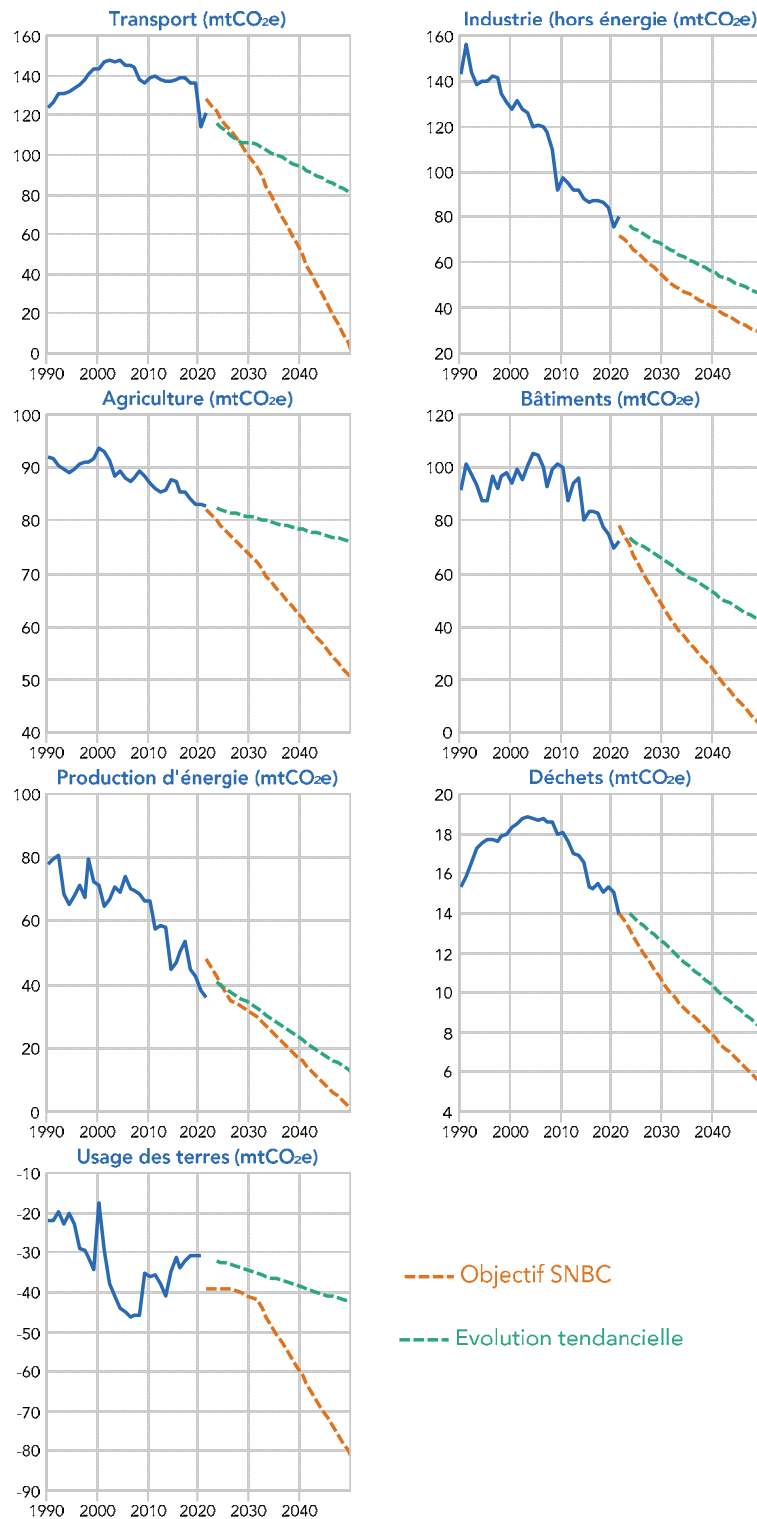
Les perspectives d'émissions tendancielle de gaz à effet de serre en 2030 et 2050 selon l'approche sectorielle (en millions de tonnes de CO₂ equivalent)

	2019	Tendanciel 2030	Tendanciel 2050
Transports	136	106	80
Industrie (hors énergie)	84	67	45
Industrie de l'énergie	42	33	12
Agriculture	83	81	76
Bâtiments	75	65	41
Déchets	15	12	8
UTCATF ¹	-31	-35	-43
Total brut (UTCATF non déduites)	436	365	262
Total net (UTCATF déduites)	405	330	220

¹ UTCATF : usage des terres, changements d'affectation des terres et forêt.

L'évolution tendancielle des émissions appréciées par secteurs conduirait à des émissions totales brutes (avant absorptions et captations) de 365 millions de tonnes de CO₂e en 2030, et de 262 millions de tonnes de CO₂e en 2050. On souligne que les incertitudes augmentent avec l'éloignement de l'horizon. Les émissions nettes, après déduction des captations et absorptions seraient de 330 MtCO₂e en 2030 et 220 millions de tonnes en 2050 (après 405 MtCO₂e en 2019).

Les tendances des émissions de la France par secteur entre 1990 et 2020, la prolongation linéaire de ces tendances jusqu'en 2050, comparée aux objectifs sectoriels de la SNBC

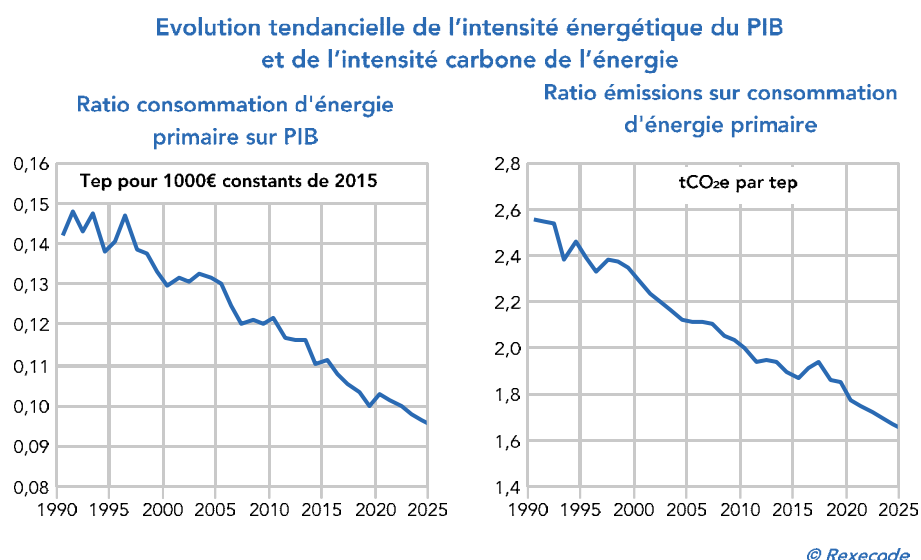


Source : Rexecode d'après CITEPA et Stratégie National Bas Carbone

© Rexecode

b. L'approche globale

L'approche globale se fonde sur un modèle simple dérivé de l'équation de Kaya¹³ appliquée à la France. Elle permet d'estimer les perspectives d'émissions de gaz à effet de serre de la France à partir de nos perspectives économiques et de la prolongation des tendances d'évolution de deux ratios : l'intensité énergétique du PIB de la France, et l'intensité carbone de l'énergie consommée. Ces tendances, qui reflètent de nombreux facteurs, montrent une baisse assez régulière des deux ratios, baisse que l'on prolonge sur la période future. Les tendances d'évolution des deux ratios, l'intensité énergétique du PIB et l'intensité carbone de l'énergie, sur les trente dernières années sont présentées sur les graphiques ci-après.



La projection future des émissions se fonde sur les perspectives de croissance du PIB retenues dans nos dernières perspectives (mars 2022). Elles retiennent pour les premières années de la décennie actuelle le retour progressif à une situation plus normale des conditions de l'offre après la période de crise sanitaire et les perturbations des approvisionnements, mais aussi la forte poussée des prix de l'énergie et de l'inflation globale, amorcée avant la guerre d'Ukraine, que celle-ci accentue encore, et qui ne se résorberait que progressivement. La croissance de 2023 serait à peine positive, avant de revenir vers le rythme de la croissance potentielle, que nous estimons un peu au-dessous de 1 % l'an au-delà de 2024.

¹³ Développée par l'économiste japonais Yoichi Kaya en 1993 dans son ouvrage *Environnement, Energy, and Economy : strategies for sustainability*, l'équation du même nom se définit comme le produit des ratios suivants : $CO_2 = population \times (PIB/population) \times (énergie/PIB) \times (CO_2/énergie)$, soit en inversant les termes le contenu en CO_2 du PIB est égal au produit de l'intensité énergétique du PIB, le PIB en milliards par l'intensité carbone de l'énergie utilisée. L'énergie est exprimée en tonnes d'équivalent pétrole, les émissions en tonnes de CO_2 ou équivalent.

Les hypothèses économiques retenues pour l'estimation macroéconomique des émissions

	2020	2021	2022	2023	2024/2030
Taux de croissance du PIB	-8,0	7,0	2,9	0,4	0,9
Hausse des prix à la consommation	0,4	1,7	4,1	2,3	2,2

Source : Perspectives Rexecode

En croisant la prolongation des tendances historiques des ratios et les perspectives de croissance économique, on obtient une trajectoire des émissions de gaz à effet de serre « tendancielle » pour la France. Les émissions tendancielles, brutes (avant déduction des absorptions), en tenant compte des actions engagées dans le plan de relance et le plan « France 2030 » mais hors actions supplémentaires, seraient de 349 millions de tonnes d'équivalent CO₂ en 2030. Ce chiffre est légèrement supérieur aux prévisions de notre document de travail d'octobre 2021¹⁴. Le calcul prolongé jusqu'en 2050 conduit à 184 MtCO₂e. Il va de soi que la précision des estimations diminue fortement avec l'éloignement de l'horizon. La perspective pour 2030 est relativement fiable. La perspective pour 2050 est en revanche une indication entachée d'une large incertitude.

c. Une zone d'incertitude pour les perspectives « tendancielles »

Les résultats obtenus diffèrent sensiblement entre les deux approches, reflètent l'incertitude des estimations.

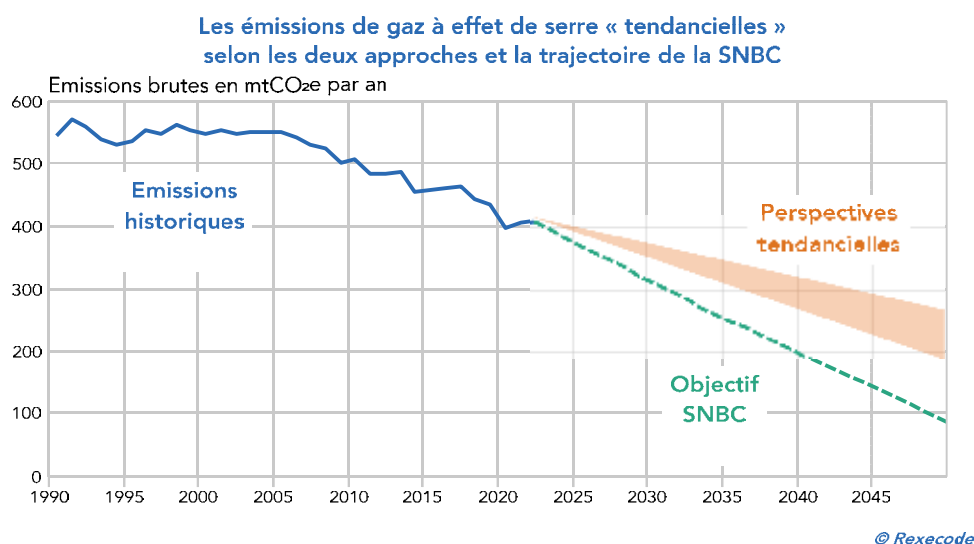
Le niveau obtenu par l'approche globale est inférieur à l'agrégation des émissions obtenues par l'approche sectorielle. Plusieurs explications peuvent être invoquées. Dans l'approche globale, nous nous fondons sur le scénario économique des perspectives de Rexecode étendu jusqu'en 2050. Le taux de croissance du PIB à partir de 2024 est de 0,9 % par an. L'approche sectorielle poursuit les tendances passées des émissions sur la période 1990-2019. Ces tendances s'inscrivaient avec un arrière-plan macroéconomique différent (taux de croissance du PIB de 1,6 % par an en moyenne entre 1990 et 2019). La plus forte croissance économique a eu alors pour conséquence des tendances d'émissions plus élevées. La poursuite dans le futur des tendances d'émissions sectorielles passées alors que la croissance serait plus faible peut aboutir à sur-évaluer dans l'approche sectorielle les émissions futures.

Une autre différence pourrait tenir à un effet de structure. Les différents secteurs d'émissions ont en effet des dynamiques différentes aboutissant à faire évoluer sensiblement leurs poids dans le total des émissions. C'est ce que l'on a effectivement observé de 1990 à 2019. Ainsi par exemple, le poids du secteur des transports dans les émissions brutes totales a-t-il augmenté de 23 % à 31 % entre 1990 et 2019.

¹⁴ Document de travail n° 80, Rexecode, *Perspectives économiques et budgétaires 2022*, octobre 2021.

Ce genre de calculs ne peut donner que des ordres de grandeur. Ils ne prennent pas en compte les avancées techniques futures éventuelles, qui restent floues et qui diminueront le coût des investissements futurs, ni les obstacles techniques aux changements, ni les obstacles économiques, notamment la contrainte budgétaire pour les ménages comme pour les entreprises, ou bien la main d'œuvre disponible pour réaliser les investissements. Il s'agit donc de calculs théoriques à partir d'hypothèses sur les trajectoires de décarbonation.

En conclusion, nous retenons que les perspectives d'émissions tendancielle seraient intermédiaires entre une hypothèse haute, qui correspond à l'approche sectorielle, et une hypothèse basse qui correspond plutôt à l'approche globale. **Pour l'année 2030**, pour laquelle les perspectives résultant des deux approches s'écartent encore peu, **l'approche sectorielle conduit à des perspectives d'émissions brutes (avant déductions des absorptions) de 365 millions de tonnes de CO₂e**, **l'approche globale à des émissions brutes de 349 millions de CO₂e**. Dans les deux approches, les émissions projetées sont supérieures au point de passage de la SNBC pour 2030, qui est de 310 millions de tonnes de CO₂e. Il resterait donc à accélérer le découplage entre croissance et émissions par une **réduction supplémentaire des émissions de CO₂e d'ici 2030 comprise entre 39 millions et 55 millions de tonnes de CO₂e**. Pour 2050, l'écart augmenterait fortement et serait compris entre 102 et 180 millions de tonnes, mais la zone d'incertitude s'élargit.



Les niveaux des investissements nécessaires présentés dans la suite de ce document pour ramener les perspectives tendancielle vers les objectifs dépendent de l'écart à résorber entre les émissions tendancielle et les objectifs à atteindre. Ils dépendent par conséquent de l'hypothèse d'émissions privilégiée.

3. Les investissements supplémentaires nécessaires pour l'objectif zéro carbone

Les investissements « supplémentaires » à envisager représentent l'écart entre 1. les prévisions d'investissements retenues dans nos perspectives macroéconomiques (hors mesures nouvelles) et 2. les dépenses d'investissements totales nécessaires pour ramener les trajectoires d'émissions vers l'objectif de la SNBC.

3.1. Le calcul des investissements supplémentaires

Dans l'approche sectorielle, le calcul des investissements nécessaires, puis des investissements supplémentaires, est établi à partir d'une représentation des changements « physiques » qui devraient avoir lieu dans chaque secteur pour provoquer une inflexion des tendances. Pour chaque secteur d'émission, il est procédé en quatre étapes :

- **L'étape 1 décrit pour chaque secteur les principaux déterminants des émissions d'équivalent CO₂.** Par exemple, pour le secteur du bâtiment, il s'agit des surfaces des bâtiments par classes de consommation énergétique et des types de chaudières installées ; pour le secteur du transport, du nombre de véhicules en circulation caractérisés par leur âge, leur classe d'émission, et leur parcours annuel moyen ; pour le secteur énergétique des centrales électriques ou de production de chaleur installées par type de technologie, et de la demande d'électricité et de chaleur.
- **L'étape 2 retrace pour chaque secteur les évolutions passées** des déterminants des émissions sur longue période, et les projette tendanciellement jusqu'en 2050. Ceci permet d'obtenir des trajectoires d'évolution des déterminants des émissions, et donc une trajectoire tendancielle d'évolution des émissions. Pour chaque trajectoire, on en déduit les dépenses associées à ces évolutions, sur la base d'hypothèses de coût. Par exemple, pour le secteur du bâtiment, il s'agit de travaux d'isolation des logements et de choix technologiques lors du remplacement des chaudières (choix de la source d'énergie) ; pour le secteur du transport il s'agit du nombre et du type de véhicules achetés ; pour le secteur énergétique il s'agit de l'évolution de capacités installées par technologie (investissement dans de nouvelles centrales nucléaires, développement des énergies renouvelables etc).
- **L'étape 3 mesure pour chaque secteur les inflexions nécessaires** de chacun de ces déterminants afin de ramener la trajectoire d'émissions résultante à l'objectif 2050. Il s'agit de représenter les changements dans les décisions d'investissement qui permettent d'obtenir une modification « physique » des déterminants des émissions. Parfois la SNBC ne donne pas le détail des changements visés, parfois elle stipule assez précisément des objectifs « physiques » intermédiaires (nombre de rénovation par an, nombre de véhicule dans le parc...). Nous en tenons compte afin de représenter au mieux les trajectoires décrites dans la SNBC. Par exemple, pour le secteur du bâtiment, il s'agit de travaux d'isolation des logements plus importants

et plus nombreux, et d'orientation technologiques différentes lors du remplacement des chaudières ; pour le secteur du transport il s'agit de choix différents en nombre et en qualité de véhicules (plus de véhicules électriques par catégories, moins de véhicules thermiques...) ; pour le secteur énergétique il s'agit d'une évolution différente du mix de production (plus de nucléaire, accélération des renouvelables, développement du thermique décarboné).

- **La quatrième étape consiste à rapprocher les investissements estimés à l'étape 2 et ceux estimés à l'étape 3**, et à en déduire par différence les « dépenses supplémentaires » associées au passage de la trajectoire tendancielle à la trajectoire compatible avec la SNBC. Ces dépenses supplémentaires expriment soit un accroissement nécessaire des volumes de dépenses, soit le plus souvent une augmentation de coût, par exemple l'accroissement de prix des voitures entre véhicules thermiques et véhicules électriques.

Le tableau sectoriel est présenté dans le dossier sectoriel en deuxième partie du document de travail. Il donne les résultats de ces calculs pour chaque secteur. En agrégeant les investissements supplémentaires par secteur, il ressort que le total des dépenses supplémentaires, à engager dès les prochaines années, devrait être porté à 80 milliards d'euros avant 2030, puis à 100 milliards d'euros (en euros constants) en 2040, et stabilisé ensuite, progressivement compensé par les économies courantes induites par les investissements antérieurs.

Selon les estimations des tendances passées des émissions sectorielles, les « dépenses d'investissements supplémentaires » nécessaires seraient en 2030, comprises entre 2,1 % du PIB (hypothèse basse) et 2,9 % du PIB (hypothèse haute).

Ces chiffres sont à rapprocher du niveau de la formation brute de capital fixe en France, celle-ci est actuellement au total de l'ordre de 600 milliards d'euros. **L'effort d'investissement supplémentaire, à engager dès les prochaines années, devrait donc être une « marche d'escalier », c'est-à-dire un supplément d'investissement, pour l'ensemble des agents économiques, entreprises, ménages et administrations, compris entre 58 et 80 milliards d'euros, soit 2,1 et 2,9 % du PIB en 2030.**

3.2. La répartition entre ménages et entreprises

Il convient aussi de s'interroger sur la répartition de l'effort à réaliser entre les agents économiques. En imputant l'effort d'investissement par secteurs d'émissions aux trois acteurs que sont les ménages, les entreprises et les administrations, il résulte que l'effort devrait être en 2030 de 37 milliards d'euros pour les ménages, de l'ordre de 43 milliards pour l'ensemble des entreprises et des administrations. Cet effort serait à engager rapidement. Il représente pour les ménages une marche d'escalier (révision en hausse par

rapport au flux courant) de 16 à 22 %. Pour les entreprises, l'effort serait de 9 à 12 %.

En début de période, un peu plus de la moitié de l'effort relèverait des ménages (isolation, chauffage, changement de véhicules), et un peu moins des entreprises et l'administration. La répartition s'inverserait avant 2030, près des deux tiers revenant alors aux entreprises.

3.3. Comparaison des résultats avec d'autres évaluations

Pour la France, peu d'évaluations ont été tentées à ce jour. Une évaluation, très peu documentée, a été présentée dans le document de la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC ; tableau de la page 60 et note de bas de page n° 46) [], et une évaluation citée dans le Rapport Quinet (2019) [] « *La valeur de l'action pour le climat* » (Chapitre 3, page 119, résultats de la simulation du modèle Times).

Sur un champ comparable, à périmètre équivalent, nos estimations hautes sont assez comparables à celles de la SNBC jusque dans les années 2030, puis inférieures sur la période 2030-2050.

Dans le Rapport Quinet, le « surplus d'investissement » identifié dans l'ensemble du système énergétique, mesuré en points de PIB, est sensiblement plus faible que les estimations basses du présent document.

Comparaison des investissements supplémentaires nécessaires dans le rapport Quinet et dans le présent document

En % du PIB	2030	2050
Rapport Quinet (simulation du modèle Times)	1,2	2,3
Rexecode (approche globale)	2,1	1,7

On peut aussi tenter de comparer les résultats précédents avec ceux d'une étude menée par le *Boston Consulting Group* (BCG), pour le BDI allemand [], visant à la neutralité carbone de l'Allemagne en 2045. On rappelle que l'Allemagne part actuellement d'un niveau d'émissions de gaz à effet de serre plus important que la France, en niveau mais aussi en points de PIB. Le PIB allemand est supérieur à celui de la France de 44 %, mais les émissions de gaz à effet de serre allemandes sont supérieures de 86 % aux émissions françaises. Ainsi pour une même production nationale de 1 000 de PIB, l'économie allemande est 30 % plus carbonée que la France. Le contenu en émissions de gaz à effet de serre de la France est de 175 kilos d'équivalent carbone pour 1 000 euros de PIB, et de 227 kilos pour l'Allemagne, soit 30 % plus élevé.

Données de cadrage sur l'Allemagne et la France

	PIB 2021 (en milliards d'euros)	Emissions GES 2019 (en millions de tonnes CO ₂ équivalent)	Emissions/PIB (en kilogrammes pour 1 000 euros de PIB)
Allemagne	3 567	810	227
France	2 483	435	175
Ecart Allemagne France (en %)	+44 %	+86 %	+30 %

Les comparaisons s'avèrent délicates car les périodes ne sont pas les mêmes. Sur un périmètre équivalent, les investissements supplémentaires pour l'Allemagne représenteraient, selon l'étude du BDI, 2,3 % du PIB allemand en 2030. Les ordres de grandeur jusqu'en 2030 sont relativement proches entre les deux pays.

Les investissements supplémentaires ne portent pas dans les mêmes proportions sur chaque secteur en France et en Allemagne. En Allemagne, les investissements devraient être massifs dans le domaine de l'énergie alors que les investissements dans le domaine de l'électricité seront plus tardifs, plutôt après 2030 en France en raison des délais de réalisation, notamment de nouvelles centrales nucléaires. La France doit faire de son côté rapidement un effort plus important, dans les bâtiments notamment, car l'effort ciblé sur les passoires thermiques porte sur la décennie 2020-2030, ce qui double les montants d'investissement par rapport à la période postérieure à 2030, pour laquelle les montants seraient comparables entre la France et l'Allemagne.

4. Investissements nécessaires, politiques climatiques et perspectives macroéconomiques : des interactions controversées

Les interactions entre les politiques climatiques et les perspectives macroéconomiques font l'objet de débats. S'il commence à être reconnu que les politiques climatiques ne peuvent pas faire abstraction des réalités macroéconomiques, l'impact des politiques climatiques sur la croissance est loin de faire l'unanimité.

Dans un document de mars 2022, l'Ademe [] rend compte du travail de prospective *Transition(s) 2050 - Choisir maintenant - Agir pour le climat*, travail qui a mobilisé plus d'une centaine d'experts et de partenaires. Ce travail comprend quatorze feuillets dont un sur les effets macroéconomiques des politiques climatiques. Cinq scénarios sont envisagés, un scénario dit « tendanciel » de référence, et quatre scénarios qui aboutissent tous selon l'étude à la neutralité carbone, en empruntant des voies différentes. Un scénario S1 illustre la voie d'une frugalité marquée (s'apparentant à la décroissance), un scénario S2, qualifié de « coopérations territoriales », un scénario S3 privilège-

giant les technologies vertes, un scénario S4 qualifié de « pari réparateur » qui exclut toute sobriété et compte sur le progrès technique pour « réparer les impacts de l'activité économique ».

La traduction de ces scénarios dans le modèle *ThreeMe* (modèle macroéconomique multisectoriel d'évaluation des politiques énergétiques et environnementales) conduit à des résultats qui interrogent. Si dans le scénario de la « décroissance », le PIB est stationnaire d'ici 2030, dans les trois autres scénarios, la croissance est pratiquement identique, proche de 1,5 % par an en moyenne sur les trente prochaines années. Les investissements seraient un peu plus élevés que dans le scénario de référence en début de période mais plus faibles au-delà de 2030, particulièrement les investissements des ménages. Dans ces mêmes scénarios, le revenu disponible réel par habitant augmenterait plus que le PIB. Aucun coût de décarbonation n'est mentionné et la notion d'investissements supplémentaires apparaît peu dans ces travaux, qui misent sur d'autres facteurs.

Dans un article récent¹⁵, Patrick Artus évoque pour le monde deux versions de la décroissance « Pour respecter les engagements climatiques internationaux (neutralité carbone nette en 2050 dans la plupart des pays), on peut envisager deux versions de la décroissance : réduire le PIB mondial pour réduire les émissions de CO₂, parce qu'on ne réussit pas à améliorer plus vite l'efficacité énergétique ou à décarboner plus vite la production d'énergie ; réduire la consommation pour qu'il y ait davantage d'épargne, pour pouvoir financer le supplément d'investissements qui permet de réaliser la transition énergétique sans réduire la croissance du PIB (investissements dans la production d'énergies renouvelables, dans la décarbonation de l'industrie, dans la rénovation thermique des bâtiments). Il y a alors décroissance de la consommation, mais pas du PIB ». Dans la première version, le coût de la décarbonation serait la baisse du revenu global, dans la seconde version, ce coût porterait sur la consommation des ménages.

Pour ce qui nous concerne largement, nous rejoignons pour le long terme ces analyses. L'hypothèse que nous retenons à titre principal, qui est prise en compte dans l'approche globale des prévisions d'émission, est que les perspectives de croissance à long terme sont relativement indépendantes des politiques climatiques. On rappelle qu'à long terme, selon les modèles très schématiques de la croissance (modèle de Solow), les perspectives de croissance potentielle résultent de deux facteurs : la démographie (qui détermine la quantité de travail), et la productivité (qui résulte des progrès de la technologie, au sens large). C'est donc, selon ce modèle théorique, au travers de son incidence sur la productivité que l'impact des politiques sur la croissance potentielle pourrait se manifester. Si les politiques climatiques influençaient les perspectives de croissance, il nous semble que c'est, au moins pendant un temps, plutôt dans le sens d'une influence modératrice sur la rentabilité, les gains de productivité et le taux de croissance, qu'il faudrait pencher.

¹⁵ Natixis, *Flash Economie* n° 18, 7 janvier 2022.

En revanche, à court moyen terme, les perspectives économiques particulièrement sur les prochaines années, seront fortement influencées par les prix de l'énergie, les mesures climatiques, et la politique des finances publiques. Or la période actuelle est fortement perturbée par la hausse du prix de l'énergie et un certain retour de l'inflation. Dans un article publié par le *Peterson Institute for International Economics*, dont la version française est accessible sur *Le Grand Continent* [], Jean Pisani-Ferry souligne « qu'un effort important pour remplacer le stock de capital existant aura également un impact sur le bien-être .../... à court terme, son effet du premier ordre sur la consommation sera négatif ». Sauf à envisager un accroissement du PIB, très hypothétique, l'investissement supplémentaire se substituera en partie à de la consommation.

Dans un discours récent [], Isabel Schnabel, membre du directoire de la Banque Centrale Européenne, souligne de son côté la menace que la transition climatique fait peser durablement sur l'inflation : « nous sommes confrontés à une nouvelle ère d'inflation énergétique avec trois chocs distincts mais interdépendants qui devraient entraîner une période prolongée de pression à la hausse sur l'inflation ». Le premier choc est l'augmentation du coût économique des phénomènes météorologiques extrêmes. Le deuxième choc est la hausse durable des prix des énergies fossiles, pétrole et gaz, en partie voulue (prix des droits à émettre, retrait des investisseurs institutionnels), surtout subie, en raison de la capacité des producteurs à limiter l'offre, exacerbée actuellement par l'embargo. Enfin, un troisième choc, car de nombreuses entreprises adaptent leur processus de production afin de réduire les émissions de carbone. Mais la plupart des technologies vertes nécessitent des quantités importantes de métaux tels que le cuivre, le lithium, le cobalt. La demande augmente fortement alors que l'offre ne pourra s'adapter que lentement.

En conclusion, **quelles qu'en soient les formes concrètes, les politiques destinées à accélérer la transition climatique et à réduire les émissions de carbone auront à court moyen terme des impacts économiques significatifs.**

Dans l'article déjà cité ci-dessus, Jean Pisani Ferry estime que l'économie est exposée à un choc d'offre négatif qui pourrait être comparable aux chocs pétroliers des années soixante-dix. On rappelle que le résultat macroéconomique avait été à l'époque une forte récession des pays de l'OCDE, une période durable de faible croissance et de forte inflation, qualifié à l'époque de stagflation.

Il convient donc de s'interroger plus que jamais sur les actions volontaristes qui seraient nécessaires pour que le jeu naturel des acteurs aboutisse à l'accélération souhaitée du découplage, c'est-à-dire sur les instruments des politiques de décarbonation et sur les conséquences économiques éventuelles de ces actions. Les débats montrent à quel point il est important d'intégrer les politiques climatiques et les politiques macroéconomiques. Comme tout « choc d'offre négatif », elles pèseront plutôt au moins dans un premier

temps sur la croissance. Dans l'hypothèse optimiste où l'impact sur la croissance resterait faible, il faudra accepter, en contrepartie d'un effort accru d'investissement, une moindre consommation. En outre, quelles qu'elles soient, ces mesures pousseront durablement les prix à la hausse. Ce sont là les enjeux économiques et les vrais coûts de la décarbonation.

Faute d'outils suffisamment élaborés pour articuler un programme complet, deux recommandations se dégagent de ce constat. La première est la **nécessité de développer en France les études coûts-efficacité** permettant de choisir les actions qui présentent le meilleur rapport entre le coût et le résultat, en terme de quantité de CO₂ évitée (coûts de la tonne évitée). La seconde est d'**organiser une approche pragmatique et itérative en tirant régulièrement les conséquences des actions passées afin de les adapter et de les corriger**. Ces deux conditions pourraient constituer les bases de la « planification écologique » envisagée.

Conclusions

L'objectif de neutralité carbone en 2050 place la France devant la nécessité d'une transformation profonde. Il s'agit tout à la fois d'adapter notre système énergétique, de renouveler ou rénover nos parcs de bâtiments et de véhicules, de transformer nos infrastructures de mobilité et une grande partie du capital industriel.

Pour atteindre les objectifs fixés par la Stratégie Nationale Bas Carbone, la France devra éliminer en grande partie les investissements dans les technologies fossiles et réduire les usages de ces énergies. Ces changements importants et nécessaires devraient être entrepris dès les années prochaines, toute accumulation supplémentaire de gaz à effet de serre dans l'atmosphère en augmente le stock et présente un caractère largement irréversible.

Par rapport à son produit intérieur, la France est un des pays du monde dont les émissions sont les moins carbonées, et ses émissions diminuent tendanciellement. Mais la prolongation des tendances actuelles ne conduit pas à l'objectif zéro carbone en 2050. Le rythme doit en être accéléré.

L'évaluation des écarts d'émissions à résorber et des investissements nécessaires pour les résorber est certes incertain et les effets macroéconomiques possibles controversés. Il est clair cependant que **des dépenses supplémentaires d'investissement des ménages et des entreprises seront nécessaires.**

Les ménages sont principalement concernés par les coûts d'isolation des logements et les surcoûts d'adaptation du parc de véhicules automobiles. En termes d'investissements supplémentaires nécessaires, les coûts pour les ménages représenteraient une marche d'escalier en hausse de 17 à 24 %. On rappelle que la tendance moyenne des dernières décennies était une augmentation de 1 % par an.

Les entreprises sont concernées par l'obsolescence accélérée du capital productif, la nécessité de mettre en œuvre de nouveaux process de production plus économes en énergie carbonée, de renouveler les véhicules de transport et d'adapter leurs bâtiments. **Les dépenses supplémentaires d'investissements représentent pour les entreprises un accroissement de leurs investissements actuels de 10 à 13 %**, s'ajoutant aux investissements courants. On rappelle que les investissements des entreprises ont augmenté au cours des trente dernières années en moyenne, un peu moins de 2,5 % par an.

Les politiques pour la neutralité carbone devraient reposer sur **un large éventail d'instruments comportant à la fois des mesures générales et des mesures sectorielles.** Elles devront trouver un équilibre entre la réglementation, des taxes spécifiques, le soutien aux investissements des ménages et des entreprises, et une prise en charge directe par l'Etat, mais elles devront aussi s'inscrire dans une politique macroéconomique soutenable financièrement et socialement.

La multiplicité des interactions est telle qu'**aucun outil d'optimisation a priori de ces politiques n'existe**. La démarche devra être plutôt une démarche itérative et pragmatique tirant régulièrement des enseignements des actions mises en œuvre et apportant les corrections nécessaires. Par ailleurs, quelle que soit la combinaison d'instruments qui sera privilégiée par les pouvoirs publics, compte tenu du niveau de déficit structurel et de la situation actuelle très déséquilibrée des finances publiques, il est crucial que les coûts économiques comme les coûts budgétaires fassent régulièrement l'objet d'évaluations documentées en termes d'efficacité et de coûts de la tonne de carbone évitée. **Ces deux orientations devraient être au centre de toute planification écologique.**

La préservation de la compétitivité industrielle de la France, en recul depuis une vingtaine d'années, nécessitera des instruments de compensation pour les secteurs les plus touchés. Pour garantir un partage équitable de la charge entre les ménages, des mesures sociales de compensation sont nécessaires. Ces mesures devraient être ciblées et ne pas neutraliser les incitations à la sobriété énergétique.

En outre, compte tenu de l'effort de financement nécessaire et des limites imposées par l'endettement public, la situation invite à **renforcer fortement l'orientation de l'épargne privée vers l'investissement**. Rexecode rappelle à cet égard ses propositions de mesures fortes d'incitation pour **orienter l'épargne moyenne vers l'investissement productif en limitant le risque** au travers de fonds à capital garanti.

Il faut aussi avoir à l'esprit que les émissions françaises représentent 0,74 % des émissions mondiales, pourcentage qui diminue. L'effort de décarbonation de la France ne peut donc avoir un impact perceptible sur le changement climatique mondial que s'il s'intègre dans un ensemble d'actions internationales au premier rang desquelles une politique climatique européenne. Celle-ci devrait comprendre **une taxation du carbone aux frontières de l'Europe**, afin d'inciter la consommation intérieure à se porter sur des productions intérieures moins émettrices de carbone.

Enfin, le changement climatique étant un problème mondial, il conviendrait de prendre en compte non seulement la baisse des émissions françaises mais aussi la contribution des politiques françaises à la réduction des émissions mondiales. L'effort public déjà entrepris et à renforcer devrait donc être focalisé de façon significative sur les innovations énergétiques et industrielles susceptibles d'être exportées et utilisées dans d'autres pays, afin de **faire de la France un pays leader en innovation des technologies climatiques**.

Dossier

Les investissements nécessaires dans les sept secteurs d'émissions

Cette deuxième partie du document présente les hypothèses et le calcul des investissements nécessaires dans chacun des sept secteurs d'émissions de la France. Le calcul des investissements supplémentaires est établi à partir d'une représentation des changements « physiques » qui devraient avoir lieu dans chaque secteur pour provoquer une inflexion des tendances.

La méthode est commune. Pour chaque secteur d'émission, il est procédé en quatre étapes :

- L'étape 1 décrit pour chaque secteur les principaux paramètres déterminants les émissions d'équivalent CO₂.
- L'étape 2 retrace pour chaque secteur les évolutions passées de ces paramètres déterminants des émissions sur longue période, et les projette tendanciellement jusqu'en 2050. Ceci permet d'obtenir des trajectoires d'évolution tendancielle des émissions. Pour chaque trajectoire, on en déduit les dépenses d'investissement associées à ces évolutions, sur la base d'hypothèses de coût.
- L'étape 3 mesure pour chaque secteur les inflexions nécessaires de chacun de ces déterminants afin de ramener la trajectoire d'émissions résultante à l'objectif 2050. Il s'agit de représenter les changements dans les décisions d'investissement qui permettent d'obtenir une modification « physique » des déterminants des émissions suffisantes pour atteindre les objectifs fixés.
- L'étape 4 consiste à rapprocher les investissements estimés à l'étape 2 et ceux estimés à l'étape 3, et à en déduire par différence les « dépenses supplémentaires » associées au passage de la trajectoire tendancielle à la trajectoire compatible avec la SNBC. Ces dépenses supplémentaires expriment soit un accroissement nécessaire des volumes de dépenses, soit le plus souvent une augmentation de coût.

Tableau de synthèse des résultats : investissements supplémentaires annuels moyens et cumulés sur les périodes 2023-2030 et 2023-2050

	Moyennes annuelles		Montants cumulés	
	2023-2030	2023-2050	2023-2030	2023-2050
Transport	11,8	31,5	94,6	880,9
Bâtiment	41,7	34,1	333,9	956,1
Industrie	2,7	4,9	21,7	137,8
Agriculture	0,3	0,8	2,4	23,2
Energie	8,8	11,9	70,7	332,4
Déchets	0,9	1,7	7,2	46,3
Usage des terres	0,6	1,8	5,1	51,4
Total général	67,0	86,7	535,7	2428,1
Total (% du PIB)	2,5	2,9	2,5	2,9
Ménages	34,1	34,5	272,7	964,9
Entreprises et administrations (solde)	32,9	52,3	262,9	1463,2
Total	67,0	86,7	535,7	2428,1

Tableau de synthèse des résultats : points de passage annuels des investissements supplémentaires, en milliards d'euros

	2023	2024	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Transport	5,9	7,4	8,9	19,2	43,2	42,5	41,7	41,0
Bâtiment	40,9	41,1	41,4	42,6	29,7	31,0	32,2	33,5
Industrie	1,8	2,0	2,3	3,7	4,6	5,6	6,7	7,9
Agriculture	0,1	0,2	0,2	0,5	0,7	1,0	1,3	1,6
Energie	7,3	6,8	8,5	11,9	13,7	15,9	14,1	9,6
Déchets	0,6	0,7	0,8	1,2	1,5	1,9	2,3	2,6
Usage des terres	0,7	0,7	0,6	0,7	1,4	2,2	3,1	3,9
Total général	57,3	58,9	62,7	79,6	95,0	100,1	101,4	100,1
Total (% du PIB)	2,2	2,2	2,4	2,9	3,3	3,3	3,2	3,0
Ménages	32,5	32,8	33,2	36,8	37,5	37,0	36,1	34,8
Entreprises et administrations (solde)	24,8	26,2	29,5	42,8	57,4	63,1	65,3	65,3
Total	57,3	58,9	62,7	79,6	95,0	100,1	101,4	100,1

Le document présente ci-après les analyses sectorielles en suivant le plan suivant :

1. Bâtiments

1.1 Bâtiments résidentiels

1.2 Bâtiments tertiaires

2. Transport routier

2.1. Véhicules particuliers

2.2. Véhicules professionnels et transport de marchandises

3. Production d'énergie

3.1 Production d'électricité

3.2 Production de chaleur renouvelable

4. Décarbonation de l'industrie

5. Secteur agricole

6. Traitement des déchets

7. Usage des terres, changement d'affectation des terres et forêts

1. Bâtiments

1.1. Bâtiments résidentiels

On construit une représentation du parc de bâtiments existants (surfaces en m²), de ses caractéristiques d'efficacité thermique (exprimée en kWhp par m²), et on en déduit ses consommations énergétiques en volume, par usage et par source d'énergie, à partir des données du Ministère de la Transition Ecologique (SDES) et du CEREN, et donc les émissions de GES associées.

On établit dans une première étape une trajectoire « tendancielle » de l'évolution du parc de bâtiments, de ses caractéristiques thermiques et des consommations énergétiques et émissions associées. On établit ensuite une simulation des opérations de rénovation énergétique et d'évolution des matériels de chauffage qu'il faut mettre en œuvre pour aligner la trajectoire simulée avec la trajectoire-cible d'émission fixée par la SNBC. On se base sur une représentation schématique des différentes opérations (travaux d'isolation et changement de chaudières), de leur coût et des effets qu'on peut en attendre en termes de baisse de consommation ou de baisse de contenu carbone de l'énergie consommée dans les publications de l'ADEME pour le secteur résidentiel. On en déduit les flux d'investissements nécessaires au cours du temps, et les trajectoires d'émissions qui en résultent.

Scénario d'évolution tendancielle du parc de bâtiments résidentiels

Nous nous basons sur la description du parc de logement au 1^{er} janvier 2018 donnée par le ministère de la transition écologique dans le document *La parc de logement par classe de consommation énergétique*, Observatoire de la rénovation énergétique, septembre 2020. Le tableau de l'annexe 1 donne notamment la répartition des logements par classe énergétique, en nombre, par classe de surface et par année de construction. Ces informations permettent de reconstituer une image de l'évolution du parc depuis 1990.

Pour rappel les classes énergétiques correspondent aux consommations d'énergie primaire rapportées à la surface des logements, exprimée en kWh primaire par m² (les consommations d'électricité sont converties en équivalent énergie primaire en utilisant un facteur réglementaire de conversion). Pour mémoire ces classes et les consommations associées sont :

A = <50 kWhp/m²

B = entre 50 et 90 kWhp/m²

C = entre 90 et 150 kWhp/m²

D = entre 150 et 230 kWhp/m²

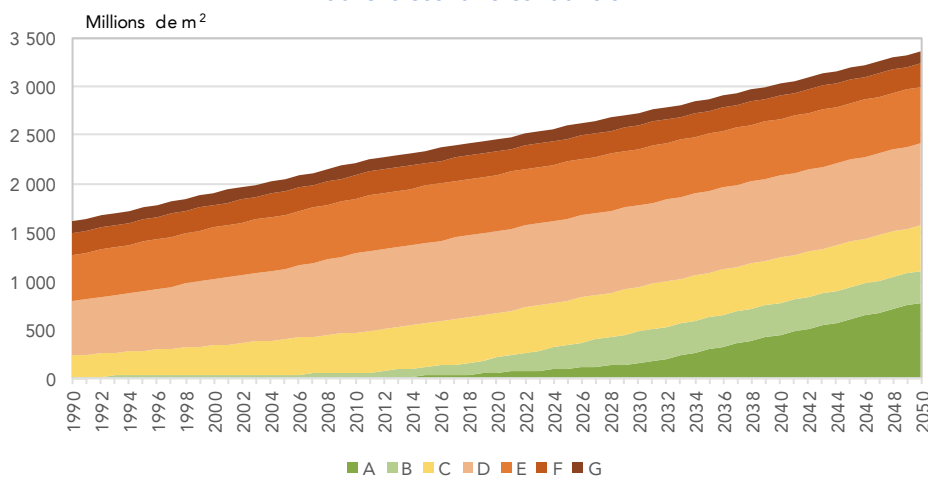
E = entre 230 et 330 kWhp/m²

F = entre 330 et 450 kWhp/m²

G = > 450 kWhp/m²

Pour établir l'évolution tendancielle du parc jusqu'en 2050, on suppose une évolution globale du parc sur son rythme de long terme, c'est-à-dire une augmentation de 1 % par an des surfaces. On simule également les tendances d'évolution des parts relatives de chaque classe énergétique, afin de tenir compte de l'amélioration tendancielle de l'efficacité énergétique du parc du fait de réalisation de travaux de rénovation énergétique sur le parc existant (basés sur les estimations données dans le Rapport d'information de la Commission Développement durable et aménagement durable de l'Assemblée Nationale¹⁶). On suppose aussi que les nouveaux bâtiments construits qui entrent dans le parc chaque année sont de classe énergétique A ou B jusqu'en 2030 puis uniquement de classe A à partir de 2030. On obtient alors l'évolution du parc représentée ci-dessous, en m² et en proportion des classes énergétiques.

Parc résidentiel reconstitué et simulé jusqu'en 2050 dans le scénario tendanciel

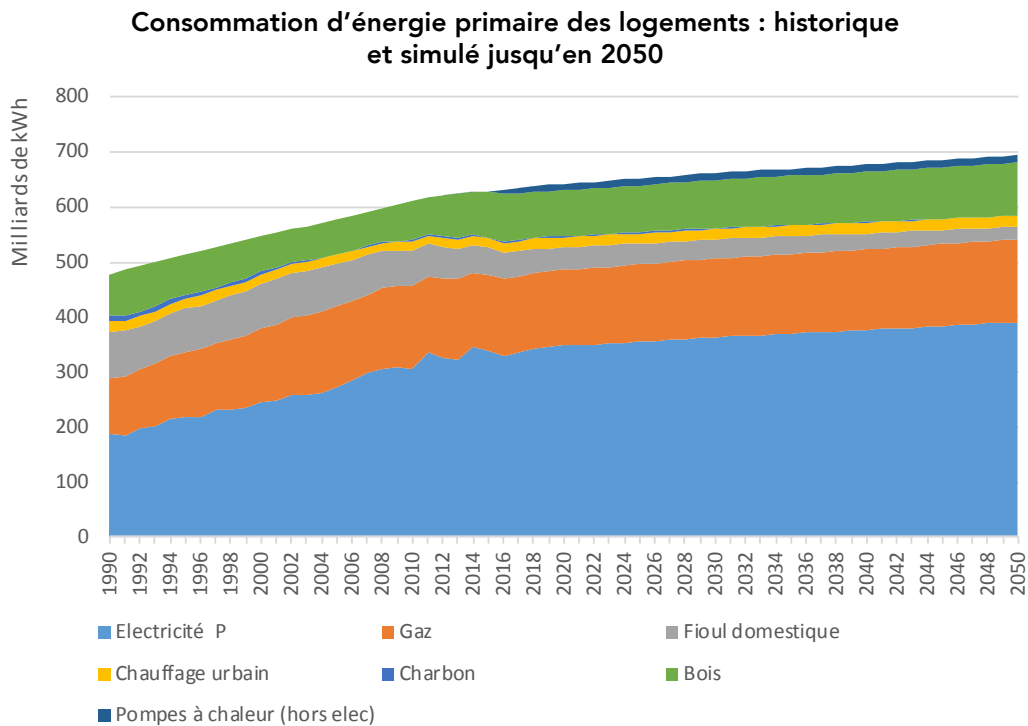
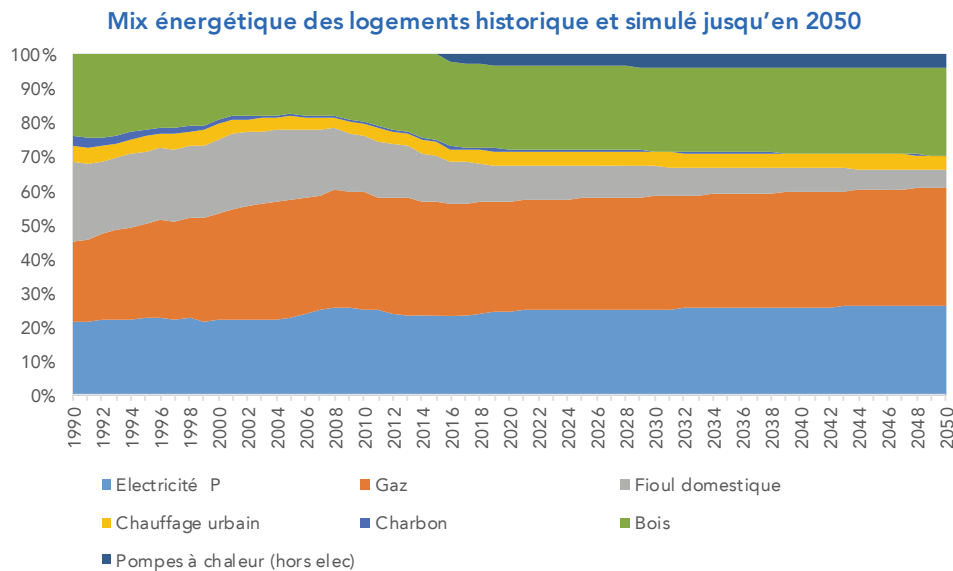


En multipliant les surfaces par les niveaux d'émissions donnés par les classes énergétiques, on en déduit les consommations énergétiques primaires des logements. On utilise ensuite les données du ministère de la transition écologique¹⁷ sur les consommations énergétiques des logements par usage et par combustibles pour en déduire les quantités de fioul, de gaz et d'électricité consommées. En prolongeant de façon tendancielle la part de chaque

¹⁶ https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/cion-dvp/l15b3871_rapport-information.pdf

¹⁷ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/consommation-denergie-par-usage-du-residentiel>

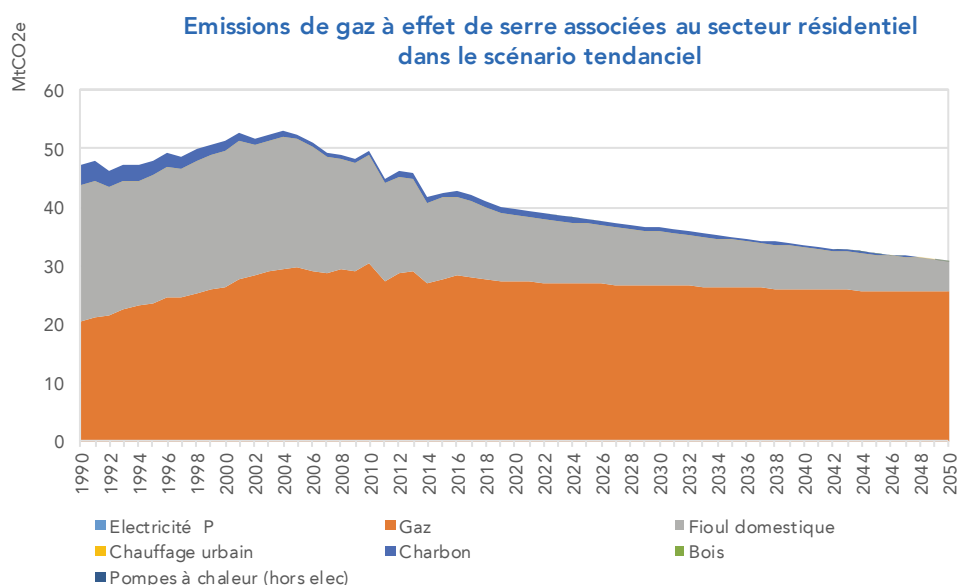
énergie dans le mix énergétique des logements, on peut alors projeter ces consommations jusqu'en 2050.



On peut enfin en déduire les émissions de gaz à effet de serre associées en utilisant les facteurs d'émissions des différentes énergies, c'est-à-dire la quan-

tivité de gaz à effet de serre émise par la combustion d'une quantité égale d'1 kWh d'énergie primaire (valeurs données par le bilan GES de l'Ademe).

On obtient la tendance d'émissions ci-dessous.



Scénario compatible avec la trajectoire de décarbonation de la SNBC

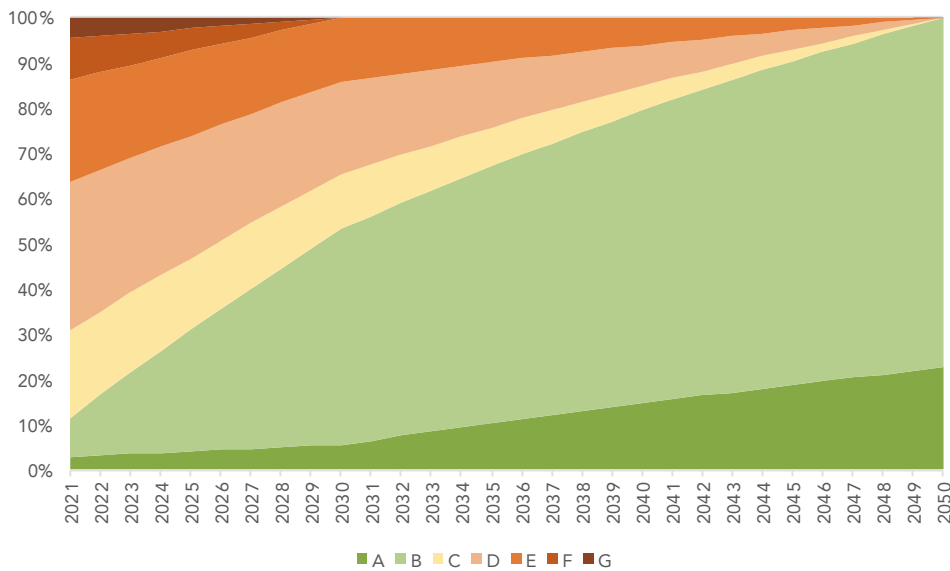
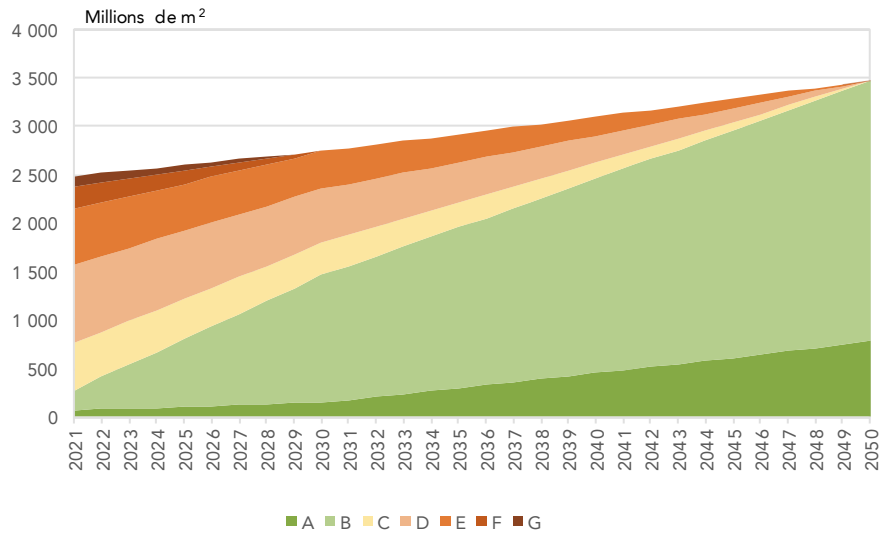
Nous procédons ici de manière équivalente, sauf que nous faisons évoluer plus rapidement la répartition des logements par classe énergétique (par des opérations de rénovation thermique des logements) et l'évolution du mix énergétique des logements (par des renouvellements de chaudières portant sur des technologies faiblement carbonées ou totalement décarbonées).

On simule des opérations de rénovation énergétique des logements permettant, conformément aux objectifs de la SNBC :

- D'éliminer totalement les « passoires thermiques » (classées F et G) d'ici 2030
- De basculer le reste des logements du parc en classe B ou A d'ici 2050

En procédant linéairement dans le cadre des contraintes citées ci-dessus, on obtient une évolution des surfaces par classe donnée ci-dessous.

Parc résidentiel simulé jusqu'en 2050 dans le scénario SNBC



On obtient une représentation du nombre de logements concerné chaque année par des rénovations et les sauts de classe équivalents.

A ces « sauts de classe » correspondent des économies d'énergie par m². Nous supposons ici qu'il n'y a pas d'effet rebond (pas d'augmentation des consommations énergétiques qui serait induite par le gain d'efficacité ther-

mique du logement). On croise alors ces « sauts de classe » avec les montants nécessaires à investir pour mettre en œuvre les travaux. On utilise pour cela des ordres de grandeur, indiqués ci-dessous, qui sont tirés des observations de l'Ademe dans son rapport *rénovation énergétique des logements : étude de prix*, novembre 2019, ainsi que des chiffres donnés dans des études de terrain¹⁸, et les valeurs moyennes citées dans le Rapport d'information de la Commission Développement durable et aménagement durable de l'Assemblée Nationale¹⁹.

Investissements et économies d'énergie associés aux sauts de classe entraînés par les travaux de rénovation thermique

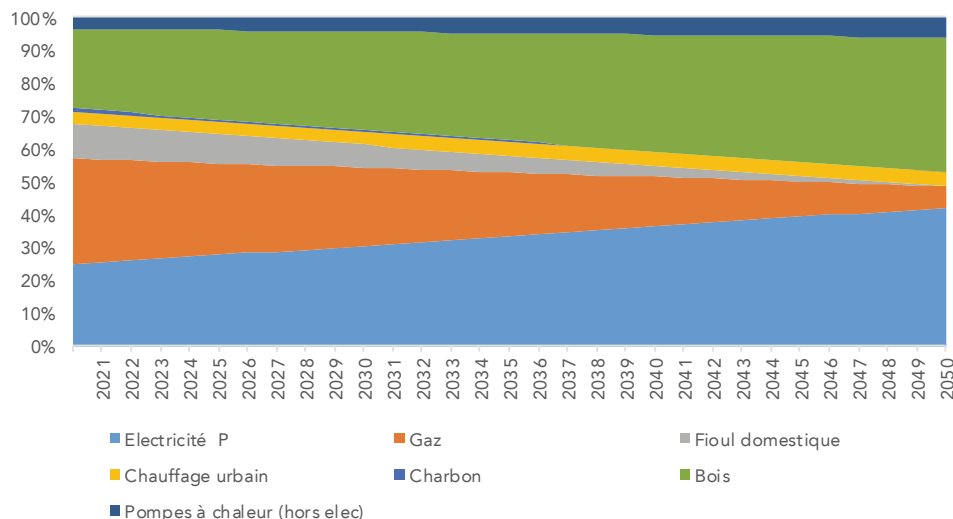
Classe de départ	Classe d'arrivée	Cout de la rénovation en €/m ²	Economie d'énergie associée en kWhp/m ²
C	B	250	60
D	B	300	140
E	B	350	240
F	B	400	360
G	B	450	410

Ces évolutions des structures des bâtiments sont complétées par une évolution des systèmes de chauffage (chaudières). Nous faisons évoluer le mix énergétique des logements afin d'éliminer le charbon, le fioul et une grande partie du gaz pour le remplacer par de l'électricité, de la biomasse et des pompes à chaleur.

¹⁸ Etude CEREMA/EDF Enseignements opérationnels des programmes « Je rénove BBC » en Alsace, juin 2017, et « Etude sur le programme Hauts-de-France Pass Renovation », juillet 2020

¹⁹ https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/cion-dvp/l15b3871_rapport-information.pdf

Evolution du mix énergétique des logements dans le scénario SNBC



En fonction des quantités d'énergie et des logements concernés, on peut convertir ces évolutions de mix énergétique en opération de renouvellement de chaudières, puis en investissement en calculant des baisses et des hausses de coût en fonction des paires qui sont substituées (pour un achat de chaudière au bois plutôt qu'au gaz, le surcoût est quasi nul ; pour un achat d'une pompe à chaleur air-eau plutôt qu'une chaudière au fioul, le surcoût sera plutôt élevé ; le passage du fioul au gaz sera au contraire avantageux).

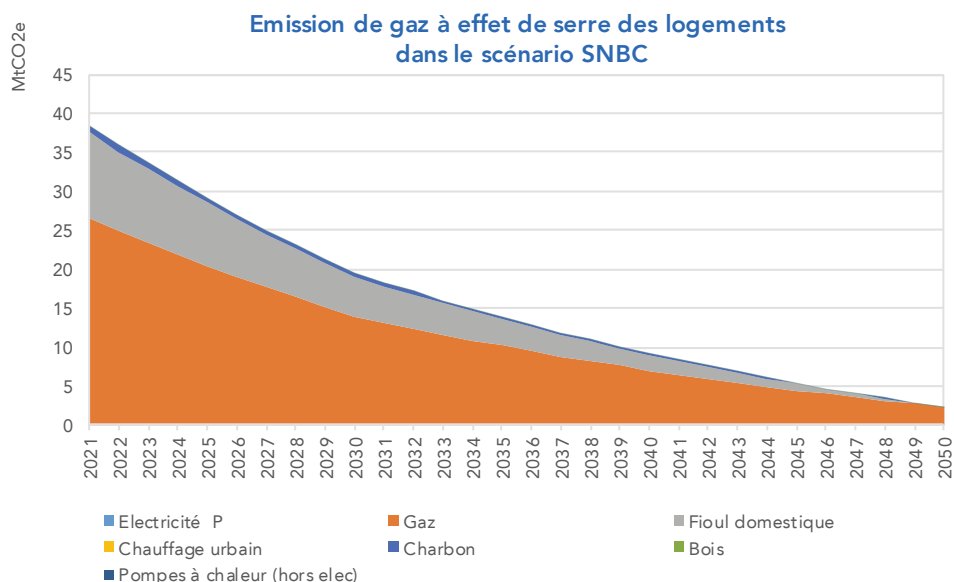
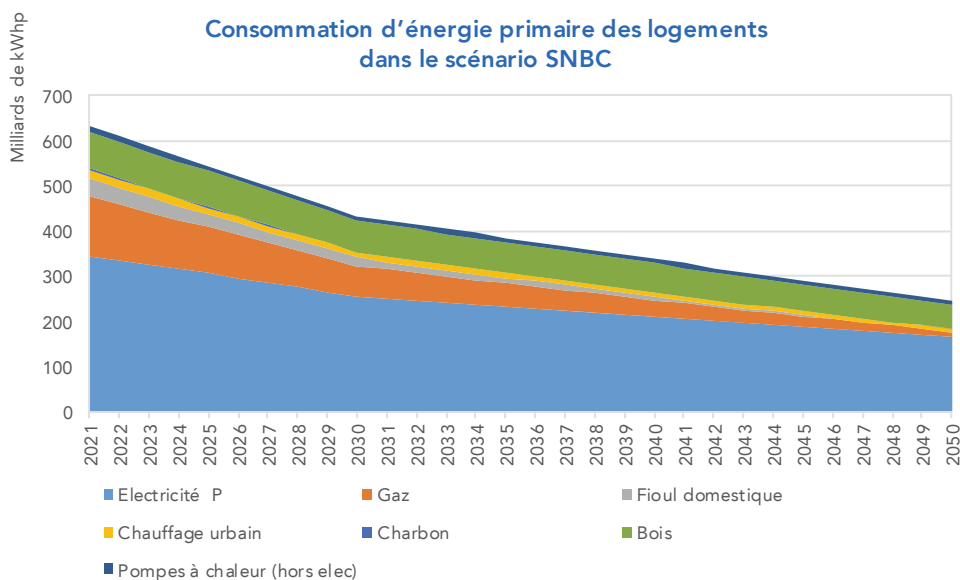
Evaluation des investissements dans le changement de chaudière dans l'étude de l'Ademe¹

	Nombre de donnée	Fourchette très basse (C5) (en euros)	Fourchette basse (C25) (en euros)	Médiane (en euros)	Fourchette haute (C75) (en euros)	Fourchette très haute (C95) (en euros)
Bois	421	2 557	3 772	5 041	6 677	15 085
Gaz	237	2 789	3 880	5 286	6 822	9 544
Fioul	40	5 573	6 912	8 345	9 120	12 570
Air-eau	48	6 419	9 797	12 668	14 846	20 939
Air-air	11	3 321	4 699	6 629	11 283	14 474
Poêle	355	2 532	3 685	4 771	5 856	7 812
Insert	22	2 520	3 770	4 438	5 046	9 082

¹ <https://www.precarite-energie.org/wp-content/uploads/2019/11/renovation-energetique-logements-etude-prix-2019.pdf>

Tableau 11 : fourchettes de prix pour le changement d'appareil de chauffage

Une fois ces opérations implémentées, on obtient une chronique de consommation énergétique des logements, et donc des émissions de gaz à effet de serre associées.



Investissements supplémentaires dans le scénario SNBC par rapport au scénario tendanciel

Le tableau ci-dessous donne les investissements supplémentaires associés au scénario SNBC par rapport au scénario tendanciel présenté au début de ce document.

**Investissements annuels supplémentaires dans le scénario SNBC
par rapport au scénario tendanciel**

	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Rénovation thermique	30,6	30,7	31,2	17,3	17,6	17,9	18,2
Appareils de chauffage	0,6	0,6	0,4	0,5	0,4	0,2	0,1
Total	31,1	31,3	31,6	17,7	17,9	18,1	18,1

1.2. Bâtiments tertiaires

On construit une représentation du parc de bâtiments existants (surfaces en m²), de ses consommations énergétiques en volume, par source d'énergie, à partir des données du CEREN, et on en déduit donc les émissions de GES associées.

On établit dans une première étape une trajectoire « tendancielle » de l'évolution du parc de bâtiments, de ses caractéristiques thermiques et des consommations énergétiques et émissions associées.

On établit ensuite une simulation des opérations de rénovation énergétique et d'évolution des matériels de chauffage qu'il faut mettre en œuvre pour aligner la trajectoire simulée avec la trajectoire-cible d'émission fixée par la SNBC. On trouve une représentation schématique des différentes opérations (travaux d'isolation et changement de chaudières), de leur coût et des effets qu'on peut en attendre en termes de baisse de consommation ou de baisse de contenu carbone de l'énergie consommée dans les publications du CEREN et du CGDD.

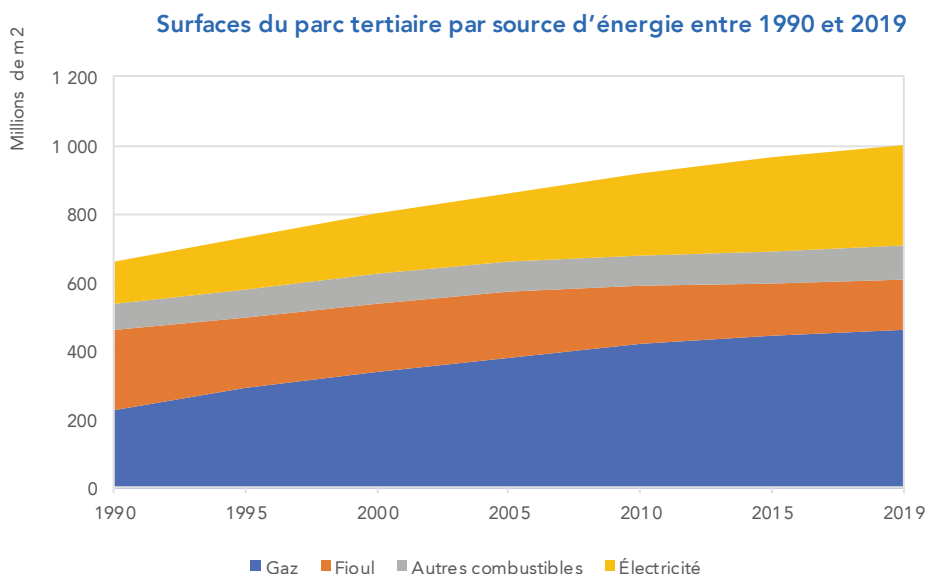
On en déduit les flux d'investissements nécessaires au cours du temps, et les trajectoires d'émissions qui en résultent.

Scénario d'évolution tendancielle du parc de bâtiments tertiaire

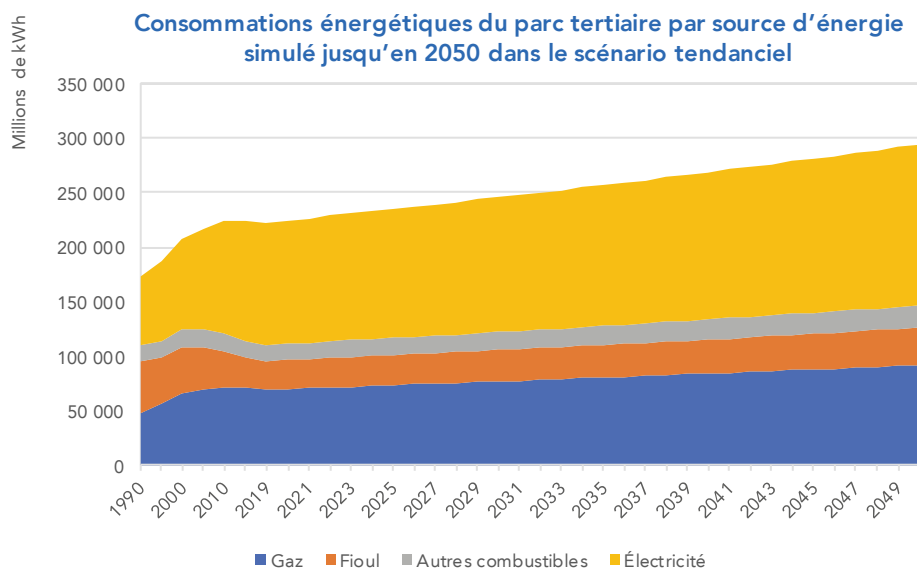
Nous nous basons sur la description des surfaces du parc résidentiel par source d'énergie de 1990 à 2019 donnée par le CEREN²⁰ et reprises par le ministère de la transition écologique²¹.

²⁰ <https://www.ceren.fr/publications/les-publications-du-ceren/>

²¹ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/consommation-denergie-par-usage-du-tertiaire>



Pour établir l'évolution tendancielle du parc jusqu'en 2050, on suppose une évolution globale du parc sur son rythme de long terme, c'est-à-dire une augmentation de 0,9 % par an des surfaces. On prolonge également les tendances d'évolution des parts relatives de chaque classe énergétique.



Scénario compatible avec la trajectoire de décarbonation de la SNBC

Nous faisons évoluer les consommations d'énergie par unité de surface (par des opérations de rénovation thermique des bâtiments) et l'évolution du mix énergétique des bâtiments (par des renouvellements de chaudières portant sur des technologies faiblement carbonées ou totalement décarbonées).

On représente une mise en œuvre d'opérations d'isolation chaque année permettant la rénovation de 100 % du parc en 2050, soit un peu plus de 3 % des surfaces chaque année.

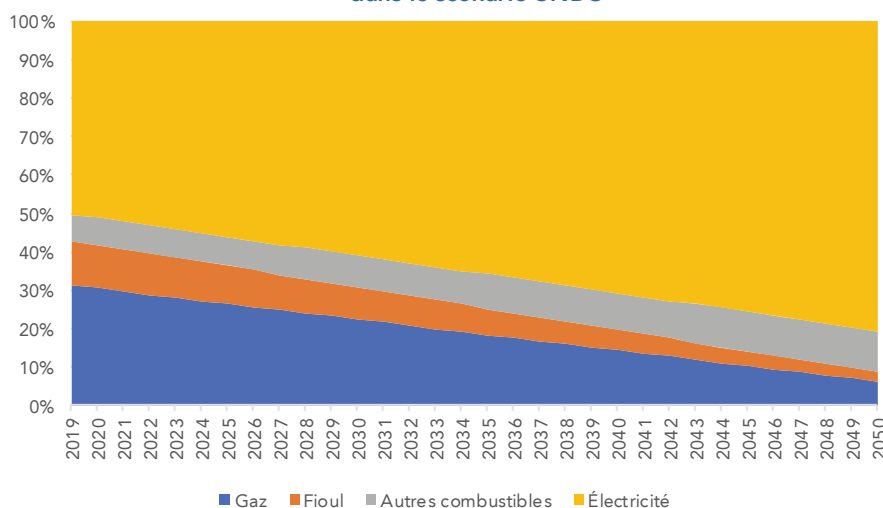
En raisonnant en moyenne, on ne représente qu'un seul type d'opération, permettant d'atteindre des économies de 61 % des consommations unitaires pour un investissement de 270 €/m². Ce calcul est issu d'une moyenne, pondérée par les typologies de bâtiments (surface, secteurs), des estimations données dans le document du ministère de la transition écologique *Scénarios de rénovation énergétique des bâtiments tertiaires : quelles solutions pour quels coûts à l'horizon 2050* publié en décembre 2020 présenté ci-dessous.

Hypothèse de coûts et de performance des opérations d'isolation d'après le MTE

	Coût minimum €/m ²	Coût maximum €/m ²	Gain énergétique minimum (en %)	Gain énergétique maximum (en %)
Bureaux/administrations	85	430	63	83
Cafés et hôtels	221	1193	25	80
Commerces	184	388	41	68
Enseignement et recherche	153	383	57	80
Habitat	98	407	25	75
Santé et action sociale	74	237	43	80
Sport, culture et loisirs	144	384	47	73
Moyenne pondérée par les surfaces	130	424	47	75

On considère également que les travaux d'isolation seront couplés à des opérations de « switch » technologique sur les matériels de production de chaleur (chaudières). On représente ainsi ces transformations avec un objectif d'élimination quasi complète des chaudières au fioul d'ici 2050, une réduction du nombre de chaudières au gaz, au profit de la biomasse et de l'électricité.

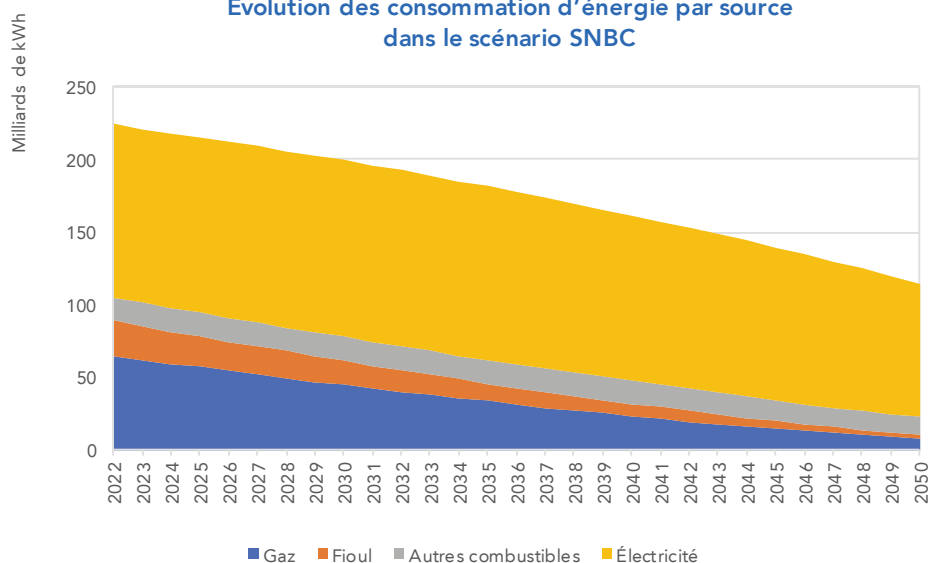
Part des différents combustibles dans la production de chaleur dans le scénario SNBC

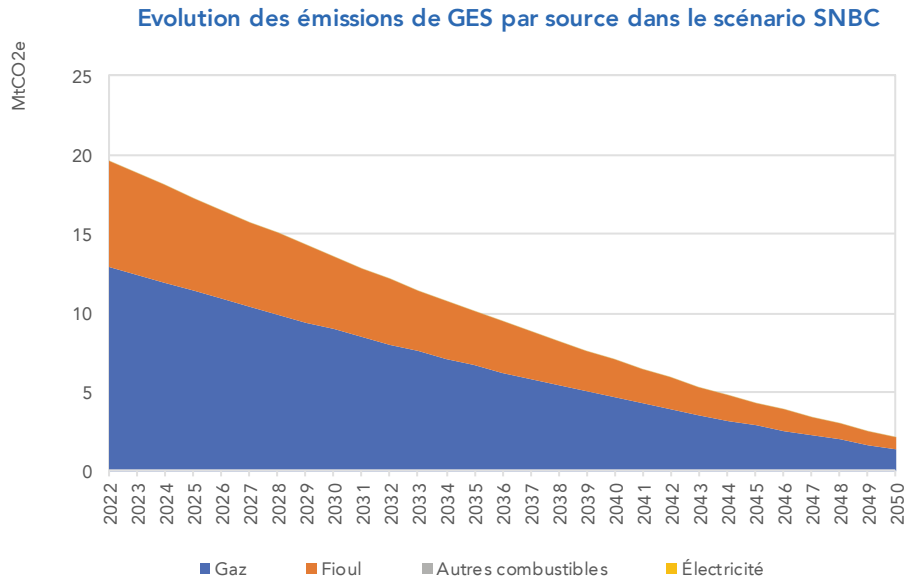


L'étude du ministère de la transition écologique présente des coûts de ces opérations d'un ordre de grandeur bien inférieur à ceux des opérations de rénovations thermiques (le tableau 4 page 31 donne des montants inférieurs à 30 euros par m² pour l'électricité, le gaz ou la biomasse). Nous négligeons donc ces montants au premier ordre.

Les consommations énergétiques et les émissions de GES qui résultent de ces opérations conjointes d'isolation et de changement de chaudières sont représentées ci-dessous.

Evolution des consommation d'énergie par source dans le scénario SNBC





Investissements supplémentaires dans le scénario SNBC par rapport au scénario tendanciel

Le tableau ci-dessous donne les investissements supplémentaires associés au scénario SNBC par rapport au scénario tendanciel présenté au début de ce document.

Investissements annuels supplémentaires dans le scénario SNBC par rapport au scénario tendanciel

	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Bâtiments tertiaires	9,7	10,1	11,0	12,0	13,0	14,1	15,3

2. Transport routier

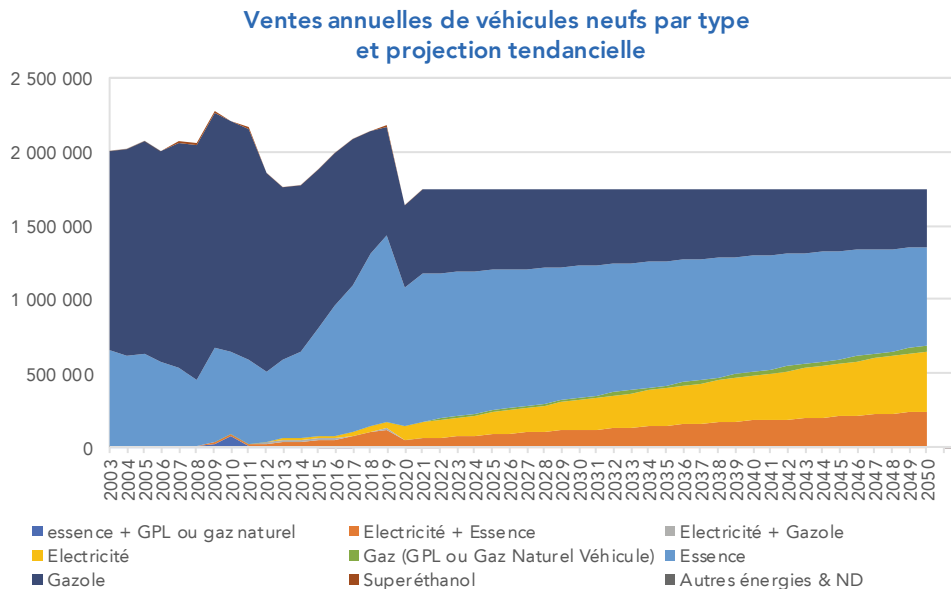
2.1. Véhicules particuliers

La base de données RSVERO²² (Répertoire Statistique des Véhicules Routiers) du ministère de la transition écologique donne une vision assez précise des flux et stocks de véhicules circulant en France. On se base pour nos calculs sur la description du parc donnant le nombre de véhicule neuf entrant dans le parc annuellement, par « technologie » et par classe d'émissions (en gCO₂/km), entre 2003 et 2019. La durée de vie moyenne d'un véhicule dans le parc roulant étant d'environ 15 ans, on peut en cumulant les entrées de nouveaux véhicules sur 15 ans et en retranchant les véhicules dépassant cet âge, reconstituer l'historique du parc roulant. On peut également, si l'on simule différents scénarios d'évolution des ventes de véhicules neufs, représenter les évolutions possibles du parc sur les décennies à venir.

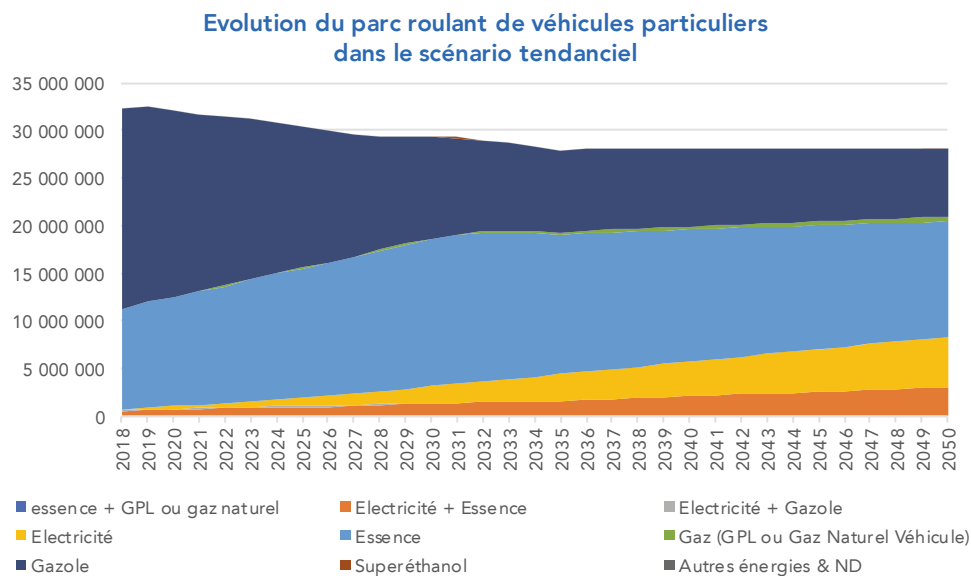
C'est ce que nous avons fait dans deux scénarios : un scénario tendanciel, dans lequel on prolonge les tendances récentes de recomposition des ventes de véhicules neufs (progrès tendanciels d'efficacité énergétique des véhicules thermiques, recul du diesel au profit de l'essence pour les véhicules thermiques, essor des véhicules hybrides et électriques en substituts des véhicules thermiques) et un scénario « SNBC » dans laquelle on accélère fortement la pénétration des véhicules bas-carbone ou zéro-carbone, en défaveur des véhicules thermiques traditionnels.

²² <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-sur-le-parc-des-vehicules-au-1er-janvier-2019>

Scénario d'évolution tendancielle du parc de véhicules et des consommations énergétiques et émissions associées

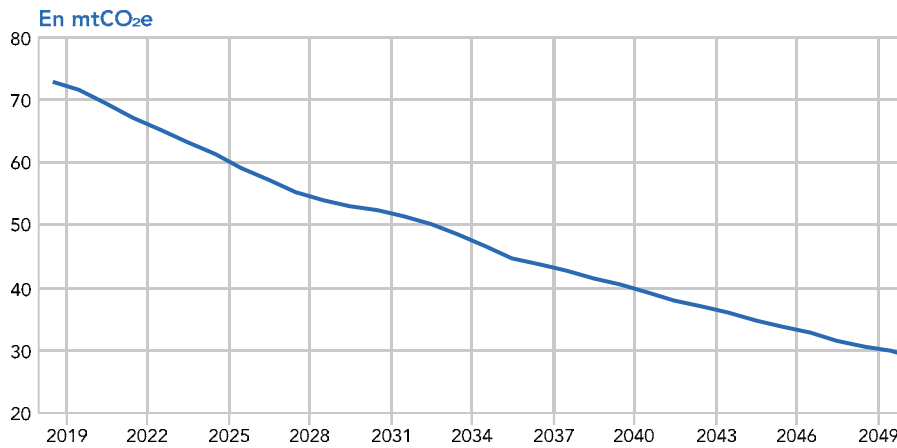


On en déduit l'évolution du parc suivante.



Sur la base d'une hypothèse d'un parcours annuel moyen par véhicule qui resterait constant au cours de temps (environ 12 000 km par an), nous calculons les quantités de carburants consommées et nous pouvons ainsi en déduire les émissions de CO₂ associées.

Emissions de CO₂ du parc roulant de véhicules particuliers dans le scénario tendanciel



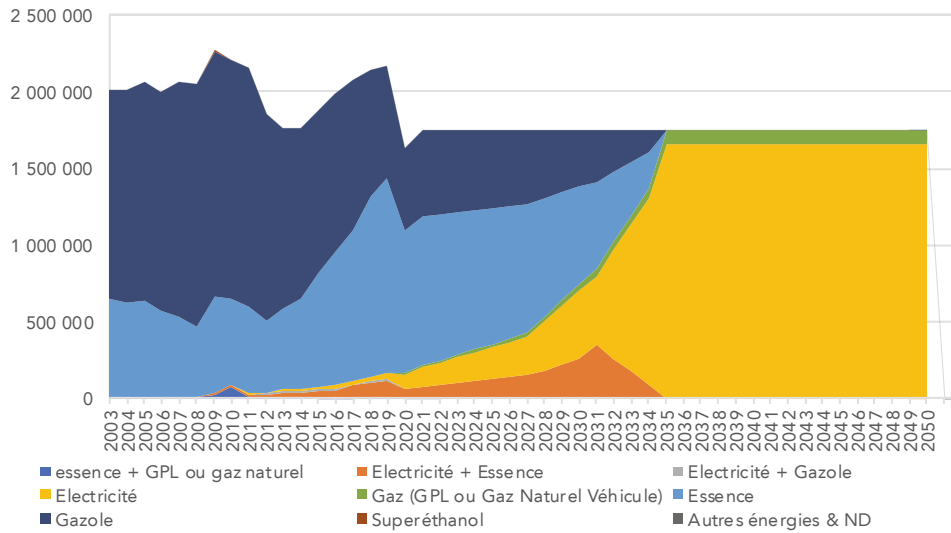
© Rexecode

Ce scénario n’aboutit pas à des émissions nulles en 2050 comme le demande la SNBC.

Scénario « SNBC » d’évolution du parc de véhicules et des consommations énergétiques et émissions associées

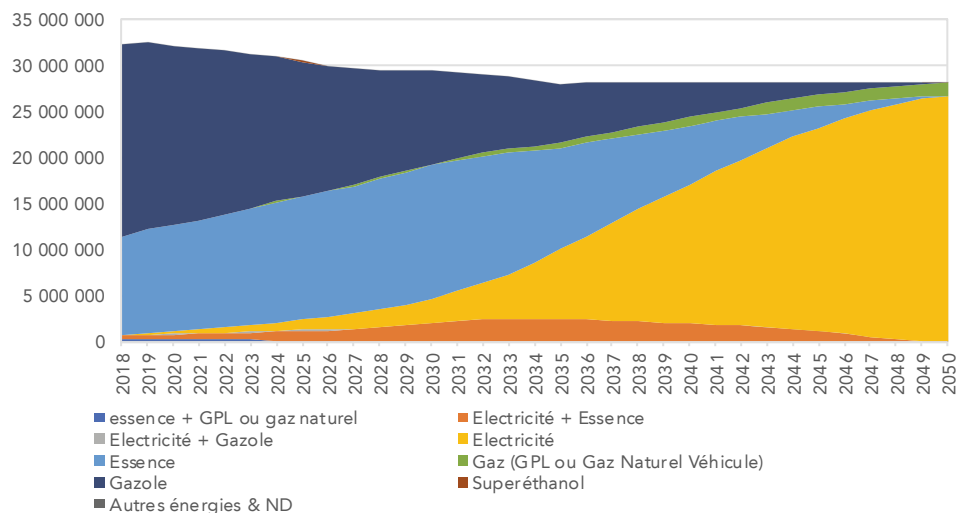
Dans ce scénario, nous représentons les accélérations nécessaires de pénétration des véhicules bas-carbone et zéro-carbone dans le parc afin d’atteindre l’objectif d’émissions quasi-nulles en 2050. Nous tenons ici aussi compte de l’objectif de fin de vente des véhicules thermiques en 2035.

Ventes annuelles de véhicules neufs par type dans le scénario SNBC

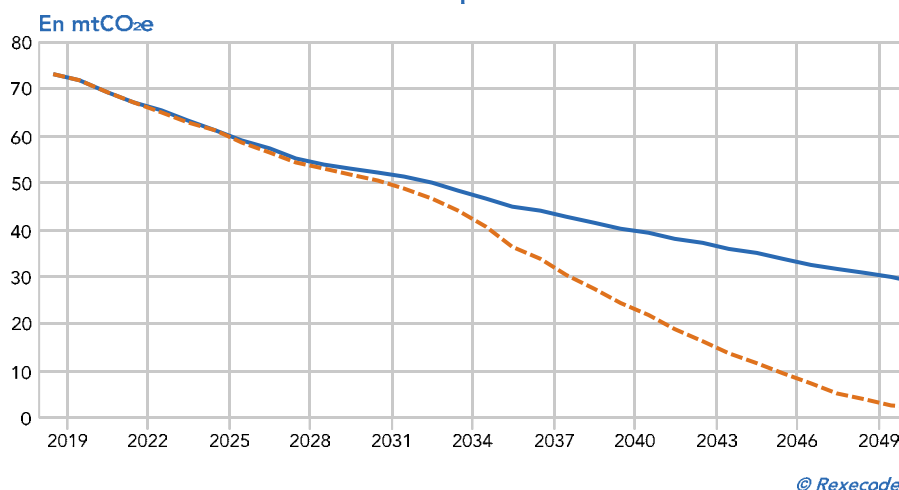


On en déduit l'évolution du parc suivante.

Evolution du parc roulant de véhicules particuliers dans le scénario SNBC



Emissions de CO₂ du parc roulant de véhicules particuliers dans le scénario SNBC et comparaison au scénario tendanciel



Investissements supplémentaires dans le scénario SNBC par rapport au scénario tendanciel

L'investissement supplémentaire dans le scénario SNBC est calculé comme le différentiel de coût d'acquisition des véhicules bas carbone (supposé plus coûteux) par rapport aux véhicules « traditionnels ». On calcule approximativement cette valeur à partir des estimations de coûts suivantes : pour les véhicules thermiques, on utilise le coût moyen d'acquisition d'un véhicule neuf en 2019 (soit environ 25 000 euros). Pour les véhicules hybrides on utilise une valeur de 29 000 euros (hors bonus ; soit un surcoût de 4 000 euros par rapport à un équivalent thermique) ; et un coût de 37 000 euros pour un véhicule électrique (hors bonus, soit un surcoût de 12 000 euros par rapport à un équivalent thermique). Ce sont des ordres de grandeur qui représentent des situations hétérogènes, et que nous supposons constants dans le temps. Ils sont soumis à de fortes incertitudes surtout à des horizons de plusieurs décennies.

En calculant le total des dépenses d'achat de véhicules dans le scénario tendanciel et dans le scénario SNBC, on peut déduire par différence le besoin d'investissement supplémentaire associé au scénario SNBC.

Il faut y ajouter une approximation des investissements réalisés dans les infrastructures de recharges, privées et sur la voirie, permettant l'utilisation effective de ces véhicules. Nous faisons l'hypothèse de l'installation d'un nombre de trois bornes pour quatre véhicules pour les bornes privées (bornes dans les logements individuels et collectifs) et d'une borne pour 10 véhicules sur la voirie (bornes lentes en ville et charge haute puissance sur voie rapide). Pour les coûts, très approximatifs à ce stade car ils peuvent varier (puissance, réseau, géographie...) nous supposons un coût moyen de 4 000 euros pour

une borne à domicile et un coût moyen de 40 000 euros pour une borne en voirie.

Le tableau ci-dessous donne les investissements supplémentaires associés au scénario SNBC par rapport au scénario tendanciel présenté au début de ce document.

**Investissements annuels supplémentaires dans le scénario SNBC
par rapport au scénario tendanciel**

	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Véhicules	0,5	0,8	3,0	14,7	14,0	13,4	12,7
Infrastructures de recharge (privés)	0,2	0,3	1,1	3,8	3,5	3,3	3,0
Infrastructures de recharge (voirie)	0,3	0,4	1,5	5,0	4,7	4,4	4,0

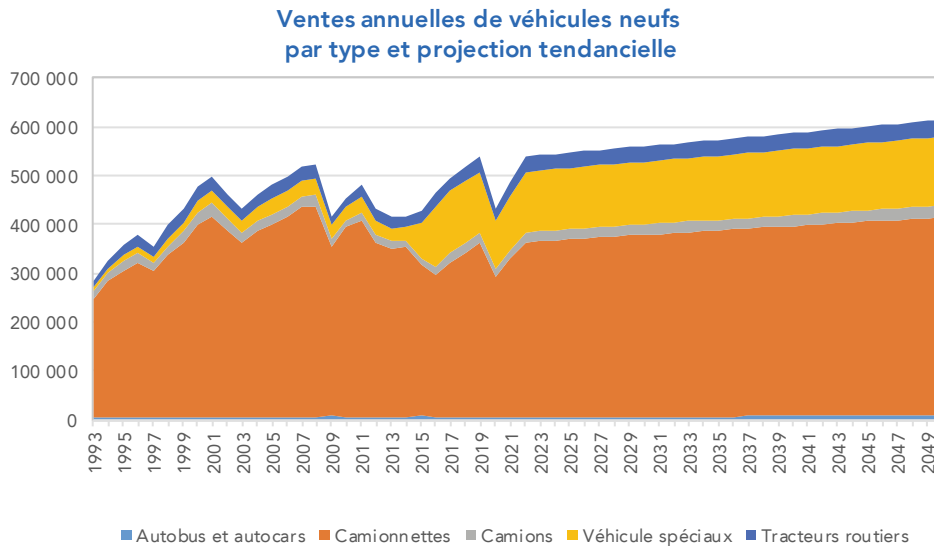
2.2. Véhicules professionnels et transport de marchandises

Scénario d'évolution tendancielle

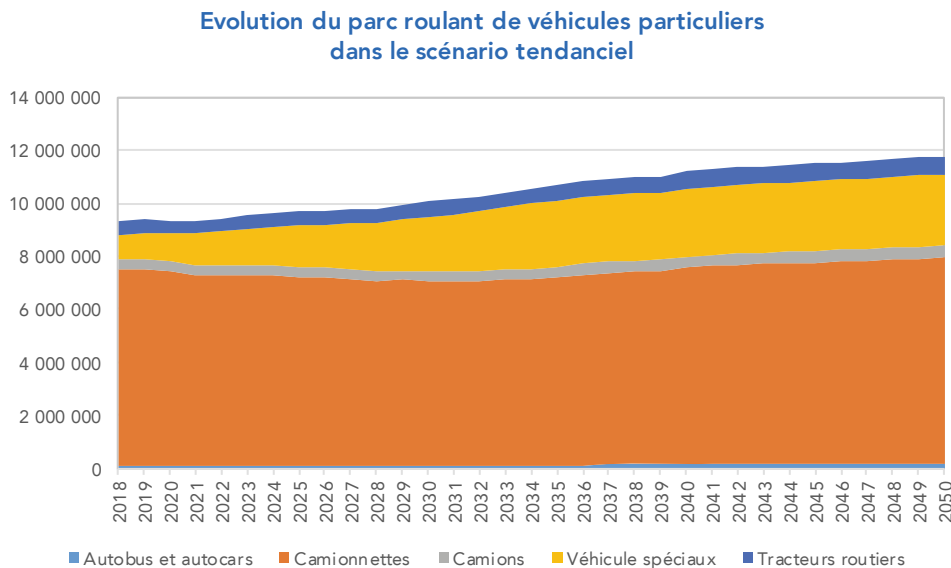
Nous établissons dans une première étape une évolution tendancielle des émissions de gaz à effet de serre du secteur. Nous nous basons sur les données de ventes de véhicules neufs par catégories entre 1993 et 2019. On peut en cumulant les entrées de nouveaux véhicules sur la base de leur « durée de vie » reconstituer l'historique du parc roulant. On peut également, en simulant différents scénarios d'évolution des ventes de véhicules neufs, représenter les évolutions possibles du parc sur les décennies à venir.

C'est ce que nous avons fait dans deux scénarios : un scénario tendanciel, dans lequel on prolonge les tendances récentes, et un scénario « SNBC » dans laquelle on accélère fortement la pénétration des véhicules bas-carbone ou zéro-carbone, en défaveur des véhicules thermiques traditionnels.

Scénario d'évolution tendancielle du parc de véhicule et des consommations énergétiques et émissions associées



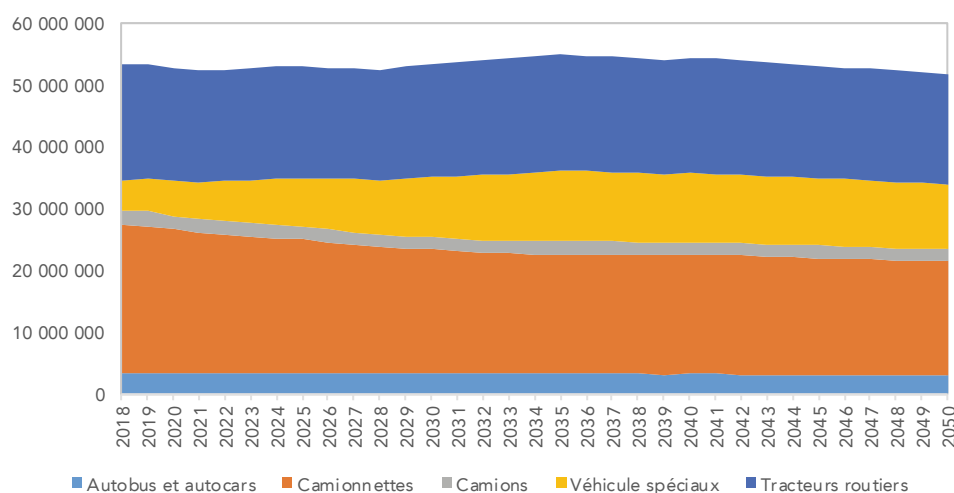
On en déduit l'évolution du parc suivante.



Sur la base d'hypothèses de parcours annuel moyen par catégorie de véhicule, de consommation de carburant moyenne, supposées diminuer tendanciellement de 1 % par an, nous calculons les quantités totales de carburants

consommées et nous pouvons ainsi en déduire les émissions de CO₂ associées à ce scénario.

Emissions de CO₂ du parc roulant de véhicules particuliers dans le scénario tendanciel



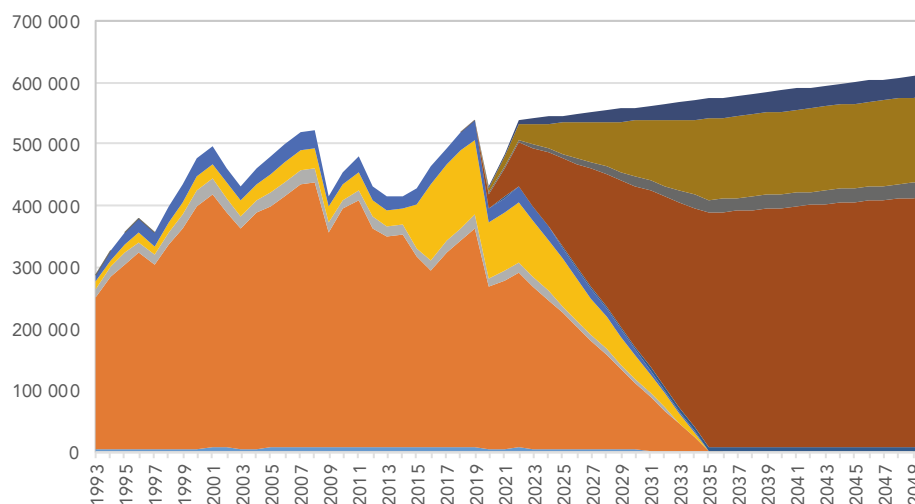
Ce scénario n'aboutit pas à des émissions nulles en 2050 comme le demande la SNBC.

Scénario « SNBC » d'évolution du parc de véhicules et des consommations énergétiques et émissions associées

Dans ce scénario, nous représentons les accélérations nécessaires de pénétration des véhicules bas-carbone et zéro-carbone dans le parc afin d'atteindre l'objectif d'émissions quasi-nulles en 2050. Nous tenons ici compte du fait que pour atteindre des émissions quasi nulles en 2050, étant donné la durée de vie des véhicules et leur date d'entrée dans le parc roulant, il est nécessaire que quasiment plus aucun véhicule thermique traditionnel n'entre dans le parc à partir des années 2030-2035.

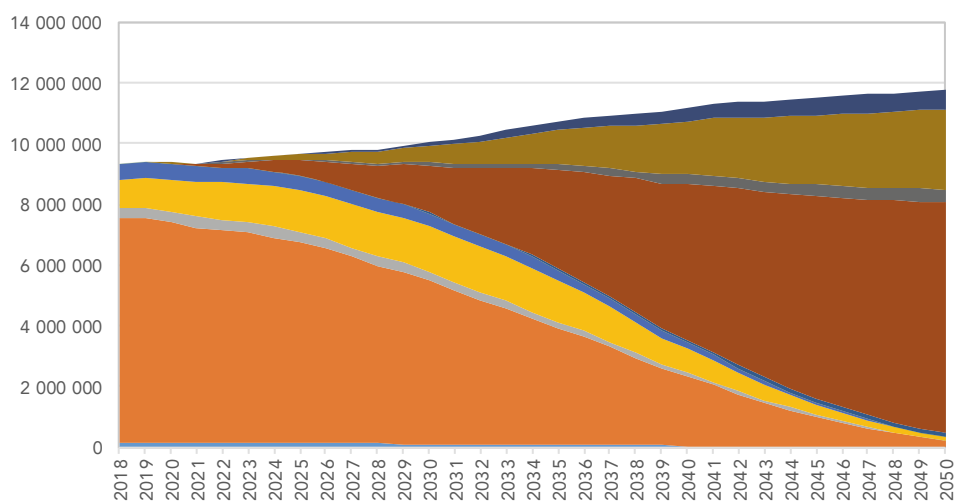
L'évolution technologique étant assez incertaine à ce stade, nous ne fixons pas *a priori* la ou les technologies qui seront choisies (électricité, hydrogène, biogaz etc.). De façon schématique, nous considérons une technologie « bas carbone » pour chaque catégorie de véhicule, dont les émissions seraient nulles pour le même service rendu. On se place dans un scénario de pénétration rapide de ces types de véhicules entre 2023 et 2035.

Ventes annuelles de véhicules neufs par type dans le scénario SNBC

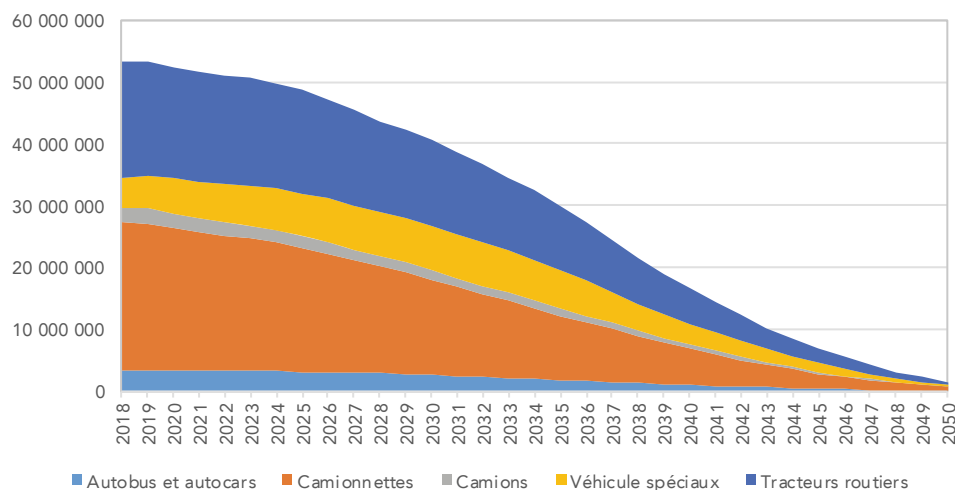


On en déduit l'évolution du parc suivante.

Evolution du parc roulant de véhicules particuliers dans le scénario SNBC



Emissions de CO2 du parc roulant de véhicules particuliers dans le scénario SNBC et comparaison au scénario tendanciel



Investissements supplémentaires dans le scénario SNBC par rapport au scénario tendanciel

L'investissement supplémentaire dans le scénario SNBC est calculé comme le différentiel de coût d'acquisition des véhicules bas carbone (supposé plus coûteux) par rapport aux véhicules « traditionnels ». On calcule cette valeur à partir des estimations de coûts suivantes. Ce sont évidemment des ordres de grandeur, que nous supposons constants. Ils sont soumis à de fortes incertitudes surtout à des horizons de plusieurs décennies.

Hypothèses de surcoûts des véhicules « bas-carbone » par rapport à leur équivalent « carboné »

Catégorie	Surcoût de la version « bas-carbone » par rapport à la version « carbonée »
Autobus et autocars	250 000
Camionnettes	7 000
Camions légers	25 000
Véhicule spéciaux	50 000
Tracteurs routiers	250 000

En calculant le total des dépenses d'achat de véhicules dans le scénario tendanciel et dans le scénario SNBC, on peut déduire par différence le besoin d'investissement supplémentaire associé au scénario SNBC, donné dans le tableau ci-dessous.

**Investissements annuels supplémentaires dans le scénario SNBC
par rapport au scénario tendanciel**

	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Véhicules de transport professionnels	4,9	7,4	13,6	19,7	20,2	20,7	21,1

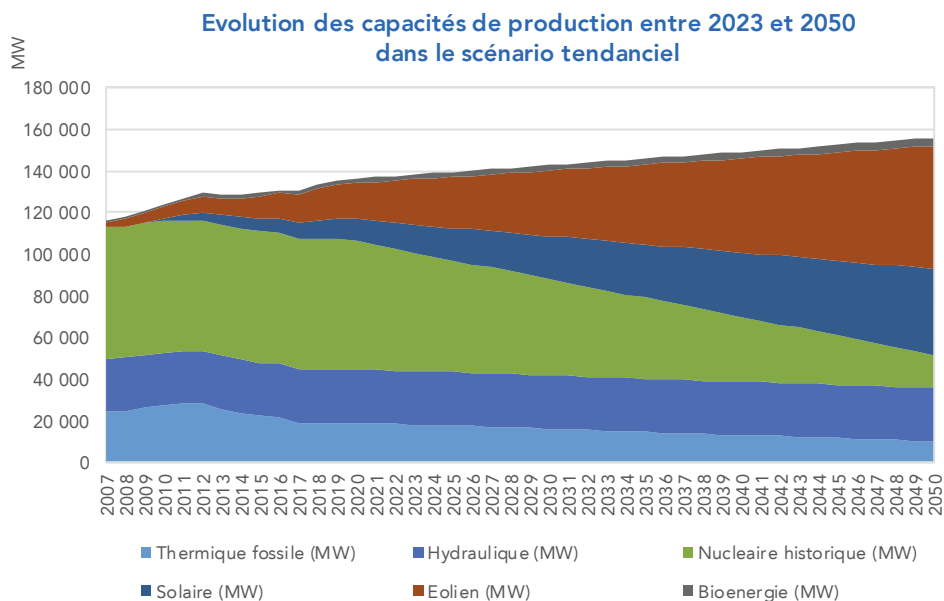
Il faudrait à ce stade y ajouter les investissements réalisés dans les infrastructures de recharges, privées et sur la voirie, permettant l'utilisation effective de ces véhicules. Comme il est très incertain à ce stade de savoir de quelle infrastructure il s'agirait (bornes électriques, stations hydrogènes, caténaires sur l'autoroute... ?) nous n'évaluons pas ce besoin à ce stade.

3. Production d'énergie

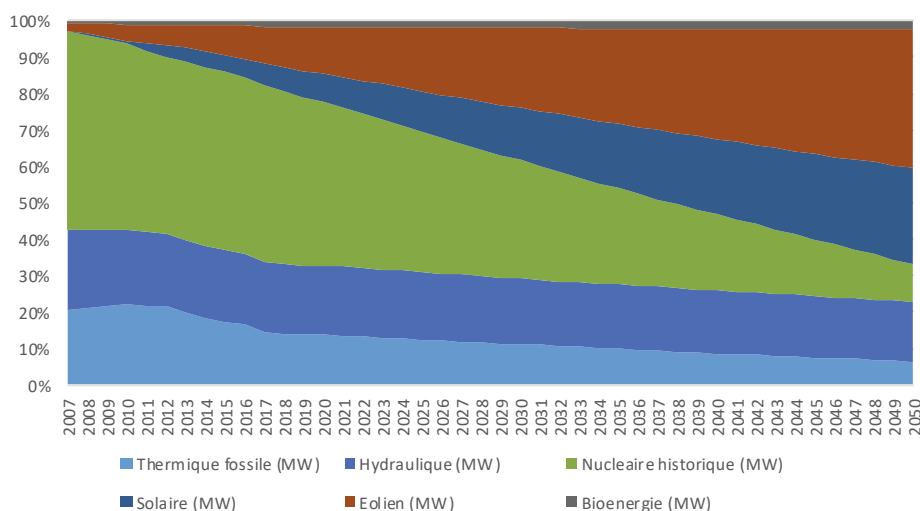
3.1. Production d'électricité

Scénario d'évolution tendancielle du parc de production

- Poursuite tendancielle du développement de l'éolien et du solaire
- Maintien des capacités hydrauliques
- Sortie progressive des capacités thermiques au fioul et au charbon, maintien des capacités thermiques au gaz
- Prolongation des réacteurs nucléaires historiques cadrée par une diminution progressive vers 40 GW en 2035, 16 GW en 2050. Pas de construction de nouveaux réacteurs.

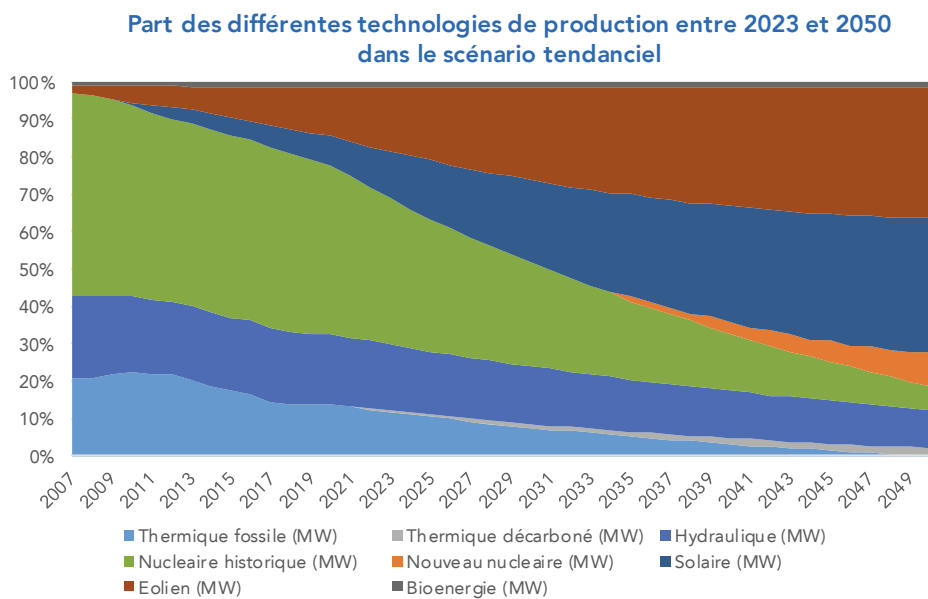
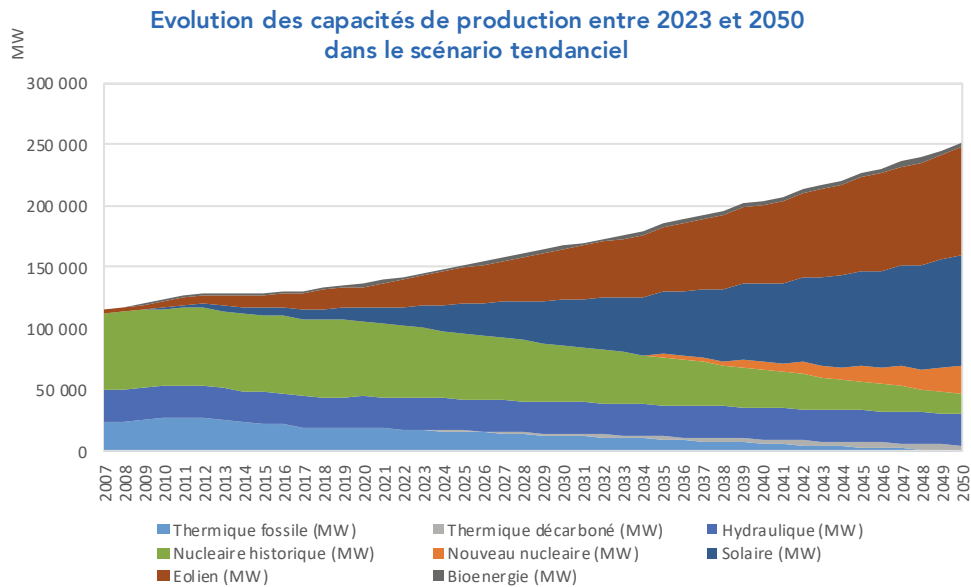


Part des différentes technologies de production entre 2023 et 2050 dans le scénario tendanciel



Scénario compatible avec les objectifs de la SNBC : cadré par le scénario N2 des perspectives de RTE

- Forte électrification des usages (transport, industrie, logement...) entraînant une hausse de la consommation totale d'électricité et donc un besoin d'expansion des capacités de production par rapport au scénario tendanciel
- Accélération du développement de l'éolien et du solaire, pour atteindre en 2050 : 90 GW de solaire, 52 GW d'éolien terrestre, 36 GW d'éolien en mer
- Sortie progressive des capacités thermiques fossiles, développement de capacités thermiques décarbonées atteignant 5 GW en 2050
- Prolongation des réacteurs nucléaires historiques cadrée par une diminution progressive vers 40 GW en 2035, 16 GW en 2050. Construction de 23 GW de nouveau nucléaire entre 2035 et 2050 (soit 14 EPR).



*Hypothèses de coût des investissements nécessaires,
tirées des perspectives de RTE*

**Développement de l'éolien terrestre et en mer : Rapport RTE
Chapitre 11, p468 et 470**

Figure 11.8 Évolution des coûts d'investissement dans l'éolien terrestre à l'horizon 2050 (hors raccordement)

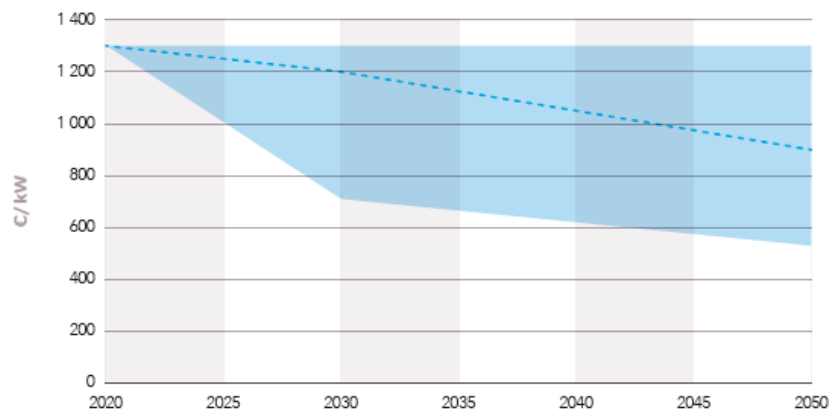
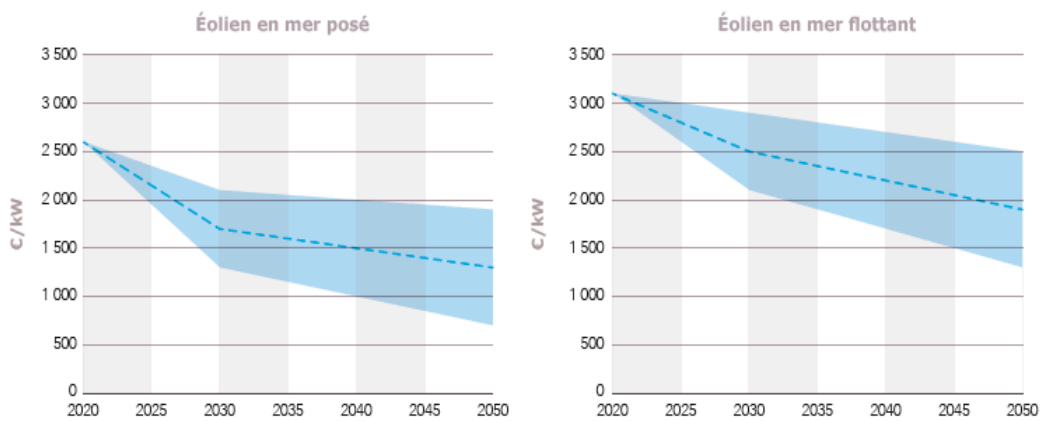
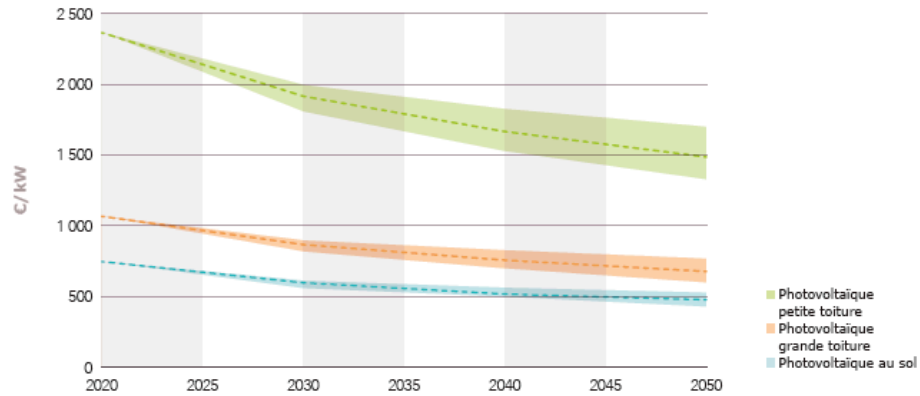


Figure 11.9 Évolution des coûts d'investissement de l'éolien en mer à l'horizon 2050 (hors raccordement)



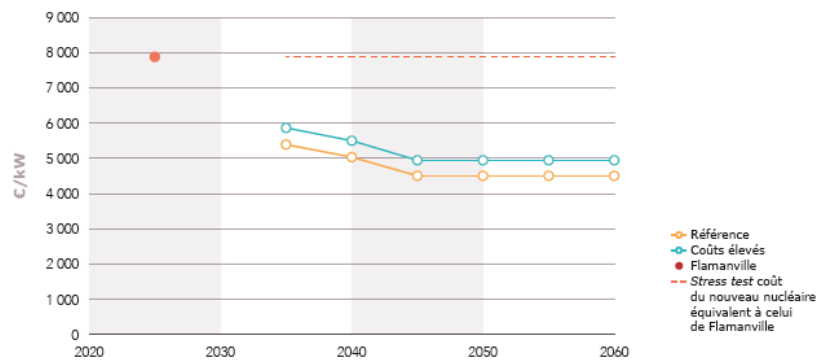
Développement du solaire : Rapport RTE Chapitre 11, p467

Figure 11.7 Évolution des coûts d'investissement en PV à l'horizon 2050 (hors raccordement)



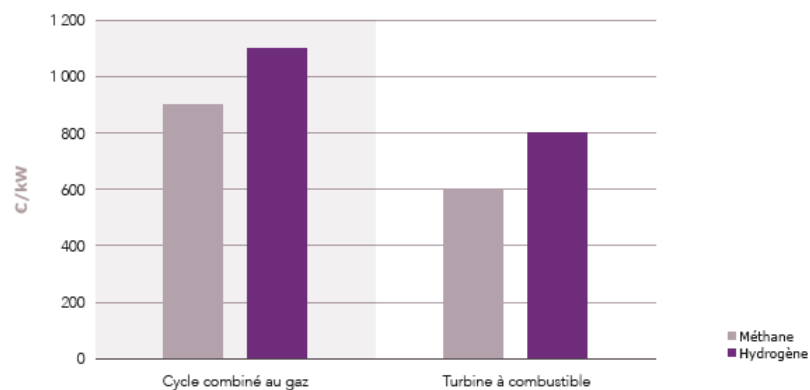
Développement du nouveau nucléaire : Rapport RTE Chapitre 11, p467

Figure 11.4 Évolution du coût d'investissement (dont coût de développement et démantèlement) des EPR2 en fonction de la date de mise en service



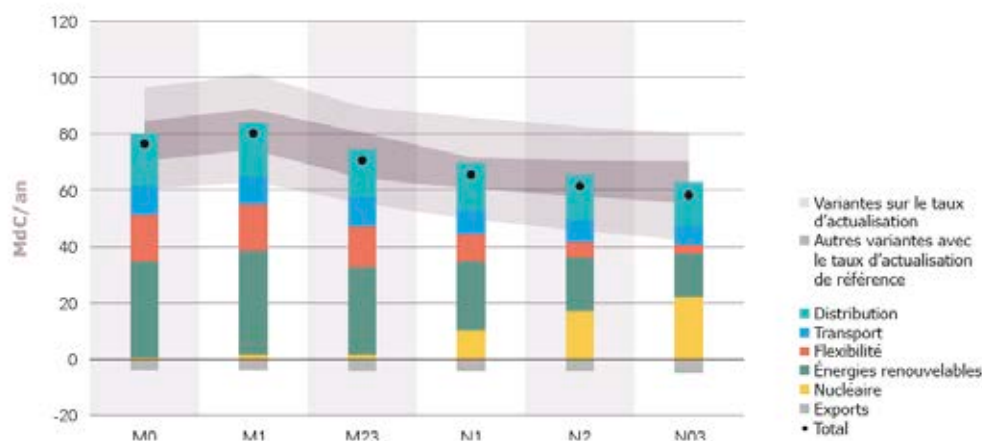
Développement du nouveau thermique décarboné : Rapport RTE Chapitre 11, p477

Figure 11.13 Hypothèses de coût des moyens de production d'électricité thermique décarbonée



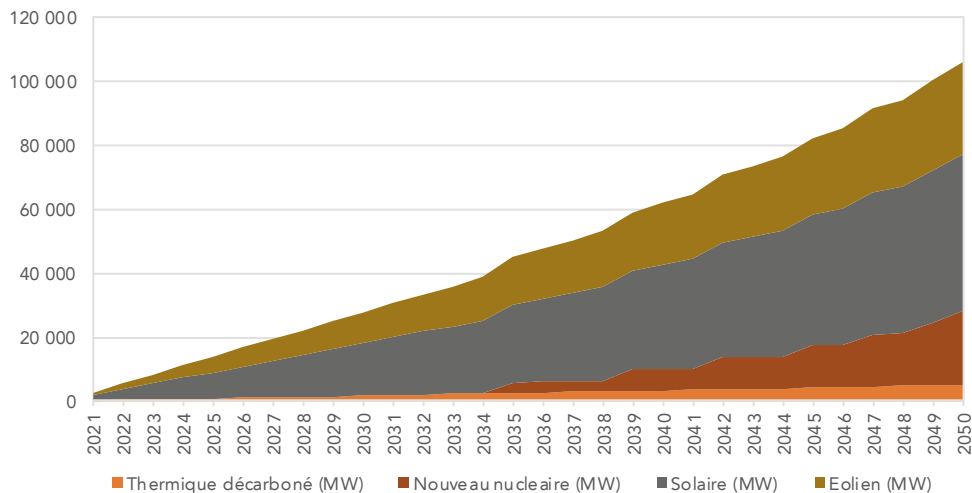
Développement des réseaux permettant les expansions visées : Rapport RTE
 Chapitre 11, p505

Figure 11.32 Coûts complets annualisés des scénarios à l'horizon 2060



Le coût des réseaux de transport et distribution dans le scénario N2 représentent de l'ordre de 40 % des coûts complets annualisés du scénario. Nous appliquons donc, en proportion, un besoin d'investissement dans les réseaux de 40 % des besoins d'investissements additionnels totaux, et croissants dans le temps (car ces besoins accompagnent le développement des renouvelables), soit de l'ordre de 3 milliards par an jusqu'en 2030, 4 milliards par an jusqu'en 2040, et 5 milliards par an sur la dernière décennie.

Différence de capacités installées entre le scénario tendanciel et le scénario SNBC (capacités cumulées en MW)



Les investissements supplémentaires permettant de basculer du scénario tendanciel au scénario SNBC sont les investissements dans ces nouvelles capacités, dont les coûts sont estimés à partir des sources présentées à la page précédente.

Investissements supplémentaires nécessaires dans le scénario SNBC par rapport au scénario tendanciel

Note : les investissements dans le nouveau nucléaire sont lissés sur les 10 ans précédant l'entrée en service prévisionnelle de chaque réacteur.

Investissements supplémentaires nécessaires dans le scénario SNBC par rapport au scénario tendanciel

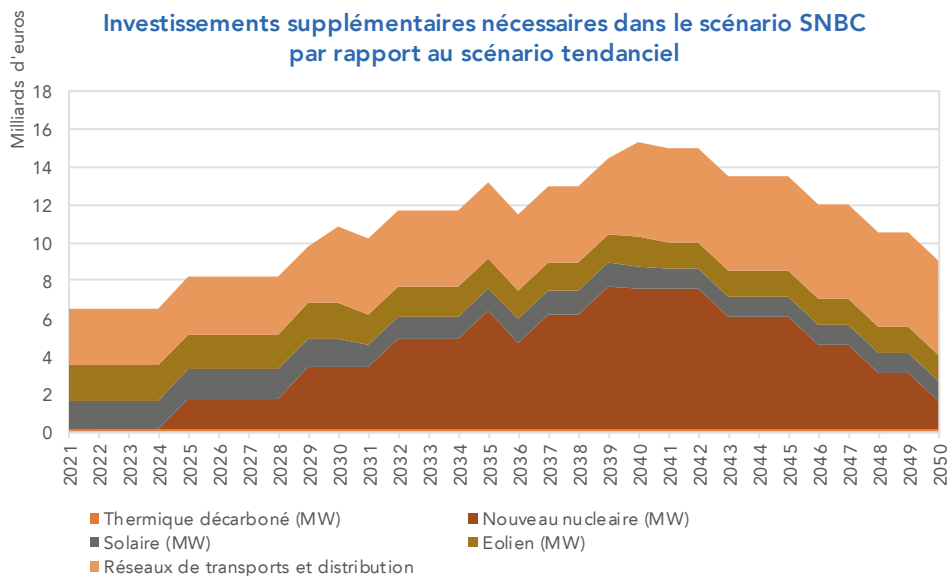


Tableau de synthèse des investissements annuels supplémentaires nécessaires dans le scénario SNBC par rapport au scénario tendanciel

	2023	2024	2025	2026-2030	2031-2035	2036-2040	2041-2045	2046-2050	2023-2050
Solaire	1,6	1,6	1,6	1,6	1,2	1,2	1,1	1,1	1,3
Eolien	1,8	1,8	1,8	1,8	1,5	1,5	1,4	1,4	1,6
Nouveau nucléaire	0,0	0,0	1,6	2,3	4,8	6,3	6,5	3,3	4,2
Thermique décarboné	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Réseaux de transports et distribution	3,0	3,0	3,0	3,2	4,0	4,2	5,0	5,0	4,1
Total	6,5	6,5	8,2	9,0	11,7	13,4	14,1	10,8	11,3

3.2. Production de chaleur renouvelable

Nous partons des objectifs de développement de la chaleur renouvelable livrée par les réseaux de chaleur. De 2020 à 2030, il faudra accroître la production de chaleur renouvelable de 24 TWh pour atteindre 40 TWh/an.

	Quantité de chaleur renouvelable et de récupération livrée par les réseaux de chaleur
2012	7,9 TWh
2018	13,9 TWh
2019	14,6 TWh
2020 (e)	16 TWh
2023 (objectif)	24,4 TWh
2028 (objectif)	31 – 36 TWh
2030 (objectif)	40 TWh

Source : Programmation pluriannuelle de l'énergie (2020)

Nous prolongeons d'une part la tendance historique observée, qui est de l'ordre de +1 TWh par an, afin d'établir un scénario tendanciel de développement ; et d'autre part la tendance des objectifs fixés par la PPE jusqu'en 2050 (linéairement). On obtient alors, par différence, une quantité de chaleur renouvelable additionnelle qui doit être produite pour respecter les objectifs de la PPE. Nous faisons l'hypothèse que la durée d'utilisation des installations serait constante dans le temps et d'environ 3 000 heures par an, afin d'en déduire un besoin supplémentaire de capacité de production. Enfin, pour

traduire ces besoins de capacités de production en montant d'investissement, nous utilisons les coûts d'investissement en €/kW indiqués par l'ADEME dans son ouvrage « *Coûts des énergies renouvelables en France* » (édition 2016) reproduits ci-dessous.

Coût de production de la filière biomasse avec ou sans réseau de chaleur

Puissance de la chaufferie	Coût de production	Coût d'investissement
Inférieure à 1 MW	88 - 125 €/MWh	1 100 – 1 330 €/kW
De 1 à 3 MW	73 - 101 €/MWh	940 – 1 290 €/kW
Supérieure à 3 MW	62 - 84 €/MWh	610 – 1 070 €/kW

Source : Ademe (2016). Les fourchettes hautes sont avec réseau de chaleur

Nous retenons le haut des fourchettes de coûts afin de prendre également en compte le développement des réseaux associés, soit un coût approximatif de 1 250 €/kW.

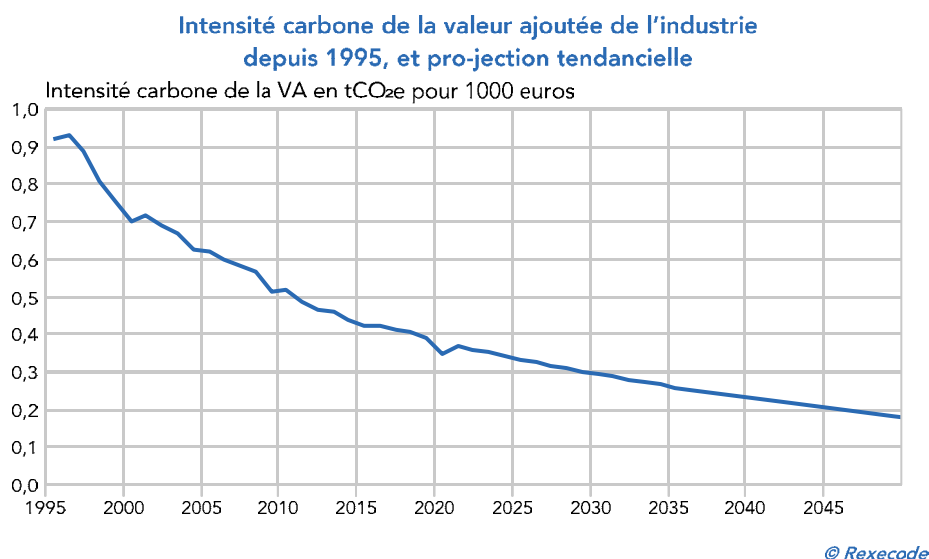
Investissements annuels supplémentaires dans le scénario PPE par rapport au scénario tendanciel, en milliards d'euros par an

	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Chaleur renouvelable	0,7	0,3	1,0	0,6	0,6	0,6	0,6

4. Décarbonation de l'industrie

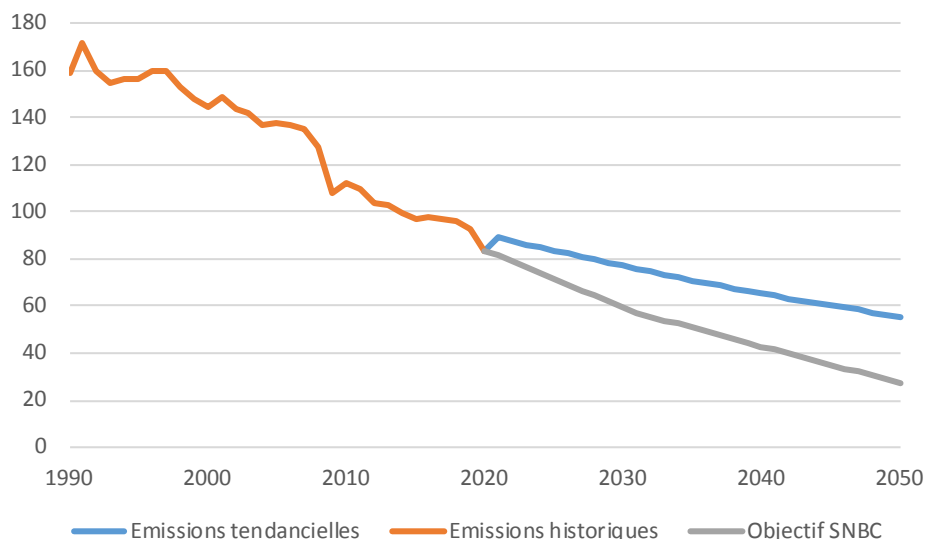
Scénario d'évolution tendancielle des émissions

Nous établissons dans une première étape une évolution tendancielle des émissions de gaz à effet de serre de l'industrie, sur la base d'une hypothèse de croissance de la valeur ajoutée en ligne avec notre scénario de croissance du PIB (0,9 %/an), et sous l'hypothèse de la poursuite, exponentiellement décroissants, des progrès passés en intensité carbone de la valeur ajoutée de l'industrie (environ -2,5 %/an).



Sous ces hypothèses, on obtient l'évolution tendancielle des émissions de l'industrie, représentée ci-dessous, qui peut alors être comparée à la trajectoire demandée par la SNBC.

Evolution tendancielle des émissions de l'industrie et trajectoire de la SNBC



Evaluation des investissements nécessaires sur la base d'une représentation des familles technologiques mobilisées

Il est difficile de représenter la diversité des solutions qui peuvent être mises en œuvre dans les différents secteurs industriels. Pour obtenir un ordre de grandeur des montants d'investissements nécessaires pour accélérer la décarbonation de l'industrie, nous procédons à un calcul sur la base d'une représentation de cinq leviers majeurs de décarbonation :

1. Substitution de biogaz en lieu et place de gaz naturel

Ce levier peut être mobilisé sans investissement supplémentaire direct de l'industrie (les investissements ont lieu au niveau des secteurs producteurs de biogaz), mais le potentiel est limité par la disponibilité des ressources et les contraintes d'acheminement éventuelles.

2. Electrification de la production de chaleur basse température (< 200 degrés)

On considère ici sur les surcoûts d'investissements associés aux technologies de pompe à chaleur industrielle permettant de produire une chaleur suffisante pour certains usages industriels. On se base sur les ordres de grandeur donnés dans deux articles de recherche récents²³.

²³ Marina, A., Spoelstra, S., Zondag, H. A., & Wemmers, A. K. (2021). An estimation of the European industrial heat pump market potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110545 ; et Pieper, Henrik, et al. *Allocation of investment costs for large-scale heat pumps supplying district heating*. *Energy Procedia* 147 (2018): 358-367.

3. Capture et séquestration du CO₂

On se base ici sur les usages potentiels identifiés par l'Agence internationale de l'énergie²⁴ pour les secteurs de l'acier, du ciment et de la chimie et sur des données de coût de la tonne évitée correspondantes (dont la partie de coût en capital qui nous intéresse plus particulièrement ici), tirées du rapport du National Petroleum Council²⁵.

4. Substitution d'hydrogène bas-carbone pour les usages actuels d'hydrogène produit à partir d'énergie fossile (raffinage, chimie...)

On utilise ici les coûts d'investissement dans trois technologies de production d'hydrogène par électrolyse à partir d'électricité renouvelable ou nucléaire (technologies dite Alcaline, *Polymer Electrolyte Membrane* et *Solid Oxyde Electrolyzer Cell*) tirés du rapport « *The Future of Hydrogen* » de l'Agence internationale de l'énergie²⁶.

5. Nouveaux usages de l'hydrogène (usages dans les procédés, comme la réduction directe dans le secteur de l'acier, usages énergétiques de l'hydrogène etc.)

Les usages possibles de l'hydrogène dans l'industrie sont multiples. On suppose pour simplifier qu'il y aura des usages dans les procédés industriels (acier, chimie...), et des usages énergétiques - l'AIE²⁷ ainsi que l'IFP²⁸ évoquent par exemple la possibilité de production de chaleur à haute température par la combustion d'hydrogène. Les structures schématiques de coûts d'investissement associés à la production et au transport de l'hydrogène proviennent du rapport « *The Future of Hydrogen* » de l'AIE. Pour les investissements dans les procédés d'utilisation, on se fonde sur une hypothèse de surcoût de l'ordre de 50-75 % par rapport à l'équipement classique (par exemple dans le secteur de l'acier, le rapport « *Energy Technology Perspectives* » de l'AIE indique un surcoût d'investissement de 63 % pour une unité de réduction directe à hydrogène).

On procède de façon schématique en considérant que les investissements dans ces cinq familles technologiques peuvent se produire immédiatement et que les réductions d'émissions correspondantes se manifesteraient la même année (ce qui n'est évidemment pas le cas dans la réalité). En mobilisant les différentes technologies chaque année pour réduire l'écart d'émissions entre les émissions tendanciennes et les émissions cibles de la SNBC, on obtient des efforts d'investissements et les réductions d'émissions correspondantes, présentés ci-dessous. Ces montants sont des ordres de grandeur qui demandent à être précisés sur la base d'une désagrégation des secteurs industriels et éventuellement d'une modélisation plus fine des changements

²⁴ <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>

²⁵ <https://dualchallenge.npc.org/>

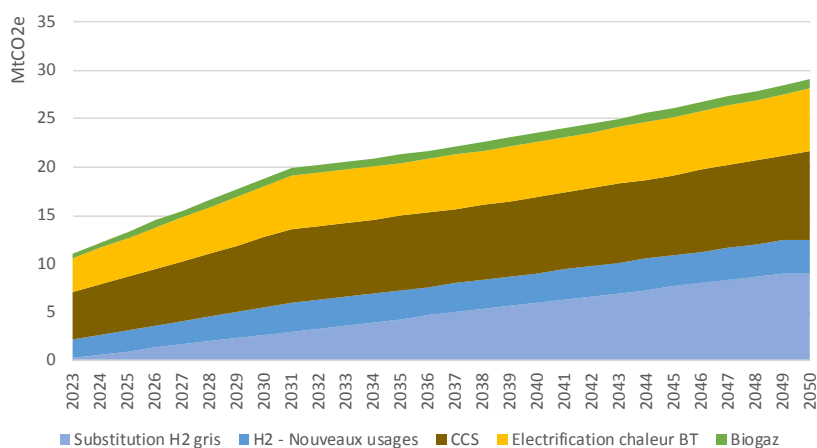
²⁶ <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

²⁷ <https://www.iea.org/topics/energy-technology-perspectives>

²⁸ IFP et Sintef *Hydrogen for Europe*.

techniques spécifiques requis et des investissements précis à mobiliser. Les feuilles de route de décarbonation qui sont en train d'être publiées par les différentes filières industrielles²⁹ seront une aide précieuse dans cette optique.

Réduction des émissions par « famille technologique » dans le scénario SNBC par rapport au scénario tendanciel



Le tableau ci-dessous donne les investissements supplémentaires associés au scénario SNBC par rapport au scénario tendanciel.

Investissements annuels supplémentaires dans le scénario SNBC par rapport au scénario tendanciel, en milliards d'euros par an

	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Industrie	1,8	2,3	3,7	4,6	5,6	6,7	7,9

²⁹ <https://www.conseil-national-industrie.gouv.fr/>

5. Décarbonation du secteur agricole

Les émissions et captations de gaz à effet de serre du secteur agricole sont très variées. Elles sont composées de différents gaz, et reposent sur des mécanismes et des sources de différentes natures. Le CITEPA synthétise ces contributions selon les catégories présentées ci-dessous. Pour la partie élevage, l'essentiel des émissions provient des émissions de méthane issues de la fermentation entérique des bovins. Pour la partie culture, une grande partie des émissions sont des émissions de N₂O liées à l'usage d'engrais. Enfin les consommations d'énergie fossile pour les engins et chaudières agricole représentent des émissions de CO₂ comptant pour un peu plus de 10 % des émissions du secteur.

Emissions de gaz à effet de serre du secteur agriculture-élevage-sylviculture en 2019

Emissions de CO ₂ e (MtCO ₂ e/an)	2019
Bovins	33,7
Porcins	1,6
Volailles	0,3
Autres émissions de l'élevage	4,2
Sous-total Elevage	39,8
Engrais et amendements minéraux	12,3
Engrais et amendements organiques	2,9
Pâturage	7,7
Brûlage de résidus agricoles	0,0
Autres émissions des cultures	10,5
Sous-total Culture	33,4
Engins, moteurs et chaudières en agriculture/sylviculture	9,9
Total agriculture / sylviculture	83,1

Afin d'appréhender la question des investissements nécessaires à la réduction de ces émissions, nous nous basons sur les différentes pistes de réduction des émissions présentées dans le rapport de l'INRA de juillet 2013 intitulé « *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre* » réalisé pour l'Ademe, le Ministère de l'agriculture, et le Ministère de l'Ecologie.

Ces actions sont synthétisées dans le tableau ci-dessous. Il y a quatre grands leviers : diminuer les apports de fertilisants minéraux azotés, stocker du carbone dans le sol et la biomasse, modifier la ration des animaux, et valo-

Dix actions permettant de réduire les émissions du secteur agricole

	Actions	Sous-actions
Diminuer les apports de fertilisants minéraux azotés		
 ↘ N ₂ O	1 Réduire le recours aux engrais minéraux de synthèse, en les utilisant mieux et en valorisant plus les ressources organiques, pour réduire les émissions de N₂O	A. Réduire la dose d'engrais minéral en ajustant mieux l'objectif de rendement B. Mieux substituer l'azote minéral de synthèse par l'azote des produits organiques C1. Retarder la date du premier apport d'engrais au printemps C2. Utiliser des inhibiteurs de la nitrification C3. Enfourer dans le sol et localiser les engrais
	 ↘ N ₂ O	2 Accroître la part de légumineuses en grande culture et dans les prairies temporaires, pour réduire les émissions de N₂O
Stocker du carbone dans le sol et la biomasse		
 ↘ CO ₂	3 Développer les techniques culturales sans labour pour stocker du C dans le sol	3 options techniques : passer au semis direct continu, passer au labour occasionnel, passer au travail superficiel du sol
 ↘ CO ₂ ↘ N ₂ O	4 Introduire davantage de cultures intermédiaires, de cultures intercalaires et de bandes enherbées dans les systèmes de culture pour stocker du carbone dans le sol et limiter les émissions de N₂O	A. Développer les cultures intermédiaires semées entre deux cultures de vente dans les systèmes de grande culture B. Introduire des cultures intercalaires en vignes et en vergers C. Introduire des bandes enherbées en bordure de cours d'eau ou en périphérie de parcelles
		 ↘ CO ₂
 ↘ CO ₂ ↘ N ₂ O	6 Optimiser la gestion des prairies pour favoriser le stockage de carbone et réduire les émissions de N₂O	A. Allonger la période de pâturage B. Accroître la durée de vie des prairies temporaires C. Réduire la fertilisation azotée des prairies permanentes et temporaires les plus intensives D. Intensifier modérément les prairies permanentes peu productives par augmentation du chargement animal
Modifier la ration des animaux		
 ↘ CH ₄	7 Substituer des glucides par des lipides insaturés et utiliser un additif dans les rations des ruminants pour réduire la production de CH₄ entérique	A. Substituer des glucides par des lipides insaturés dans les rations B. Ajouter un additif (à base de nitrates) dans les rations
 ↘ N ₂ O	8 Réduire les apports protéiques dans les rations animales pour limiter les teneurs en azote des effluents et réduire les émissions de N₂O	A. Réduire la teneur en protéines des rations des vaches laitières B. Réduire la teneur en protéines des rations des porcs et des truies
Valoriser les effluents pour produire de l'énergie et réduire la consommation d'énergie fossile		
 ↘ CH ₄	9 Développer la méthanisation et installer des torchères, pour réduire les émissions de CH₄ liées au stockage des effluents d'élevage	A. Développer la méthanisation B. Couvrir les fosses de stockage et installer des torchères
 ↘ CO ₂	10 Réduire, sur l'exploitation, la consommation d'énergie fossile des bâtiments et équipements agricoles pour limiter les émissions directes de CO₂	A. Réduire la consommation d'énergie fossile pour le chauffage des bâtiments d'élevage B. Réduire la consommation d'énergie fossile pour le chauffage des serres C. Réduire la consommation d'énergie fossile des engins agricoles

riser les effluents pour produire de l'énergie et réduire la consommation d'énergie fossile.

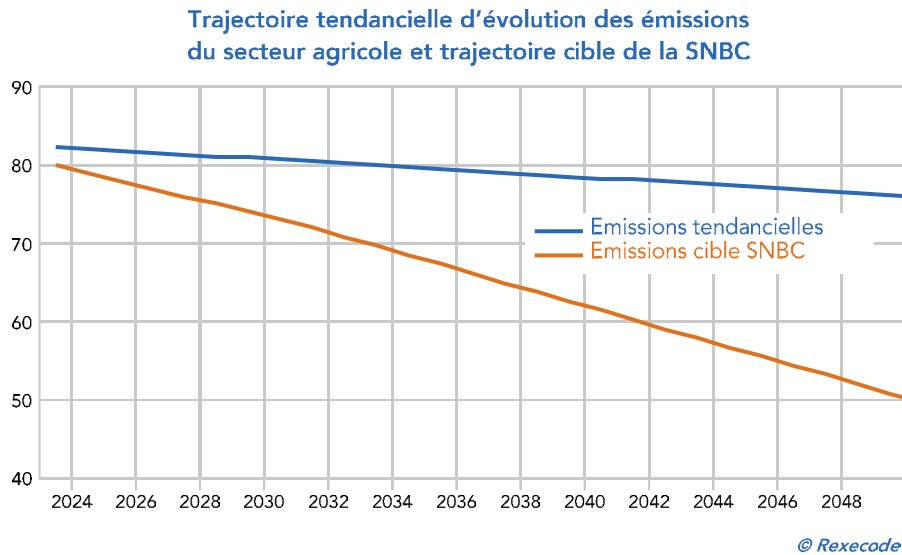
Le rapport donne pour chacun de ces leviers un potentiel associé de réduction des émissions et les différentes dépenses associées. Il n'est pas toujours possible d'isoler celles qui relèvent de dépenses d'investissement et celles qui sont d'un autre ordre. Pour certaines actions, un potentiel est atteignable par un « simple » changement de pratique, pour lequel aucune dépense d'investissement n'est nécessaire. On estime la proportion de l'effort de réduction pouvant être atteint par ce biais à environ 20 % des réductions annuelles. Pour les 80 % restants, après traitement des différentes données présentées, nous avons isolé les actions suivantes pour lesquelles on pouvait mettre en regard des dépenses d'investissements et un potentiel de réduction des émissions.

Potentiel de réduction des émissions et investissements associés pour différentes actions

Action	Potentiel d'atténuation moyen en MtCO ₂ e/an	Investissement annuel moyen pour les agriculteurs en millions d'euros /an	Dépense moyenne par tonne réduite en euros par tCO ₂ e
Réduire le recours aux engrais minéraux de synthèse, en les utilisant mieux et en valorisant plus les ressources organiques, pour réduire les émissions de N ₂ O	4,3	243	57
Développer les techniques culturales sans labour pour stocker du carbone dans le sol	3,3	39	12
Introduire davantage de cultures intermédiaires, cultures intercalaires, et bandes enherbées pour stocker du carbone dans le sol et limiter les émissions de N ₂ O	0,9	219	243
Développer l'agroforesterie et les haies pour favoriser le stockage de carbone dans le sol et la biomasse végétale	1,8	215	119
Substituer des glucides par des lipides insaturés et utiliser un additif dans les rations des ruminants pour réduire la production de CH ₄ entérique	1,6	369	238
Développer la méthanisation et installer des torchères pour réduire les émissions de CH ₄ liées au stockage des effluents d'élevage	5,4	189	35
Total	17,2	1274	74

On suppose que ces différentes actions seront mises en œuvre uniformément, avec un investissement moyen de 75 €/tCO₂, afin de réduire les émissions tendanciennes du secteur et de les ramener à la trajectoire visée par la SNBC.

Le graphique ci-dessous présente ces deux trajectoires pour le secteur agricole dans son ensemble.



On en déduit la chronique d'investissements suivante :

Investissements annuels supplémentaires dans le scénario SNBC par rapport au scénario tendanciel

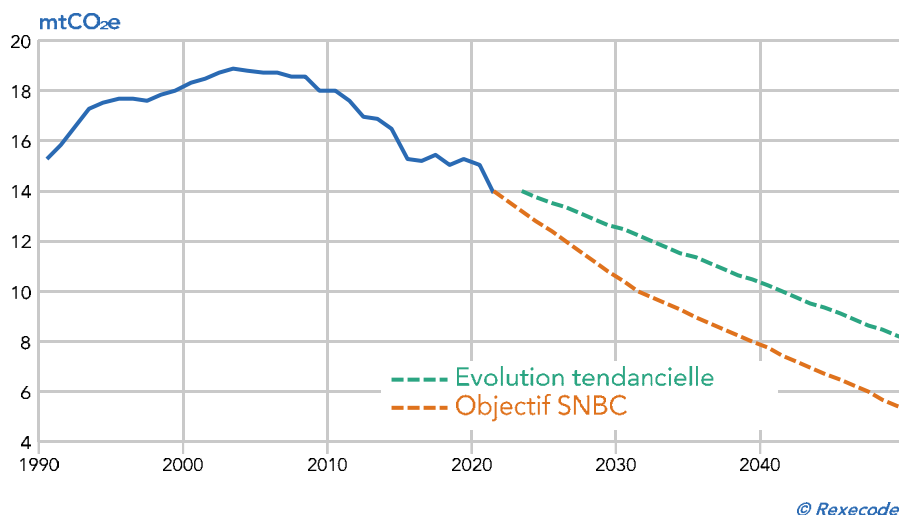
	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Agriculture	0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	1,3	1,6

6. Traitement des déchets

Bien qu'il ait des spécificités propres, ce secteur a été traité sur la même base que les émissions du secteur industriel pris dans son ensemble. Ceci permet d'obtenir un ordre de grandeur des montants à mobiliser, qui pourra être affiné sur la base d'études plus précises.

Le graphique ci-dessous rappelle l'écart entre la trajectoire tendancielle et la trajectoire cible de la SNBC pour le secteur du traitement des déchets.

Evolution tendancielle et objectif de la SNBC pour le secteur du traitement des déchets



Nos calculs conduisent à calculer les montants d'investissements nécessaires pour ramener les émissions tendancielles au niveau des émissions cibles de la SNBC, sur la base des dépenses par tonne évitée obtenue dans notre étude du secteur industriel.

On en déduit la chronique suivante :

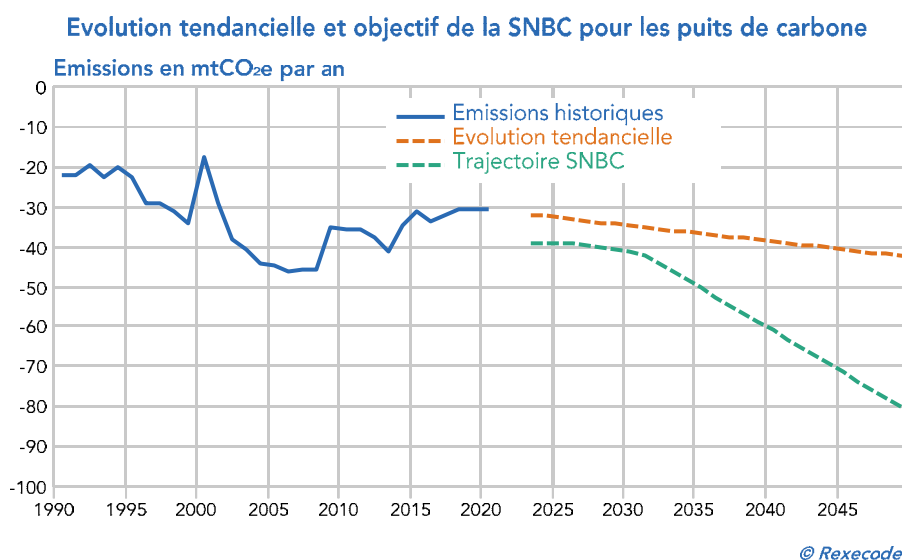
Investissements annuels supplémentaires dans le scénario SNBC par rapport au scénario tendanciel

	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Traitement des déchets	0,6	0,8	1,2	1,5	1,9	2,3	2,6

7. Développement des puits de carbone

La question du développement des puits de carbone, naturels et artificiels, a été traitée très globalement sans rentrer dans le détail des actions pouvant conduire à l'augmentation des quantités de carbone captées et stockées. Nos calculs ont été effectués sur la base d'un investissement moyen de 100 €/tCO₂e captée, qui peut représenter un ordre de grandeur des captations artificielles (capture et séquestration dans l'industrie) ou par certaines pratiques agro-forestières. Ceci permet d'obtenir un ordre de grandeur des montants à mobiliser, qui pourra être affiné sur la base d'études plus précises.

Le graphique ci-dessous rappelle l'écart entre la trajectoire tendancielle et la trajectoire cible de la SNBC pour le secteur des puits de carbone.



Nos calculs conduisent à calculer les montants d'investissements nécessaires pour ramener les émissions tendancielles au niveau des émissions cibles de la SNBC, sur la base d'une dépense de 100 €/tCO₂e captée et stockée. On en déduit la chronique suivante :

**Investissements annuels supplémentaires dans le scénario SNBC
par rapport au scénario tendanciel**

	2023	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Puits de carbone	0,7	0,6	0,7	1,4	2,2	3,1	3,9

Documents de travail récemment parus

<i>Nouvelle dégradation de la compétitivité française en 2021</i>	N° 82 - février 2022
<i>L'essor du numérique est favorable à la croissance et à la réduction de l'empreinte carbone de la France</i>	N° 81 - janvier 2022
<i>Perspectives économiques et budgétaires 2022</i>	N° 80 - octobre 2021
<i>La durée effective du travail en France et en Europe</i>	N° 79 - octobre 2021
<i>La soutenabilité de la dette publique ou le dilemme des émissions</i>	N° 78 - avril 2021
<i>Les indicateurs de compétitivité de la France reculent nettement en 2020</i>	N° 77 - mars 2021
<i>Les émissions françaises de gaz à effet de serre d'ici 2030</i>	N° 76 - janvier 2021
<i>La politique budgétaire entre sauvegarde et relance</i>	N° 75 - octobre 2020
<i>Moins de croissance trop de carbone</i>	N° 74 - juillet 2020
<i>Perspectives économiques et budgétaires pour 2020</i>	N° 73 - octobre 2019
<i>Le poids des prélèvements obligatoires en France et dans trois grands pays européens</i>	N° 72 - octobre 2019
<i>La compétitivité française en 2018</i>	N° 71 - juin 2019
<i>Perspectives 2018 - Consolider les réformes dans un environnement économique incertain</i>	N° 70 - octobre 2018
<i>L'écart de dépenses publiques entre la France et l'Allemagne - 12,6 points de PIB - 280 milliards d'euros Analyses - Explications - Propositions</i>	N° 69 - juin 2018
<i>Le poids et la structure des prélèvements obligatoires sur les entreprises industrielles</i>	N° 68 - juin 2018
<i>Perspectives de l'économie mondiale 2018-2022 - Le retour du cycle économique</i>	N° 67 - mars 2018
<i>La compétitivité en 2017</i>	N° 66 - janvier 2018
<i>Perspectives 2018 - Premières réformes structurelles dans un contexte macroéconomique favorable</i>	N° 65 - octobre 2017
<i>Les écarts de prélèvements obligatoires entre la France et la zone euro</i>	N° 64 - septembre 2017
<i>Les conséquences économiques des expatriations dues aux écarts de fiscalité entre la France et les autres pays</i>	N° 63 - juillet 2017
<i>Présidentielle 2017 Des promesses aux réalités</i>	N° 62 - mars 2017