



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 intégrera 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	15
5. Les scénarios 2050 se distingueront sur différents aspects de la consommation et de la production	17
5.1 Les trajectoires de consommation pourraient principalement se différencier sur le niveau d'efficacité énergétique, de sobriété, de <i>power-to-gas</i> et de flexibilité	17
5.2 Les trajectoires de consommation pourront faire l'objet de tests de sensibilité portant sur l'évolution de la population et du produit intérieur brut, sur les scénarios climatiques, ou sur le niveau de l'électrification de certains usages	18
5.3 Les scénarios 2050 du système électrique se distingueront par leur mix de production.....	20
5.4 Quantifier les hypothèses différenciant les différents scénarios de consommation et de production pour assurer une compréhension commune	22
5.5 Les hypothèses de consommation et de mix électriques à l'échelle européenne	28
6. Quels scénarios incompatibles avec les enjeux de l'atteinte de la neutralité carbone ?	29
6.1 Des scénarios <i>a priori</i> techniquement infaisables ou à la faisabilité technique incertaine ?	29
6.2 Des scénarios <i>a priori</i> inacceptables du point de vue sociétal ?	29
6.3 Des scénarios <i>a priori</i> inacceptables du point de vue environnemental ?	29

6.4	Des scénarios peu probables pour des raisons économiques ?	29
7.	Quels scénarios pour l'étude du fonctionnement du système électrique à l'horizon 2050 dans le cadrage de la SNBC ?	30
7.1	Les scénarios avec l'option nouveau nucléaire ouverte	31
7.2	Les scénarios avec l'option nouveau nucléaire fermé	32
8.	Des variantes pour identifier les jalons clés, capter la valeur d'options de certaines technologies et les regrets éventuels associés à certains scénarios	33

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 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)¹ 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.

¹ 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 intégrera une trajectoire détaillée et une identification des jalons-clés afin d'estimer les valeurs d'options associés à certaines technologies pour le système électrique ou 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. section 5, 6, 7, 8).

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 premiers échanges prévus avec le groupe de travail lors de la réunion du 2 juillet 2019. Le document sera progressivement enrichi au fur et à mesure de la concertation.

Ce document et la première réunion 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.

Une autre réunion du groupe de travail sera organisée au second semestre 2019 et portera spécifiquement sur la constitution de quelques scénarios principaux.

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 carbone² (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 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.

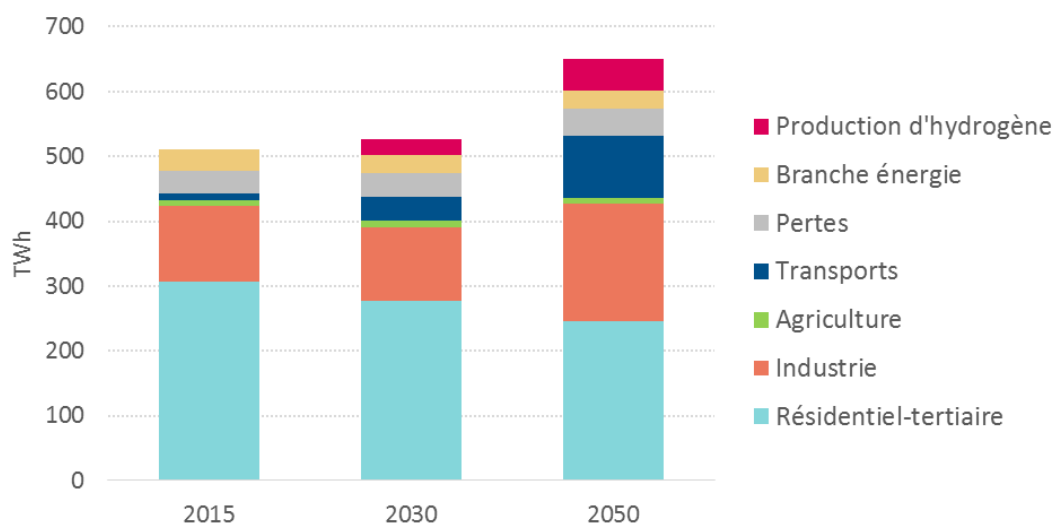


Figure 1. Évolution de la demande d'électricité dans la trajectoire du projet de SNBC (périmètre SNBC, incluant les DOM-TOM et l'ensemble des consommations du secteur énergétique)

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. **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.**

² 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.

Ces variantes pourront s'inspirer des différentes analyses étudiant l'horizon 2050, par exemple :

- 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, 28th November 2018;
- Les scénarios du GIEC³ ;
- Les scénarios du TYNDP⁴ communs ENTSO-G / ENTSO-E devant être publiés prochainement ;
- ADEME, Trajectoires d'évolution du mix électrique 2020-2060. Synthèse de l'étude, 2018 ;
- E-Highway2050, Main results, 2015;
- Eurelectric, Decarbonisation pathways, 2018;
- FTI, réalisé pour Foratom, Pathways to 2050: role of nuclear in a low-carbon Europe, 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 CO2 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 ;
- ...

³ Groupe International d'Experts du Climat.

⁴ *Ten-Year Network Development Plan*.

3. La construction des scénarios intégrera 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 du mix électrique ?
- 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 ?

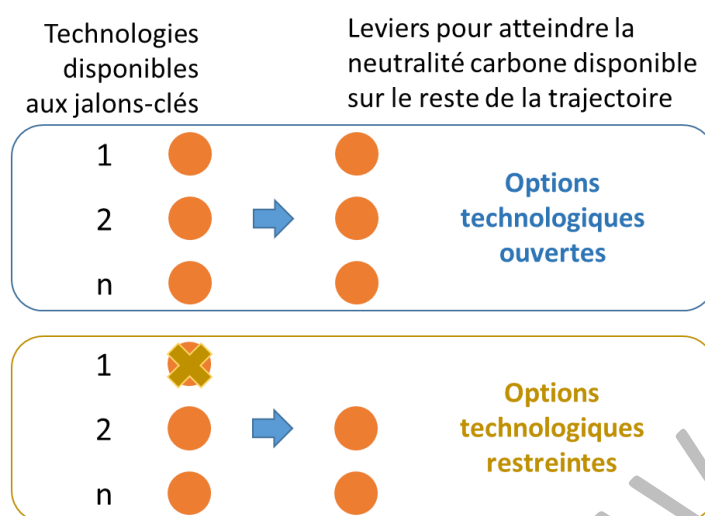
En effet, la capacité à transformer le système électrique fait face à de nombreux défis industriels pour différentes filières technologiques.

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 capable de développer tous les ans plusieurs gigawatts de capacité ou de mener à bien plusieurs millions de rénovation dans le bâtiment nécessite d'être structurée, avec le contingent adéquat de main d'œuvre formée avec les compétences requises. 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.

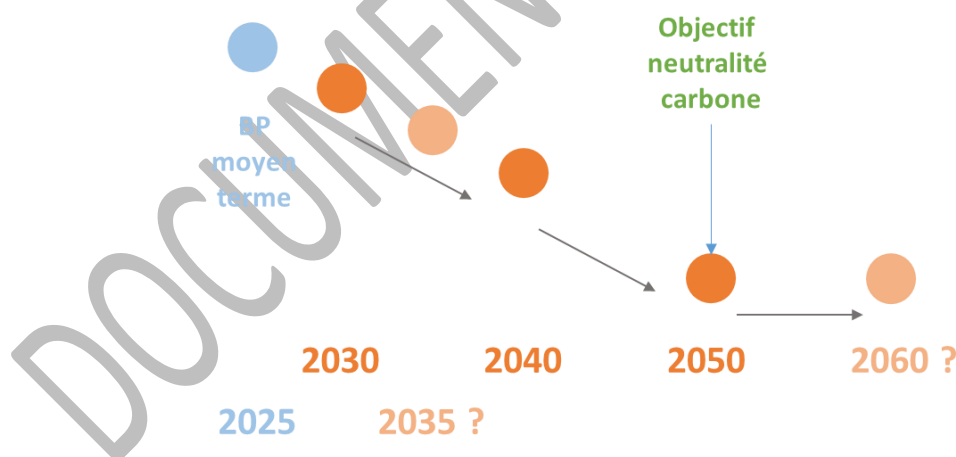
Figure 2 Illustration des jalons-clés pour certaines technologies et de leur valeur d'option



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

Les scénarios de long terme du Bilan prévisionnel décriront ainsi des trajectoires d'atteinte de la neutralité carbone à l'échelle du système électrique. RTE propose de considérer a minima les échéances suivantes : 2030, 2040, 2050. Deux échéances supplémentaires, correspondant aux horizons 2035 et 2060, pourraient également faire l'objet d'analyses si besoin.

Figure 3 Horizons d'étude proposés pour le Bilan prévisionnel de long terme



L'échéance de 2025 sera 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.

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 pourrait également présenter 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 horizon 2050.

Enfin pour illustrer les incertitudes associées à l'horizon 2050 ainsi que les conséquences ultérieures des choix ciblant cette échéance, il pourrait être utile de mettre en avant les évolutions qui se poursuivraient une décennie supplémentaire jusqu'en 2060.

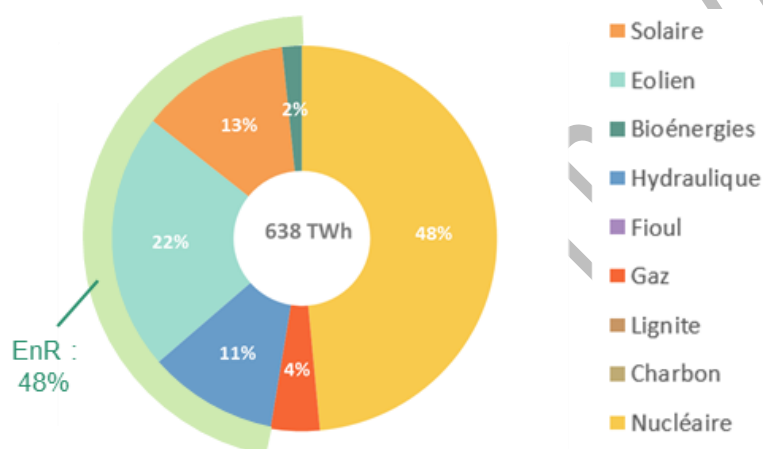


Figure 4. Bilan électrique projeté à horizon 2035 (projections RTE sur la base du projet de PPE)

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, RR⁵) 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.

⁵ 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.

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 RTE⁶, 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 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...).

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

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

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.

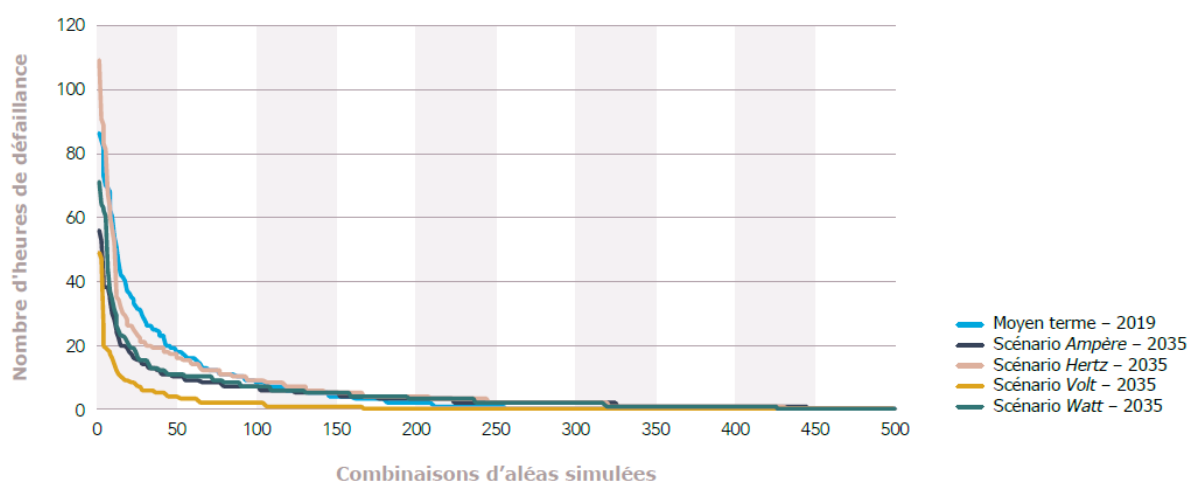


Figure 5. Monotones des heures de défaillance pour 1000 configurations simulées, dans les différents scénarios du Bilan prévisionnel 2017

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.

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_4 et N_2O) 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. Mais c'est plus encore 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) qui mesurent effectivement l'effet du système électrique sur le changement climatique.

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 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 aussi 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 cancérogènes.

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.

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 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 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	• Développement de filières technologiques nécessaires à l'atteinte de la neutralité carbone • Valeur d'option des filières technologiques et regrets ou remords associés à leur maintien ou leur arrêt • Evolution du fonctionnement du système électrique (sécurité d'approvisionnement, équilibrage, marges, réserves, stabilité, réseau)
Acceptabilité sociétale	• Acceptabilité des investissements nécessaires à la neutralité carbone • Acceptabilité des différentes technologies de production • Evolution des modes de vie et changements de comportements • Evolution du consentement des consommateurs par rapport au critère de défaillance • Possibilité d'une individualisation de la sécurité d'approvisionnement
Environnementaux	• Réduction des émissions de gaz à effet de serre • Utilisation des ressources • Qualité des écosystèmes • Impact sur la santé humaine
Economiques	• Coûts de l'atteinte de la neutralité carbone pour le système électrique • Etablis à partir d'une base de coûts concertée intégrant ○ les coûts de production et des investissements d'efficacité énergétique, d'électrification et de flexibilisation de la demande ○ des fourchettes de coût pour intégrer leur nature incertaine et évaluer la robustesse des trajectoires économiques des scénarios

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. Les scénarios 2050 se distingueront sur différents aspects de la consommation et de la production

Les scénarios de perspectives du système électrique se construisent concrètement autour des hypothèses retenues pour les différents paramètres qui constituent la consommation et la production électriques.

5.1 Les trajectoires de consommation pourraient principalement se différencier sur le niveau d'efficacité énergétique, de sobriété, de *power-to-gas* et de flexibilité

Les scénarios peuvent se distinguer en fonction du niveau et du profil de consommation globalement considérés. Dans le cadre de la SNBC, les trajectoires de consommation peuvent se différencier notamment sur :

- Le niveau d'efficacité énergétique mis en œuvre,
- La sobriété supposée dans les usages que font les consommateurs de l'énergie électrique,
- 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),
- Le niveau de *power-to-gas* considéré.

S'agissant de l'efficacité énergétique, la SNBC fournit plusieurs indications (cibles ou fourchettes) sur le niveau d'efficacité énergétique ou la sobriété supposée de l'utilisation de l'électricité. Néanmoins, ces hypothèses s'appliquent uniformément à l'ensemble des vecteurs énergétiques. En conséquence, tout en étant dans le cadre donné par la SNBC, en particulier s'agissant de la répartition de la consommation énergétique totale entre les différents vecteurs, les hypothèses retenues sur ces paramètres peuvent différencier les trajectoires de consommation électrique.

S'agissant de la flexibilité de la consommation électrique, celle-ci est peu évoquée dans la SNBC. Or, elle présente l'intérêt de pouvoir venir se substituer pour partie à la flexibilité des centrales thermiques (et dans une moindre mesure des centrales nucléaires) alors même que la production de ces dernières est appelée à diminuer afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre du secteur électrique, tant à l'échelle de la France que de l'Europe. Différents niveaux de flexibilité peuvent être considérés. Alors qu'aujourd'hui, environ 3 GW d'effacement sont valorisés sur les marchés de l'électricité, les travaux de l'ADEME⁷ et de RTE⁸ ont montré que le potentiel d'effacement, tous segments de consommateurs confondus, peut atteindre 9 GW. Les travaux sur l'électromobilité menés récemment par RTE ont également montré que différentes hypothèses peuvent être formulées quant à la flexibilité que les véhicules électriques peuvent offrir au système électrique.

Sur les couplages entre le gaz et l'électricité, le cadrage défini par la SNBC établit des orientations, notamment sur la répartition de la demande entre les différents vecteurs énergétiques, en particulier pour la fourniture des services de mobilité, de chauffage et pour l'industrie. 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 limité, de même que les imports de gaz décarboné

⁷ ADEME, Effacement de consommation électrique en France – Évaluation du gisement potentiel d'effacement par modulation de process dans l'industrie et le tertiaire en France, 2017.

⁸ RTE, Réseaux électriques intelligents. Valeur économique, environnementale et déploiement d'ensemble. Rapport complet, septembre 2017

depuis d'autres pays européens⁹. 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 horizon 2050.

La combinaison des différentes hypothèses sur ces caractéristiques (*power-to-gas*, efficacité et sobriété énergétiques, flexibilité, échanges aux interconnexions) offre la possibilité de définir différentes trajectoires de consommation. D'autres paramètres pourront être fixés dans les scénarios de référence et pourront faire l'objet de variantes pour estimer leur impact sur la consommation et plus généralement sur le fonctionnement du système électrique.

5.2 Les trajectoires de consommation pourront faire l'objet de tests de sensibilité portant sur l'évolution de la population et du produit intérieur brut, sur les scénarios climatiques, ou sur le niveau de l'électrification de certains usages

Population et PIB

La méthode proposée consiste à retenir une unique hypothèse centrale, commune à tous les scénarios. Cette proposition fait suite aux commentaires de plusieurs acteurs lors des restitutions du Bilan prévisionnel 2017. Cette hypothèse centrale étant utilisée dans les différentes familles de scénarios, leur comparaison sera facilitée.

En revanche, des tests de sensibilité pourront être réalisés sur ce paramètre, afin de vérifier dans quelle mesure les conclusions sont robustes à une modification du cadrage macroéconomique. Ces tests de sensibilité viseront notamment à estimer l'impact de la population ou du PIB sur le niveau de la consommation. L'hypothèse sur le produit intérieur brut 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.

Scénario(s) climatique(s) de référence

Comme présenté en GT sur la base climatique¹⁰, les référentiels climatiques utilisés pour la simulation du fonctionnement du système électrique intégreront les effets du changement climatique, selon plusieurs trajectoires possibles. 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 correspondant à deux scénarios du GIEC (RCP4.5 et RCP 8.5) ;
- Un référentiel basé sur le climat à horizon 2000 (c'est-à-dire avec les données atmosphériques et de concentration de CO₂ de l'an 200) ;

⁹ Ces derniers ne sont pas évoqués dans le cadre de la SNBC alors qu'ils pourront effectivement participer au bouclage énergétique du secteur gazier

¹⁰ 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 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.

Place des différents vecteurs

Le cadrage général des prochains scénarios est articulé autour de la SNBC et de la répartition des usages entre les vecteurs énergétiques (notamment chaleur, électricité, méthane, hydrogène) qu'elle propose.

Néanmoins, 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 entre autres à des trajectoires d'électrification (notamment s'agissant du chauffage, de la mobilité ou de l'industrie) différentes de celles retenues dans la SNBC. Il s'agira par exemple de tester les effets respectifs d'une moindre électrification de la mobilité ou de l'industrie ou d'une électrification plus importante de la chaleur ou d'autres usages. Une moindre électrification pourrait certes réduire la consommation électrique mais également réduire la flexibilité offerte par ces usages.

Le tableau ci-dessous synthétise les paramètres qui décrivent la consommation, en distinguant ceux qui définissent les trajectoires principales et ceux qui feront l'objet de variantes afin d'évaluer leurs effets sur la consommation et plus généralement sur l'ensemble du système électrique.

Tableau 2 Paramètres décrivant la consommation définissant les trajectoires principales ou objet de variantes

Paramètres décrivant la consommation	Définissant les trajectoires principales	Objet de variantes
Efficacité énergétique	✓	
Sobriété	✓	
Flexibilité	✓	
Population		✓
PIB et industrie		✓
Base climatique		✓
Moindre électrification de la mobilité		✓
Electrification plus importante de la chaleur		✓
Power-to-gas		✓

Le tableau ci-dessous expose quant à lui les hypothèses définissant pour partie la consommation qui pourront faire l'objet de variantes ainsi que leur valeur de référence proposée pour tous les scénarios qui seront étudiés.

Tableau 3 Hypothèses de consommation pouvant faire l'objet de variantes et leur valeur de référence dans tous les scénarios considérés

Paramètres définissant les scénarios	Valeur de référence pour tous les scénarios	Sensibilités envisagées
Population	Scénario central INSEE (d'après la SNBC)	Haute ou basse
PIB et niveau de l'industrie	D'après la SNBC	En fonction du niveau d'investissement du scénario
Base climatique	Base climatique à déterminer parmi les référentiels présentés en GT « base climatique » : 2050 RCP4.5 ou 2050 RCP8.5 ou 2025	
Electrification de la mobilité	D'après la SNBC	A établir
Electrification du chauffage	D'après la SNBC	A établir

5.3 Les scénarios 2050 du système électrique se distingueront par leur mix de production

Les scénarios 2050 peuvent également se distinguer en fonction du mix de production considéré. Celui-ci peut être défini par le niveau de production 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 CO₂ équipées de système de captation et séquestration.

La SNBC laisse globalement ouverte la question du mix de production électrique. Dans le même temps, le débat public s'articule autour de deux familles de scénarios, qui seront spécifiquement considérées et séparées d'emblée par hypothèse dans les travaux du Bilan prévisionnel,

- des scénarios avec l'option « nouveau nucléaire » ouverte,
- des scénarios avec l'option « nouveau nucléaire » fermée.

Mécaniquement, afin d'obtenir un mix couvrant la consommation et les échanges aux interconnexions, la part des autres moyens de production sera adaptée, en particulier la part de production renouvelable provenant des parcs éoliens et photovoltaïques. En fonction de l'acceptabilité sociétale de l'exploitation de ces sources d'énergie renouvelable, des contraintes environnementales et des conditions techniques de fonctionnement du système électrique qu'elles pourraient induire, le mix

entre ces différentes sources renouvelables pourraient différer. Des variantes pourront être considérées pour capter ces effets.

A priori, la capacité de la production hydraulique n'est pas appelée à évoluer substantiellement. La PPE ne prévoit ainsi une augmentation de la capacité hydraulique que de quelques centaines de mégawatts (cf. section 5.4). Néanmoins, la production hydraulique pourrait s'avérer plus faible qu'aujourd'hui toute chose égale par ailleurs du fait du réchauffement climatique, y compris dans les scénarios les plus optimistes¹¹ (cf. le document de concertation du groupe de travail sur la base climatique utilisée pour le Bilan prévisionnel).

Les orientations de la SNBC conduisent à des gisements de biomasse et de biogaz limités pour la production d'électricité, ceux-ci devant être prioritairement utilisés pour la production de chaleur ou, s'agissant du biogaz, pour l'injection directe dans le réseau de gaz, sauf contrainte de localisation. Ces sources d'énergie produisent aujourd'hui en bande, sur l'année ou durant une partie de l'année, notamment l'hiver. Dans la mesure où quelques unités de production d'électricité à base de biomasse ou de biogaz pourraient émerger ou subsister, il conviendra alors de s'interroger sur la modification de leur profil de production, par exemple pour réserver cette énergie spécifiquement pour les périodes de fonctionnement les plus tendues du système électrique à cet horizon.

S'agissant du parc thermique, les exigences climatiques associées à l'objectif de neutralité carbone conduiront à la disparition progressive des unités fonctionnant au fioul et au charbon. Des unités fonctionnant au gaz pourraient subsister ou émerger, mais dans des proportions limitées. En effet, pour produire de l'électricité à partir de gaz sans émettre de CO₂, seules deux options sont possibles : soit le gaz utilisé est d'origine décarbonée, mais le gisement de gaz décarboné est relativement limité d'après la SNBC ; soit les unités de production sont dotées de dispositifs de captation et séquestration de gaz carbonique, mais cette technologie présente des incertitudes techniques, économiques et d'acceptabilité qui conduisent la SNBC à retenir un déploiement limité d'ici 2050.

Selon les orientations de la SNBC, l'ouverture ou la fermeture de l'option « nouveau nucléaire » ne pourra donc se reporter que partiellement sur la production électrique à base de gaz. La SNBC prévoit tout de même que 20 TWh d'hydrogène et 25 TWh de gaz (avant conversion en électricité) sont disponibles pour la production d'électricité et que 10 millions de tonnes de CO₂ pourront être captées en sortie d'installations de production électrique à base de biomasse afin de générer un puits de carbone¹².

Le tableau ci-dessous synthétise les paramètres qui décrivent le mix de production, en distinguant ceux qui définissent les trajectoires principales et ceux qui feront l'objet de variantes afin d'évaluer leurs effets sur le fonctionnement du système électrique.

¹¹ Source : RTE, Groupe de travail « base climatique ». Les données climatiques utilisées pour la construction des scénarios de mix électrique à horizon 2050. Accessible sur CONCERTÉ

¹² Direction Générale de l'Energie et du Climat, 2019. Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat. 15 mars 2019.

Tableau 4 Paramètres décrivant le mix de production définissant les trajectoires principales ou objets de variantes

Paramètres décrivant le mix de production	Définissant les trajectoires principales	Objets de variantes éventuelles autour des trajectoires principales
Hydraulique	✓	
Cogénération	✓	
Nucléaire	✓	✓
Eolien terrestre	✓	✓
Eolien offshore	✓	✓
Photovoltaïque	✓	✓
Gas-to-power	✓	✓
Captation et séquestration de CO2	✓	✓

5.4 Quantifier les hypothèses différenciant les différents scénarios de consommation et de production pour assurer une compréhension commune

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.

Les extrêmes des niveaux d'hypothèses peuvent être établis sur la base des scénarios existants. Par exemple, une trajectoire de consommation électrique s'appuyant sur un fort niveau de d'efficacité énergétique et de sobriété s'approcherait du niveau de consommation du scénario négaWatt, soit autour de 270 TWh (quoique les hypothèses d'électrification en particulier du transport puissent différer) ou 391 TWh dans les visions de l'ADEME. A l'opposé, une trajectoire de consommation électrique s'appuyant sur un niveau de sobriété ou d'efficacité énergétique bien moindre et / ou une plus forte électrification des usages s'approcherait du niveau de consommation électrique considéré dans le scénario Négatep avec 850 TWh en 2050.

De façon similaire, une capacité nucléaire élevée représenterait autour de 40 GW dans l'esprit des scénarios basés sur le modèle PRIMES pour la SFEN voire même 100 GW dans le scénario Négatep. A l'inverse, une capacité nucléaire faible serait supposée de l'ordre de 10 GW voire nulle, respectivement comme dans les scénarios de l'ADEME ou de négaWatt.

Le niveau des extrêmes de consommation et de production doit faire l'objet d'une compréhension commune afin d'assurer la clarté des échanges entre toutes les parties prenantes à la concertation sur la scénarisation.

Les trois tableaux suivants exposent les hypothèses permettant respectivement de concevoir les scénarios et les variantes de consommation, ainsi que les hypothèses de mix électrique. Lorsque les éléments sont disponibles, le cadrage donné par la Stratégie Nationale Bas Carbone est également

rappelé afin de situer les propositions par rapport à celui-ci¹³. Si d'autres paramètres sont identifiés comme pertinents, ils pourront être ajoutés aux tableaux ci-après. Les fourchettes proposées pour décrire les hypothèses de consommation et de production seront discutées en séance afin d'établir un socle commun de compréhension. Une fois celui-ci établi, les trajectoires de consommation et de mix électrique pourront être collectivement construits. Les paramètres détaillés permettant de modéliser la consommation feront l'objet de discussions spécifiques ultérieures dans le cadre du groupe de travail sur la consommation.

DOCUMENT DE TRAVAIL

¹³ Direction Générale de l'Energie et du Climat, 2019. Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat. 15 mars 2019.

Tableau 5 Fourchettes proposées pour les hypothèses figées dans toutes les scénarios de référence mais pouvant faire l'objet de variantes

Paramètres définissant les scénarios	Hypothèse retenue dans le projet de la SNBC	Proposition de fourchette de valeurs
PIB et industrie	• PIB tendanciel non précisé (+3% de supplément de PIB en 2050 résultant de la transition énergétique) • Industrie : entre 10 et 16% de la valeur ajoutée	Discussions dans le cadre du GT consommation
Nombre de logements	Scénario central de l'INSEE • Population : 72 millions en 2050 • Diminution du nombre de personnes par ménage de 0,3% par an	Discussions dans le cadre du GT consommation
Electrification de la mobilité	• Voitures particulières ○ Presque 100% électriques en 2040 ○ 12,5 kWh/100 km en 2050 : -30% par rapport à aujourd'hui • Véhicules utilitaires légers ○ 80% de part de marché en 2050 ○ 16,9 kWh/100 km en 2050 : -30% par rapport à aujourd'hui • Poids lourds : ○ 30% de part de marché en 2050 ○ 118 kWh/100 km : -40% par rapport à aujourd'hui	Discussions dans le cadre du GT consommation
Electrification du chauffage	• 30% de part de marché de l'électricité pour le chauffage dans le résidentiel, soit environ 47 TWh • 25% de part de marché de l'électricité pour le chauffage dans le tertiaire soit environ 13 TWh	Discussions dans le cadre du GT consommation

Tableau 6 Fourchettes proposées pour les hypothèses définissant les scénarios de consommation électrique

Paramètres définissant les scénarios	Hypothèse retenue dans les projets de la SNBC ou de la PPE	Proposition de fourchette de valeurs
Efficacité énergétique	<u>Bâtiment</u> • Neuf : ○ 205 000 constructions neuves/an ○ 75% de logement collectif en 2050 ○ 7 Mm² dans le tertiaire en 2050 • Rénovation : 1 000 000 de rénovations complètes équivalentes en 2050 • Electricité spécifique : gains de consommation unitaire entre 15% et 60% en fonction des appareils entre aujourd'hui et 2050 <u>Industrie</u> : gains d'efficacité énergétique entre 20 et 40 % entre 2015 et 2050 en fonction des potentiels des filières	Discussions dans le cadre du GT consommation
Sobriété / rationalisation des usages	• Baisse de 1°C dans l'ensemble des bâtiments • Changement important des modes de consommation sans perte de confort	Discussions dans le cadre du GT consommation
Power-to-gas	50 TWh de consommation électrique	Autour de la valeur proposée par la SNBC, par exemple entre 0 et 100 TWh Consommation supposée flexible
Echanges aux interconnexions	Objectif 2050 non précisé, supposément nuls	Entre 0 et 150 TWh d'exports ¹⁴ ?
Flexibilité de l'électromobilité	Objectif chiffré non précisé	• Entre la flexibilité limitée du scénario d'électromobilité dit <i>Forte</i>¹⁵ • Et la flexibilité renforcée du scénario d'électromobilité dit <i>Opera</i>
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

¹⁴ 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 cette fourchette d'échanges aux interconnexions.

¹⁵ 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.

Tableau 7 Fourchettes proposées pour les hypothèses définissant le mix électrique

Paramètres définissant les scénarios	Hypothèse retenue dans les projets de la SNBC ou de la PPE	Proposition de fourchette de valeurs
Nucléaire	Dans le projet de PPE : 50% en 2035 avec la fermeture de 14 à 16 réacteurs (dont ceux de Fessenheim) Objectif 2050 non précisé dans la SNBC	Entre 0 et 50% de la production électrique
Eolien terrestre	Dans le projet de PPE - Gisement technique : entre 120 et 170 GW (en fonction de la technologie) - Objectif entre 34,1 et 35,6 GW en 2028 Objectif 2050 non précisé dans la SNBC	Entre 40 et 80 GW
Eolien en mer	Dans le projet de PPE - Eolien posé - Gisement technique : 90 GW - Avec conciliation : 16 GW - Eolien flottant - Gisement technique : 155 GW - Avec conciliation : 33 GW - Objectif entre 4,7 et 5,2 GW en 2028 Objectif 2050 non précisé dans la SNBC	De moins de 10 GW à la capacité maximale du gisement soit autour de 50 GW
Photovoltaïque au sol	Dans le projet de PPE - Gisement technique : environ 776 GW (source : CEREMA – sol et parking) - Objectif entre 20,6 et 25 GW en 2028 Objectif 2050 non précisé dans la SNBC	Entre 40 et 200 GW
Photovoltaïque sur toitures	Dans le projet de PPE - Gisement technique : environ 350 GW (source : ADEME) - Objectif entre 15 et 19,5 GW en 2028 Objectif 2050 non précisé dans la SNBC	Entre 20 et 80 GW
Hydraulique	Dans le projet de PPE - Gisement technique de capacités supplémentaires : Entre 3,8 et 4 GW - Objectif entre 26,4 et 26,7 GW en 2028 Objectif 2050 non précisé dans la SNBC	Autour de 26 GW (objectifs PPE)
Stockage	Dans le projet de PPE + 1,5 GW de STEP entre 2030 et 2035 - Batteries sans objectif chiffré Objectif 2050 non précisé dans la SNBC	- D'une capacité constante à +1,5 GW de STEP supplémentaires - Capacité de batteries en fonction des analyses sur l'intérêt de l'autoconsommation

Tableau 8 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
Biomasse électrique	Dans le projet de PPE - Gisement technique non précisé - Objectif de 1,4 GW en 2028¹⁶ Objectif 2050 non précisé dans la SNBC	Entre 1 GW et 5 GW avec un fonctionnement en pointe en cogénération ?
Gas-to-power	Environ 13 GW à l'horizon 2035 (estimation RTE sur la base du projet de PPE) Dans le projet de SNBC à l'horizon 2050 20 TWh d'hydrogène → 12 TWh de production électrique¹⁷ 25 TWh de gaz → supposément 15 TWh de production électrique¹⁸	Entre 0 et de l'ordre de 25 GW Technologies à préciser : - turbines à combustion, - centrales à cycle combiné gaz - ou piles à combustible ?
Captation et séquestration de gaz carbonique	Dans le projet de SNBC à l'horizon 2050 : environ 10 MtCO ₂ d'émissions négatives sur des installations de production d'énergie à partir de biomasse	- Entre 0 et 10 MtCO₂ ou plus ? - Association ou non à de la production biomasse (émissions négatives)

¹⁶ En complément, objectif de 400 à 500 MW de production d'électricité à base de biogaz en 2028 dans le projet de PPE.

¹⁷ Conversion précisée dans la SNBC

¹⁸ Avec le rendement d'un cycle combiné gaz autour de 60%.

5.5 Les hypothèses 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
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		

6. Quels scénarios incompatibles avec les enjeux de l'atteinte de la neutralité carbone ?

Après détermination des fourchettes d'hypothèses pour les paramètres, il s'agira de concevoir des scénarios reflétant la variété des valeurs qu'elles pourront prendre, en tout en assurant une cohérence entre les hypothèses retenues. A l'inverse, il est possible que certaines combinaisons soient incohérentes et particulièrement incompatibles avec les enjeux de l'atteinte de la neutralité carbone (tels qu'exposés section 4), c'est-à-dire spécifiquement d'un point de vue technique, en termes d'acceptabilité sociétale ou du point de vue environnemental. Certains scénarios pourraient également s'avérer peu probables d'un point de vue économique. Ces scénarios, incompatibles avec les enjeux de la neutralité carbone ou peu probables, seront discutés en séance. Leur connaissance permettra d'identifier plus simplement les combinaisons cohérentes d'hypothèses qui formeront le socle des scénarios étudiés.

6.1 Des scénarios *a priori* techniquement infaisables ou à la faisabilité technique incertaine ?

La combinaison de certaines hypothèses peut résulter en des scénarios techniquement irréalisables *a priori* ou dont la faisabilité technique est incertaine.

[Discussions en séance]

6.2 Des scénarios *a priori* inacceptables du point de vue sociétal ?

La combinaison de certaines hypothèses peut résulter en des scénarios inacceptables *a priori* pour la collectivité nationale du point de vue sociétal.

[Discussions en séance]

6.3 Des scénarios *a priori* inacceptables du point de vue environnemental ?

La combinaison de certaines hypothèses peut résulter en des scénarios inacceptables *a priori* du point de vue environnemental.

[Discussions en séance]

6.4 Des scénarios peu probables pour des raisons économiques ?

La combinaison de certaines hypothèses peut résulter en des scénarios dont la probabilité de réalisation est faible. De telles combinaisons d'hypothèses peuvent faire l'objet de discussions en séance.

[Discussions en séance]

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

Les scénarios qui permettront l'étude du fonctionnement du système électrique à l'horizon 2050 seront conçus comme des combinaisons cohérentes. De ce point de vue, deux familles de scénarios seront considérées et séparées d'emblée par hypothèse :

1. Les scénarios avec l'option « nouveau nucléaire » ouverte
2. Les scénarios avec l'option « nouveau nucléaire » fermée

Ce paramètre étant fixé, la cohérence entre l'ensemble des paramètres portera sur les autres hypothèses. En particulier, dans les scénarios avec l'option « nouveau nucléaire » fermée, le niveau de consommation électrique devra être cohérent avec les gisements d'énergie renouvelable qui pourront être exploités (par exemple compte tenu des enjeux techniques, environnementaux et en matière d'acceptabilité sociale).

Dans le cadre des deux familles de scénarios, des propositions de scénarios pourront être discutées durant cette séance ou la suivante.

DOCUMENT DE TRAVAIL

7.1 Les scénarios avec l'option nouveau nucléaire ouverte

[Discussions en séance ou à la suivante]

Tableau 10 pour illustration – à compléter

Paramètres décrivant un scénario		Hypothèses
Consommation	Efficacité énergétique	
	Sobriété	
	<i>Power-to-gas</i>	
	Flexibilité	
	Echanges	
	Consommation électrique en Europe	
Production	Nucléaire	
	Eolien terrestre	
	Eolien en mer	
	Photovoltaïque	
	Captation de carbone	
	Hydraulique	
	<i>Gas-to-power</i>	
	Biomasse électrique	
	Mix européen	

7.2 Les scénarios avec l'option nouveau nucléaire fermé

[Discussions en séance ou à la suivante]

Tableau 11 pour illustration – à compléter

Paramètres décrivant un scénario		Hypothèses
Consommation	Efficacité énergétique	
	Sobriété	
	<i>Power-to-gas</i>	
	Flexibilité	
	Echanges	
	Consommation électrique en Europe	
Production	Nucléaire	
	Eolien terrestre	
	Eolien en mer	
	Photovoltaïque	
	Captation de carbone	
	Hydraulique	
	<i>Gas-to-power</i>	
	Biomasse électrique	
	Mix européen	

8. Des variantes pour identifier les jalons clés, capter la valeur d'options de certaines technologies et les regrets éventuels associés à certains scénarios

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.

A cet effet, il est proposé de considérer des variantes des scénarios. 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, par exemple pour rejoindre l'un des autres scénarios de référence.

En fonction de l'avancement des discussions sur les scénarios, des propositions de variantes pourront être discutées durant cette séance ou la suivante.

[Discussion en séance ou à la suivante]