



**Groupe de travail
« consommation d'électricité »**



**Orientations méthodologiques
pour l'horizon d'étude 2050**

Table des matières

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1 | La neutralité carbone en 2050 comme cadrage | 3 |
| 1.1 | Principaux enseignements de la Stratégie nationale bas-carbone | 3 |
| 1.1.1 | Cadrage socioéconomique du scénario..... | 3 |
| 1.1.2 | Le secteur du bâtiment..... | 4 |
| 1.1.3 | Le secteur du transport | 5 |
| 1.1.4 | Le secteur de l'industrie | 6 |
| 1.2 | Comparaison avec d'autres scénarios et analyse critique | 7 |
| 2 | Premiers éléments de méthodologie sur la construction des trajectoires | 9 |
| 2.1 | Retour sur les contributions des parties prenantes sur le long terme..... | 9 |
| 2.1.1 | Remarques générales | 9 |
| 2.1.2 | Secteur résidentiel..... | 9 |
| 2.1.3 | Secteur tertiaire..... | 10 |
| 2.1.4 | Secteur industriel | 11 |
| 2.2 | Méthodologie envisagée | 12 |

1 La neutralité carbone en 2050 comme cadrage

1.1 Principaux enseignements de la Stratégie nationale bas-carbone

La stratégie nationale bas-carbone (SNBC) décrit la feuille de route de la France pour conduire la politique d'atténuation du changement climatique. Elle donne des orientations pour mettre en œuvre la transition vers une économie bas-carbone dans tous les secteurs d'activités.

Elle définit l'ensemble des objectifs et mesure pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 dans le scénario « avec mesures supplémentaires » (AMS). En particulier elle détermine des niveaux de consommation énergétique par secteur et les orientations pour atteindre ces objectifs.

RTE présente ici les principales hypothèses sous-jacentes issues du rapport provisoire de la SNBC, qui seront reprises pour l'élaboration des scénarios de référence du Bilan prévisionnel long terme, et feront l'objet de variantes s'agissant de certains paramètres.

1.1.1 Cadrage socioéconomique du scénario

La SNBC fournit les principaux éléments de cadrage socioéconomique du scénario AMS.

Ainsi, la population évolue légèrement à la hausse dans cette trajectoire, à un rythme annuel moyen de 0,3%, selon le scénario central de l'INSEE. La population de la France métropolitaine s'élève ainsi à 72 millions en 2050.

En parallèle, la croissance du nombre de ménages est plus rapide que celle de la population en raison d'une poursuite de la diminution de la taille unitaire moyenne des ménages. Le nombre moyen de personnes par ménage se contracte ainsi sur un rythme de 0,3% par an à l'horizon 2050.

De manière centrale, le scénario SNBC suppose une activité économique qui continue de croître à un rythme similaire à aujourd'hui : la croissance du PIB est ainsi comprise entre 1,3 et 1,7% sur la période étudiée.

Le poids relatif dans le PIB français de la valeur ajoutée industrielle, en baisse tendancielle depuis plusieurs décennies, ne diminue que très légèrement dans le scénario SNBC pour atteindre 10% en 2050. Cela signifie que la valeur ajoutée industrielle croît d'ici à 2050 sur un rythme annuel moyen d'environ 1,3%. Dans une variante « réindustrialisation », la SNBC envisage également un niveau de croissance beaucoup soutenu pour la valeur ajoutée industrielle puisqu'elle représenterait alors 16% du PIB en 2050. Cela signifie que la valeur industrielle croît de 2,8 % par an environ en moyenne. L'approfondissement d'un scénario de réindustrialisation figure parmi les priorités décidées lors de la CPSR du 28 février 2020, et fera l'objet de développements ultérieurs dans le cadre de ce document et de suivants.

Enfin, les hypothèses de la SNBC tablent sur une augmentation du prix des énergies fossiles (le prix du baril de Brent dépasse durablement 100 € courants vers 2025) et des prix des quotas sur le marché européen ETS. En revanche, il n'a pas été pris en compte d'augmentation de la composante carbone des taxes énergétiques, qui reste à son niveau actuel de 44,6 €/tCO₂.

Orientations méthodologiques pour l'horizon d'étude 2050

1.1.2 Le secteur du bâtiment

Le secteur du bâtiment regroupe le secteur résidentiel et tertiaire. Il est caractérisé par une importante inertie. En effet, la construction neuve représente environ 1% du parc et, en 2050, 70% du parc pourrait être constitué de bâtiments construits avant 2012. Il est donc nécessaire pour atteindre la neutralité carbone dans ce secteur de rénover la majorité du parc existant.

Le scénario AMS fournit des éléments d'efficacité énergétique, de sobriété et de transfert de vecteur pour atteindre la neutralité carbone en 2050.

*Principales hypothèses du scénario AMS
Secteur du bâtiment*

| Secteur | Transfert de vecteur | Efficacité | Sociétal |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Général | Solutions de chauffage décarbonées : <ul style="list-style-type: none"> - pompes à chaleur - réseaux de chaleur dans les zones urbaines denses - biomasse ou gaz renouvelable, mais limité par les contraintes de gisements Électrification des usages hors chauffage (cuisson électrique) Eau chaude sanitaire : <ul style="list-style-type: none"> - chauffe-eau thermodynamique - solaire thermique | RE 2020 et prochaines réglementations thermiques <ul style="list-style-type: none"> - traitement du confort d'été - climatisation : PAC double usage - éclairage : LED - directives écoconception UE (gain de consommation unitaire de 15 à 60%) - mitigeur efficace - système de gestion intelligent sur certains usages | <ul style="list-style-type: none"> - Température de chauffage abaissée de 1°C (changement volontaire, individualisation des frais de chauffage...) - « comportements individuels vertueux » - « Recours accru à la sobriété » |
| Résidentiel | | <ul style="list-style-type: none"> - Au moins 370 000 rénovations complètes équivalentes par an à partir de 2022 - 700 000 rénovations complètes équivalentes par an sur 2030-2050 - Objectif : niveau BBC équivalent en moyenne sur l'ensemble du parc en 2050 | <ul style="list-style-type: none"> - Diminution des constructions neuves : 324 000 en 2016 ; 204 000 en 2050 - Augmentation de la part des logements collectifs dans les constructions neuves : 61% en 2015 ; 75% en 2050 |
| Tertiaire | | <ul style="list-style-type: none"> - Rénovation de 3% du parc par an en moyenne d'ici 2050 - « rénovation profonde du parc public » | <ul style="list-style-type: none"> - Diminution de la construction neuve : 10 Mm² en 2015 ; 7 Mm² en 2050 - Rationalisation des surfaces par les entreprises |

La trajectoire de référence retiendra ces orientations, et sera complétée d'un grand nombre de variantes examinant les effets d'évolutions contrastées en matière d'efficacité énergétique, de sobriété, de transferts d'usage.

En complément, pour approfondir ces travaux, l'ADEME et RTE ont convenu de réaliser une analyse sur les enjeux environnementaux et économiques liés à la part électrique du chauffage dans les bâtiments neufs et les rénovations afin de répondre de façon quantifiée aux questions soulevées par une éventuelle électrification du chauffage. Le rapport de cette étude fera très prochainement l'objet d'une publication.

Orientations méthodologiques pour l'horizon d'étude 2050

1.1.3 Le secteur du transport

Le secteur des transports regroupe le transport de personne et de marchandise. Il doit subir un changement en profondeur pour atteindre la neutralité carbone en 2050. Le scénario AMS utilise cinq principaux leviers pour décarboner ce secteur : l'utilisation de vecteurs neutres en carbone (électricité, hydrogène, biocarburants, biogaz), la performance énergétique des véhicules, la maîtrise de la croissance de la demande, le report modal et l'optimisation de l'utilisation des véhicules.

*Principales hypothèses du scénario AMS
Secteur du transport*

| Secteur | Transfert de vecteur | Efficacité | Sociétal |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Général | Décarbonation : - motorisation électrique - biocarburants - biogaz - hydrogène | | - Maîtrise de la croissance de la demande de mobilité (+26% pour le transport de voyageurs d'ici 2050) - Report modal : mobilité active, transports collectifs et transports « massifiés » - Optimisation de l'utilisation des véhicules (le taux d'occupation moyen des voitures passe de 1,63 aujourd'hui à 1,88 en 2050) |
| Véhicules particuliers | Électrification : multiplication par cinq des ventes d'ici 2022 - en 2030 : VE = 35% des ventes et VHR = 11% - en 2040 : 100% des ventes de véhicules sans émission de GES | - 4 l/100 km pour les véhicules thermiques en 2030 - 12,5 kWh/100 km pour les VE en 2050 (-40% par rapport à 2018) | - Développement du télétravail - Limitation de l'étalement urbain - Part modale du vélo multipliée par 4 dès 2030 - Transport collectif : + 7% d'ici 2050 - Hausse des mobilités partagées et du covoiturage - Trafic de voyageurs : + 12%, trafic de véhicules : -2% |
| Transport de marchandises | Un mix plus équilibré : - gaz renouvelable, y compris hydrogène - électricité - biocarburants | - Gains d'efficacité sur la consommation unitaire de 35 à 40% d'ici 2050 pour les poids lourds | - Fret = +40% entre 2015 et 2050 - Développement de l'économie circulaire et des circuits courts - Développement du fret ferroviaire et fluvial (avec une part modale stable) - Taux de chargement des poids lourds : de 9,8 à 12 t/véhicule - Croissance du trafic des poids lourds contenue à 12% |
| Avions | - 50% de biocarburants en 2050 | | |
| Maritime et fluvial | - 100% décarboné pour les transports domestiques - 50% décarboné pour les soutes internationales | | |

Orientations méthodologiques pour l'horizon d'étude 2050

1.1.4 Le secteur de l'industrie

La consommation d'énergie du secteur de l'industrie est aussi entièrement décarbonée dans le scénario AMS. Cette décarbonation passe par une très forte électrification des procédés et une stabilité de la production des industries grandes consommatrices d'énergie. Le scénario AMS repose aussi sur une consommation de biens plus durable.

*Principales hypothèses du scénario AMS
Secteur de l'industrie*

| Secteur | Transfert de vecteur | Efficacité | Sociétal |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Général | Consommation énergétique : - 70% électrique - 30% assuré par de la biomasse solide, du gaz renouvelable et des biocarburants - Valorisation de chaleur fatale (15 TWh) Consommations non énergétiques : - hydrogène décarboné par électrolyse ou des ressources en biomasse | - Produits à durée de vie plus longue, plus faciles à réparer, qui utilisent des matériaux nécessitant moins d'énergie à produire - Gain d'efficacité énergétique de 20 à 40% entre 2015 et 2050 en fonction des potentiels des filières | - Consommation plus durable de la part des citoyens - Augmentation de l'activité de recyclage - Augmentation de l'économie circulaire - Hausse de l'activité industrielle nationale importante malgré une légère tertiarisation de l'économie - Bio-économie : bois dans la construction, chimie biosourcée - Mise en place de mécanismes de protection aux frontières [UE] pour assurer un standard sur l'empreinte carbone |
| Industries grandes consommatrices d'énergie | | - Diminution des émissions non énergétiques de certains procédés industriels | - Baisse du besoin par habitant |
| Industrie diffuse | | | - Augmentation du besoin par habitant |

1.2 Comparaison avec d'autres scénarios et analyse critique

Cette partie propose une comparaison, en matière de consommations d'énergie d'une part et d'électricité d'autre part, de la Stratégie nationale bas-carbone, dont les objectifs sont présentés dans le scénario AMS, et d'autres scénarios prospectifs à l'horizon 2050, dont la publication a pu être antérieure à celle de la SNBC ou non.

Les scénarios considérés dans cette comparaison sont les suivants :

- L'actualisation du scénario énergie-climat ADEME 2035-2050¹
- Le scénario négaWatt 2017-2050²
- L'étude « ZEN 2050 – Imaginer et construire une France neutre en carbone »³ réalisée par le collectif « Entreprises pour l'environnement »
- Le scénario Négatep 2017-2050⁴

Une réduction des consommations d'énergie finale est envisagée dans l'ensemble des scénarios, de façon plus prononcée pour négaWatt, et moins marquée pour Négatep. En revanche, des différences subsistent pour ce qui est de la répartition sectorielle : la part de l'industrie est par exemple plus importante dans la SNBC, la vision de l'ADEME et le scénario Négatep que dans l'étude ZEN ou le scénario négaWatt.

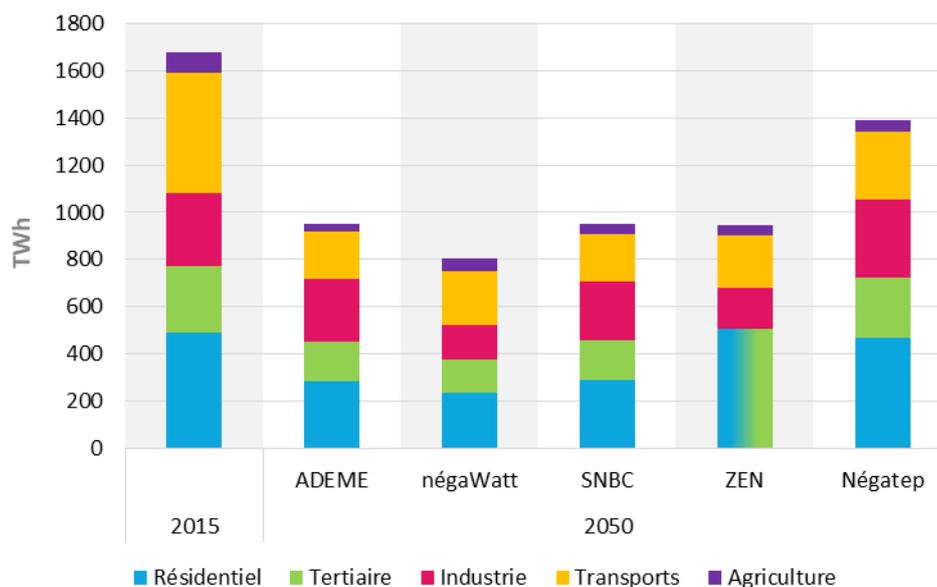


Figure 1 : Consommation sectorielle d'énergie finale en 2015 et 2050 selon différents scénarios prospectifs

Par ailleurs, en comparaison des autres scénarios, la SNBC et le scénario Négatep envisagent un recours plus accru à l'électricité et une consommation de gaz nettement plus faible que celle des autres scénarios considérés.

¹ https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademe_visions2035-50_010305.pdf - octobre 2017

² <https://neqawatt.org/Scenario-neqaWatt-2017-2050> - janvier 2017

³ <http://www.epe-asso.org/zen-2050-imaginer-et-construire-une-france-neutre-en-carbone-mai-2019/> - mai 2019

⁴ http://www.sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf_files/climat-energie/Neqatep_V-2017.pdf - août 2017

Orientations méthodologiques pour l'horizon d'étude 2050

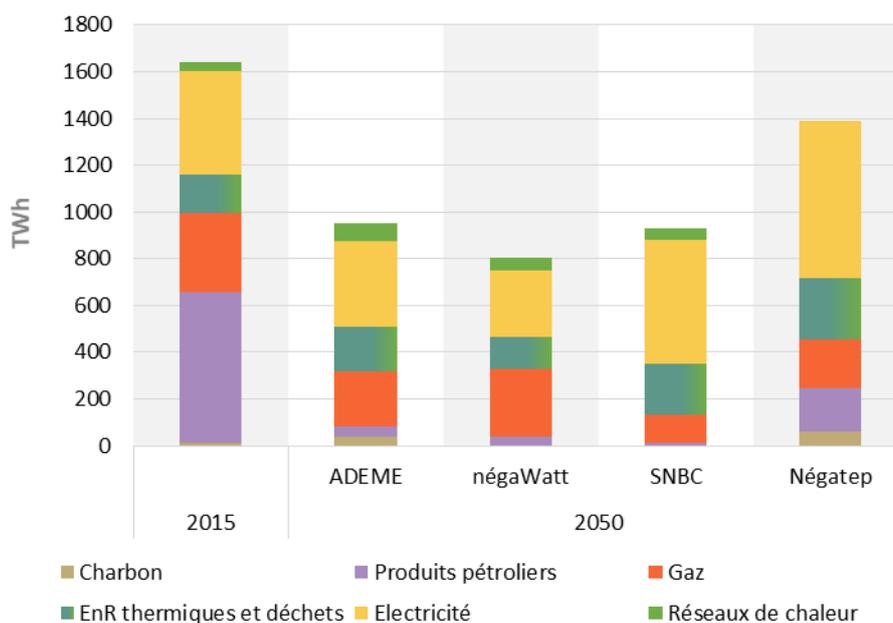


Figure 2 : Consommation finale d'énergie par vecteur énergétique en 2015 et 2050 selon différents scénarios prospectifs

L'électrification de la SNBC est majoritairement portée par les secteurs de l'industrie et du transport. On notera toutefois que malgré la baisse des besoins en énergie finale des secteurs résidentiel et tertiaire, leur consommation d'électricité reste importante en raison de l'électrification de certains usages, notamment le chauffage ou la cuisson.

Enfin, d'importants écarts apparaissent en ce qui concerne la production d'hydrogène par voie électrolytique (*power-to-gas*) : alors que la SNBC envisage un volume de 50 TWh d'électricité nécessaire pour la production d'hydrogène en 2050, le scénario négaWatt en présente 180 TWh et l'ADEME environ 20 TWh.

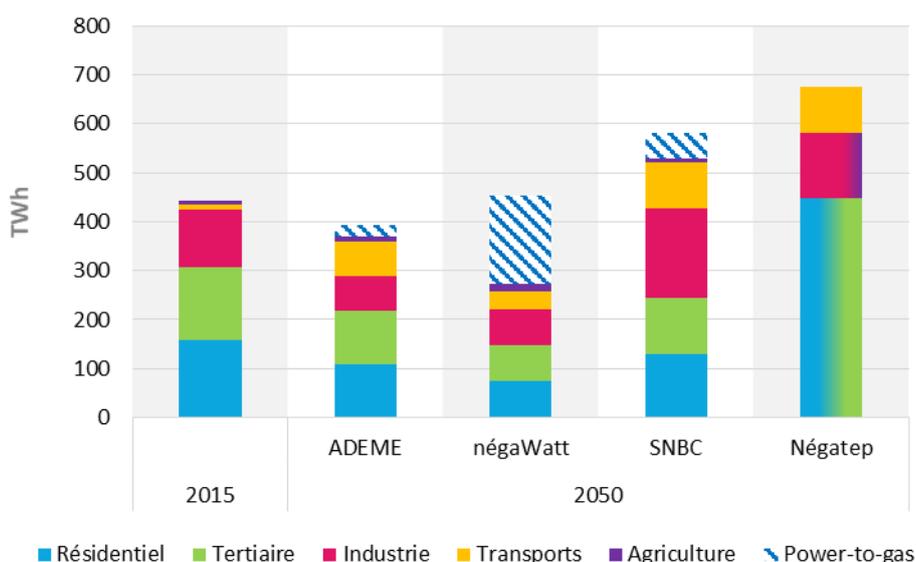


Figure 3 : Consommation sectorielle d'électricité (hors pertes) en 2015 et 2050 selon différents scénarios prospectifs

2 Premiers éléments de méthodologie sur la construction des trajectoires

2.1 Retour sur les contributions des parties prenantes sur le long terme

Au-delà de la concertation sur la modélisation et les jeux d'hypothèses utilisés dans le cadre de l'élaboration du Bilan prévisionnel, les appels à contributions, lancés à l'issue des différentes réunions sectorielles du groupe de travail sur la consommation, sollicitaient les parties prenantes sur l'approche méthodologique et sur les orientations (par usage et secteur) à retenir pour l'établissement de trajectoires de consommation à très long terme, à savoir l'horizon 2050.

Les principaux retours des acteurs sont résumés ci-après.

2.1.1 Remarques générales

D'un point de vue très général, les préconisations suivantes émergent.

Ainsi, la prise en compte du **changement climatique** doit être intégrée dans la modélisation, tant en matière de baisse potentielle des besoins de chauffage que d'augmentation possible des besoins de climatisation. Au-delà des besoins unitaires de chaleur et de rafraîchissement, le changement climatique est de nature à affecter les choix d'équipement des ménages et des entreprises : le taux de logements ou de mètres carrés de bâtiments tertiaires recourant à la climatisation pourrait croître d'autant plus fortement que les effets du changement climatique seraient importants.

Une autre préconisation, plusieurs fois soulignée par les acteurs, est de **contraster fortement les scénarios** compte tenu des incertitudes qui règnent à un horizon aussi lointain que 2050. Ainsi, l'atteinte ou non du potentiel technique maximum, en tenant compte de la pertinence entre les coûts liés à l'amélioration de la performance des équipements et les gains d'efficacité, pourra faire partie des facteurs de nature à introduire du contraste entre les trajectoires.

La question de l'intégration ou non des **ruptures technologiques** a également été soulevée par les acteurs. Ces ruptures, par nature non prévisibles, ne peuvent toutefois être ni affectées à un usage, ni quantifiées précisément. Une approche basée sur un effet global plus ou moins marqué des ruptures technologiques sera donc nécessaire.

2.1.2 Secteur résidentiel

Pour les usages thermiques, **chauffage** et **climatisation**, comme cela l'a été déjà évoqué dans les remarques générales, la prise en compte des effets potentiels du réchauffement climatique doivent être pris en compte, tant en matière d'évolution du besoin thermique que d'équipement des ménages.

L'évolution des **technologies de l'information et de la communication (TIC)** est empreinte, selon l'ensemble des parties prenantes, d'une incertitude particulièrement marquée, s'agissant d'usages en mutation très rapide.

Certains acteurs invitent en conséquence à rester prudent sur les gains d'efficacité et la baisse de consommation de ce poste.

A l'opposé, d'autres acteurs estiment que la persistance dans les logements de gros appareils (de type ordinateurs fixes) et même d'ordinateurs portables est peu crédible, avec l'apparition déjà perceptible d'usages informatiques nomades, hautement miniaturisés et dématérialisés. La consommation de ce poste aurait ainsi toutes les chances de s'approcher de zéro dans les logements. De même, la consommation des équipements audiovisuels pourrait très fortement décroître.

Ces deux visions relativement opposées plaident donc pour des hypothèses largement contrastées sur ce poste de consommation.

Pour les **équipements électroménagers**, les acteurs soulignent que deux tendances à très long terme sont possibles :

- des améliorations de performance qui pourraient s'infléchir et finir par stagner, une fois que la nouvelle étiquette énergie sera à bout de souffle et que les améliorations supplémentaires représenteront un gain énergétique incrémental de plus en plus faible ;
- l'apparition de ruptures technologiques, comme le froid magnétique, les gels réfrigérants, etc., dans le cas du froid domestique, qui pourraient transformer radicalement les appareils.

Dans ce cas également, une approche avec des jeux d'hypothèses contrastés semble incontournable, pour capter les incertitudes de long terme.

En matière d'**éclairage**, tous les acteurs s'accordent sur une poursuite de l'amélioration de l'efficacité des LED. Un acteur souligne toutefois que le potentiel maximum de performance des LED ne devrait pas être atteint car le rapport « coûts/gains d'efficacité » ne sera plus pertinent pour ces niveaux.

Enfin, les acteurs soulignent la nécessité d'ajouter un volume de consommation lié à l'apparition de **nouveaux appareils** encore inconnus.

2.1.3 Secteur tertiaire

Les acteurs appellent globalement à bien prendre en compte, s'agissant de prévision à horizon très éloigné, des variables d'évolution de long terme de la société française susceptibles de peser sur l'évolution de l'**activité de services**, tels que :

- la démographie et, en particulier, le vieillissement de la population, qui appellent des besoins nouveaux dans certains secteurs tertiaires (habitat communautaire) et des évolutions de la consommation des ménages (avec des incidences sur les dynamiques de secteurs comme le commerce ou les hôtels-café-restaurants) ;
- l'évolution de la structure du PIB, avec en corollaire un impact sur le nombre d'employés dans les différents sous-secteurs tertiaires ;
- les logiques d'aménagement du territoire, qui auront un impact sur la localisation du parc, sur les besoins de construction neuve, ou, au contraire, de rénovation / densification, dans une logique de lutte contre l'artificialisation des sols ;
- l'évolution des formes de travail et d'emploi, qui auront un impact sur la forme des lieux de travail (surface par personne, types de services mis à disposition...).

Ces éléments sont déjà pris en compte dans les trajectoires à l'horizon 2035. Toutefois, des analyses sur des horizons plus lointains exigeront de renforcer le contraste entre les différents jeux d'hypothèses.

Les facteurs, évoqués par les acteurs, à prendre en compte concernant l'évolution des usages sont sensiblement les mêmes que dans le secteur résidentiel, notamment :

- la prise en compte des effets potentiels du réchauffement climatique, tant en matière d'évolution du besoin thermique surfacique que du taux de surfaces climatisées ;
- les évolutions réglementaires, susceptibles d'enclencher une dynamique de rénovation sur le long terme, à la fois dans le tertiaire public et le tertiaire privé.
- la pénétration du numérique, et notamment la prise en compte de la consommation énergétique liée au transfert de données numériques, qui dépendent de la localisation des data centers ;
- et d'une façon plus générale, l'intégration ou non des ruptures technologiques, et l'atteinte ou non du potentiel technique maximum.

2.1.4 Secteur industriel

La modélisation actuelle du secteur industriel, telle qu'utilisée dans le Bilan prévisionnel 2017, a été globalement jugée bien adaptée pour l'horizon 2035 par les parties prenantes. Ils soulignent toutefois la nécessité d'amender la méthode sur les points suivants.

Pour l'évaluation de l'activité productrice des entreprises, l'approche par tableau « entrées-sorties » simplifiée a été jugée pertinente pour bien prendre en compte l'interdépendance des différentes branches industrielles (la production de certaines branches peut constituer en effet un débouché pour d'autres branches produisant des biens intermédiaires).

Certains acteurs suggèrent toutefois d'adopter, à un horizon aussi lointain que 2050, une approche physique des flux basée sur une analyse de la demande : en d'autres termes, de projeter les tonnes d'acier, de verre, de matières plastiques, de papier, etc., nécessaires pour répondre à la demande en matériaux. Cette dernière pourra être affectée par des évolutions sociétales conduisant à plus de sobriété et liées à l'économie circulaire : réduction pour les objets inutiles, réutilisation notamment pour les emballages via la consigne mais aussi avec le développement des ressourceries⁵ et des sites de vente d'occasion, réparation encouragée par des législations contre l'obsolescence programmée, mutualisation de certains produits, taux de recyclage des biens et taux d'incorporation de matières issues du recyclage dans la production de matériaux.

Par ailleurs, la nécessité de renforcer le contraste sur les scénarios de production industrielle a été soulignée, au vu des incertitudes fortes à l'horizon 2050.

Ce contraste pourra notamment passer par une variante de réindustrialisation de la France, comme cela est évoqué dans la SNBC. A noter que, compte tenu de l'actualité récente, ce phénomène de relocalisation de l'activité industrielle sur le territoire national pourrait être catalysé à terme par les retombées de la crise du coronavirus, qui a mis en avant le fait que certaines productions stratégiques ne se faisaient plus en France.

Concernant la consommation d'électricité pour l'activité productrice, les parties prenantes jugent pertinente l'approche consistant à décomposer son évolution entre un effet baissier de l'amélioration de l'efficacité énergétique d'une part, et un effet haussier lié à l'électrification de certains procédés, soit via des substitutions à des combustibles fossiles, soit via l'ajout de traitements électriques (motorisation plus poussée par exemple).

⁵ Structures qui gèrent la récupération, la valorisation et la revente de biens sur un territoire donné

La fourchette de gisement d'**efficacité énergétique** à l'horizon 2035 a fait l'objet de discussions au cours des premiers groupes de travail. Cela plaide encore une fois pour l'introduction d'un contraste plus marqué sur les jeux d'hypothèses.

L'**électrification des procédés** est jugée par certains, à l'instar de la SNBC, comme le levier principal pour décarboner le secteur de l'industrie, qui juge qu'une approche basée uniquement sur les tendances historiques ne semble pas suffisante pour atteindre les niveaux de décarbonation souhaitée par la stratégie nationale à 2050 (il convient de préciser que la plupart des trajectoires du Bilan prévisionnel 2017 intégraient des hypothèses d'électrification sensiblement supérieures aux tendances historiques).

Ces acteurs incitent à exploiter l'étude CEREN sur l'électrification des procédés thermiques qui permet de couvrir une part importante des consommations de combustible de l'industrie et des émissions de CO₂ énergétiques de l'industrie. L'exploitation de cette étude permet non seulement d'estimer le potentiel technique accessible par des technologies électriques matures mais aussi d'identifier les usages nécessitant le développement de technologies de rupture pour réduire les émissions résiduelles.

Enfin, d'autres soulignent la nécessité que les trajectoires de consommation intègrent bien en amont de 2050 la nécessité d'électrifier les procédés pour espérer atteindre l'objectif de neutralité carbone de la SNBC, l'impact de la dynamique temporelle étant jugée cruciale dans le potentiel d'électrification et donc de décarbonation.

2.2 Méthodologie envisagée

Comme cela a été évoqué lors de la réunion plénière de la Commission « Perspectives du système et du réseau » (CPSR) du 28 février 2020, les prochains scénarios de long terme seront articulés autour de l'objectif de neutralité carbone en 2050 et des trajectoires de la SNBC.

Une trajectoire basée sur les orientations de la SNBC sera donc élaborée, en retenant tous les objectifs et hypothèses quantifiés (ex : cadrage socioéconomique, nombre de rénovations, production physique des principales branches industrielles, parts modales du transport et trafic, etc.) du scénario AMS, publiés dans les publications de la SNBC.

Les autres hypothèses granulaires non détaillées dans le rapport d'accompagnement de la SNBC s'appuieront sur les contributions des parties prenantes, reçues à l'issue des consultations des réunions précédentes du groupe de travail, en visant à conserver la philosophie générale du scénario AMS. La trajectoire résultante devrait donc être relativement proche du scénario AMS, sans être toutefois parfaitement identique.

Par ailleurs, des **variantes** seront également élaborées, permettant de capter le cône d'incertitude, particulièrement large à un horizon aussi lointain, et de mesurer la résilience du système électrique à des niveaux et structures de consommation pouvant être sensiblement différents si, par exemple, l'amélioration de l'efficacité énergétique, la sobriété ou les transferts d'usage venaient à ne pas suivre pas la dynamique attendue dans la trajectoire AMS.

Afin de rendre les rendre comparables et de répondre à un souhait récurrent des parties prenantes, les scénarios du futur Bilan prévisionnel reposeront sur **un cadrage macroéconomique commun**. Des variantes pourront néanmoins analyser la sensibilité du paysage énergétique décrit à certains paramètres socioéconomiques, tels que la démographie ou l'activité économique.

Comme cela a également été annoncé lors de la séance de la CPSR évoquée précédemment, les scénarios seront présentés sous la forme de **trajectoires annuelles** et ne se limiteront donc pas uniquement au seul point d'arrivée, à savoir l'année 2050. Cela permettra l'identification des chemins possibles pour atteindre la neutralité carbone ainsi que la mise en évidence des jalons de décision et de la valeur d'option des différentes technologies.

Afin de pouvoir élaborer des trajectoires annuelles de consommation d'électricité basées sur des jeux d'hypothèses cohérents et réalistes, il apparaît nécessaire de conserver une **approche analytique** par secteurs et par usages, en reconstituant pour chaque année de l'horizon prévisionnel la consommation intérieure électrique par empilement (approche *bottom-up*).

Cette approche analytique requiert un nombre particulièrement important de paramètres de calcul, largement présentés dans les documents d'appel à contributions diffusés lors des quatre premières réunions du groupe de travail « Consommation ».

Afin de pouvoir gérer globalement et de façon cohérente ces centaines de paramètres, la méthodologie proposée va consister à les « piloter » avec des **variables de commande** représentant les incertitudes majeures sur la consommation d'électricité.

Il est proposé de retenir sept variables de commande, dont la plupart ont été évoquées dans le groupe de travail « Scénarisation » :

- l'activité économique ;
- la relocalisation de l'industrie en France ;
- la démographie ;
- l'efficacité énergétique ;
- la sobriété ;
- les transferts d'usage et l'électrification ;
- le réchauffement climatique.

Il convient de préciser certaines définitions.

Par « efficacité énergétique », on entend une amélioration des procédés, technologies et produits pour réduire leur consommation énergétique et augmenter leur rendement. Il s'agit d'atteindre au moins le même résultat en consommant moins d'énergie.

La notion de « sobriété » se traduit également par un effet baissier sur les consommations énergétiques, mais au travers de changements d'ordre comportemental et/ou sociétal.

Ainsi, l'efficacité énergétique pourrait se traduire par une baisse de la consommation kilométrique des véhicules particuliers, et la sobriété pour affecter l'usage de ces véhicules (moins de kilomètres parcourus) voire la taille du parc de véhicules.

Bien évidemment, ces variables de commande ne sont pas entièrement indépendantes les unes des autres (la croissance démographique est par exemple une composante de la croissance économique), et certaines combinaisons peu probables devront être écartées (ex : une très forte sobriété combinée avec une efficacité énergétique peu poussée).

Les tableaux des pages suivantes dressent un tableau des liens de dépendance des différents paramètres de la méthode analytiques aux variables de commandes listées précédemment.

Afin de ne pas rendre inutilement trop complexe la modélisation, seuls les liens de premier ordre ont été retenus. Certains liens existants mais dont l'effet est moindre ne sont pas intégrés dans la modélisation, comme l'effet de la croissance économique sur le taux d'équipement des ménages (via le revenu des ménages) : cet effet est assez ténu et difficile à capter dans les historiques, il l'est a fortiori davantage projeté à un horizon aussi lointain.

Par ailleurs, un paramètre du calcul analytique pouvant être affecté par deux, voire trois variables de commandes (par exemple, la consommation unitaire annuelle d'un appareil électroménager peut être affectée par l'efficacité énergétique et par la sobriété), il paraît judicieux d'adopter une approche indicelle pour quantifier l'effet de chaque variable de commande concernée.

Orientations méthodologiques pour l'horizon d'étude 2050

Pilotage des paramètres par des variables de commande
Secteur résidentiel

Relocalisation

PIB

Démographie

Efficacité
énergétique

Sobriété

Transferts
électrificationRéchauffement
climatique

| Données de parc | | | | | | | |
|---------------------------------------------|--|--|--|---|--|---|--|
| Population | | | | ● | | | |
| Taille des ménages | | | | | | ● | |
| Flux net dans l'existant | | | | | | ● | |
| Part des maisons individuelles dans le neuf | | | | | | ● | |

| Chauffage | | | | | | | |
|----------------------------------------------------|--|--|--|--|---|---|---|
| Part de l'électricité dans le neuf | | | | | | | ● |
| % PAC en logements neufs chauffés élec. | | | | | ● | | |
| Transferts combustibles vers élec. dans l'existant | | | | | | | ● |
| Transferts Joule vers PAC dans l'existant | | | | | ● | | ● |
| Nombre de rénovations | | | | | ● | | |
| Gain unitaire par rénovation | | | | | ● | | |
| Répartition par types de PAC | | | | | ● | | |
| COP PAC neuves | | | | | ● | | |
| Température de confort | | | | | | ● | |
| Effet réchauffement climatique | | | | | | | ● |

| Eau chaude sanitaire | | | | | | | |
|--------------------------------------------|--|--|--|--|---|---|---|
| Part électricité dans le neuf | | | | | | | ● |
| Part Joule / PAC CET dans le neuf | | | | | ● | | |
| Transfert vers électricité dans l'existant | | | | | | | ● |
| Part Joule / PAC CET dans l'existant | | | | | ● | | |
| Besoin ECS par ménage | | | | | | ● | |
| Pertes statiques | | | | | ● | | |
| COP CET | | | | | ● | | |

| Froid domestique | | | | | | | |
|-----------------------------------------|--|--|--|--|---|---|--|
| Taux d'équipement | | | | | | ● | |
| Type d'équipement (simple/combiné, ...) | | | | | | ● | |
| Durée de vie des appareils | | | | | | ● | |
| Consommation unitaire | | | | | ● | ● | |

| Lavage | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------|--|--|--|--|--|---|--|
| Taux d'équipement | | | | | | ● | |
| Type d'équipement (séchant ou non, condensation...) | | | | | | ● | |
| Durée de vie des appareils | | | | | | ● | |

Orientations méthodologiques pour l'horizon d'étude 2050

| | | | | | | | |
|-----------------------|--|--|--|---|---|--|--|
| Consommation unitaire | | | | ● | ● | | |
|-----------------------|--|--|--|---|---|--|--|

Pilotage des paramètres par des variables de commande
Secteur résidentiel (suite et fin)

Relocalisation

PIB

Démographie

Efficacité
énergétique

Sobriété

Transferts
électrificationRéchauffement
climatique

| TIC | | | | | | | |
|-----------------------|--|--|--|---|---|--|--|
| Taux d'équipement | | | | | ● | | |
| Consommation unitaire | | | | ● | ● | | |

| Cuisson | | | | | | | |
|----------------------------|--|--|--|---|---|---|--|
| Taux d'équipement | | | | | ● | | |
| Part de marché électricité | | | | | | ● | |
| Consommation unitaire | | | | ● | ● | | |

| Eclairage | | | | | | | |
|------------------------------|--|--|--|---|---|--|--|
| Nombre de sources lumineuses | | | | | ● | | |
| Répartition des ventes | | | | ● | | | |
| Puissance des sources | | | | ● | | | |
| Durée de fonctionnement | | | | | ● | | |

| Climatisation-VMC | | | | | | | |
|-------------------------------------|--|--|--|---|---|--|---|
| Taux de climatisation | | | | | ● | | ● |
| Puissance VMC | | | | ● | | | |
| Consommation unitaire climatisation | | | | ● | ● | | ● |

Orientations méthodologiques pour l'horizon d'étude 2050

Pilotage des paramètres par des variables de commande
Secteur tertiaire

| | Relocalisation | PIB | Démographie | Efficacité énergétique | Sobriété | Transferts électrification | Réchauffement climatique |
|-----------------------------------------------|----------------|-----|-------------|------------------------|----------|----------------------------|--------------------------|
| Données de parc | | | | | | | |
| Taux de chômage | | ● | | | | | |
| Population active | | | ● | | | | |
| Croissance de l'emploi par branche | | ● | | | | | |
| Surface par emploi | | | | | ● | | |
| Flux net dans l'existant | | | | | ● | | |
| Rénovation | | | | ● | | | |
| Chauffage | | | | | | | |
| Part du chauffage électrique dans le neuf | | | | | | ● | |
| Transfert combustible vers électricité | | | | | | ● | |
| Consommation unitaire de chauffage | | | | ● | ● | | ● |
| Taux de PAC dans le neuf | | | | ● | | | |
| Flux de PAC dans l'existant | | | | ● | | | |
| Besoin thermique dans le neuf | | | | ● | | | |
| Efficacité des rénovations | | | | ● | | | |
| Climatisation | | | | | | | |
| Installation de climatisation dans l'existant | | | | | | ● | ● |
| Part des surfaces climatisées dans le neuf | | | | | | ● | ● |
| Consommation unitaire de la climatisation | | | | ● | ● | | ● |
| Taux d'équipement en PAC air/air | | | | ● | | ● | ● |
| Eau chaude sanitaire | | | | | | | |
| Consommation unitaire | | | | ● | ● | | |
| Part de l'électricité dans le neuf | | | | | | ● | |
| Part des chauffe-eau thermodynamiques | | | | ● | | | |
| Cuisson | | | | | | | |
| Consommation unitaire | | | | ● | ● | | |
| Part de l'électricité | | | | | | ● | |

Orientations méthodologiques pour l'horizon d'étude 2050

Pilotage des paramètres par des variables de commande
Secteur tertiaire (suite et fin)

| | Relocalisation | PIB | Démographie | Efficacité énergétique | Sobriété | Transferts électrification | Réchauffement climatique |
|--------------------------------------------|----------------|-----|-------------|------------------------|----------|----------------------------|--------------------------|
| Froid | | | | | | | |
| Consommation unitaire | | | | ● | ● | | |
| Nouveaux usages | | | | | | ● | |
| Éclairage | | | | | | | |
| Pénétration des LED | | | | ● | | | |
| Gestion/pilotage | | | | ● | | | |
| Consommation unitaire | | | | ● | ● | | |
| Spécifique | | | | | | | |
| Consommation unitaire | | | | ● | ● | | |
| Nouveaux usages | | | | | ● | | |
| Data centers | | | | | | | |
| Consommation unitaire | | | | ● | ● | | |
| Coefficient d'efficacité énergétique (PUE) | | | | ● | | | |
| Nombre de data centers | | | | | ● | | |
| Télécommunications | | | | | | | |
| Efficacité énergétique | | | | ● | ● | | |
| Nouveaux usages | | | | | ● | | |
| Autres hors bâti | | | | | | | |
| Assainissement et gestion des déchets | | | ● | ● | | | |
| Bâtiments, construction, génie civil | | ● | | | | | |
| Gestion d'immeuble | | | | ● | ● | | |

Pilotage des paramètres par des variables de commande
Secteur industriel

| | Relocalisation | PIB | Démographie | Efficacité énergétique | Sobriété | Transferts électrification | Réchauffement climatique |
|---------------------------------------------|----------------|-----|-------------|------------------------|----------|----------------------------|--------------------------|
| Production en volume par NCE | | | | | | | |
| Besoins en matériels | | ● | ● | | ● | | |
| Niveau de l'activité industrielle en France | ● | ● | | | | | |
| Efficacité énergétique | | | | | | | |
| Procédés transverses | | | | ● | | | |
| Procédés thermiques | | | | ● | | | |
| Electrification | | | | | | | |
| Accroissement des techniques électriques | | | | | ● | | |
| Conversion de procédés à l'électricité | | | | | ● | ● | |

Orientations méthodologiques pour l'horizon d'étude 2050

Pilotage des paramètres par des variables de commande
Secteur des transports

Relocalisation

PIB

Démographie

Efficacité
énergétique

Sobriété

Transferts
électrificationRéchauffement
climatique

| Trafic passagers | | | | | | | |
|----------------------------------------|--|--|---|--|---|---|--|
| Population | | | ● | | | | |
| Besoin annuel de mobilité par personne | | | | | ● | | |
| Parts modales passagers | | | | | ● | ● | |

| Trafic marchandises | | | | | | | |
|--------------------------------------------------|---|---|--|--|---|---|--|
| Croissance économique | | ● | | | | | |
| Gain lié à l'économie circulaire/circuits courts | ● | | | | ● | | |
| Parts modales marchandises | | | | | ● | ● | |

| Consommations unitaires | | | | | | | |
|-------------------------------------|--|--|--|---|--|---|--|
| Transport ferré interurbain | | | | ● | | | |
| Transport ferré urbain | | | | ● | | | |
| Transport fluvial, maritime, côtier | | | | ● | | | |
| Branchements à quai | | | | | | ● | |
| Transport aérien | | | | ● | | | |

| Véhicules légers | | | | | | | |
|---------------------------------------------------|--|---|--|---|---|---|--|
| Taux d'occupation des véhicules particuliers | | | | | ● | | |
| Kilométrage annuel moyen - véhicules particuliers | | | | | ● | | |
| Trafic véhicules utilitaires légers (VUL) | | ● | | | | | |
| Kilométrage annuel moyen - VUL | | | | | ● | | |
| Part de marché des VE-VHR dans les ventes | | | | | | ● | |
| Consommation kilométrique | | | | ● | | | |

| Autobus | | | | | | | |
|---------------------------------|--|--|---|--|--|---|--|
| Flotte de bus/autocars | | | ● | | | | |
| Part de marché de l'électricité | | | | | | ● | |

| Poids lourds | | | | | | | |
|---------------------------------|--|---|--|--|---|---|--|
| Parc de poids lourds | | ● | | | ● | | |
| Part de marché de l'électricité | | | | | | ● | |

Par ailleurs, la modélisation des équipements ménagers (produits blancs, bruns et gris, éclairage...) est réalisée par le biais de **modèles de parc** permettant de simuler de façon réaliste la diffusion du progrès technique via les ventes, représenté au travers des différentes classes d'efficacité énergétique existante et à venir.

Cette approche est pertinente sur des horizons de 10 à 15 ans, pour lesquels une certaine visibilité est offerte sur les évolutions à venir des classes d'efficacité énergétique. A un horizon de beaucoup plus long terme, comme 2050, cette approche par modèles de parc apparaît comme très délicate à mettre en œuvre au regard des incertitudes. Il est donc proposé, au-delà de 2035, d'adopter une approche plus normative sur l'évolution de la consommation unitaire moyenne de chaque équipement, définie à partir des retours des parties prenantes et d'une veille sur les évolutions technologiques envisageables de façon réaliste (ex : lave-linge à ultrasons).

Enfin, s'il n'est pas envisagé (sauf demande expresse des parties prenantes) d'explorer des trajectoires de demande marquées par des ruptures technologiques majeures, les trajectoires, comme cela a déjà été évoqué, intégreront bien toutefois un volume de consommation lié à l'apparition d'usages nouveaux, non identifiés aujourd'hui.