

# **Groupe de travail « scénarisation »**



Les principes de construction des scénarios  
pour étudier le système électrique à  
l'horizon 2050

## Table des matières

1. Contexte et objectifs du groupe de travail.....	4
2. Les scénarios de long terme du Bilan prévisionnel sont cadrés par la SNBC et l’atteinte de la neutralité carbone à l’horizon 2050.....	7
3. La construction des scénarios intègrera une trajectoire et une identification des « jalons clés ».	9
3.1 Des défis industriels qui impliquent de pouvoir anticiper certaines décisions structurantes sur le mix électrique.....	9
3.2 Le choix des échéances d’étude pour les trajectoires de long terme.....	10
4. La participation du système électrique à l’objectif de neutralité carbone à l’horizon 2050 soulève des enjeux techniques, sociétaux, environnementaux et économiques.....	12
4.1 La poursuite de la transformation du système électrique pose des interrogations sur le fonctionnement technique du système à long terme.....	12
4.2 L’analyse identifiera les problématiques [d’acceptabilité sociétale].....	13
4.3 La transition énergétique du système électrique pose des questions environnementales au-delà des émissions de gaz à effet de serre.....	15
4.4 Les scénarios de transition du système électrique répondant aux dimensions techniques, sociétales et environnementales feront l’objet d’un chiffrage économique concerté.....	16
5. Quels scénarios pour l’étude du fonctionnement du système électrique à l’horizon 2050 dans le cadrage de la SNBC ?.....	18
5.1 Principes généraux pour la construction des scénarios de long terme du Bilan prévisionnel	18
5.2 Les scénarios se différencieront par des options distinctes sur les choix publics restant ouverts.....	19
5.3 Des variantes pour tester la résilience du système électrique.....	22
6. Premiers éléments de cadrage des trajectoires d’évolution du mix électrique.....	29
6.1 Les paramètres macro-économiques.....	29
6.2 L’évolution de la demande d’électricité.....	32
6.3 Les trajectoires d’évolution pour les filières de production électrique.....	35
6.4 Les flexibilités et le stockage.....	45
6.5 Les hypothèses d’interconnexions, de consommation et de mix électriques à l’échelle européenne.....	48

DOCUMENT DE TRAVAIL

## 1. Contexte et objectifs du groupe de travail

### Cadre général : la construction de scénarios de mix électrique à horizon 2050

Dans le cadre de ses missions prévues par le Code de l'énergie, RTE établit périodiquement un Bilan prévisionnel pluriannuel de l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité en France. Celui-ci contribue à l'élaboration de la politique énergétique, en éclairant le paysage du système électrique à long terme.

Pour répondre à des demandes de certaines parties prenantes, le prochain Bilan prévisionnel à long terme intégrera un volet portant sur l'horizon 2050 et proposera des scénarios d'évolution possibles du mix électrique français, dans un contexte de transition énergétique et d'ambition de l'atteinte de la neutralité carbone de la France à ce même horizon, portée par le projet de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC).

Les premiers éléments de cadrage pour la construction des scénarios à horizon 2050 ont été présentés par RTE et discutés avec l'ensemble des parties prenantes au cours de la réunion plénière de la Commission perspectives système et réseau (CPSR)<sup>1</sup> du 17 mai 2019.

La gouvernance des travaux d'élaboration des scénarios 2050 est articulée autour de plusieurs piliers, visant notamment à renforcer la transparence et la robustesse des analyses :

- **des groupes de travail** lancés dès juin 2019 et réunissant l'ensemble des experts et parties prenantes intéressées sur des thématiques précises, notamment : la consommation, la base climatique, la scénarisation, le couplage entre les différents vecteurs, la modélisation de la production, les flexibilités, l'acceptabilité sociétale ou encore l'inertie et la stabilité du réseau...
- **une consultation publique** très large, structurée sous forme d'appels à contributions prévus pour l'automne 2019 et qui viendront enrichir les échanges initiés dans les premiers groupes de travail ;
- **la CPSR**, qui servira d'instance de cadrage stratégique des travaux, et d'arbitrage des orientations.

De premières réunions du groupe de travail sur la consommation et la base climatique se sont d'ores et déjà tenues aux mois de mars, mai et juin 2019, et des réunions d'autres groupes de travail portant de façon non exhaustive sur la modélisation de la production, l'hypothèse et le power-to-X, les flexibilités, l'acceptabilité sociale, etc. sont programmées pour le second semestre 2019. D'autres réunions thématiques suivront et s'étaleront jusqu'en 2020.

Pour chacun de ces ateliers, RTE diffusera un document de cadrage visant à présenter de manière synthétique la méthodologie et les jeux d'hypothèses envisagés pour la construction des scénarios. Le document présent porte sur la « scénarisation », c'est-à-dire les scénarios qui seront étudiés dans le cadre du Bilan prévisionnel et leurs modalités de construction.

---

<sup>1</sup> Les supports de présentation des réunions plénières de la CPSR sont disponibles sur le site de la concertation : <https://www.concerte.fr/content/actualite-de-la-commission-perspectives-systeme-et-reseau>

## Objectifs du groupe de travail sur la scénarisation

La trajectoire du mix électrique français jusqu'à l'horizon 2035 est désormais balisée par la PPE, dont la version projet et les grands arbitrages ont été présentés par le Gouvernement fin 2018 et début 2019. À l'horizon 2050 cependant, la part des différentes technologies dans le mix de production et de consommation fait l'objet de nombreuses incertitudes. La SNBC (version projet) liste des mesures permettant d'atteindre la neutralité carbone à cet horizon, et présente des trajectoires globales d'évolution de la demande en énergie, mais pas de trajectoires détaillées sur l'évolution du mix électrique.

Une des questions principales du débat public sur l'évolution du système électrique à long terme porte sur la faisabilité technique d'un système électrique 100% renouvelable et sur la nécessité (ou l'intérêt) de disposer d'un socle de moyens de production thermique ou nucléaire. RTE est ainsi régulièrement interrogé sur le fonctionnement du mix électrique à des échéances postérieures à 2035, et notamment à l'horizon 2050.

Compte tenu des incertitudes sur l'évolution des paramètres techniques, économiques et sociétaux à cet horizon, une approche par optimisation consistant à évaluer le « mix optimal en 2050 », pour des hypothèses techniques et économiques fixées, ne permet pas de refléter ces incertitudes et constitue donc un éclairage partiel aux questions du débat public.

Pour analyser différentes trajectoires possibles du mix électrique, l'approche proposée par RTE consiste à élaborer différents scénarios contrastés, notamment sur l'évolution de la part des différentes technologies de production et de flexibilité dans le mix, et de les décrire de manière détaillée, dans leur fonctionnement technique et dans leurs implications.

**Dans une démarche de transparence et de co-construction, l'élaboration des prochains scénarios de long terme du Bilan prévisionnel vise à être réalisée en concertation avec l'ensemble des parties prenantes. Les échanges avec les parties prenantes sur le cadrage global des scénarios seront ainsi organisés au sein du groupe de travail « scénarisation ».** D'autres groupes de travail portant sur des sujets spécifiques (couplages gaz-électricité, modélisation de la production renouvelable ou nucléaire, évolution de la consommation...) sont organisés en complément.

L'analyse des scénarios se basera sur des éléments de cadrage déjà présentés au cours de la dernière réunion plénière de la CPSR :

- la définition des scénarios s'inscrira dans les grandes orientations de la SNBC et l'atteinte de la neutralité carbone (cf. section 2) ;
- la construction des scénarios intègrera une trajectoire détaillée et une identification des jalons-clés afin d'estimer les regrets qui pourraient résulter de certains mix technologiques (cf. section 3) ;
- les scénarios seront analysés sous quatre angles principaux : fonctionnement technique du système, enjeux sociétaux et acceptabilité, enjeux environnementaux et analyse économique (cf. section 4) ;
- plusieurs scénarios contrastés seront élaborés et constitueront des ensembles cohérents de paramètres définissant la production et la consommation. En particulier, deux familles de scénarios seront considérées et qui se distingueront selon le choix sur le « nouveau nucléaire » : une famille de scénario considèrera cette option ouverte, et l'autre la considèrera fermée (cf. sections 5 et 6).

Le document présent vise à présenter de manière synthétique des premiers éléments méthodologiques sur la construction des scénarios qui permettront d'étudier le fonctionnement du système électrique à l'horizon 2050 en ciblant la neutralité carbone de l'économie française.

**Il s'agit d'une version de travail**, préalable aux échanges prévus avec le groupe de travail lors de la réunion du 20 novembre 2019. Une version préliminaire a déjà été partagée avec les parties prenantes, préalablement à la réunion du groupe de travail ayant eu lieu le 2 juillet 2019. Le document continuera à être progressivement enrichi au fur et à mesure de la concertation.

Ce document et les premières réunions du groupe de travail porteront à ce stade essentiellement sur la présentation du cadrage et des enjeux des scénarios de long terme, sur l'identification des paramètres permettant de les concevoir (efficacité énergétique, sobriété, *power-to-gas*, échanges aux interconnexions, flexibilité, mix de production, ...), ainsi que sur les fourchettes de valeurs qu'ils peuvent prendre. De premières discussions pourront également être initiées sur les scénarios eux-mêmes.

DOCUMENT DE TRAVAIL

## 2. Les scénarios de long terme du Bilan prévisionnel sont cadrés par la SNBC et l'atteinte de la neutralité carbone à l'horizon 2050

La France est désormais fortement engagée sur l'atteinte de l'objectif de neutralité carbone, qui est notamment inscrit dans le projet de loi énergie-climat actuellement discuté au Parlement. Le projet de Stratégie nationale bas carbone<sup>2</sup> (SNBC) donne le cadrage de la trajectoire énergétique de la France à l'horizon 2050 pour atteindre cet objectif.

**Pour s'appuyer sur ces orientations et pour éviter de refaire le débat de la SNBC sur les trajectoires de demande énergétique à l'horizon 2050, le cadrage général des prochains scénarios de long terme de RTE sera ainsi articulé autour de la SNBC.** Cela signifie que les scénarios de long terme de RTE s'appuieront sur les grands principes et grandes orientations du projet de SNBC sur l'évolution de l'offre et de la demande d'énergie à long terme, et notamment sur la répartition des usages (par exemple le chauffage, la mobilité ou l'industrie) entre les vecteurs énergétiques, telle que décrite dans la SNBC.

Dans le même temps, l'exercice du Bilan prévisionnel doit permettre d'établir la robustesse du fonctionnement du système électrique à différentes configurations, notamment différentes évolutions de l'offre et de la demande d'électricité, tant à l'échelle de la France que de l'Europe. Ces variantes seront restituées dans le cadre d'une vision cohérente sur l'ensemble du système (notamment sur le respect de la neutralité carbone).

**Des variantes pourront ainsi tester la robustesse du système électrique français entre autres à différentes trajectoires d'économies d'énergie, de consommation d'électricité, de population, de produit intérieur brut, de changement climatique ou de mix électrique européen, ainsi qu'à la mise en œuvre effective des leviers nécessaires à l'atteinte de la neutralité carbone.**

La méthode doit permettre d'assurer la comparaison entre les scénarios (par exemple en ayant une hypothèse centrale de consommation commune aux principales variantes). Ce point est remonté par de nombreux participants.

A l'échelle nationale et internationale, ces variantes pourront s'inspirer des différentes analyses étudiant l'horizon 2050, par exemple :

- ADEME, Trajectoires d'évolution du mix électrique 2020-2060. Synthèse de l'étude, 2018 ;
- Greenpeace, [R]évolution énergétique. Perspectives énergétiques pour un monde plus durable. Synthèse du rapport 2015 ;
- NégaWatt, Scénario 2017-2050 ;
- Sauvons le climat, Diviser par quatre les rejets de CO<sub>2</sub> dus à l'énergie : le scénario Négatep 2017 ;
- SFEN, Le nucléaire français dans le système énergétique européen. Scénarios basés sur le modèle PRIMES pour la SFEN. Note SFEN. Avril 2018 ;
- EPE, ZEN 2050 – Imaginer et construire une France neutre en carbone. Mai 2019

---

<sup>2</sup> Ministère de la transition écologique et solidaire, 2018. Projet de Stratégie Nationale Bas-Carbone. La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone. Décembre 2018.

A l'échelle européenne, les analyses suivantes pourront également être considérées pour établir les variantes :

- Commission européenne, Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil européen, au Conseil, au Comité des régions, au Comité économique et social et à la Banque européenne d'Investissement, Une planète propre pour tous Une vision européenne stratégique à long terme pour une économie prospère, moderne, compétitive et neutre pour le climat, COM(2018) 773 final, 28 novembre 2018.
- European Commission, In-depth analysis in support of the Commission communication COM(2018) 773. A clean planet for all. A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, 28<sup>th</sup> November 2018;
- Les scénarios du GIEC<sup>3</sup> ;
- Les scénarios du TYNDP<sup>4</sup> communs ENTSO-G / ENTSO-E devant être publiés prochainement ;
- E-Highway2050, Main results, 2015;
- Eurelectric, Decarbonisation pathways, 2018;
- FTI, réalisée pour Foratom, Pathways to 2050: role of nuclear in a low-carbon Europe, 2018 ;
- Deutsche Energie Agentur (DENA), Leitstudie Integrierte Energiewende, 2018 ;  
Committee on Climate Change, Net Zero – The UK's contribution to stopping global warming 2019.

---

<sup>3</sup> Groupe International d'Experts du Climat.

<sup>4</sup> Ten-Year Network Development Plan.

### 3. La construction des scénarios intègrera une trajectoire et une identification des « jalons clés »

#### 3.1 Des défis industriels qui impliquent de pouvoir anticiper certaines décisions structurantes sur le mix électrique

Comme présenté en réunion plénière de la CPSR, la construction des « scénarios 2050 » ne se limite pas à construire de « mix cibles » à l'horizon 2050 mais à décrire de manière détaillée les trajectoires associées pour atteindre les différentes cibles possibles. L'enjeu du Bilan prévisionnel sera notamment d'identifier les jalons clés, et ainsi d'apporter des éléments de réponse à diverses questions telles que :

- à quel moment faut-il décider / investir pour assurer le maintien de l'équilibre offre-demande ? à quel moment faut-il décider puis investir pour faire évoluer le mix énergétique ?
- quelle est la valeur d'option associée à certaines technologies ?
- comment limiter les regrets tant s'agissant des coûts échoués que des déviations par rapport à la cible ?

En effet, la capacité à transformer le système électrique fait face à de nombreux défis industriels pour différentes filières technologiques.

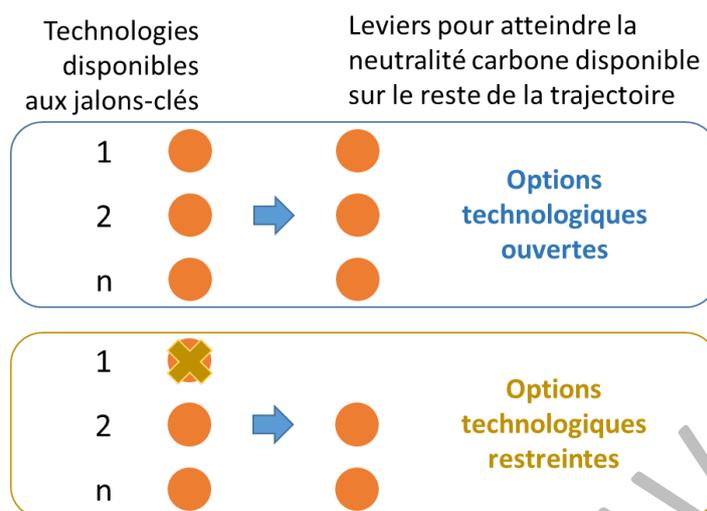
Du côté de la consommation, cette transformation requiert des investissements d'efficacité énergétique et de flexibilisation de la consommation électrique. L'effet de ces investissements sera fonction de leur combinaison avec l'évolution des usages et de la sobriété des consommations électriques.

Du côté de la production, les défis industriels concernent toutes les filières de production susceptibles d'être mobilisées pour atteindre l'objectif de neutralité carbone décliné pour le système électrique. Le renouvellement du parc nucléaire, la poursuite du déploiement des énergies renouvelables (éolien terrestre, éolien en mer, photovoltaïque, etc. – qui pose également une question s'agissant du gisement exploitable) ou encore le déploiement d'autres capacités de production (thermiques ou pile à combustibles) combinées ou non avec des capacités de captation ou de séquestration de gaz carboniques requièrent des capacités industrielles convenablement dotées. Les investissements réseau doivent également être déployés dans les proportions et le timing adéquats afin de l'adapter aux évolutions de la production et de la consommation.

Une filière industrielle nécessite d'être structurée, avec le contingent adéquat de main d'œuvre formée avec les compétences requises, par exemple pour être capable de développer tous les ans plusieurs gigawatts de capacité ou de mener à bien plusieurs millions de rénovation dans le bâtiment. La structuration et la montée en cadence de telles filières prennent du temps. Le développement ou le maintien d'une option technologique nécessite donc d'être anticipé. A l'inverse, l'absence d'une technologie peut compliquer l'atteinte de l'objectif d'un système électrique fonctionnel participant à la neutralité carbone. Les technologies devront donc être disponibles à certains jalons-clés afin d'être effectivement présentes sur le reste de la trajectoire menant à l'horizon 2050. Les technologies considérées aujourd'hui pour l'atteinte de la neutralité carbone participent ainsi d'une stratégie de moindres regrets à l'échelle du système électrique mais aussi de l'ensemble du système énergétique et de l'économie nationale.

Ces différents points font l'objet de consensus dans le cadre des réunions menées jusqu'à présent.

Figure 1 Illustration des jalons-clés pour certaines technologies et de leur valeur d'option



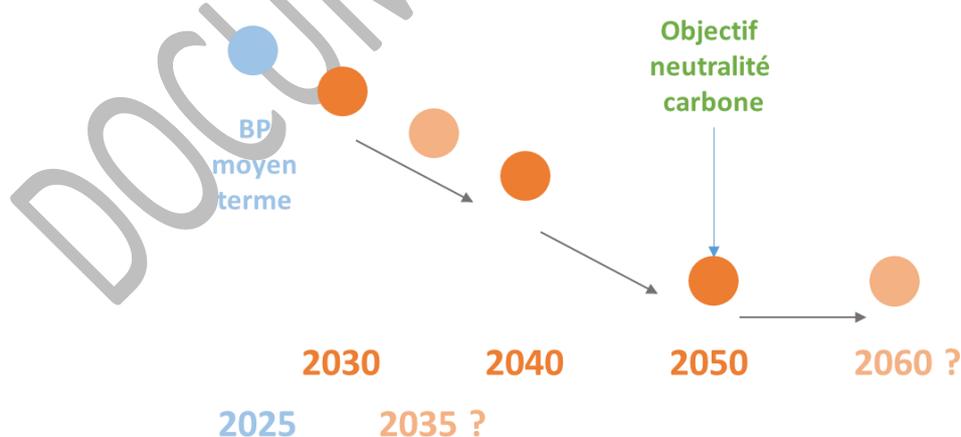
### 3.2 Le choix des échéances d'étude pour les trajectoires de long terme

Les scénarios de long terme du Bilan prévisionnel doivent décrire des trajectoires permettant d'atteindre la neutralité carbone en France, en se basant sur une électricité décarbonée.

RTE propose que les trajectoires portent sur les points de passage suivants : 2030, 2040, 2050. Deux échéances supplémentaires, correspondant aux horizons 2035 et 2060, pourraient également faire l'objet d'analyses si besoin. Le point 2060 ressort dans plusieurs commentaires des participants aux groupes de travail, notamment dans la perspective des scénarios 100% ENR.

L'intérêt de ces jalons est détaillé ci-dessous.

Figure 2 Horizons d'étude proposés pour le Bilan prévisionnel de long terme



L'échéance de 2025 est analysée de manière approfondie dans le cadre du Bilan prévisionnel moyen terme qui sera publié à l'automne 2019, sous l'angle de la sécurité d'approvisionnement. Les trajectoires pour le Bilan prévisionnel de long terme s'appuieront donc sur ces analyses et ne chercheront pas à réélaborer de nouveaux scénarios pour cet horizon.

L'échéance 2025 pourra être considérée comme un jalon décisionnel. En effet, compte tenu des dynamiques industrielles, pour une filière technologique donnée, un changement de rythme dans le développement de nouvelles capacités s'anticipe plusieurs années à l'avance. Un temps est nécessaire à la mise en place du cadre réglementaire adéquat et à l'adaptation des capacités industrielles de la filière. L'échéance 2025 considérée comme jalon décisionnel permet ainsi d'éclairer sur les inflexions possibles de capacités (production et consommation) au-delà de 2030.

Pour la suite, RTE propose d'étudier des échéances espacées de dix ans, en commençant donc par l'horizon 2030 et en poursuivant sur les horizons 2040 et 2050. L'étude de ces différentes échéances apparaît nécessaire car elle permet de mettre en évidence les jalons à respecter pour atteindre la neutralité carbone en 2050, ainsi que les éventuels remords ou regrets qui pourraient résulter des choix retenus.

L'étude de l'échéance 2035 présente également de l'intérêt dans la mesure où elle correspond aujourd'hui à un jalon-clé de la politique énergie-climat de la France, identifié par l'objectif de 50% de nucléaire à cet horizon. L'étude de cette échéance pourrait donc constituer un point d'étape spécifique à partir duquel les scénarios divergeraient plus fortement pour atteindre l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050. Au même titre que 2025, l'échéance 2035 permet d'éclairer l'horizon des décisions politiques nécessaires aux inflexions de trajectoires au-delà, en particulier en 2040.

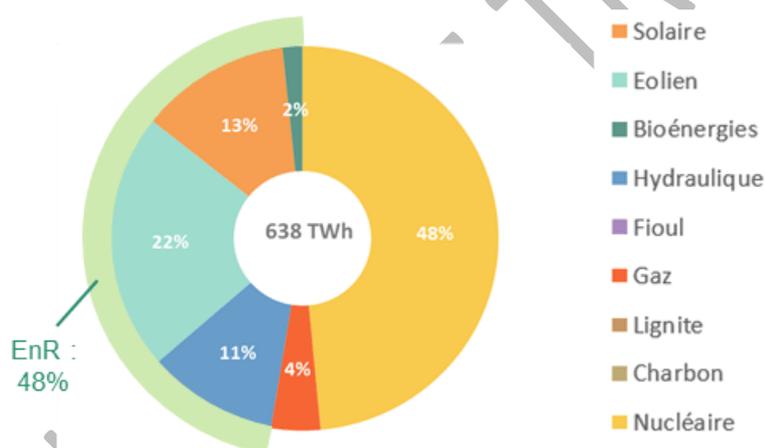


Figure 3. Bilan électrique projeté à horizon 2035 (projections RTE sur la base du projet de PPE)

Enfin, il sera utile de mettre en avant les évolutions qui se poursuivraient une décennie supplémentaire jusqu'en 2060. Tout en centrant sur l'horizon 2050, principal objet du débat, la prise en compte de l'horizon 2060 permettra d'illustrer les incertitudes associées au-delà de 2050 ainsi que les conséquences ultérieures des choix ciblant cette échéance. En particulier, si l'option nouveau nucléaire était fermée à l'horizon 2050, il faudrait attendre l'horizon 2060 pour que certains réacteurs existants soient arrêtés sous hypothèse d'une prolongation de leur durée de vie jusqu'à 60 ans. Dans ce contexte, le système électrique devrait notamment assurer la résilience de son fonctionnement sans ces moyens, notamment face au changement et aléas climatiques. L'étude de chacune des échéances est néanmoins chronophage, dans la mesure où elle induit à chaque fois des milliers de simulations à réaliser. La multiplication des échéances étudiées pourrait donc se faire au détriment d'autres analyses.

À ce stade, les échanges avec les parties prenantes portent essentiellement sur les échéances à étudier. Les problématiques associées à la modélisation et aux principes d'analyse de décision en avenir incertain seront discutées dans des groupes de travail ultérieurs.

## 4. La participation du système électrique à l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 soulève des enjeux techniques, sociétaux, environnementaux et économiques

L'atteinte de la neutralité carbone et les évolutions associées du système électrique à l'horizon 2050 présentent des enjeux conséquents et multiples, pour l'ensemble de la collectivité. Elles emportent des enjeux techniques, sociétaux, environnementaux et économiques. Les quatre sections qui suivent détaillent ces enjeux et leur traduction concrète.

### 4.1 La poursuite de la transformation du système électrique pose des interrogations sur le fonctionnement technique du système à long terme

L'évolution du mix de technologies de production et de consommation électrique représente un défi technique pour le fonctionnement du système électrique. L'intégration des nouvelles technologies de production (nouveau nucléaire, renouvelables, etc.) et des nouveaux usages électriques (électromobilité, *power-to-gas*, flexibilisation de la consommation, etc.) peut ainsi poser plusieurs problématiques sur l'équilibre du système et du réseau.

En particulier, la question du maintien de la stabilité et de l'inertie dans un système marqué par une forte part des énergies renouvelables constitue un sujet récurrent dans le débat sur l'évolution du système électrique. RTE est ainsi régulièrement interrogé sur les solutions qui seront requises pour assurer l'inertie du système à long terme. Un volet du prochain Bilan prévisionnel de long terme portera donc spécifiquement sur ces problématiques.

Dans le détail, plusieurs dimensions du fonctionnement technique du système seront ainsi étudiées de manière détaillée :

- la sécurité d'approvisionnement du système et le paysage de défaillance (i.e. de déséquilibre entre l'offre et la demande),
- la fourniture des réserves (FCR, aFRR, mFRR, RR<sup>5</sup>) ou des marges d'exploitation dans les volumes requis,
- voire la fourniture de nouveaux services complétant l'inertie des moyens de production conventionnels ou de compensateurs synchrones pour assurer la stabilité de la fréquence (inertie synthétique ou *grid forming* par exemple) ;
- la gestion des flux sur le réseau électrique et son développement devront également être adaptés au plus large déploiement de ses nouvelles technologies.

---

<sup>5</sup> FCR signifie Frequency Containment Reserves. Elle est sollicitée seulement quelques secondes après l'apparition d'un aléa introduisant un déséquilibre entre la production et la consommation afin de limiter la variation de fréquence résultante.

aFRR signifie automatic Frequency Restoration Reserve. Elle est sollicitée de façon automatique jusqu'à 15 minutes après l'apparition d'un aléa introduisant un déséquilibre entre la production et la consommation afin de ramener la fréquence à sa valeur de référence de 50 Hz.

mFRR signifie manual Frequency Restoration Reserve. Elle est sollicitée de façon manuelle par le dispatcheur jusqu'à 15 minutes, si le volume d'aFRR s'avère trop faible.

RR signifie Replacement Reserve. Elle peut être sollicitée jusqu'à 30 minutes après l'apparition d'un aléa permet de reconstituer l'aFRR et la mFRR.

Un groupe de travail dédié discutera les données et méthodologies nécessaires à ces analyses.

## 4.2 L'analyse identifiera les problématiques [d'acceptabilité sociétale]

L'atteinte de l'objectif de neutralité carbone emporte des changements qui peuvent être significatifs pour le système électrique et ses utilisateurs et poser des questions [d'acceptabilité sociétale], notamment s'agissant des investissements, de l'évolution des modes de vie et des comportements ainsi que de la définition de la sécurité d'approvisionnement électrique. Le terme [acceptabilité sociétale] est ici volontairement mis entre crochets, en l'attente d'une formulation adaptée, certains participants à la CPSR ayant indiqué que cette expression était discutable, alors même qu'une réappropriation des enjeux et des transformations par le public pourrait avoir lieu.

L'atteinte de la neutralité carbone impliquera des investissements au sein du système électrique, sur l'ensemble de ses composantes, s'agissant tant de la production, des réseaux, que des transferts d'usage ou de l'efficacité énergétique de la consommation. Ces investissements peuvent faire l'objet de divers degrés [d'acceptabilité sociale], notamment selon les acteurs économiques qui les portent. Ils induisent des évolutions de pratiques, des coûts économiques ou des impacts environnementaux (cf. les deux sections suivantes) que les consommateurs ou les citoyens ne sont pas nécessairement prêts à accepter.

Sur les trente prochaines années, les modes de vie et les comportements sont également amenés à évoluer. Ces évolutions pourront être portées par l'objectif de la neutralité carbone et la faciliter, par exemple si les pratiques de consommation d'énergie deviennent plus sobres et plus flexibles. Mais d'autres évolutions sociétales pourront au contraire compliquer l'atteinte de l'objectif de neutralité carbone. A titre d'illustration, les travaux sur l'électromobilité menés récemment par RTE<sup>6</sup>, en particulier dans le cadre du scénario *Alto* intégrant l'essor du véhicule électrique autonome partagé, ont souligné l'absence d'automatisme entre autonomie accrue et performances environnementales. Certes, la réduction du nombre de véhicules y diminue aussi l'empreinte environnementale mais l'empreinte des batteries de grande capacité et la durée de vie réduite constituent des facteurs haussiers.

### *Sur la sécurité d'approvisionnement*

Sur le sujet de la sécurité d'approvisionnement électrique, le niveau de référence est aujourd'hui défini par un critère public, correspondant à une espérance de défaillance (i.e. de déséquilibre entre l'offre et la demande, avant activation de moyens post-marché) ne dépassant pas 3 heures par an en moyenne, en considérant l'ensemble des configurations possibles (conditions météorologiques et disponibilité des moyens de production).

Dans le système électrique actuel, le risque de défaillance est très largement associé aux vagues de froid et à la disponibilité du parc nucléaire. Aussi, le critère de sécurité d'approvisionnement est parfois illustré, de manière approximative, en indiquant qu'il correspond à une trentaine d'heures de défaillance se produisant en moyenne tous les dix ans, lors d'une vague de froid décennale.

À long terme, la diversification du mix électrique, les effets du réchauffement climatique ou encore l'évolution des usages pourraient induire de nouveaux déterminants pour la sécurité d'approvisionnement. Les périodes de défaillance pourraient ainsi concerner d'autres périodes que les vagues de froid (périodes de faible production renouvelable, vague de chaleur...).

---

<sup>6</sup> RTE, Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique Principaux résultats. Mai 2019.

Par ailleurs, le respect du critère de 3 heures pourrait être associé à un paysage de défaillance différent, en termes de fréquence des défaillances ou de profondeur des déséquilibres (i.e. ampleur des moyens à engager et nombre de sites à couper pour rétablir l'équilibre). Or, la perception de la sécurité d'approvisionnement ne sera en effet pas la même selon qu'elle conduit à des coupures importantes tous les ans ou tous les deux ans ou que le risque de coupure reste limité à des événements extrêmes se produisant une fois tous les dix ans.

Le critère actuel ne permet pas de différencier des scénarios pourtant très différents en termes de fréquence et de profondeur de coupure. Les analyses menées dans le cadre du Bilan prévisionnel porteront donc sur une analyse exhaustive du paysage de défaillance et des implications pour les consommateurs d'électricité.

Cette évolution du paysage de défaillance était déjà illustrée dans les scénarios du Bilan prévisionnel 2017, même si à horizon 2035, les différences restaient encore peu marquées entre les différents scénarios.

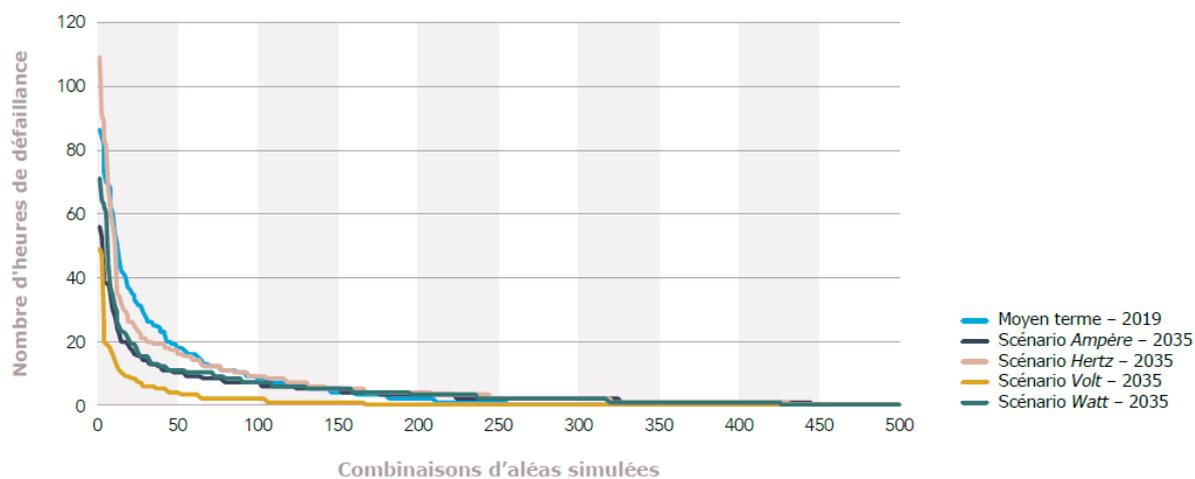


Figure 4. Monotones des heures de défaillance pour 1000 configurations simulées, dans les différents scénarios du Bilan prévisionnel 2017

Le consentement des consommateurs vis-à-vis de ce critère pourrait donc évoluer, en acceptant une moindre sécurité d'approvisionnement ou au contraire en exigeant un nombre d'heures de défaillance plus limité. Dans le même temps, la sécurité d'approvisionnement électrique est considérée aujourd'hui comme un bien collectif, auquel tous les producteurs disponibles lors des pointes de consommation participent et dont bénéficient tous les consommateurs sans appropriation ou différenciation possible. Néanmoins, dans le futur, si des solutions de stockage ou d'alimentation individuelles (moyens de production ou coupures différenciées au compteur) se développent, la sécurité d'approvisionnement pourrait s'individualiser.

De manière générale, la description et le partage des problématiques d'acceptabilité sociétale permettront d'appréhender les enjeux sociétaux associés à l'atteinte de l'objectif de neutralité carbone. Ils pourront mettre en avant que des arbitrages peuvent s'avérer nécessaires en matière d'acceptabilité de technologies de production, de réduction ou de flexibilisation de la consommation électrique ou d'évolutions de l'utilisation de l'électricité.

Les conséquences techniques, environnementales et économiques de ces enjeux seront analysées à l'aide de variantes de scénarios, par exemple s'agissant de l'acceptation plus ou moins forte de différents moyens de production comme le nucléaire ou l'éolien, de la flexibilisation de la consommation plus ou moins poussée, de différents niveaux de sécurité d'approvisionnement qui pourront être différenciées par groupes de consommateurs, etc.

Les dimensions d'analyse mentionnées ci-dessus seront traitées en détail dans le groupe de travail « évolutions des modes de vie et aspirations des français à l'horizon 2050 ».

### **4.3 La transition énergétique du système électrique pose des questions environnementales au-delà des émissions de gaz à effet de serre**

La réduction des émissions de gaz carbonique mais aussi plus généralement des gaz à effet de serre (notamment le méthane ou le protoxyde d'azote – respectivement CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O) est le principal défi afin de contenir le changement climatique, si possible dans les limites définies dans l'Accord de Paris. Ces émissions incluent certes celles émises directement lors de l'exploitation du système électrique. Le volume de gaz à effet de serre émis sur l'ensemble du cycle de vie des composants du système électrique (investissement, acheminement des combustibles et exploitation) est plus significatif pour mesurer l'effet réel du système électrique sur le changement climatique. L'empreinte carbone est la mesure la plus complète car elle prend en compte l'effet des importations et exportations de biens et de services sur les émissions de CO<sub>2</sub> d'un pays. Elle est néanmoins contingente à des hypothèses qui dépassent les politiques publiques concernant le système électrique, voire même du système énergétique.

Dans le même temps, l'impact environnemental du système électrique peut être mesuré sur d'autres dimensions, notamment l'utilisation des ressources et des sols, l'impact sur la qualité des écosystèmes, la biodiversité et sur la santé humaine. Les enjeux en matière de ressources associés à la participation du système électrique à l'atteinte de l'objectif de neutralité carbone concernent ainsi bien les minéraux, et les métaux, que les combustibles fossiles, l'utilisation des sols, ou de l'eau. Les enjeux en matière de qualité des écosystèmes résident principalement dans la qualité des sols et des eaux (douces ou marines) comme milieux accueillant pour la vie. Les enjeux en matière de santé humaine concernent par exemple la pollution de l'air, la couche d'ozone ou des effets cancérigènes.

Tout comme les émissions de gaz à effet de serre, ces autres types d'impacts environnementaux doivent s'apprécier tant lors de l'exploitation du système électrique que sur le cycle de vie de ses composants. Considérer l'ensemble des enjeux environnementaux permet de mettre en lumière qu'ils ne se résument pas aux seules émissions de gaz à effet de serre. Des solutions satisfaisantes du point de vue de la réduction des émissions de gaz à effet de serre pourront également être différenciées en s'appuyant sur un bilan environnemental plus complet intégrant ces dimensions complémentaires.

Les modalités d'analyse des questions environnementales feront l'objet d'un groupe de travail dédié. La méthodologie ou grille d'analyse<sup>7</sup> à retenir ainsi que les bases de données sur lesquelles le travail d'évaluation pourra s'appuyer y seront notamment concertés.

---

<sup>7</sup> Lors de la première session du groupe de travail scénarisation, les objectifs de développement durable établis par l'ONU ont été mentionnés, en particulier ceux se focalisant sur la dimension environnementale. D'autres grilles d'analyse comme celles de la Commission européenne existent également. Le choix de la grille d'analyse fera l'objet d'une concertation dans le groupe de travail adéquat.

#### **4.4 Les scénarios de transition du système électrique répondant aux dimensions techniques, sociétales et environnementales feront l'objet d'un chiffrage économique concerté**

Dans un dernier temps, et une fois menée à bien la description des scénarios sur les plans technique, environnemental et sociétal, une analyse économique pourra être réalisée.

L'atteinte de la neutralité carbone en 2050 et ses conséquences pour le système électrique représentent aussi un enjeu économique.

La base de coûts sur laquelle l'analyse économique sera construite sera concertée, de façon similaire à ce qui avait été fait pour le Bilan prévisionnel 2017. Elle sera enrichie afin d'évaluer plus largement les coûts. A cet effet, un groupe de travail spécifique se tiendra au mois de février, pour présenter la base proposée par RTE et retenir les premiers commentaires. Cette base pourra ensuite faire l'objet de commentaires formels dans le cadre de la consultation publique. Cette méthode répond aux souhaits exprimés par plusieurs participants auprès de RTE.

A ce stade, il est prévu d'y intégrer non seulement les coûts de production mais aussi le coût des investissements d'efficacité énergétique ou d'électrification ainsi que de flexibilisation de la demande électrique. Dans des trajectoires s'appuyant sur de fortes ambitions d'efficacité énergétique, ces investissements pourraient représenter une part substantielle des coûts et introduire une forte différenciation par rapport à des scénarios utilisant ce levier dans une moindre mesure.

Les analyses du Bilan prévisionnel 2017 ont également montré qu'il était utile d'éclairer les trajectoires de coûts au regard des incertitudes à l'horizon ciblé (ici 2050) sur les coûts des technologies composant le mix (de production, de flexibilité et d'investissements de consommation). Chaque scénario pourra ainsi être associé non pas à une unique trajectoire de coûts mais à un faisceau de coût reflétant les incertitudes. La robustesse des trajectoires de coût ainsi que ses principaux déterminants (capacité et coût des technologies) pourront ainsi être évalués.

Le contenu en emplois des différents scénarios et variantes représente également un enjeu économique. Néanmoins, il dépasse les enjeux du système électrique ou même énergétique. En effet, il est contingent à des hypothèses qui dépassent les politiques publiques concernant le système électrique et énergétique. Par exemple, cette évaluation renvoie à une politique de réindustrialisation qui permettrait de construire sur le territoire nationale les matériels nécessaires à l'évolution du système électrique plutôt que de les importer.

A la suite de différentes demandes des parties prenantes, l'évaluation économique des scénarios, la méthodologie associée ainsi que les hypothèses et indicateurs afférents au chiffrage économique seront l'objet d'un groupe de travail dédié.

Le tableau ci-dessous synthétise les enjeux associés à l'atteinte de l'objectif de neutralité carbone tels que précédemment exposés.

Tableau 1 Synthèse des enjeux de l'atteinte de l'objectif de neutralité carbone pour le système électrique

Enjeux	Détails
Techniques et industriels	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Développement de filières technologiques nécessaires à l'atteinte de la neutralité carbone</li> <li>• Valeur d'option des filières technologiques et regrets ou remords associés à leur maintien ou leur arrêt</li> <li>• Evolution du fonctionnement du système électrique (sécurité d'approvisionnement, équilibrage, marges, réserves, stabilité, réseau)</li> </ul>
Acceptabilité sociétale	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acceptabilité des investissements nécessaires à la neutralité carbone</li> <li>• Acceptabilité des différentes technologies de production</li> <li>• Evolution des modes de vie et changements de comportements</li> <li>• Evolution du consentement des consommateurs par rapport au critère de défaillance</li> <li>• Possibilité d'une individualisation de la sécurité d'approvisionnement</li> </ul>
Environnementaux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction des émissions de gaz à effet de serre</li> <li>• Utilisation des ressources</li> <li>• Qualité des écosystèmes</li> <li>• Impact sur la santé humaine</li> </ul>
Economiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coûts de l'atteinte de la neutralité carbone pour le système électrique</li> <li>• Etablis à partir d'une base de coûts concertée intégrant                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ les coûts de production et des investissements d'efficacité énergétique, d'électrification et de flexibilisation de la demande</li> <li>○ des fourchettes de coût pour intégrer leur nature incertaine et évaluer la robustesse des trajectoires économiques des scénarios</li> </ul> </li> </ul>

Les enjeux associés aux analyses de scénarios du système électrique à l'horizon 2050 étant posés, il s'agit maintenant d'établir leurs modalités de construction.

## 5. Quels scénarios pour l'étude du fonctionnement du système électrique à l'horizon 2050 dans le cadrage de la SNBC ?

### 5.1 Principes généraux pour la construction des scénarios de long terme du Bilan prévisionnel

L'objectif des prochains scénarios de long terme du Bilan prévisionnel est de fournir un éclairage sur les évolutions possibles du système électrique et de son fonctionnement à long terme (horizon 2050) en vue d'atteindre l'objectif de neutralité carbone désormais inscrit dans la loi.

Pour élaborer ces scénarios, RTE propose les principes suivants :

1. Comme indiqué ci-dessus, **ces scénarios s'inscriront en cohérence avec le cadrage du projet de SNBC** présenté par le Gouvernement fin 2018 et dont la version finale devrait être publiée début 2020. Ceci signifie qu'un certain nombre d'hypothèses des scénarios du Bilan prévisionnel seront cadrées par les orientations de la SNBC, notamment pour celles portant sur les consommations énergétiques. En revanche, la SNBC laisse ouverte la question du mix de production et de flexibilité électriques au-delà de 2035. En particulier, elle ne donne pas de trajectoires détaillées s'agissant de l'évolution de la capacité des différentes filières de production (nucléaire, éolien, photovoltaïque, thermique...) et des solutions de flexibilité (stockage par batterie ou par production de gaz de synthèse, effacement et pilotage de la demande...) après 2035. L'objectif des scénarios de long terme du Bilan prévisionnel sera donc d'explorer les différentes options possibles en la matière.
2. **Les scénarios illustreront une variété de choix publics possibles et se diviseront en particulier en deux familles distinctes :**
  - des scénarios avec l'option « nouveau nucléaire » ouverte,
  - des scénarios avec l'option « nouveau nucléaire » fermée.

Ceci permettra d'apporter des éléments d'éclairage sur l'un des principaux sujets du débat public : la question du mix de production électrique au-delà de 2035.

Au sein de ces deux familles, les scénarios se distingueront par différents choix publics possibles dans le cadre de la SNBC sur les autres aspects du système énergétique : les rythmes de développement des autres filières de production, des solutions de flexibilité... Le terme de choix public est ici utilisé dans une acceptation large : il peut s'entendre comme les choix réglementaires des pouvoirs publics ou comme les choix culturels et les attentes de la société. Nous listons plus loin la liste des options qui seront envisagées.

3. Conformément à la méthodologie mise en œuvre dans les dernières éditions du Bilan prévisionnel, l'élaboration des scénarios sera complétée par de nombreuses variantes permettant de tester la résilience des scénarios à des aléas ou de manière générale à une évolution des paramètres différente de celle anticipée. **Ces analyses de sensibilité comporteront deux types de variantes :**
  - des variantes portant sur **des paramètres endogènes** à la politique énergétique française reposant sur cet ensemble de choix publics (rythme de développement des différentes filières, efforts en matière de sobriété et d'efficacité énergétique, rythme

des transferts d'usage vers l'électricité...), afin d'évaluer la résilience des scénarios à une évolution s'écartant légèrement des objectifs publics sur le mix ;

- des variantes portant sur **des paramètres exogènes** à la politique énergétique française (démographie, macro-économie : PIB, activité industrielle en France, réchauffement climatique, ...), qui permettront d'évaluer la résilience des scénarios à ces paramètres pouvant en particulier affecter la consommation ou la production électrique.

Ces principes de construction des scénarios sont illustrés sur la figure ci-dessous.

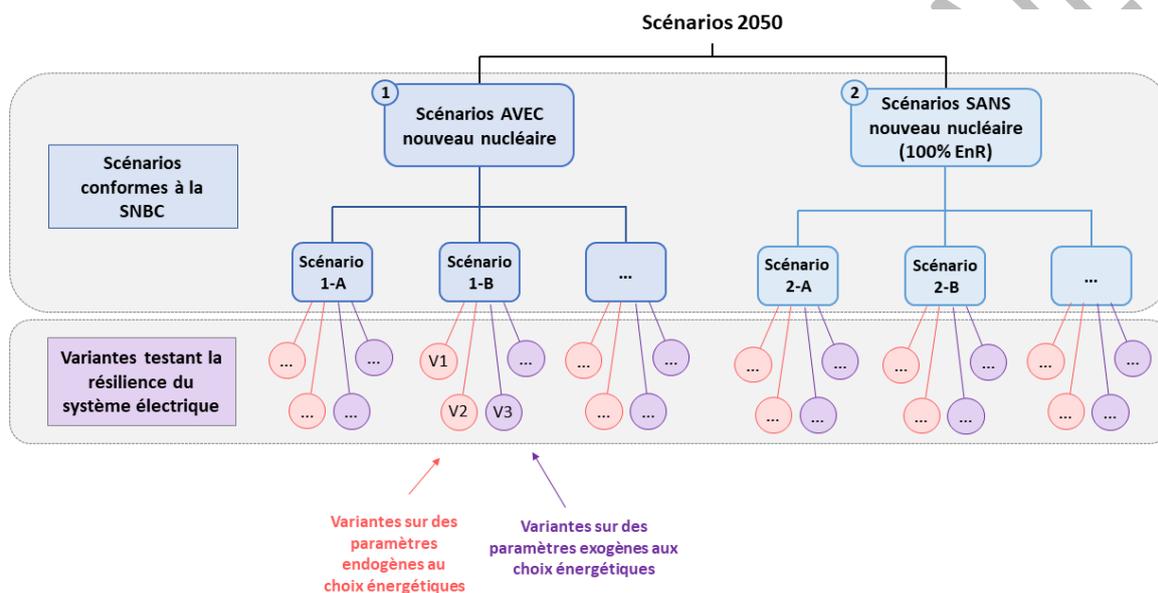


Figure 5. Principes d'élaboration des scénarios et de leurs variantes

## 5.2 Les scénarios se différencieront par des options distinctes sur les choix publics restant ouverts

Les hypothèses définies dans la SNBC concernent essentiellement l'évolution des consommations énergétiques. D'autres hypothèses sont laissées ouvertes, en particulier s'agissant de la production et la flexibilité de la consommation mais également dans une certaine mesure s'agissant de la sobriété énergétique. En conséquence, différents scénarios respectant le cadre de la SNBC peuvent être définis à partir de différentes combinaisons d'hypothèses laissées ouvertes par celle-ci. Les déterminants<sup>8</sup> définissant les scénarios entrant dans le cadre de la SNBC concernent :

- **la capacité nucléaire**, tant s'agissant de la capacité de nouveau nucléaire développée que de la capacité de nucléaire existant maintenue en service jusqu'à 50 ou 60 ans sur la trajectoire vers l'horizon 2050,
- **la capacité et la proportion des différentes filières de production d'énergies renouvelables, ainsi que leur rythme de développement** : le photovoltaïque au sol, le photovoltaïque sur toitures (grandes installations et résidentielles), l'éolien terrestre, l'éolien en mer posé ou flottant,

<sup>8</sup> Un « déterminant d'un ensemble de scénarios », correspond, dans le cadre de ce document, à une hypothèse susceptible de varier sur chacun des scénarios de l'ensemble.

- le dimensionnement du parc de production par rapport à la consommation au regard des éventuels exports d'énergie
- le niveau de sobriété (partiellement décrit dans le projet de SNBC),
- la flexibilisation des usages,
- le niveau de développement du stockage par batterie centralisée ou décentralisée.

Ces déterminants résultent de différents choix publics concernant le système électrique, énergétique (décrits dans le projet de SNBC ou non) ou dépassant ceux-ci. Certains choix publics ne concernent que l'un des déterminants. D'autres choix publics ont un effet sur plusieurs de ces déterminants. A titre d'illustration, nous établissons ici une première liste de l'ensemble des choix publics qui peuvent conduire à différents jeux d'hypothèses pour le système électrique. Les choix publics sont classés en trois catégories, ceux influençant principalement le mix de production, ceux influençant conjointement le mix de production et la consommation, et ceux influençant principalement la consommation<sup>9</sup>. Cette liste pourra être complétée en séance ou ultérieurement avec de nouveaux sujets identifiés.

### 5.2.1 Choix publics influençant principalement le mix de production

#### Choix public concernant l'option « nouveau nucléaire »

Un des principaux déterminants laissés ouverts par la SNBC concerne la filière nucléaire. Comme indiqué ci-dessus, deux familles de scénarios seront ainsi considérées :

- l'une avec l'option « nouveau nucléaire » ouverte
- et l'autre avec l'option « nouveau nucléaire » fermée.

Au-delà de ce choix public, se pose une question sur la définition du volume cible et le rythme nécessaire pour l'atteindre.

#### Choix publics s'agissant de la fermeture du parc nucléaire existant

Plusieurs trajectoires de puissance installée du nucléaire existant peuvent être établies selon que l'on considère que les tranches nucléaires du parc sont déclassées à 50 ou 60 ans ou avec un panachage des prolongements de durée de vie en fonction des centrales considérées.

#### Choix publics autour de l'intégration paysagère des moyens du système électrique

La construction de nouvelles infrastructures énergétiques, y compris renouvelables, peut faire l'objet d'oppositions locales. Ceci constitue un trait dominant de nos sociétés, et n'est pas propre à la France. L'intégration de ce paramètre dans les futures trajectoires constitue un enjeu fort des futurs scénarios, et constitue l'un des objets de travail du GT « scénarisation ». Les choix concernant l'intégration paysagère des moyens du système électrique sont ainsi susceptibles d'influencer :

- la part de l'éolien et du photovoltaïque dans le mix électrique,
- la composition de la filière éolienne (terrestre et en mer posée et flottante),
- la part des centrales au sol dans la filière photovoltaïque,
- le développement du réseau.
- La trajectoire sur le nucléaire dans les scénarios de renouvellement du parc.

---

<sup>9</sup> La dimension sociétale des choix publics est traitée dans un groupe de travail dédié « évolutions des modes de vie et aspirations des français à l'horizon 2050 ».

### *Choix publics de dimensionnement du parc de production par rapport à la consommation au regard des éventuels exports d'énergie*

Avec un parc de production et un niveau de consommation donnés, le niveau d'export résulte de la préséance économique entre moyens de production à l'échelle européenne.

Dans une France visant l'atteinte de la neutralité carbone, il est légitime de s'interroger sur l'acceptation d'avoir un niveau national de productible décarboné (énergies renouvelables et/ou nucléaire) qui permette de disposer d'exports dans le cadre de l'ordre de préséance économique à l'échelle européenne qui ne soient pas vécus comme une charge par la collectivité (pouvoirs publics, consommateurs). En effet, dans un contexte où la sobriété est promue, l'export d'une part de l'énergie produite peut rester incompris, alors qu'il peut être nécessaire à la décarbonation du reste de l'Europe. Le choix sur les exports décarbonés est ainsi susceptible d'influencer le dimensionnement de l'ensemble du parc national de production d'électricité.

#### *5.2.2 Choix publics influençant conjointement le mix de production et la consommation*

##### *Choix publics sur l'organisation du système électrique*

Le développement du système électrique peut s'organiser selon une approche plutôt centralisée ou plutôt décentralisée. Ainsi, le nombre, la puissance unitaire, la localisation et le niveau de tension de raccordement des actifs développés peuvent significativement différer d'une approche à l'autre. L'acceptabilité des infrastructures ainsi que les coûts du système (coût de production et coûts des réseaux) sont alors susceptibles de varier en conséquence. Ces choix sont susceptibles d'influencer :

- le nombre de centrales photovoltaïques,
- le développement du photovoltaïque chez les particuliers,
- le dimensionnement des parcs éoliens,
- la puissance unitaire des centrales,
- le développement du stockage centralisé ou du stockage chez les particuliers,
- ainsi que la cartographie des réseaux.

##### *Choix publics des politiques d'implications des différents acteurs de la société : grands industriels, PME et citoyens*

Selon la nature des politiques retenues, les acteurs qui porteront les aspects de la transition énergétique seront différents. Par exemple, le développement de l'efficacité énergétique, la constitution d'une filière photovoltaïque résidentielle ou encore du stockage chez les particuliers nécessitera une mobilisation forte des PME et des citoyens. A l'inverse, le développement du nucléaire et de la captation et du stockage de gaz carbonique (CSC) sera porté par les grands industriels. Les choix d'implications des différents acteurs sont ainsi susceptibles d'influencer les déterminants mentionnés en 6.2.4 ainsi que le CSC.

##### *Choix sur le niveau de sécurité d'approvisionnement*

La nature et les occurrences des épisodes de déséquilibre du système électrique peuvent changer de manière significative avec l'intégration massive d'énergies renouvelables intermittentes. L'acceptation et les choix de gestion autour de ces épisodes extrêmes dimensionneront le parc de production, les capacités de stockage la flexibilité demandée à la consommation et le réseau.

#### *5.2.3 Choix publics influençant principalement la consommation*

##### *Choix sur la sobriété*

La sobriété pourrait reposer sur une implication des consommateurs et des institutions pour les aspects de campagne d'information et de sensibilisation. Ce choix public serait choisi ou subi et d'amplitude différente. Il est susceptible d'influencer le niveau de demande électrique de différents usages.

#### *Choix sur la flexibilisation des usages*

La flexibilisation des usages nécessite une implication des consommateurs, tant pour la réponse à un signal tarifaire, la perte potentielle de confort que pour la mise en place d'équipements spécifiques (box énergie, prises connectées, *vehicle-to-grid*, autres appareils pilotables, batteries, etc.). Ces choix sont susceptibles de modifier le profil de différents usages, d'avoir un coût (tant économique qu'environnemental) ou de participer au développement de batteries localisées chez les consommateurs.

#### *Choix sur les données personnelles*

L'instauration de compteurs intelligents a donné lieu à des réactions contrastées chez les consommateurs s'agissant de l'accès à leurs données personnelles. Les perspectives de développement de solutions autour de la maison connectée ou du pilotage de la charge (effacement) peuvent réactiver ces questions et interroger sur certains niveaux de pilotabilité de la consommation électrique.

### **5.3 Des variantes pour tester la résilience du système électrique**

La résilience du système électrique de demain face aux incertitudes (telles qu'elles sont aujourd'hui appréhendées) constitue un enjeu central des prochains scénarios du Bilan prévisionnel. Une attention particulière sera apportée à cet enjeu dans le cadre du GT scénarisation.

Aux scénarios décrits par les déterminants et les choix mentionnés dans la section 5.2, s'ajouteront deux séries de variantes. Elles pourront s'articuler autour de déterminants de natures différentes et chercheront à tester la résilience du système électrique à la mise en œuvre effective des leviers de transition énergétique. L'approche retenue pourra adopter la méthodologie des « moindres regrets ».

Cette méthode est détaillée dans l'encadré ci-après, avec un exemple simple à titre d'illustration.

Les deux séries de variantes proposées par la suite s'inscrivent dans le cadre de cette approche. Une première série de variantes aura pour objet les éléments **endogènes** aux choix publics sur le mix énergétique et étudiera notamment les cas où certains des défis techniques et sociétaux présumés acquis ne sont pas relevés. Cette série de variantes est décrite dans la section 5.3.1.

L'approche pourra consister à évaluer les regrets qui pourraient survenir si les défis technologiques et comportementaux nécessaires à l'atteinte de la neutralité carbone n'étaient pas satisfaits. Ces regrets pourront être d'ordres économiques, sociétaux ou environnementaux. Le système énergétique étant conduit à la neutralité carbone sans l'option concernée, les autres leviers pourront donc être plus sollicités. Certains cas pourront conduire à des émissions nettes positives car les leviers restants pourront être insuffisants<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> Le commentaire est, d'ailleurs, parfaitement valable pour les scénarios. En effet, leur faisabilité est instruite par l'exercice technique de réalisation du Bilan prévisionnel de long terme.

Une seconde série de variantes concernera les éléments **exogènes** à la politique énergétique nationale concentrés principalement sur les risques géopolitiques et climatiques. Cette série de variantes est décrite dans la section 5.3.2.

L'approche des « moindres regrets » consistera dans cette série de variantes à s'assurer de la robustesse des décisions engagées et d'évaluer les surcoûts pour atteindre la neutralité carbone dans des contextes moins favorables.

DOCUMENT DE TRAVAIL

*Pour évaluer la robustesse d'une stratégie au regard de l'incertitude sur son contexte de mise en œuvre, il est possible de recourir à la méthode d'analyse de moindres regrets*

Une analyse suivant le critère du moindre regret consiste à envisager que c'est la plus mauvaise situation qui va se réaliser et à choisir alors la stratégie de décision la moins mauvaise dans ce scénario. L'objectif est donc de se prémunir contre la pire situation, même si celle-ci peut ne pas arriver. Dans la pire des situations, le regret vis-à-vis de la décision retenue sera néanmoins minimisé.

Plus concrètement, l'analyse suivant le critère de moindre regret suit trois étapes. La première étape consiste à établir les stratégies  $S_x$  à considérer, représentées par exemple par les scénarios mentionnés précédemment. Ici, les stratégies consistent à activer les leviers permettant d'atteindre les objectifs de la SNBC pour respecter la neutralité carbone. Différentes situations de mise en œuvre ou événements  $E_y$  doivent ensuite être considérées. Ces situations de mise en œuvre ou événements peuvent concerner le contexte international mais aussi les défis techniques ou comportementaux à relever pour effectivement activer les leviers et atteindre la neutralité carbone de la France. L'analyse vise ainsi à déterminer le regret induit par la défaillance d'un des leviers qui aurait permis d'atteindre la neutralité carbone.

Préalablement à l'évaluation des regrets, la deuxième étape consiste à évaluer les couples stratégies – événements ( $S_x, E_y$ ). L'évaluation est souvent pensée en termes économiques mais elle pourrait également être réalisée d'un point de vue technique (en matière de sécurité d'approvisionnement) ou d'un point de vue environnemental (émissions de CO<sub>2</sub> sur la trajectoire par exemple). De façon générique, nous parlerons dans la suite de  $\text{gain}(S_x, E_y)$  pour l'évaluation de la stratégie  $S_x$  dans l'évènement  $E_y$ .

La troisième étape consiste à évaluer le regret de chaque stratégie. Le regret  $R(S_x, E_y)$  d'une stratégie  $S_x$  dans le contexte d'un événement  $E_y$  correspond à la différence entre le gain maximum pour cet événement  $E_y$  avec le gain pour cette stratégie  $S_x$  dans le contexte de cet événement  $E_y$ . Le regret s'évalue avec la formule suivante :

$$R(S_x, E_y) = \text{gain\_max}(E_y) - \text{gain}(S_x, E_y)$$

En conséquence, le regret est nul pour la stratégie  $S_{\text{gain\_max}}(E_y)$  permettant de maximiser le gain dans le contexte de l'évènement  $E_y$ .

Chaque stratégie est ensuite évaluée au regard du regret maximal qu'elle est susceptible de générer.

$$R_{\text{max}}(S_x) = \max R(S_x, E_y) = \max(\text{gain\_max}(E_y) - \text{gain}(S_x, E_y))$$

La stratégie de moindre regret est alors celle qui permet de minimiser le regret maximal

$$S_{\text{moindre\_regret}} = \min(R_{\text{max}}(S_x)) = \min(\max(\text{gain\_max}(E_y) - \text{gain}(S_x, E_y)))$$

A titre d'illustration, considérons le cas simplifié suivant. Une consommation totale doit être alimentée par un unique moyen de production à dimensionner. Néanmoins, il existe une incertitude sur le niveau qu'atteindra la consommation qui peut prendre quatre valeurs, par exemple résultant de différents transferts d'usage : 2, 4, 8 ou 10 TWh. Le moyen de production peut également être dimensionné suivant ces quatre valeurs. Les quatre dimensionnements de la production correspondent aux stratégies et les quatre niveaux de consommation correspondent aux situations de mises en œuvre ou évènements. Le tableau ci-dessous décrit le gain pour la collectivité pour chaque couple stratégie – évènement. Les stratégies sont en colonnes et les évènements sont en ligne.

Tableau 2 Illustration de gains pour des couples stratégie – évènement ou dimensionnement de la production – consommation

Stratégie	S1 : 2 TWh	S2 : 4 TWh	S3 : 8 TWh	S4 : 10 TWh	Gain max
Evènement					
E1 : 2 TWh	100	50	0	-100	100
E2 : 4 TWh	100	200	100	0	200
E3 : 8 TWh	100	200	250	200	250
E4 : 10 TWh	100	200	300	450	450

Le tableau ci-dessous illustre l'évaluation du regret pour chaque stratégie dans chaque évènement. Pour obtenir le regret de chaque stratégie dans chaque évènement, le raisonnement est le suivant. Supposons que l'évènement E1 se réalise. La meilleure stratégie est alors S1. Si la stratégie effectivement choisie est S1, l'entreprise n'a pas de regrets d'où 0 dans la cellule S1/E1 du tableau ci-dessous. Si, par contre la stratégie effectivement choisie est S2, le gain réalisé n'est que 50 alors qu'avec S1, le gain aurait été maximal, à 100. Le regret s'exprime alors par la différence  $100 - 50 = 50$ , repris dans la cellule E1/S2. Les cellules du tableau se remplissent ainsi. La dernière ligne du tableau évalue le regret maximal pour chaque stratégie. On constate ainsi qu'ici, compte tenu des hypothèses, la stratégie de moindre regret est celle consistant à opter pour le dimensionnement de la production à 8 TWh.

Tableau 3 Illustration du regret pour des couples stratégie - évènement

Stratégie	S1 : 2 TWh	S2 : 4 TWh	S3 : 8 TWh	S4 : 10 TWh
Evènement				
E1 : 2 TWh	0	50	100	200
E2 : 4 TWh	100	0	100	200
E3 : 8 TWh	150	50	0	50
E4 : 10 TWh	350	250	150	0
Regret max	350	250	<b>150</b>	200

### 5.3.1 Des variantes sur des *paramètres endogènes* à la politique énergétique française

L'un des enjeux du Bilan prévisionnel est d'identifier les jalons clés sur les trajectoires des scénarios, notamment s'agissant de la disponibilité de certaines technologies afin de permettre d'atteindre de façon robuste l'objectif de neutralité carbone.

Les scénarios précédemment mentionnés supposent en effet que certains défis techniques et sociétaux sont effectivement relevés. Ces défis, bien que considérés comme raisonnables, comportent une part d'incertitude.

A l'aide de variantes dédiées, il est proposé d'évaluer les regrets, i.e. les surcoûts économiques, sociétaux et environnementaux pour atteindre la neutralité carbone si l'un de ces défis fait finalement défaut. Nous chercherons par conséquent à éclairer l'équilibre du système électrique dans ces situations.

La sensibilité de l'équilibre du système à l'absence de certains leviers structurants pourra notamment être étudiée : par exemple, des configurations dans lesquelles les objectifs d'efficacité ou de sobriété énergétique ne seraient pas atteints ou dans lesquelles la capacité de production nucléaire ou renouvelable s'avèrerait plus faible que prévue, pourront ainsi faire l'objet d'analyses de sensibilité. Il sera ainsi possible de s'interroger sur les autres leviers mobilisables pour permettre néanmoins l'atteinte de la neutralité carbone.

Les défis listés ci-dessous décrivent les variantes sur lesquelles s'appuiera l'évaluation des moindres regrets. Ils concernent les déterminants suivants :

- le nucléaire,
- l'acceptabilité des énergies renouvelables,
- l'efficacité énergétique,
- l'évolution des comportements des citoyens,
- la gestion de la biomasse,
- et la captation et stockage du gaz carbonique (CSC).

#### *Défi sur le nucléaire*

Dans les scénarios avec l'option « nouveau nucléaire » ouverte, la filière nucléaire va devoir trouver un équilibre entre la faisabilité technique de nouvelles centrales nucléaires et le respect des modalités d'exploitation et des normes de sécurité acceptable pour la société, tant pour le fonctionnement des centrales que pour la gestion de leurs déchets. Ce défi nécessite simultanément une acceptation du nucléaire par la société et la capacité de la filière à relever le défi industriel.

#### *Défi sur l'acceptabilité des énergies renouvelables*

Le potentiel de développement des énergies renouvelables est fortement dépendant de leur acceptation par la population. Ce défi principal pour les énergies renouvelables peut également s'accompagner d'un défi industriel. La dynamique des filières de production doit être en mesure de suivre la trajectoire de développement attendue. Le défi industriel est d'autant plus notable que les changements de rythmes de développement imposés aux filières de production sont conséquents par rapport au rythme passé.

#### *Défi sur l'efficacité énergétique*

L'efficacité énergétique représente un défi industriel pour la filière française du bâtiment. Une filière trop peu coordonnée et de taille insuffisante pourrait amener à retarder l'atteinte des objectifs.

#### *Défi sur l'évolution des comportements des consommateurs*

Une évolution des comportements des consommateurs ne pourrait être considérée comme acquise. La réalisation d'un système énergétique peut reposer sur un consommateur actif et volontaire en matière de sobriété et de flexibilité des usages. Le défi correspond à rendre les comportements effectifs dans la société.

#### *Défi sur la gestion de la biomasse*

L'ensemble du projet de SNBC repose sur une gestion au plus juste de la biomasse tant pour le développement du puits de carbone que pour la constitution d'une filière bio-sourcée.

#### *Défi sur captation et le stockage de gaz carbonique (CSC)*

Le projet de SNBC repose sur un couplage de la biomasse avec la technologie de captation et de stockage du gaz carbonique pour augmenter la quantité d'émissions négatives. Cette technologie fortement capitalistique n'est pas encore mature bien que sa faisabilité soit démontrée. Il y a un risque économique et industriel à ne pas voir la technologie se déployer de manière suffisante.

Il existe également un défi sociétal à voir cette technologie acceptée par les populations avoisinantes des sites de stockage.

### **5.3.2 Variantes sur les paramètres exogènes à la politique énergétique française**

Mis à part les variantes permettant de qualifier les regrets associés aux défis technologiques et comportementaux, il est également utile de considérer le fonctionnement du système électrique français établi dans le cadre du projet de SNBC dans différents contextes macroéconomiques au niveau mondial. Les variantes présentées ci-dessous pourront servir à illustrer le fonctionnement du système électrique sous l'hypothèse de l'atteinte de la neutralité carbone à l'horizon 2050 à l'échelle française dans ces différents contextes internationaux.

Cette série de variantes est caractérisée par les éléments exogènes à la politique énergétique française concentrés principalement sur les risques macroéconomiques et climatiques. En particulier, dans le cas où les émissions mondiales de gaz à effet de serre sont non contrôlées, le réchauffement climatique pourrait perturber les ressources et la stabilité du système électrique.

Les déterminants dont les effets seront étudiés sont les suivants :

- la croissance,
- le PIB,
- le niveau d'industrialisation,
- l'état du réchauffement climatique,
- l'avancée de la politique européenne en matière de lutte contre le réchauffement climatique
- et la tension sur les marchés des combustibles fossiles.

Trois variantes sont proposées pour étudier l'influence de ces paramètres sur la résilience du système électrique français à l'horizon 2050. La première variante correspondra au cas de référence supposée par la SNBC. Les deux autres cas éclaireront des contextes macroéconomiques différents.

Ces variantes sont à discuter et affiner.

#### **5.3.2.1 Une économie relancée autour des transitions écologiques - A**

Ce scénario considère une croissance économique tendancielle et un dérèglement climatique conforme à la trajectoire du GIEC RPC 4.5. Il présuppose une coopération internationale rendant envisageable le respect des accords de Paris. Pour la France, il impose une économie en partie

relocalisée dans les secteurs où il y a une opportunité de réduction de l’empreinte carbone française. La croissance est celle du corps d’hypothèses initiales de la SNBC. L’Europe est engagée dans une transition énergétique réussie et le marché des coûts de combustibles n’est pas tendu.

Les émissions de la France atteignent les objectifs de neutralité carbone.

### *5.3.2.2 Croissante forte et non-respect des accords de Paris par la communauté internationale - B*

Un essor économique mondial est maintenu par une ouverture des marchés et une absence de respect des accords de Paris par la majorité des pays de la communauté internationale. Les investissements pour assurer la transition énergétique en France sont réalisés en partie grâce au contexte économique favorable. La demande énergétique est en forte croissance mais la hausse est partiellement atténuée par une industrie qui n’est pas fortement relocalisée en France. Les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> atteignent des conditions entraînant la température sur la trajectoire du GIEC RPC 8.5. L’Europe n’est pas engagée dans une transition énergétique réussie et le marché des combustibles est tendu.

Les émissions de la France atteignent les objectifs de neutralité carbone.

### *5.3.2.3 Crise économique et tensions géopolitiques - C*

En raison d’un contexte mondial de tension géopolitique créant une situation économique dégradée, la croissance est ralentie et l’économie est partiellement relocalisée par la montée des politiques protectionnistes. La demande énergétique est faible en raison de la faible croissance mais est compensée partiellement par certains secteurs de l’industrie qui se relocalisent. L’Europe est engagée dans une transition énergétique partiellement achevée et le marché des combustibles n’est pas tendu en raison de la faible demande.

Le niveau d’émissions mondial de CO<sub>2</sub> conduit à la trajectoire de température du GIEC RPC 4.5.

Les émissions de la France atteignent les objectifs de neutralité carbone.

## 6. Premiers éléments de cadrage des trajectoires d'évolution du mix électrique

Lors de la construction de scénarios, les paramètres peuvent prendre différentes valeurs, souvent qualifiées par leur niveau relatif par simplification, par exemple haut, moyen, bas. En l'absence d'échelle de valeurs explicites, les qualifications en niveau peuvent être diversement interprétées. Par exemple, une valeur de 500 TWh peut alternativement être considérée comme « haute » ou « basse » selon les participants à la concertation. C'est pourquoi, avant la conception même des scénarios, il apparaît nécessaire de pouvoir concerter sur l'échelle des valeurs que peuvent prendre les paramètres différenciant les scénarios, et de les comparer aux sources et études de référence existant dans la littérature.

### 6.1 Les paramètres macro-économiques

La méthode proposée consiste à retenir **une unique hypothèse centrale pour les principaux paramètres macro-économiques, commune à tous les scénarios**. Ceci permettra de faciliter la comparaison des scénarios. Cette proposition fait suite aux commentaires remontés par plusieurs acteurs lors des restitutions des analyses du Bilan prévisionnel 2017, qui soulignaient la difficulté à comparer des scénarios reposant sur des fondamentaux macro-économiques différents.

Par ailleurs, l'étude des scénarios sera complétée par plusieurs variantes ou tests de sensibilité portant sur les différents paramètres macro-économiques, de manière à tester la résilience des scénarios à des évolutions s'écartant des trajectoires de référence : par exemple, le scénario est-il robuste à une démographie plus forte qu'anticipée ? à une croissance de l'activité en hausse par rapport à aujourd'hui ?

Ces paramètres seront cadrés par des scénarios macroéconomiques cohérents à l'échelle internationale. L'hypothèse sur le produit intérieur brut de la France pourra également être recalée pour tenir compte des effets des investissements tant du côté de la consommation (électrification, efficacité énergétique, transferts d'usages entre vecteurs) que du mix de production. Le recalage du produit intérieur brut se reflétera sur des variantes de trajectoires de consommation, en particulier sur la consommation industrielle.

#### *Population*

RTE propose de retenir le scénario central de l'INSEE<sup>11</sup> comme trajectoire de référence, de manière identique à celle retenue dans le cadrage de la SNBC. Celui-ci conduit à une population totale en France métropolitaine continentale<sup>12</sup> d'environ 71 millions d'habitants à l'horizon 2050. Les scénarios de l'INSEE contiennent également des hypothèses permettant de projeter le nombre de ménages à l'horizon 2050 : ainsi, le scénario central prévoit une diminution de nombre de personnes par ménage de 0,3% par an.

<sup>11</sup> INSEE, 2017, *Projections de population 2013-2050 pour les départements et les régions*, <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2859843>

<sup>12</sup> Le périmètre du Bilan prévisionnel correspond à la France métropolitaine continentale (tandis que le périmètre de la SNBC correspond à l'ensemble du territoire français).

Les variantes pourront être construites sur la base des autres scénarios INSEE disponibles et illustrés sur la figure suivante.

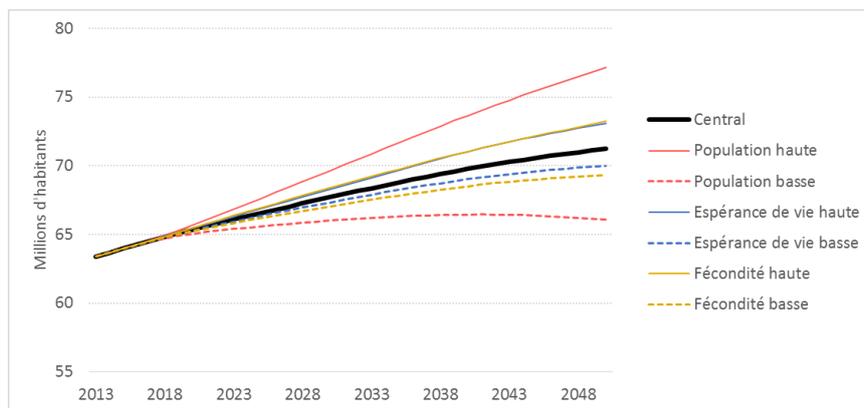


Figure 6. Scénarios INSEE d'évolution de la population en France métropolitaine continentale

### PIB et activité industrielle

La trajectoire de référence d'évolution du PIB sera basée sur les tendances actuelles et le consensus des économistes, de manière similaire à l'hypothèse de référence utilisée pour l'élaboration de la SNBC (entre 1,3% et 1,7% par an, valeurs à confirmer).

De même, en cohérence avec le cadrage de la SNBC, la trajectoire de référence pour l'évolution de l'activité industrielle correspond à une croissance de l'ordre de 1% par an. Ceci conduit néanmoins à une légère décroissance de la part de l'industrie dans l'activité économique, qui passe à 10% en 2050 au lieu de 11% aujourd'hui.

Une variante pourra être menée en intégrant une hypothèse de réindustrialisation de la France, en se basant par exemple sur celle étudiée dans le cadre de la SNBC (avec une part de l'industrie dans le PIB qui passerait à 16%).

### Scénario(s) climatique(s) de référence

Comme présenté en groupe de travail sur la base climatique<sup>13</sup>, les référentiels climatiques utilisés pour la simulation du fonctionnement du système électrique intégreront les effets du changement climatique, selon plusieurs trajectoires possibles. Ces trajectoires de changement climatique sont susceptibles d'affecter la consommation d'électricité (consommation de climatisation et de chauffage) mais également la production.

Les travaux réalisés par RTE depuis plusieurs années en partenariat avec Météo France permettent ainsi de disposer de plusieurs référentiels dits « à climat constant », notamment :

- Deux référentiels basés sur le climat à horizon 2050 pour des trajectoires d'évolution des émissions correspondant à deux scénarios du GIEC (RCP4.5 et RCP 8.5) ;

<sup>13</sup> Voir le site des actualités de la concertation pour le détail des documents et des présentations des autres groupes de travail : <https://www.concerte.fr/content/actualite-de-la-commission-perspectives-systeme-et-reseau>

- Un référentiel basé sur le climat à horizon 2000 (c'est-à-dire avec les données atmosphériques et de concentration de CO<sub>2</sub> de l'an 2000) ;
- Un référentiel climatique intermédiaire à horizon 2025, obtenu par analyse statistique du réchauffement entre les années 2000 et le référentiel climatique 2050 RCP8.5.

L'analyse réalisée se basera sur ces différents référentiels.

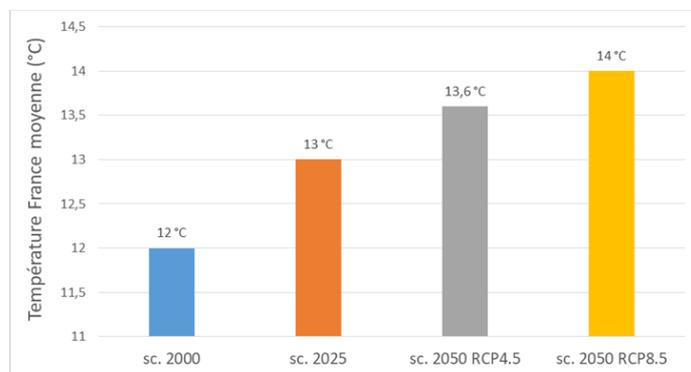


Figure 7. Températures France moyennes dans les différents référentiels climatiques

Tableau

Tableau 4 Fourchettes proposées pour les hypothèses exogènes au système énergétique

Paramètres définissant les scénarios	Hypothèse retenue dans le projet de la SNBC pour l'horizon 2050	Proposition de fourchette de valeurs
Nombre de logements	Scénario central de l'INSEE <ul style="list-style-type: none"> <li>• Population : ~71 millions en 2050</li> <li>• Diminution du nombre de personnes par ménage de 0,3% par an</li> </ul>	Variante des scénarios INSEE
PIB	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PIB tendanciel à préciser (+3% de supplément de PIB en 2050 résultant de la transition énergétique)</li> </ul>	En ligne avec le consensus (entre 1,3% et 1,7%)
Part de l'industrie dans le PIB	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Industrie : 10% du PIB</li> </ul>	Variante à 16% du PIB proposée dans la SNBC Discussions dans le cadre du GT consommation
Référentiel climatique	Référentiel climatique à déterminer parmi ceux présentés en GT « référentiel climatique » : 2050 RCP4.5 ou 2050 RCP8.5 ou 2025	

## 6.2 L'évolution de la demande d'électricité

La demande en électricité dépend d'une part des paramètres macro-économiques exogènes définis ci-dessus, et d'autre part, de plusieurs choix publics et collectifs relatifs à l'évolution du mix énergétique :

- le niveau d'efficacité énergétique mis en œuvre,
- la sobriété supposée dans les usages que font les consommateurs de l'énergie électrique,
- le rythme des transferts d'usage vers l'électricité, notamment dans le secteur des transports, du bâtiment ou encore de l'industrie,
- le volume d'électricité envisagé pour les couplages avec d'autres vecteurs (en particulier *power-to-gas*, *power-to-heat*),
- la flexibilité de certains usages électriques (par exemple les véhicules électriques, les usages dits blancs, ou encore plus largement les effacements industriels, tertiaires ou résidentiels).

**La SNBC donne des orientations précises pour l'évolution de la consommation d'électricité en énergie (pas en puissance).** Elle est ainsi adossée à des hypothèses sur l'évolution des niveaux d'efficacité énergétique, de transferts d'usage, de couplage avec les autres vecteurs ou encore des efforts de sobriété mis en œuvre par les consommateurs. En revanche, la problématique des appels de puissance, et plus largement de l'équilibre entre l'offre et la demande à chaque instant, n'est pas abordée dans la SNBC. Ceci laisse donc ouvert la question de la flexibilité des usages.

**Plus précisément :**

- **S'agissant de l'efficacité énergétique et / ou de la sobriété<sup>14</sup> supposée de l'utilisation de l'électricité**, le projet de SNBC fournit plusieurs indications (cibles ou fourchettes) sur leur évolution, qui traduisent globalement un niveau relativement ambitieux.
- **Sur les couplages entre le gaz et l'électricité**, le cadrage défini par le projet de SNBC établit des orientations, notamment sur les volumes d'électricité nécessaire pour la production de gaz de synthèse. Ces volumes s'inscrivent en nette hausse (alors qu'ils sont aujourd'hui quasi-nuls) en particulier pour la production d'hydrogène par électrolyse, et de manière plus réduite pour la production de méthane. En effet, dans la SNBC, le gaz décarboné provient de manière privilégiée de la biomasse (méthanisation ou pyrogazéification), tandis que le développement du *power-to-gas* est supposé plus limité, de même que les imports de gaz décarboné depuis d'autres pays européens<sup>15</sup>. Toutefois, un développement plus important du *power-to-gas* pour décarboner le vecteur gaz ne peut être complètement exclu à ce stade et des variantes sur le volume de consommation électrique pour le *power-to-gas* pourront être testées dans les scénarios à l'horizon 2050. Le *power-to-gas* peut également fournir des flexibilités au système électrique. En conséquence, les variantes de verdissement du gaz par le *power-to-gas* conduiront à considérer différents niveaux et mix de flexibilité pour le système électrique.

Les scénarios de long terme du Bilan prévisionnel s'intégreront dans ce cadrage en prenant comme référence la répartition de la demande entre les différents vecteurs énergétiques de la SNBC et en particulier la trajectoire de consommation électrique associée. La déclinaison de cette trajectoire selon les différents secteurs et les différents usages sera discutée dans le cadre du groupe de travail technique sur la consommation, lancé depuis mars 2019. Elle nécessitera un travail approfondi de projection de certaines orientations données dans le projet de SNBC pour en définir des paramètres

<sup>14</sup> La frontière entre efficacité énergétique et sobriété est rarement définie de manière précise. Celle-ci pourra être discutée dans le cadre du groupe de travail sur la représentation des attentes de la société.

<sup>15</sup> Ces derniers ne sont pas évoqués dans le cadre de la SNBC alors qu'ils pourront effectivement participer au bouclage énergétique du secteur gazier.

détaillés (par exemple, les hypothèses d'efficacité énergétique et de sobriété affichées dans le projet de SNBC ne sont pas spécifiques à l'électricité et portent sur l'ensemble des vecteurs, il s'agira donc de pouvoir les décliner plus spécifiquement sur les usages électriques).

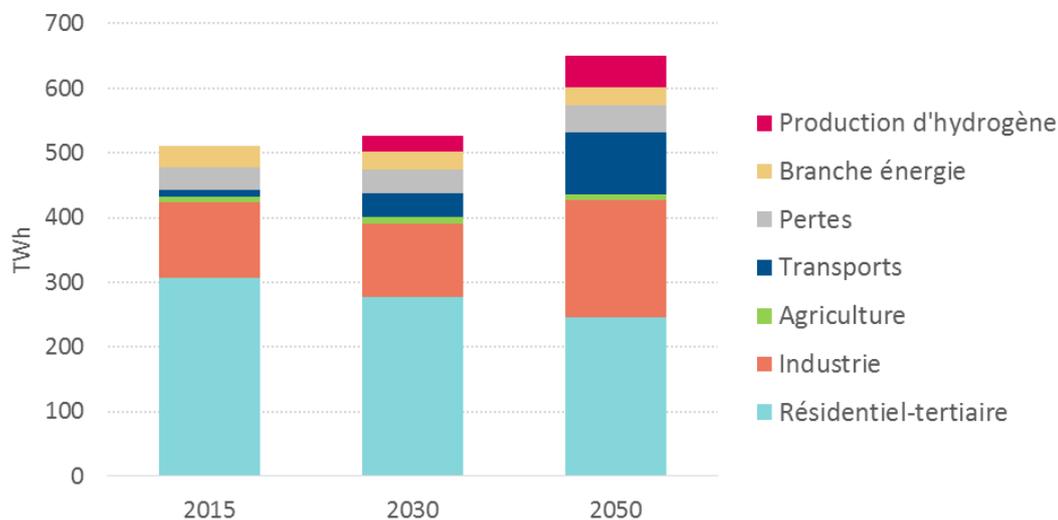


Figure 8. Évolution de la demande d'électricité dans la trajectoire du projet de SNBC (périmètre SNBC, incluant les DOM-TOM et l'ensemble des consommations du secteur énergétique).

Comme indiqué précédemment, l'exercice du Bilan prévisionnel doit permettre d'établir la robustesse du fonctionnement du système électrique à différentes configurations, notamment différentes évolutions de la demande d'électricité. Des variantes seront donc nécessaires pour tester la robustesse du système électrique à des trajectoires d'électrification s'écartant de celles retenues dans la SNBC (par exemple, rythme d'électrification plus lent ou plus rapide que prévu). Il s'agira également de tester les effets d'un retard ou d'une accélération des efforts d'efficacité énergétique ou de sobriété.

#### Tableau récapitulatif des paramètres sur l'évolution de la demande en électricité

Le tableau suivant expose les hypothèses permettant respectivement de concevoir les scénarios et les variantes de consommation. Lorsque les éléments sont disponibles, le cadrage donné par la SNBC est également rappelé afin de situer les propositions par rapport à celui-ci<sup>16</sup>. Si d'autres paramètres sont identifiés comme pertinents, ils pourront être ajoutés aux tableaux ci-après. Les fourchettes proposées pour décrire ces différentes hypothèses de consommation pourront être discutées en séance afin d'établir un socle commun de compréhension.

<sup>16</sup> Direction Générale de l'Énergie et du Climat, 2019. *Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat*. 15 mars 2019.

Tableau 5 Hypothèses d'efficacité et de sobriété énergétique, de transferts d'usages définies dans la SNBC, figées dans les scénarios de référence mais pouvant faire l'objet de sensibilités

Paramètres définissant les scénarios		Hypothèse retenue dans les projets de la SNBC ou de la PPE	Proposition de fourchette de valeurs
Efficacité énergétique		<p><b>Bâtiment</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Neuf : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 205 000 constructions neuves/an</li> <li>○ 75% de logement collectif en 2050</li> <li>○ 7 Mm<sup>2</sup> dans le tertiaire en 2050</li> </ul> </li> <li>• Rénovation : 1 000 000 de rénovations complètes équivalentes en 2050</li> <li>• Electricité spécifique : gains de consommation unitaire entre 15% et 60% en fonction des appareils entre aujourd'hui et 2050</li> </ul> <p><b>Industrie</b> : gains d'efficacité énergétique entre 20 et 40 % entre 2015 et 2050 en fonction des potentiels des filières</p>	Discussions dans le cadre du GT consommation
Sobriété / rationalisation des usages		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baisse de 1°C dans l'ensemble des bâtiments</li> <li>• Changement important des modes de consommation sans perte de confort</li> </ul>	Discussions dans le cadre du GT consommation
Transferts d'usages	Power-to-gas	50 TWh de consommation électrique	Autour de la valeur proposée par la SNBC, par exemple entre 0 et 100 TWh
	Electrification de l'industrie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taux d'électrification de 74 % des consommations du secteur de l'industrie (38% en 2015)</li> </ul>	Discussions dans le cadre du GT consommation
	Electrification de la mobilité	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voitures particulières <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Presque 100% électriques en 2040</li> <li>○ 12,5 kWh/100 km en 2050 : -30% par rapport à aujourd'hui</li> </ul> </li> <li>• Véhicules utilitaires légers <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 80% de part de marché en 2050</li> <li>○ 16,9 kWh/100 km en 2050 : -30% par rapport à aujourd'hui</li> </ul> </li> <li>• Poids lourds : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ 30% de part de marché en 2050</li> <li>○ 118 kWh/100 km : -40% par rapport à aujourd'hui</li> </ul> </li> </ul>	Discussions dans le cadre du GT consommation
	Electrification du chauffage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 30% de part de marché de l'électricité pour le chauffage dans le résidentiel, soit environ 47 TWh</li> <li>• 25% de part de marché de l'électricité pour le chauffage dans le tertiaire soit environ 13 TWh</li> </ul>	Discussions dans le cadre du GT consommation

### 6.3 Les trajectoires d'évolution pour les filières de production électrique

Le projet de SNBC laisse ouverte la question du mix électrique à l'horizon 2050. Afin de l'illustrer, une diversité de scénarios sera étudiée. Ils se distingueront en particulier sur le mix de production. Celui-ci peut être défini par la capacité des modes de production suivants :

- nucléaire,
- éolien terrestre,
- éolien en mer
- solaire photovoltaïque,
- hydraulique,
- électricité à base de biomasse ou de biogaz,
- *gas-to-power* (à partir de méthane *a priori* décarboné ou d'hydrogène),
- cogénération (basée sur de la biomasse, biogaz ou *gas-to-power*),
- unités de production rejetant du CO<sub>2</sub> équipées de système de captation et séquestration.

Les capacités présentées ci-après ainsi que leur représentation graphique ci-dessous sont à apprécier en prenant en compte trois effets. Tout d'abord, les filières industrielles sont à la recherche de rythme stable ou en croissance afin d'être en mesure de dimensionner convenablement leur outil industriel et leurs équipes. Par ailleurs, tout changement de rythme de développement d'une filière s'anticipe car elle a besoin de temps pour s'adapter (formation, embauche, investissement, capacité de traitement des déchets et recyclage, etc.). Enfin, à partir d'un certain temps, les capacités existantes devront être renouvelées. Par exemple, sous l'hypothèse d'une durée de vie des installations éoliennes de l'ordre de 30 ans, les fermes installées à partir de 2005 devront être progressivement renouvelées à partir de 2035.

Le facteur de charge des différentes technologies renouvelables de production fera l'objet d'une analyse détaillée dans le groupe de travail sur le référentiel climatique. Seront notamment discutés les principaux déterminants des facteurs de charge, c'est-à-dire l'effet du changement climatique sur les ressources renouvelables, l'exploitation des gisements d'énergies renouvelables, en particulier en fonction de leur localisation et de l'évolution technologique. Les premiers éléments fournis dans le cadre du groupe de travail sur la scénarisation seront ainsi reversés au groupe de travail sur le référentiel climatique. La modulation des moyens de production sera prise en compte lors de la simulation de l'équilibre entre l'offre et la demande, sur la base du classement de leurs coûts marginaux. Les moyens de production renouvelables pourront également être écrêtés en cas d'excès de production par rapport à la demande.

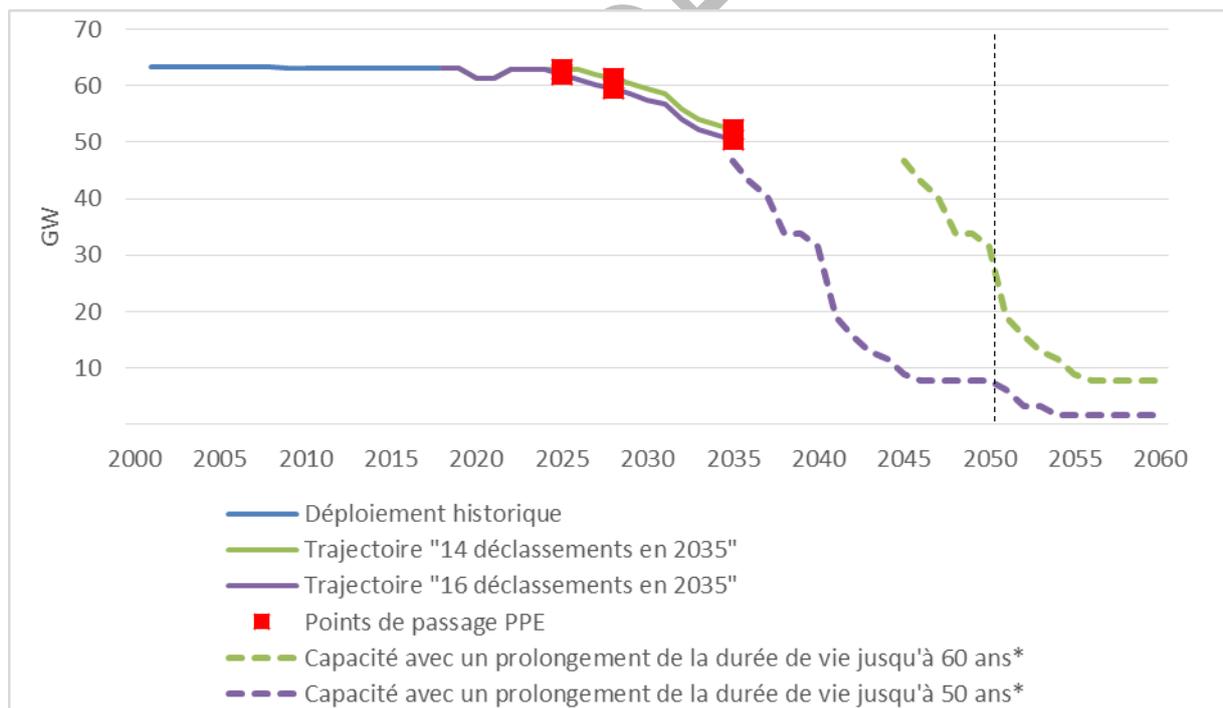
Les graphiques qui suivent permettent mettre en perspective les objectifs fixés par la PPE, les fourchettes de capacité envisageables pour 2050 avec la dynamique historique des différentes filières de production.

*Proposition de trajectoires pour le nucléaire existant sur la base des objectifs de la PPE et des visites décennales*

Depuis la fin des années 1990, la capacité nucléaire installée en France est de 63 GW. Elle devrait baisser avec l'arrêt de la centrale de Fessenheim en 2020 puis remonter à un niveau proche de son niveau initial lorsque l'EPR de Flamanville sera en service. La PPE mentionne l'option d'une fermeture à l'horizon 2025-2026 à la date de leur cinquième visite décennale, si certaines conditions relatives au prix de l'électricité et à l'évolution du marché de l'électricité à l'échelle européenne sont remplies, sur la base d'une décision à prendre en 2023. Entre 14 et 16 fermetures de réacteurs (dont Fessenheim) sont prévues par la PPE (suivant la fermeture ou non des deux réacteurs additionnels à l'horizon 2025-2026) pour atteindre 50% de nucléaire à l'horizon 2035, à l'échéance de la cinquième visite décennale (sauf pour deux réacteurs).

Au-delà de 2035, la capacité des centrales nucléaires existantes encore en fonctionnement pourra suivre une trajectoire comprise entre celle décrite par la fermeture des réacteurs à leur cinquième visite décennale ou celle décrite par la fermeture des réacteurs à leur sixième visite décennale.

*Figure 9. Trajectoires de capacités du nucléaire existant suivant les objectifs PPE et les cinquièmes et sixièmes visites décennales*



### Proposition de trajectoires pour l'éolien terrestre sur la base du développement récent et des objectifs de la PPE

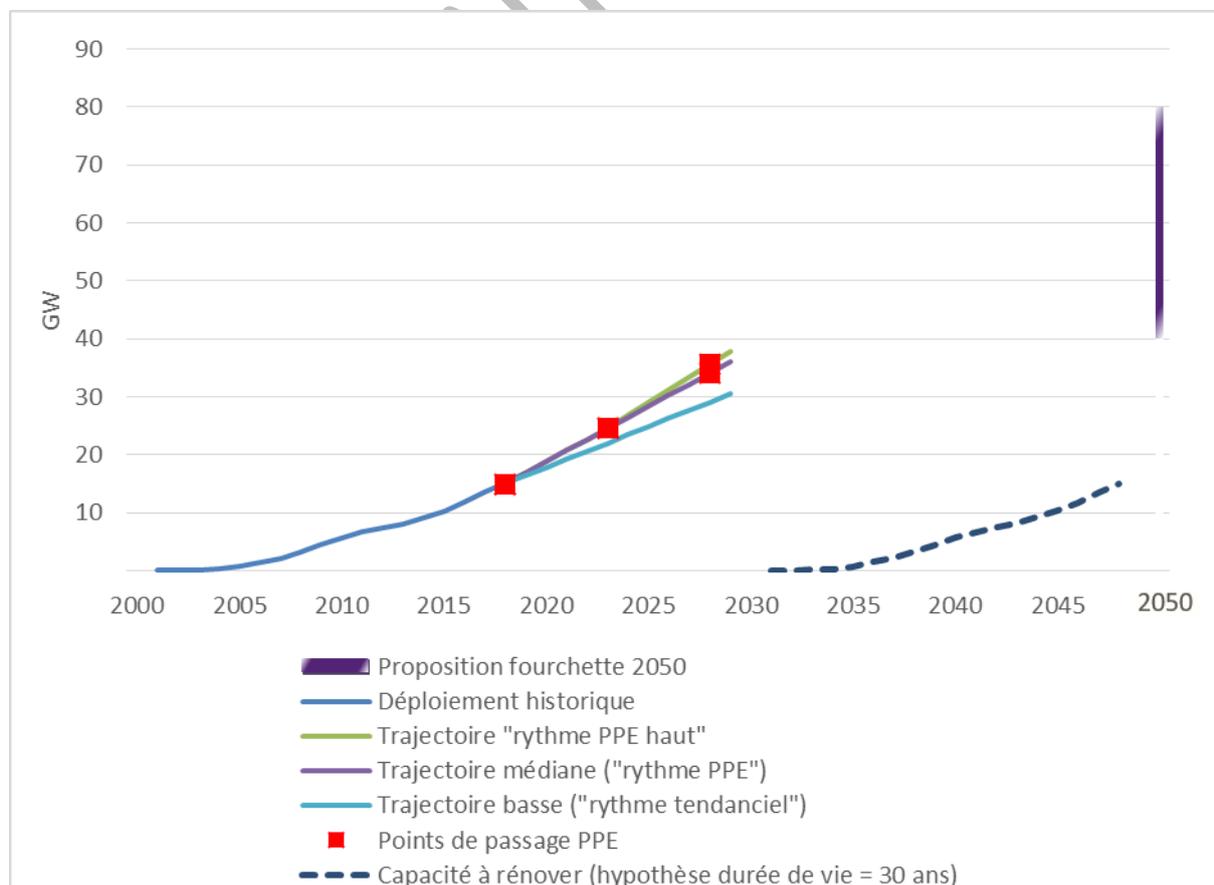
La production éolienne terrestre s'est développée depuis le début des années 2000. Sa croissance a connu des à-coups, variant entre 600 et 1800 MW/an sur les dix dernières années. Néanmoins, depuis les trois dernières années, le rythme de développement est plus régulier, dépassant 1400 MW/an.

Ce développement a permis d'atteindre l'objectif 2018 avec 15 GW de capacité éolienne installée. L'atteinte de l'objectif 2023 et de l'objectif bas 2028 de la PPE va nécessiter une accélération du rythme d'installation des éoliennes terrestres, pour atteindre 1900 MW/an en moyenne. L'atteinte de l'objectif haut en 2028 nécessite d'accélérer encore davantage après 2023 avec l'installation de 2200 MW/an en moyenne.

Par ailleurs, le parc installé pourra nécessiter un *repowering* à terme. Par exemple, sous l'hypothèse d'une durée de vie des installations éoliennes de l'ordre de 30 ans (comme concerté dans le cadre du Bilan prévisionnel 2017), les fermes installées à partir de 2005 devront être progressivement renouvelées à partir de 2035. Cette capacité doit être prise en compte dans le dimensionnement du développement de la capacité éolienne à cet horizon car la filière devra assurer conjointement l'accroissement de la capacité installée et le *repowering*.

En prolongeant le rythme actuel de développement de la capacité et en tenant compte du besoin de *repowering* sous l'hypothèse d'une durée de vie des installations de 30 ans, une capacité de l'ordre de 40 GW pourrait être installée à l'horizon 2050. Par ailleurs, le prolongement du rythme permettant d'atteindre l'objectif haut de la PPE en 2028, en supposant également le *repowering* nécessaire mis en œuvre pourrait permettre d'atteindre de l'ordre de 80 GW de capacité éolienne terrestre.

Figure 10. Trajectoires de capacités de l'éolien terrestre, objectifs PPE et fourchette envisageable pour 2050



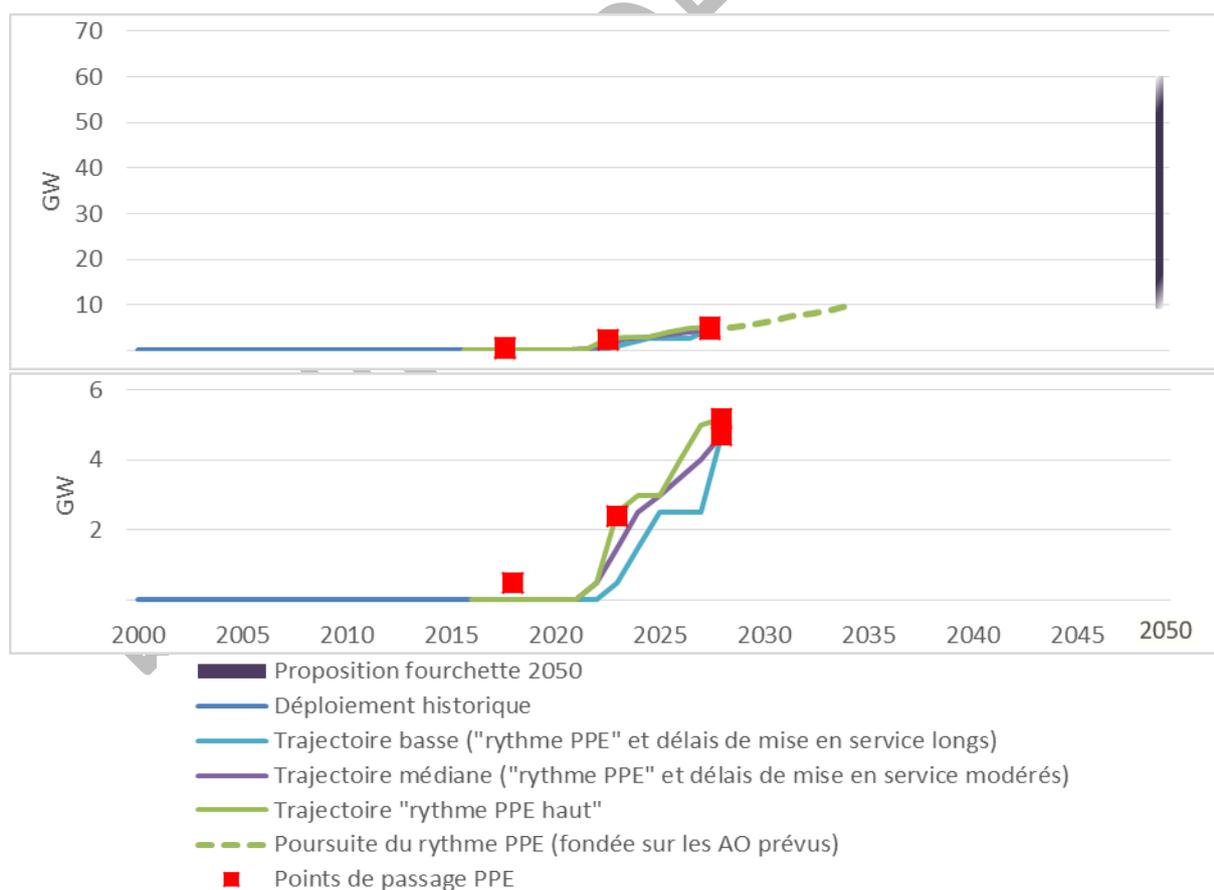
*Proposition de trajectoires pour l'éolien en mer sur la base du développement récent et des objectifs de la PPE*

La capacité de la filière d'éoliennes en mer devrait commencer sa croissance dans les prochaines années car les différents recours contre les projets retenus pour les premiers appels sont maintenant purgés.

Le projet de PPE fixe comme objectif une capacité installée de 2400 MW. L'atteinte de cet objectif ne peut se faire que si les délais de mise en œuvre sont maintenant particulièrement courts. Avec des délais de mise en œuvre plus modérés ou plus longs, la capacité installée d'éoliennes en mer devrait être entre 500 et 1500 MW à cette échéance. Les objectifs 2028 de la PPE s'établissent ensuite entre 4700 et 5200 MW. La prolongation de ce rythme d'installation à l'horizon 2035 devrait permettre d'installer 10 GW (capacité qui serait également atteinte mais en 2050 sous l'hypothèse d'un rythme d'installation de seulement 250 MW/an).

La prolongation de ce rythme jusqu'en 2050 conduirait à installer 25 GW d'éoliennes en mer. L'exploitation substantielle du gisement d'éoliennes en mer, posées ou flottantes, jusqu'à 60 GW nécessitera donc un fort accroissement du rythme d'installation, l'amenant jusqu'à 2500 MW/an en moyenne à partir de la fin de la PPE.

*Figure 11. Trajectoires de capacités de l'éolien en mer, objectifs PPE et fourchette envisageable pour 2050*



### Proposition de trajectoires pour le photovoltaïque sur la base du développement récent et des objectifs de la PPE

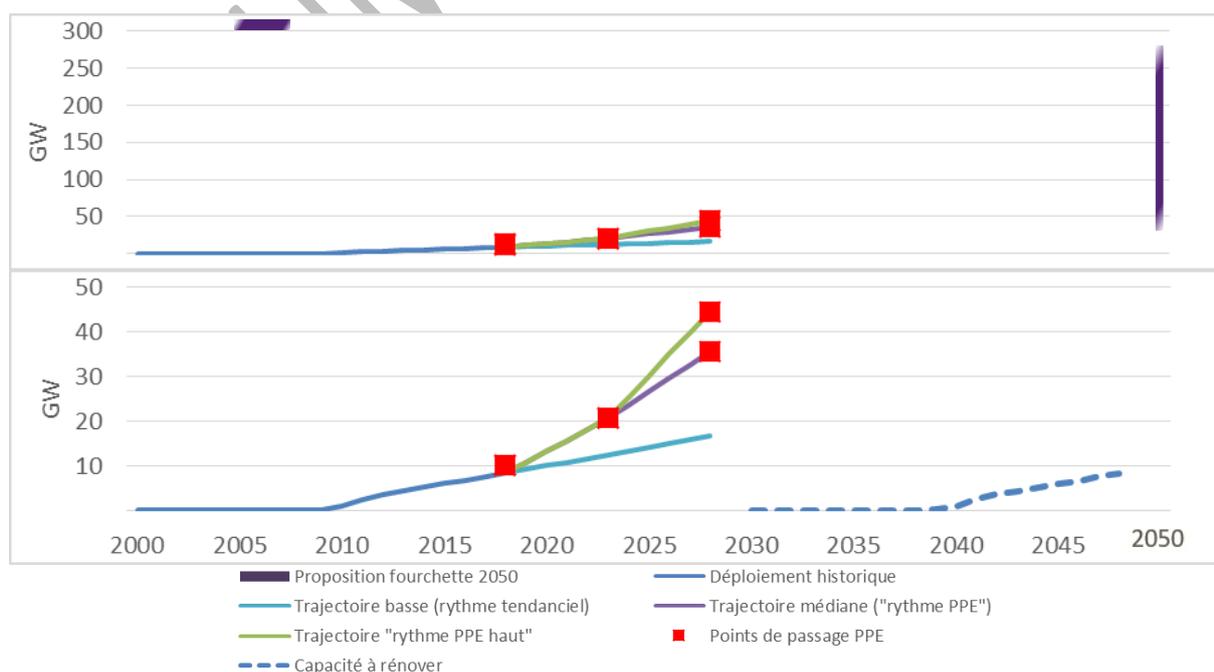
La production photovoltaïque a commencé à se développer à partir des années 2010. Elle a connu un boom d'installations à ce moment-là, suite à un moratoire sur un tarif d'achat très avantageux. Depuis les cinq ou six dernières années, la capacité photovoltaïque croît à un rythme moyen de l'ordre de 800 MW/an. La capacité installée était ainsi de plus de 8 GW à la fin de l'année 2018.

Or l'objectif 2018 fixé par la précédente PPE était de 10,2 GW. Pour l'atteindre, la capacité installée en moyenne chaque année aurait dû être de l'ordre de 1000 MW/an, soit 25% plus élevée que la moyenne des dix dernières années. L'atteinte de l'objectif 2023 du projet de PPE nécessiterait quant à lui une accélération du rythme d'installation de la production photovoltaïque à 2400 MW/an en moyenne, soit une multiplication par trois du rythme actuel d'installation. L'atteinte des objectifs bas et haut de la PPE en 2028 nécessiteraient d'accélérer encore davantage après 2023, avec un rythme moyen de 3000 et 4800 MW/an, soit une multiplication du rythme d'installation par 4 à 6 par rapport au rythme actuel. L'augmentation du rythme d'installations photovoltaïques, quoiqu'en rupture par rapport au rythme actuel, paraît atteignable car il est du même ordre que le rythme observé dans d'autres pays.

Par ailleurs, le parc installé pourra bénéficier d'un *repowering* en fonction de la durée de vie des installations. Par exemple, sous l'hypothèse d'une durée de vie de l'ordre de 30 ans, les capacités photovoltaïques installées à partir de 2010 devront être progressivement renouvelées à partir de 2040. La capacité à renouveler pourrait représenter 10 GW à l'horizon 2050.

Le photovoltaïque fait actuellement face à moins d'oppositions locales que les fermes éoliennes, en particulier, si les sites agricoles et naturels sont épargnés. Le maintien du rythme tendanciel permettrait d'atteindre de l'ordre de 30 GW de capacité installée à l'horizon 2050. Le rythme qui aurait permis l'atteinte de l'objectif PPE 2018 permettrait d'atteindre de l'ordre de 40 GW. La mise en place du rythme nécessaire à l'atteinte de l'objectif haut 2028 permettrait d'atteindre plus de 120 GW de capacité. Doubler ce rythme moyen à partir de 2023 permet d'atteindre plus de 250 GW à l'horizon 2050.

Figure 12. Trajectoires de capacités du photovoltaïque (au sol + sur toitures), objectifs PPE et fourchette envisageable pour 2050



### Proposition de trajectoires pour l'hydraulique sur la base du développement récent et des objectifs de la PPE

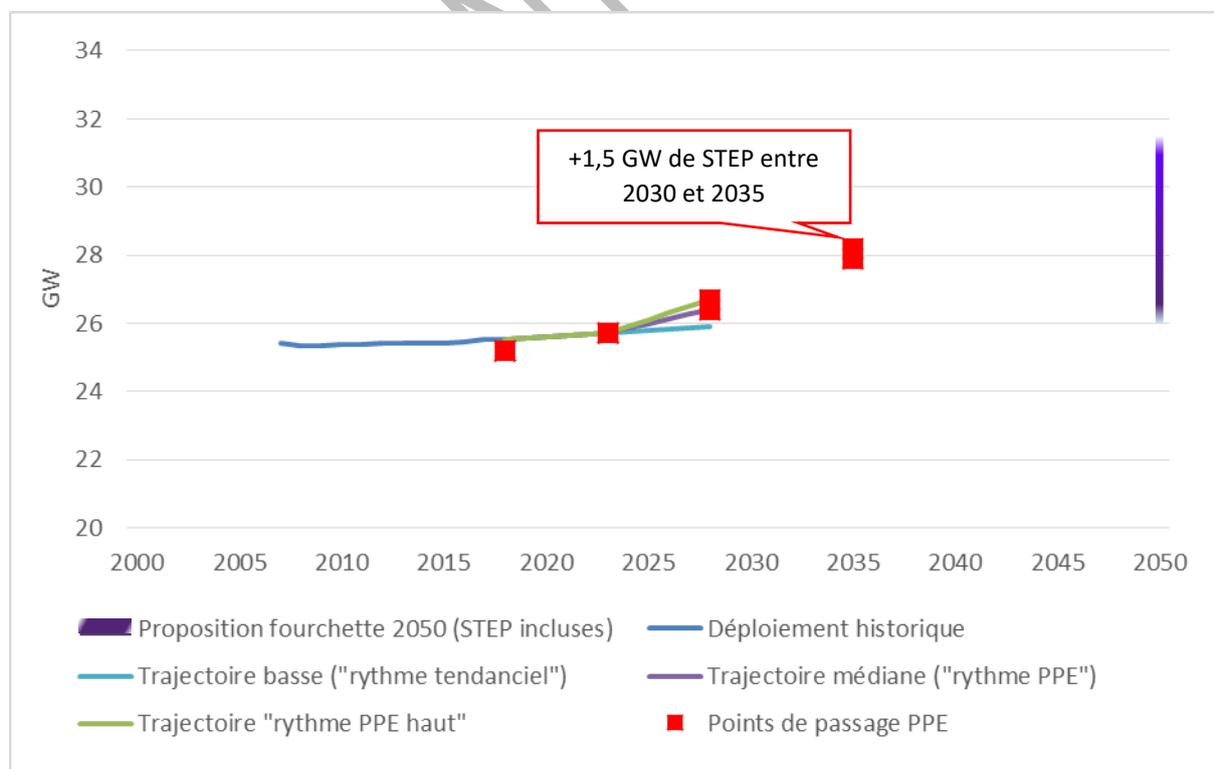
La capacité hydraulique a cru régulièrement depuis une dizaine d'années, à un rythme oscillant en moyenne entre 10 et 30 MW de capacités supplémentaires par an. Elle atteignait 25 540 MW en 2018. Elle dépasse ainsi les objectifs 2018 de la PPE de 360 MW.

En poursuivant sur ce rythme, l'objectif 2023 de capacité hydraulique fixé dans le projet de PPE pourrait également être atteint. A l'horizon 2028, les objectifs tant haut que bas de la PPE nécessitent d'accélérer substantiellement le rythme d'augmentation de la capacité hydraulique. Dans l'objectif bas de la PPE à 2028, en supposant atteint l'objectif 2023, il sera nécessaire d'augmenter la capacité hydraulique de 140 MW/an en moyenne. Dans l'objectif haut de la PPE à 2028, en supposant atteint l'objectif 2023, il sera nécessaire d'augmenter la capacité hydraulique de 210 MW/an en moyenne. En complément, la PPE prévoit l'installation de 1,5 GW de STEP<sup>17</sup> supplémentaires entre 2030 et 2035. La capacité actuelle de STEP est de 4,2 GW.

A l'horizon 2050, la poursuite du rythme actuel ne devrait pas accroître significativement la capacité hydraulique, tandis que la poursuite du rythme permettant d'atteindre l'objectif haut de la PPE en 2028 pourrait conduire à une capacité hydraulique de l'ordre de 32 GW (STEP incluses).

L'augmentation de la capacité ne préjuge pas de l'évolution du productible hydraulique. Toute chose égale par ailleurs, elle pourrait ainsi s'avérer plus faible qu'aujourd'hui du fait du réchauffement climatique, y compris dans les scénarios les plus optimistes<sup>18</sup>.

Figure 13. Trajectoires de capacités de l'hydraulique (STEP incluses), objectifs PPE et fourchette envisageable pour 2050



<sup>17</sup> Station de transfert d'énergie par pompage.

<sup>18</sup> Cf. RTE, Groupe de travail « base climatique ». Les données climatiques utilisées pour la construction des scénarios de mix électrique à horizon 2050. Accessible sur CONCERTTE.

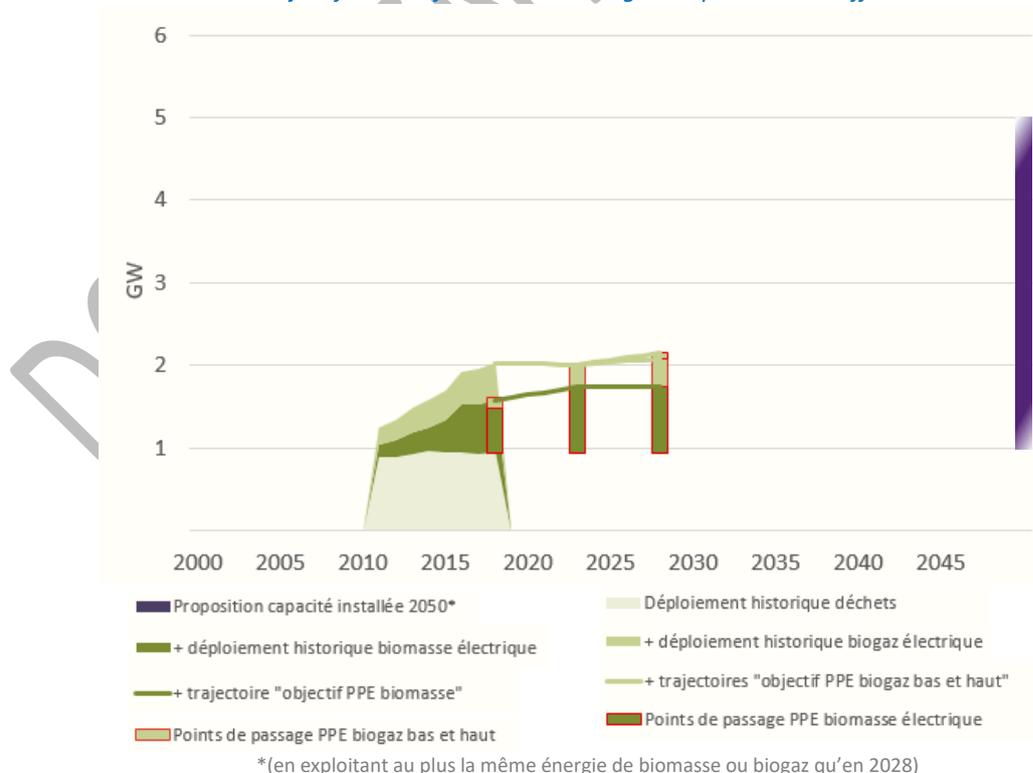
### Proposition de trajectoires pour les bioénergies sur la base du développement récent et des objectifs de la PPE

Les centrales utilisant les déchets, la biomasse et le biogaz comme combustibles forment la filière des bioénergies. La capacité des centrales utilisant les déchets comme combustibles est relativement stable depuis une dizaine d'années. Ces centrales produisent de l'ordre de 4 TWh par an, comptant pour moitié comme de l'énergie renouvelable. La PPE ne prévoit pas d'évolution de cette capacité. Dans le cadre de l'expansion de l'économie circulaire à l'horizon 2050, il conviendra de réinterroger le gisement de combustibles à base de déchets qui pourra être effectivement exploité.

La capacité des centrales électriques utilisant la biomasse et le biogaz croît régulièrement depuis une dizaine d'années, respectivement de l'ordre de 70 et 35 MW/an. Conjointement, ces capacités ont produit en 2018 plus de 5 TWh. La PPE prévoit que la capacité de ces filières continue de croître, en plafonnant à 800 MW à partir de 2023 pour la biomasse, et jusqu'à 340 à 410 MW pour les centrales électriques à biogaz en 2028, en privilégiant des installations de cogénération (afin d'orienter de façon préférentielle les ressources de biomasse vers la production de chaleur).

Ces trois filières (combustible déchets, biomasse, biogaz) fonctionnent actuellement avec un facteur de charge autour de 50%. Avec un même volume d'énergie, il serait possible d'envisager un accroissement de la capacité de production de ces filières, sans solliciter davantage de ressources. Elles pourraient ainsi davantage fonctionner en pointe et participer dans des proportions plus importantes qu'aujourd'hui à la sécurité d'approvisionnement, en complément des centrales thermiques à flamme. La SNBC prévoit également que 10 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> pourront être captées en sortie d'installations de production électrique à base de bioénergies afin de générer un puits de carbone<sup>19</sup>

Figure 14. Trajectoires de capacités de production d'électricité à partir de biomasse, de biogaz et de déchets, objectifs PPE et fourchette envisageable pour 2050 à affiner



<sup>19</sup> Direction Générale de l'Énergie et du Climat, 2019. Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat. 15 mars 2019.

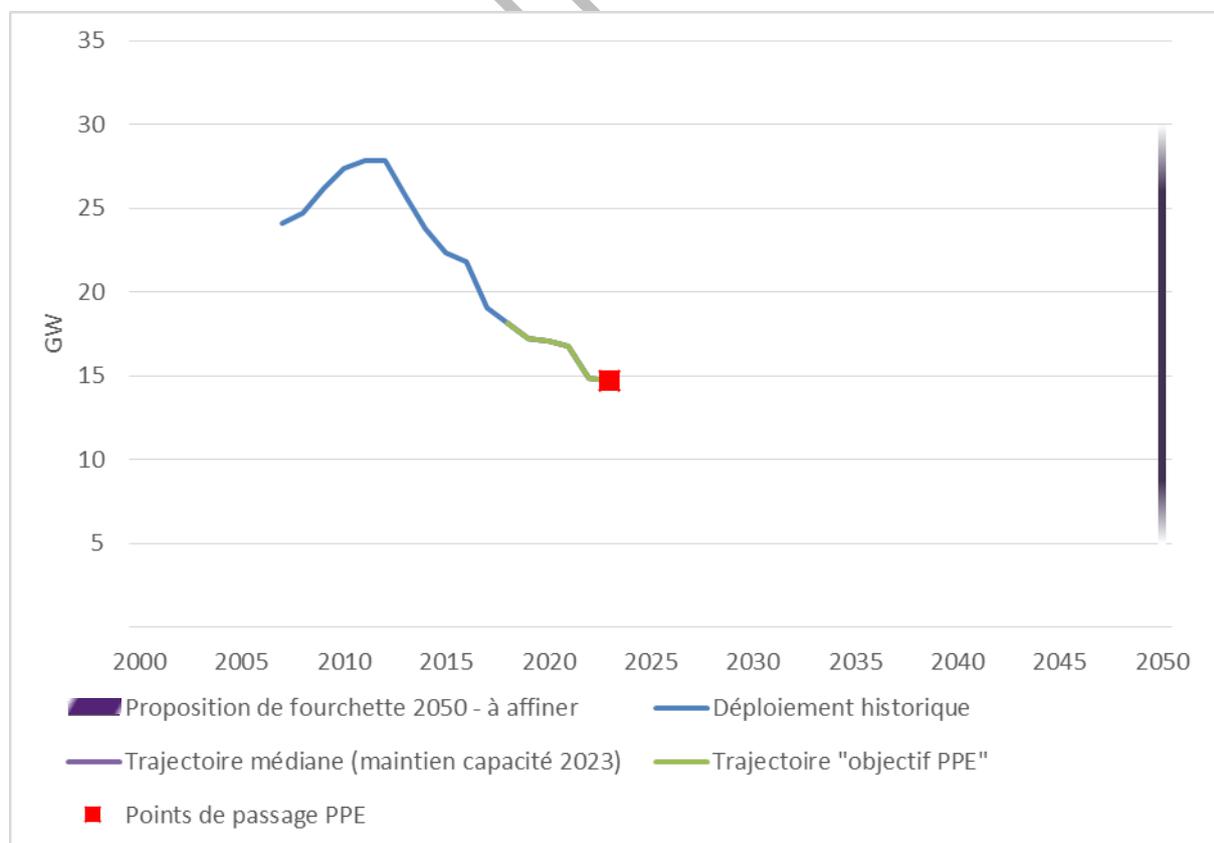
### Proposition de trajectoires pour la production thermique à flamme sur la base du développement récent et des objectifs de la PPE

La capacité de production thermique a connu une phase de croissance jusqu'au début des années 2010, avec le développement du parc de centrales à cycle combiné à gaz. Depuis, la décroissance des capacités thermiques s'explique par la fermeture des centrales « vapeur » au fioul et au charbon. Ces dernières années, elles ont produit entre 25 et 53 TWh d'électricité.

S'agissant de l'évolution future de la capacité de production d'électricité avec des centrales thermiques à flamme, la capacité existante pourrait encore être pour partie en fonctionnement en 2050. C'est notamment le cas pour les centrales à cycle combiné à gaz, principalement mises en service à l'horizon 2010, soit 6,3 GW, quoiqu'elle pourrait être en fin de vie à la fin de l'horizon d'étude. Les turbines à combustion ont des âges plus contrastées. Elles ont été mises en service au début des années 1980, au début et à la fin des années 1990 et autour de 2010. Leur capacité devrait donc se réduire progressivement sur l'horizon d'étude. La capacité des centrales à cogénération et de la production thermique décentralisée pourrait également se réduire.

Par ailleurs, le projet de PPE prévoit l'interdiction de nouvelles capacités de production exclusive d'électricité à partir d'énergies fossiles. La capacité des centrales thermiques à flamme ne serait susceptible de croître qu'avec de nouvelles centrales de cogénération. A l'horizon 2050, la SNBC prévoit tout de même que 20 TWh d'hydrogène et 25 TWh de gaz décarboné (avant conversion en électricité) sont disponibles pour la production d'électricité.

Figure 15. Trajectoires de capacités de la production thermique, objectifs PPE (avec fermeture des centrales à charbon) et fourchette envisageable pour 2050 à affiner



## Synthèse des propositions d'hypothèses de production

Le tableau suivant synthétise les hypothèses s'agissant de la production. Le projet de PPE fixe des objectifs de capacité jusqu'en 2028, voire 2035 pour la filière nucléaire mais laisse ouverte les perspectives à l'horizon 2050, y compris dans la SNBC. Néanmoins, sur la base de l'évolution récente des différentes filières, des objectifs fixés par le projet de PPE et l'estimation de gisements exploitables, il est possible de formuler de premières propositions de capacités pour les filières de production.

Tableau 6 Fourchettes proposées pour les hypothèses définissant le mix électrique (N.B. : les objectifs 2050 de production ne sont pas précisés dans la SNBC)

Paramètres définissant les scénarios	Hypothèse retenue dans les projets de la SNBC ou de la PPE	Proposition de fourchette de valeurs
Nucléaire existant	Dans le projet de PPE : 50% en 2035 avec la fermeture de 14 à 16 réacteurs (dont ceux de Fessenheim) soit entre -12,6 et -14,4 GW	Entre 0 et 20 GW en 2050 si prolongement des réacteurs jusqu'à 60 ans de durée de vie
Nouveau nucléaire	Pas d'objectif de capacité non précisé dans la PPE, si ce n'est maintien de l'option ouverte	Entre 0 et le développement maximum autorisé par la loi (50% de la production totale issue du nucléaire)
Eolien terrestre	Dans le projet de PPE <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gisement technique : entre 120 et 170 GW (en fonction de la technologie)</li> <li>• Objectif entre 34,1 et 35,6 GW en 2028</li> </ul>	Entre 40 et 80 GW
Eolien en mer	Dans le projet de PPE <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eolien posé <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Gisement technique : 90 GW</li> <li>○ Avec conciliation : 16 GW</li> </ul> </li> <li>• Eolien flottant <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Gisement technique : 155 GW</li> <li>○ Avec conciliation : 33 GW</li> </ul> </li> <li>• Objectif entre 4,7 et 5,2 GW en 2028</li> </ul>	De moins de 10 GW à la capacité maximale du gisement soit autour de 60 GW
Photovoltaïque au sol	Dans le projet de PPE <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gisement technique : environ 776 GW (source : CEREMA – sol et parking)</li> <li>• Objectif entre 20,6 et 25 GW en 2028</li> </ul>	Entre 40 et 200 GW
Photovoltaïque sur toitures	Dans le projet de PPE <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gisement technique : environ 350 GW (source : ADEME)</li> <li>• Objectif entre 15 et 19,5 GW en 2028</li> </ul>	Entre 20 et 80 GW
Hydraulique	Dans le projet de PPE <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gisement technique de capacités supplémentaires : Entre 3,8 et 4 GW</li> <li>• Objectif entre 26,4 et 26,7 GW en 2028</li> </ul>	Entre 26 GW (objectifs PPE) et 30 GW (objectif haut de la filière ) Pour les STEP, cf tableau sur les flexibilités

Tableau 7 Fourchettes proposées pour les hypothèses définissant le mix électrique (suite)

Paramètres définissant les scénarios	Hypothèse retenue dans les projets de la SNBC ou de la PPE	Proposition de fourchette pour les hypothèses définissant la consommation électrique
Production d'électricité à partir de biomasse et de biogaz	Dans le projet de PPE <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gisement technique non précisé</li> <li>• Objectif entre 1,1 et 1,2 GW en 2028</li> </ul> Objectif 2050 non précisé dans la SNBC	Entre 1 GW et 5 GW avec un fonctionnement en pointe en cogénération dans la limite de l'énergie de biomasse, biogaz et déchets allouée pour l'électricité dans le cadre de la PPE
<i>Gas-to-power</i>	Environ 14 GW à l'horizon 2035 (estimation RTE sur la base du projet de PPE) Dans le projet de SNBC à l'horizon 2050 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 20 TWh d'hydrogène → 12 TWh de production électrique<sup>20</sup></li> <li>• 25 TWh de gaz → supposément 15 TWh de production électrique<sup>21</sup></li> </ul>	Entre 0 et de l'ordre de 25 GW Technologies à préciser : <ul style="list-style-type: none"> <li>• turbines à combustion,</li> <li>• centrales à cycle combiné gaz</li> <li>• ou piles à combustible ?</li> </ul>
Captation et séquestration de gaz carbonique	Dans le projet de SNBC à l'horizon 2050 : environ 10 MtCO <sub>2</sub> d'émissions négatives sur des installations de production d'énergie à partir de biomasse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entre 0 et 10 MtCO<sub>2</sub> ou plus ?</li> <li>• Association ou non à de la production biomasse (émissions négatives)</li> </ul>

<sup>20</sup> Conversion précisée dans la SNBC<sup>21</sup> Avec le rendement d'un cycle combiné gaz autour de 60%.

## 6.4 Les flexibilités et le stockage

Les différentes flexibilités du système électrique seront déterminantes pour le maintien de la sécurité d’approvisionnement dans les différents scénarios. Ces flexibilités peuvent être de différentes natures :

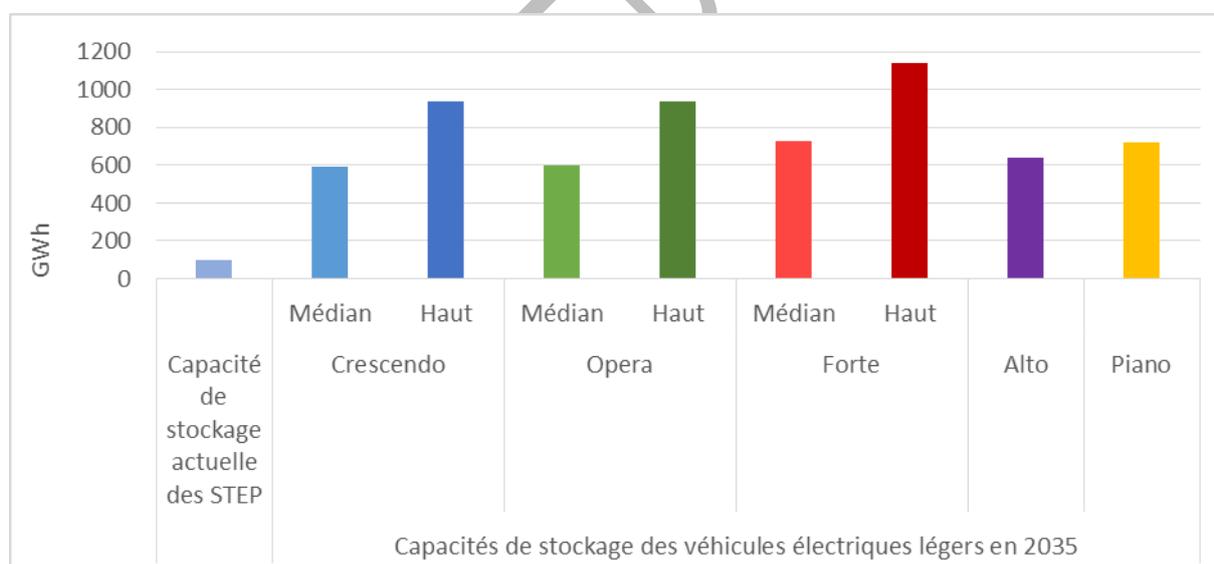
- Flexibilités sur la consommation (pilotage de la charge des véhicules électriques, effacements dans les secteurs résidentiel, tertiaire et industriel) ;
- Solutions de stockage, par exemple via des batteries ou en utilisant les possibilités offertes par les couplages avec les autres vecteurs (*power-to-gas*).

Des premiers éléments de cadrage sur certaines de ces flexibilités sont présentés sur les graphiques ci-dessous.

### *Proposition de flexibilités qui pourraient offrir les véhicules électriques*

Ces valeurs seront affinées à l’aide d’hypothèses plus précises et de modélisations détaillées. Néanmoins, on constate que les véhicules électriques même faiblement pilotés sont susceptibles d’offrir un volume important de flexibilité au système électrique (quoiqu’il faille ajouter aux valeurs présentées les contraintes de connexion au réseau des véhicules).

*Figure 16. Capacité de stockage des véhicules électriques dans les scénarios décrits dans les principaux résultats des enjeux du développement de l’électromobilité pour le système électrique publiés par RTE en mai 2019, sans tenir compte des contraintes de connexion au réseau des véhicules*



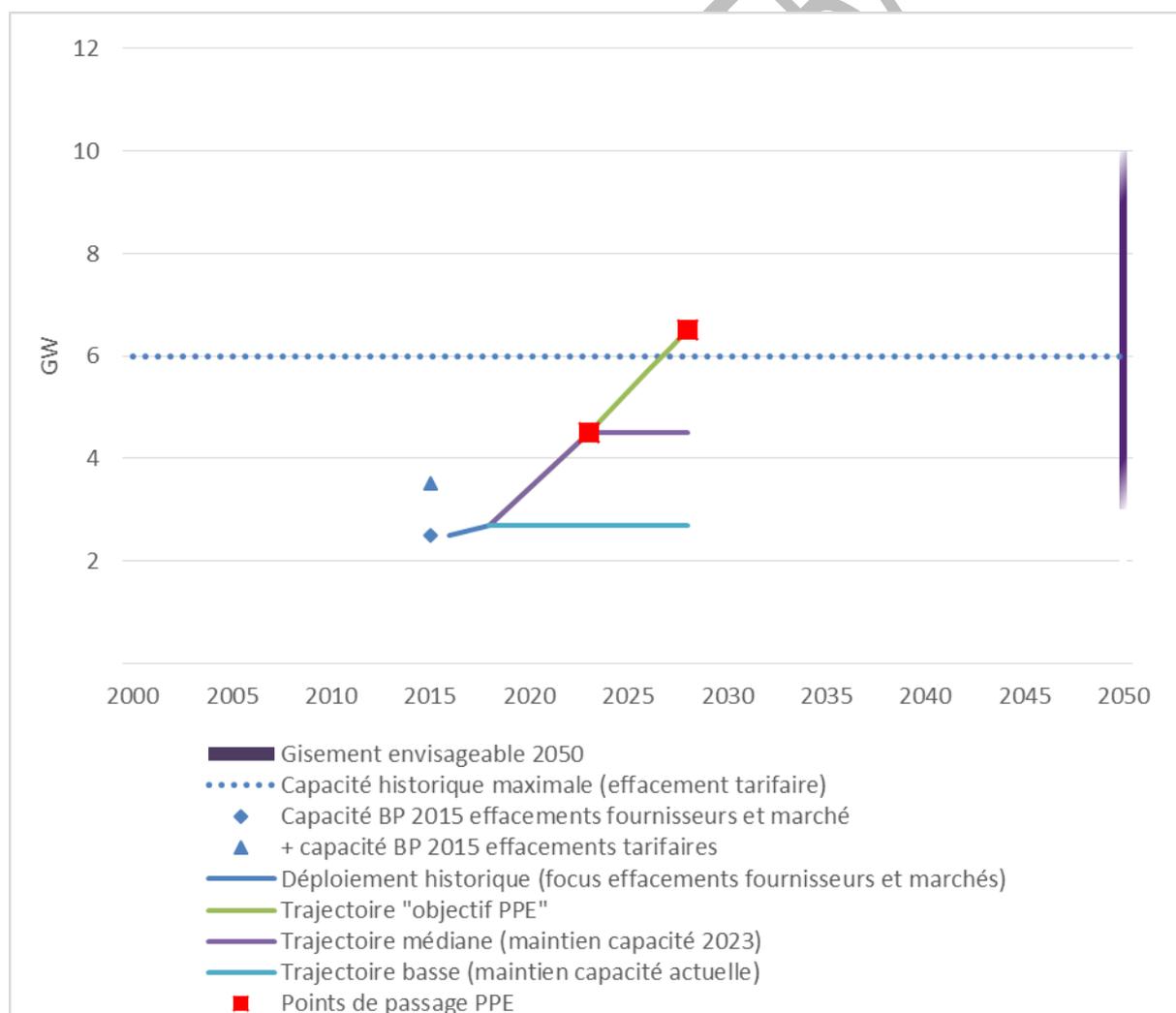
### Proposition de capacité d'effacement à l'horizon de l'étude dans le contexte récent de la filière

Compte tenu de l'incertitude sur la définition des effacements, il est difficile d'établir un historique précis. A titre d'illustration, dans le Bilan prévisionnel 2015, la capacité des effacements était estimée à moins de 2 500 MW pour les effacements dits fournisseurs ou de marché et plus de 1 000 MW pour les effacements tarifaires (EJP et Tempo). En 2018, la capacité était estimée à 2700 MW, auxquels viennent s'ajouter moins de 1 GW d'effacements tarifaires.

La PPE prévoit que la capacité progresse jusqu'à 4,5 GW en 2023 et 6,5 GW en 2028. Le gisement total d'effacement est estimé de l'ordre de 10 GW à l'heure actuelle<sup>22</sup>

Par ailleurs, afin de mettre en perspective tant les objectifs de PPE à l'horizon 2028 que la capacité envisageable à plus long terme, il est utile de rappeler que les effacements tarifaires ont représenté jusqu'à 6 000 MW de capacité dans les années 1990.

Figure 17. Trajectoire de capacités d'effacement, projection PPE et gisement envisagé



<sup>22</sup> Cf. les hypothèses concertées du Bilan prévisionnel 2017 et la référence suivante s'agissant du gisement d'effacements industriels et tertiaire : ADEME, E-CUBE Strategy Consultants, CEREN. 2017. L'effacement de consommation électrique en France. 22 pages.

## Synthèse des hypothèses de flexibilité de la consommation

Le tableau suivant synthétise les hypothèses s'agissant des flexibilités offertes par la consommation. Dans les projets de PPE et de SNBC, seuls les objectifs de capacité d'effacement à l'horizon 2028 sont précisés. Les capacités de flexibilité de la consommation à l'horizon 2050, que cela soit via l'effacement ou le pilotage de la charge des véhicules électriques restent à préciser dans ce cadre.

Tableau 8 Fourchettes proposées pour les hypothèses de flexibilité de la consommation non définies dans la SNBC

Paramètres définissant les scénarios	Hypothèse retenue dans les projets de la SNBC ou de la PPE	Proposition de fourchette de valeurs
Flexibilité de l'électromobilité	Objectif chiffré non précisé	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entre la flexibilité limitée du scénario d'électromobilité dit <i>Forte</i><sup>23</sup></li> <li>• Et la flexibilité renforcée du scénario d'électromobilité dit <i>Opera</i></li> </ul>
Flexibilité du reste de la consommation électrique	Objectif de la PPE : 6,5 GW en 2028 Objectif 2050 non précisé dans la SNBC	Entre 3 et 10 GW d'effacement <sup>24</sup>
Stockage	Dans le projet de PPE <ul style="list-style-type: none"> <li>• + 1,5 GW de STEP entre 2030 et 2035</li> </ul> Batteries sans objectif chiffré	<ul style="list-style-type: none"> <li>• +1,5 GW de STEP supplémentaires avec vérification de la rentabilité</li> </ul> Capacité de batteries fonction des analyses sur l'intérêt de l'autoconsommation ou des batteries de seconde vie (cf. étude électromobilité)

Ce tableau devra être complété avec des hypothèses sur la flexibilité offerte par les couplages avec les autres vecteurs (discutées en groupe de travail dédié à ce sujet) et par des solutions de stockage (notamment batteries).

<sup>23</sup> Les scénarios *Forte* et *Opera* sont décrits dans les principaux résultats des enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique publiés par RTE en mai 2019.

<sup>24</sup> Cela pourra comprendre des solutions de chauffage électrique hybridée avec d'autres vecteurs énergétiques (gaz ou biomasse par exemple).

## 6.5 Les hypothèses d'interconnexions, de consommation et de mix électriques à l'échelle européenne

Dans la SNBC, une hypothèse implicite porte sur le bilan énergétique du système français (nul par rapport à ses voisins). Or, l'exploitation des gisements d'énergie renouvelable en France complétés ou non de production nucléaire pourrait participer à la décarbonation des voisins si leurs ressources renouvelables ne le leur permettaient pas, soit par l'export d'électricité produite à l'aide de technologies décarbonées, soit par l'export de gaz décarboné, produit notamment à l'aide d'unités de *power-to-gas*.

En pratique, les perspectives de volumes d'échanges aux interconnexions dépendront fortement de l'évolution des mix électriques (production et consommation) de la France et des pays voisins.

Les hypothèses de consommation électrique et du mix de production électrique à l'échelle européenne seront tirées des travaux en cours au sein d'ENTSO-E pour le TYNDP 2020.

Les hypothèses concernant l'Europe s'appuieront sur les travaux existants sur ce périmètre, à cet horizon et dans un cadre similaire, notamment les scénarios publiés par la Commission européenne en novembre 2018, ceux actuellement à l'étude par ENTSO-E et ENTSG ainsi que les cadrages nationaux similaires à la SNBC qui sont publiés. A titre d'information, il est prévu que ces hypothèses soient concertées par ENTSO-E et ENTSG à la fin de l'été ou au début de l'automne. Dans le cadre de la concertation du Bilan prévisionnel pour les scénarios, un atelier technique sera organisé après la publication des documents de concertation d'ENTSO-E et ENTSG afin d'exposer les scénarios considérés à l'échelle européenne et de discuter de leur éventuel appariement avec les scénarios considérés pour la France.

Tableau 9 Méthodologie proposée pour les hypothèses définissant la consommation et le mix électriques en Europe

Paramètres définissant les scénarios	Hypothèse retenue dans les projets de la SNBC ou de la PPE	Proposition de fourchette pour les hypothèses définissant la consommation et le mix électriques en Europe
Echanges aux interconnexions	Objectif 2050 non précisé, supposément nuls Les échanges aux interconnexions résultent de l'équilibre entre les mix de production et de consommation à l'échelle européenne, heure par heure et dépendent donc des parcs nationaux et des capacités d'interconnexions	A préciser <sup>25</sup>
Consommation électrique en Europe	Non précisée	En cohérence avec les hypothèses retenues pour la France dans le cadre de donné par d'autres scénarios p. ex. ceux d'ENTSO-E et ENTSG présentés dans un atelier technique <i>ad hoc</i>
Mix européen		

<sup>25</sup> Les travaux d'analyses complémentaires sur les échanges d'électricité aux interconnexions dans les scénarios du Bilan prévisionnel 2017 menés par RTE en 2018 conduisaient à une fourchette d'échanges aux interconnexions en 2035 entre 0 et 150 TWh d'exports nets.