



Futurs énergétiques 2050

Bilan de la Phase I

Synthèse et enseignements
issus de la consultation publique

VERSION COMPLÈTE

Futurs énergétiques 2050

Bilan de la Phase I

Synthèse et enseignements
issus de la consultation publique

VERSION COMPLÈTE

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

« Futurs énergétiques 2050 » : pourquoi, quand, comment ?

Dans le cadre de ses missions légales (Bilan prévisionnel) et en réponse à une saisine du Gouvernement, RTE a lancé en 2019 une large étude sur l'évolution du système électrique intitulée «Futurs énergétiques 2050».

Ce travail intervient à un moment clé du débat public sur l'énergie et le climat, au cours duquel se décident les stratégies nécessaires pour sortir des énergies fossiles, atteindre la neutralité carbone en 2050 et ainsi respecter l'objectif fixé lors de la COP 21 à Paris. Cela implique une transformation profonde de l'économie et des bouleversements dans le secteur des transports, de l'industrie et du bâtiment aujourd'hui encore très dépendants du pétrole, du charbon et du gaz d'origine fossile. Cette transformation doit être menée à bien en seulement trois décennies et même accélérer de manière substantielle d'ici 2030. Elle modifiera les logiques industrielles, mobilisera des capitaux considérables, aura des implications sociales importantes et entrera en résonance voire en conflit avec d'autres objectifs environnementaux.

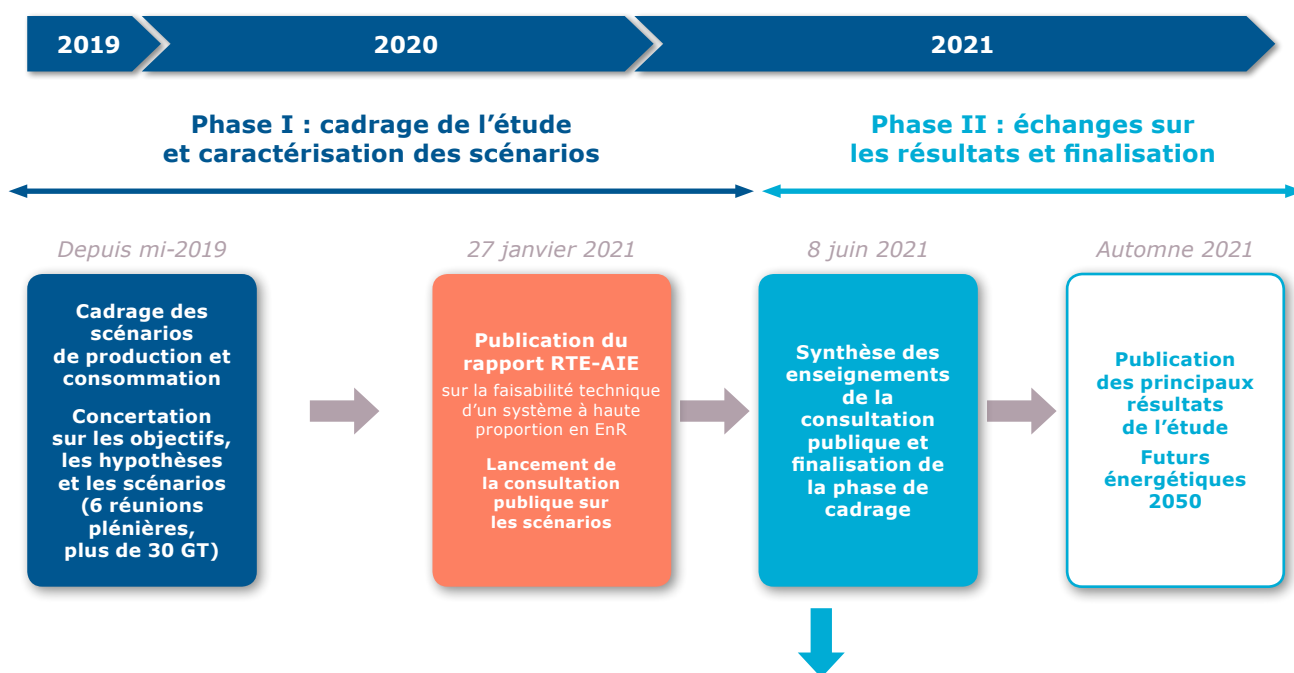
Différentes options sont sur la table pour y parvenir. Elles présentent des points communs (baisse de la consommation d'énergie, augmentation de la part de l'électricité, recours aux énergies renouvelables) mais également des différences importantes (rythme d'évolution et la structure de la consommation, part de l'industrie, avenir du nucléaire, rôle de l'hydrogène, etc.). L'étude «Futurs énergétiques 2050» répond au besoin de les documenter en décrivant les modifications sur le plan technique, chiffrant les coûts associés, dégagant les conséquences environnementales au sens large et explicitant les impacts sur les modes de vie.

L'étude consiste, en premier lieu, en un travail technique d'une ampleur inédite, qui nécessite un très lourd effort de simulation et de calcul pour caractériser de manière rigoureuse l'ensemble des systèmes électriques permettant d'atteindre la neutralité carbone en 2050. Le dispositif de concertation est complété d'un conseil scientifique qui sera amené à fournir un avis indépendant sur les travaux réalisés dans la phase II.

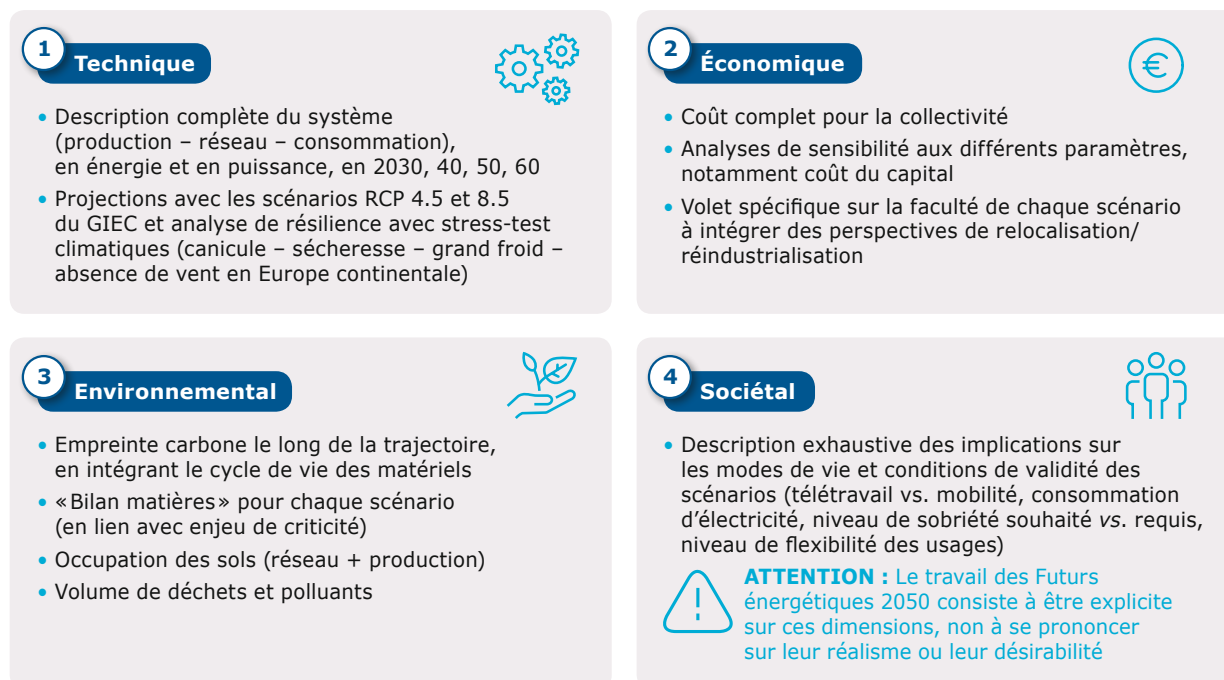
Elle implique également une démarche inédite en matière de concertation : les scénarios sont élaborés au grand jour, tous les paramètres de l'étude sont discutés, tracés et débattus dans des groupes de travail et dans le cadre d'une instance plénière de concertation, selon une méthode ouverte et transparente visant à ce que chaque partie intéressée puisse s'exprimer et être entendue. Le planning de l'étude a notamment évolué pour prendre en compte les remarques et enrichir le dispositif en intégrant de nombreux scénarios et variantes qui n'étaient pas initialement prévus.

La phase I de l'étude, consacrée au cadrage des objectifs, des méthodes et des hypothèses, s'est achevée au premier trimestre 2021. Elle a été ponctuée d'une large consultation publique, qui a suscité des réponses bien au-delà du cercle des «parties prenantes expertes» habituellement concernées par ce genre d'exercices : concrètement, près de 4 000 organisations et particuliers ont participé, à travers des contributions spécifiques très détaillées, lettres ouvertes, pétitions et cyberactions.

Le présent document en présente un bilan résumé, public et préliminaire, alors que s'ouvre la phase II de l'étude qui durera jusqu'à l'automne.

Figure 1 La séquence globale de l'étude

Une évaluation des scénarios en selon quatre axes



Un cadre de référence stabilisé

La consultation publique permet de dégager un socle largement partagé sur la plupart des éléments de cadrage de l'étude :

1. L'objet d'étude est la **neutralité carbone en 2050**. Par construction, tous les scénarios doivent atteindre cet objectif, et des trajectoires cohérentes doivent être articulées pour y parvenir, en prévoyant qu'une partie importante de l'effort doit être réalisé dès la décennie 2020-2030. La méthode proposée par RTE consiste ainsi à préciser des trajectoires détaillées et pas uniquement un éclairage sur l'année 2050.
2. L'analyse du système électrique doit être complète, systématique, et décrire de manière exhaustive les scénarios envisageables. Elle repose sur une grille d'analyse en « 4 cadrans » qui est désormais validée : étude technique, chiffrage économique, analyse environnementale, description des impacts sur les modes de vie.
3. Le changement climatique est une réalité ; il se poursuivra quoiqu'il arrive au cours des prochaines années et affectera les infrastructures énergétiques qui seront exploitées. Ceci plaide pour qu'un volet « adaptation au changement climatique » soit ajouté au volet « atténuation du changement climatique ». Ainsi, pour la première fois, **l'analyse prospective des scénarios s'accompagnera d'une analyse de résilience aux chocs climatiques**, fondée sur des scénarios contrastés du GIEC.
4. Les scénarios à l'étude partagent des traits communs, conformes à tous les exercices internationaux cherchant à décrire les moyens d'atteindre la neutralité carbone : ils impliquent de **diminuer la consommation d'énergie totale, d'accroître la part de l'électricité dans la consommation d'énergie finale**. Pour atteindre la neutralité carbone, le recours à l'électricité doit en effet se développer pour

remplacer les énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) sur de très nombreux usages, sans préjudice de l'inflexion très importante attendue sur la biomasse et sur les vecteurs qui l'utilisent (chaleur, gaz vert). Au-delà des débats d'experts sur les trajectoires précises, les besoins d'électrification rapide dans le secteur des transports, ainsi que dans l'industrie et le bâtiment, sont clairs. De même, il est certain que cette électricité bas-carbone sera assurée par des énergies renouvelables dans des proportions bien plus importantes qu'aujourd'hui, même en cas de relance du nucléaire, car les réacteurs actuels devront à terme être arrêtés pour des raisons d'âge et qu'il n'apparaît pas possible de les remplacer au rythme (exceptionnel selon les standards internationaux) auquel ils ont été construits. Ceci se traduit, dans les scénarios centraux présentés à l'étude, **par une part des énergies renouvelables comprise entre 50 et 100 % de la production nationale d'électricité en 2050**.

5. À l'origine un thème d'étude parmi d'autres, **la question de la réindustrialisation et des fuites de carbone** s'est imposée comme un enjeu central du travail en cours. Depuis 30 ans, la France est parvenue à réduire ses émissions de gaz à effet de serre mais, dans le même temps, son empreinte carbone n'a pas diminué : ce paradoxe s'explique par la désindustrialisation du pays et un recours croissant aux produits manufacturés importés, dans un contexte d'augmentation de la consommation. Bien que l'empreinte carbone ait également été orientée à la baisse sur la dernière dizaine d'années, les produits manufacturés importés ont toujours une intensité carbone nettement plus importante que s'ils avaient été produits en France et pèsent dans l'empreinte carbone du pays. Ce phénomène est contre-productif du point de vue climatique alors que la France bénéficie d'une électricité bas-carbone et

affiche sur ce terrain l'une des meilleures performances au monde (au même niveau de pays comme la Norvège ou la Suède en Europe). Pour renseigner sur les liens entre émissions en France, émissions importées et coûts d'approvisionnement en électricité, RTE a proposé de construire une variante et un dispositif d'analyse spécifique. Les scénarios vertueux du point de vue de la maîtrise de l'empreinte carbone du pays imposent une **reconstruction de l'appareil productif autour de solutions bas-carbone**, dès les prochains cycles d'investissement, et ceci nécessite que l'électricité bas-carbone soit compétitive par rapport aux alternatives carbonées proposées hors de France.

6. Parmi les livrables de l'étude «Futurs énergétiques 2050» figurent des variantes spécifiques sur la consommation d'électricité. Au-delà des travaux sur la réindustrialisation, deux variantes («sobriété» et «hydrogène+») apparaissent particulièrement attendues. D'une part, **une plus grande sobriété dans les modes de vie et de consommation permet de relâcher la pression sur le rythme nécessaire de développement des énergies bas-carbone** : cela élargit ainsi la gamme des options techniques et le degré d'effort nécessaire pour atteindre la neutralité carbone. Les implications sur les modes de vie seront explicités et problématisés à l'issue d'ateliers dédiés. D'autre part, **certains acteurs fondent de nombreux espoirs dans la perspective d'une révolution dans l'usage de l'hydrogène, notamment dans l'industrie (sidérurgie verte) ou la mobilité lourde. La variante «hydrogène+»** permettra d'en approfondir les conditions concrètes de mise en œuvre, que ce soit via le maintien du principe d'une production domestique ou l'import via les grands réseaux de gaz.
7. L'évolution des modes de production d'électricité en France constitue une question centrale de l'analyse. Le parc de production d'électricité français repose aujourd'hui en large partie sur des réacteurs nucléaires de seconde génération. Cette infrastructure de production – totalement

atypique à l'échelle internationale – a permis une production d'électricité compétitive et **une performance CO₂ exceptionnelle, qui n'est égalée dans le monde que par des pays ou régions disposant de ressources hydrauliques uniques** (Norvège, Suède, Islande, Québec). Cependant, les réacteurs ont été mis en service pour la plupart entre la fin des années 1970 et le début des années 1990. Même si l'échéance de leur fin d'exploitation peut être discutée en fonction du programme de prolongation de la durée de fonctionnement des réacteurs et des décisions de l'Autorité de sûreté nucléaire, il n'en reste pas moins que **ces réacteurs devront être massivement fermés entre 2030 et 2060, pour des raisons industrielles et non politiques**. En retenant une période d'étude longue, l'étude «Futurs énergétiques 2050» se confronte résolument à cette problématique et au remplacement du système actuel par un nouveau système de production, d'acheminement et de consommation d'électricité.

8. Pour cela, RTE a proposé d'emblée un choix méthodologique clair, articulé autour de la distinction entre deux familles de scénarios selon que les nouveaux investissements dans le parc se portent uniquement sur les énergies renouvelables (scénarios M) ou sur un mix bas-carbone, c'est-à-dire une combinaison d'énergies renouvelables et de nouveaux réacteurs nucléaires (scénarios N). Cette représentation met ainsi l'accent sur l'importance de la décision de relance ou non d'un parc électro-nucléaire, qui engagera le pays sur le temps long et résultera d'un choix politique ayant des implications techniques, économiques et sociétales très larges. Cette méthode apparaît très largement confortée par la phase I de la concertation. Elle conduit à décrire deux types de systèmes électriques différents de celui d'aujourd'hui, qui nécessitent tous les deux sur des investissements massifs. Cependant, **il ne doit pas s'agir de l'unique clé de lecture des scénarios, une distinction trop forte entre scénarios M et N masquant les proximités techniques** (forte part des

énergies renouvelables variables) **ou économiques** (prépondérance des investissements sur les coûts de fonctionnement) entre certains scénarios.

9. Les conditions de réussite des scénarios sont différentes et portent sur de nombreux aspects qui sont par nature incertains (contexte social et macroéconomique, degré de maîtrise technologique des différents maillons de la chaîne, etc.). Ainsi, la perspective d'un système électrique composé à 100 % d'énergies renouvelables implique le franchissement de barrières technologiques et la maîtrise de solutions non encore testées en grandeur réelle. Les scénarios N comportant du nouveau nucléaire, quant à eux, nécessitent de construire de nouveaux réacteurs nucléaires rapidement et à des coûts maîtrisés, et de

nombreux scénarios supposent une prolongation de la durée de vie d'une partie du parc nucléaire actuel alors que cette prolongation au-delà de 50 ans et *a fortiori* de 60 ans n'est pas acquise à ce jour. **Ceci invite à ne pas se contenter d'une analyse « statique » des scénarios, mais à identifier les jalons décisionnels clés qui les caractérisent, les leviers de correction en cas de non-réalisation de certaines de leurs hypothèses, et ainsi les décisions les plus pertinentes pour l'atteinte de la neutralité carbone.** À ce titre, les conséquences sur l'atteinte des objectifs publics d'un non-respect des rythmes d'installation des différentes filières ou d'un écart par rapport aux projections de référence sur la consommation d'électricité feront partie intégrante des analyses, via une approche de type moindres regrets par exemple.

De nombreuses évolutions à l'issue de la consultation publique

La consultation publique conduit RTE à faire évoluer – souvent par l'ajout de nouvelles variantes ou thèmes d'étude – le dispositif initial comme suit :

1. Le point de départ de l'étude est la stratégie nationale bas-carbone (SNBC) adoptée par la France en 2020. Celle-ci partage de nombreux points communs avec les stratégies d'atteinte de la neutralité carbone adoptée récemment par plusieurs pays en Europe. Néanmoins, de nombreux répondants proposent des cadrages différents, soit qu'ils contestent certains choix de la SNBC, soit qu'ils semblent les ignorer. La SNBC a été élaborée entre 2017 et 2020 ; elle a été complétée par plusieurs lois, par un plan de relance de l'économie dans le cadre de la pandémie de la COVID ; elle a été publiée alors que les questions énergétiques soulevaient de vifs débats de société (mouvement des gilets jaunes contre la fiscalité carbone, convention citoyenne sur le climat) ; elle a été suivie d'un approfondissement de la réflexion au niveau européen se traduisant par la volonté d'accroître l'ambition de réduction des émissions à l'horizon 2030 (projet du Green New Deal) ; elle a, enfin, vocation à être actualisée dès 2023. Dès lors, **l'étude « Futurs énergétiques 2050 » reposera sur un cadrage général (trajectoires de référence, variantes et analyses de sensibilité) reposant sur la SNBC et intégrant les enseignements des travaux complémentaires menés depuis sa parution**, et notamment les travaux de l'Agence internationale de l'énergie, de la Commission européenne, et du Haut conseil pour le climat.
2. L'étude présentera une **trajectoire d'accélération de la décarbonation de l'économie dès 2030**. En effet, la trajectoire d'atteinte de la neutralité carbone de la France passe pour le moment par un jalon 2030 correspondant à

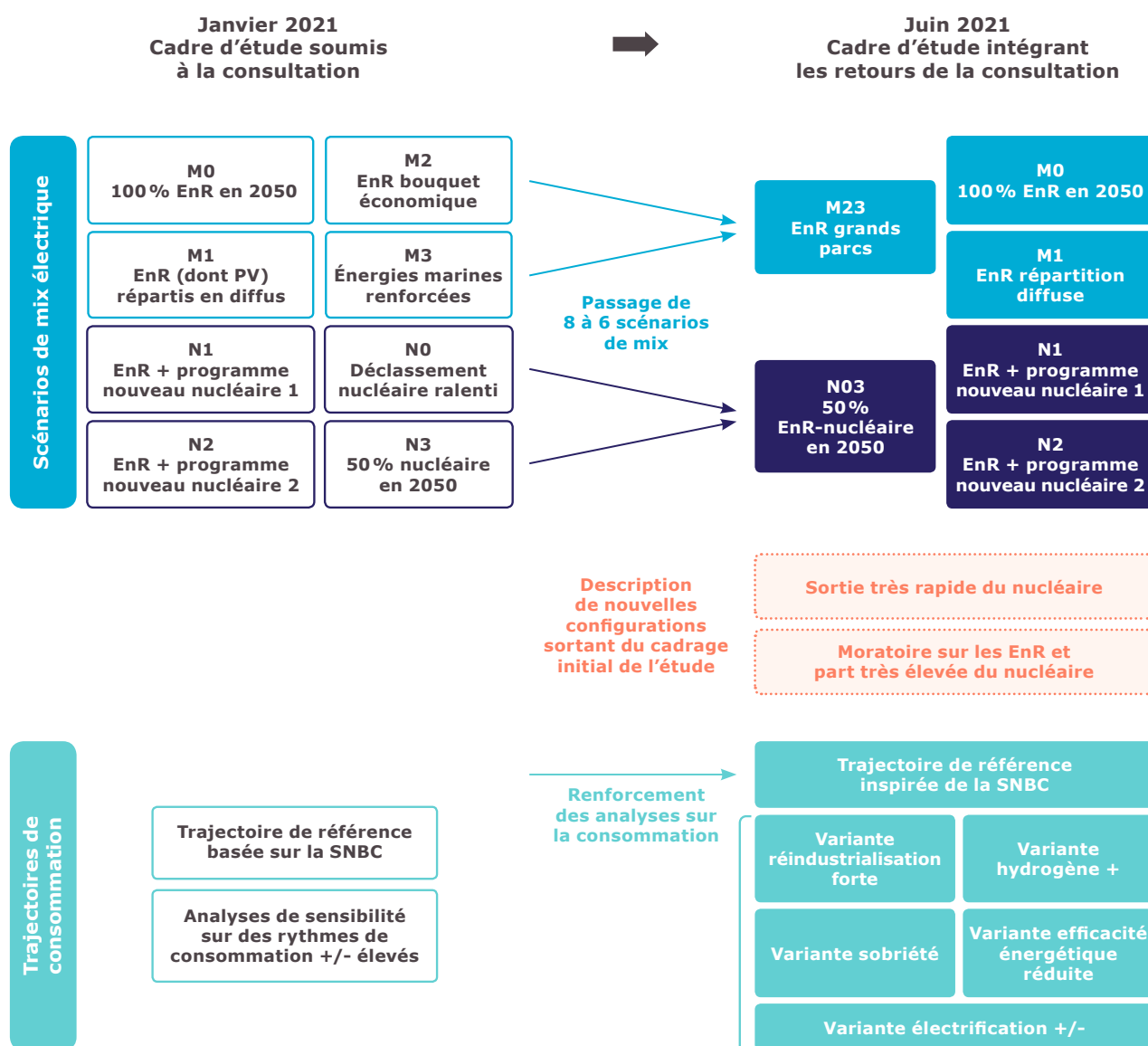
une diminution des émissions de gaz à effet de serre de 40 % par rapport à 1990. Or les États européens sont en train d'adopter une trajectoire renforcée en 2030, avec un objectif de -55 % des émissions nettes au niveau européen qui devra être décliné par pays mais conduira nécessairement à un relèvement de l'ambition pour la France. Dès lors, **la faculté des différents scénarios testés dans l'étude à permettre une accélération et à atteindre un objectif climatique plus ambitieux en 2030 fera l'objet d'une analyse détaillée**, notamment par le biais de variantes et analyses de sensibilité dédiées.

3. La consultation publique a montré que plusieurs répondants regrettaient que l'étude – ou plus probablement son traitement médiatique – accorde une place trop importante au volet « production d'électricité », au détriment des enjeux sur la consommation qui sont pourtant tout aussi cruciaux. **L'étude comprend bien un volet dédié à l'estimation de l'évolution de la consommation d'électricité à long terme : ce volet sera ainsi renforcé, et comprendra une trajectoire de référence ainsi que cinq variantes** : réindustrialisation forte, sobriété, hydrogène +, efficacité énergétique dégradée, électrification +/-, ainsi que de nombreux tests de sensibilité.
4. **Les scénarios prévoyant à terme un système 100 % EnR (« scénarios M ») seront au nombre de trois**. Ils permettent de tester une sortie du nucléaire en 2050 (M0) ou en 2060 (M1 et M23). Leur logique consiste en une répartition diffuse des installations de production avec déploiement massif du solaire (M1) ou alors sur l'idée d'une massification du déploiement des énergies renouvelables autour de grands parcs (éolien en mer, à terre, et solaire photovoltaïque) (M0 et M23).

5. Les scénarios « EnR + nucléaire » (scénarios N) seront également au nombre de trois. Les scénarios N1 et N2 diffèrent par le rythme de construction de nouveaux réacteurs nucléaires de troisième génération : N1 présente un « réinvestissement minimal »

prolongeant le rythme du programme Nouveau Nucléaire Français présenté par EDF à l'État, tandis que N2 adopte le rythme maximal présenté par la filière. Le scénario N03 a pour sa part été largement réécrit autour de l'idée d'un système électrique fondé durablement sur le

Figure 2 Résumé des principaux ajustements des scénarios d'étude à l'issue de la consultation publique



nucléaire. N03 permet d'atteindre 50% pour la part du nucléaire en 2050 en misant (i) sur une trajectoire de fermetures plus lente sur la période 2025-2035, (ii) sur la prolongation de quelques réacteurs au-delà de 60 ans, et (iii) sur d'autres filières que l'EPR 2, comme les SMR (petits réacteurs modulaires ou Small Modular Reactors).

6. La consultation publique a confirmé le caractère extrêmement clivé et passionnel du débat sur le nucléaire et les énergies renouvelables. Les contributions de citoyens reçues dans le cadre de la concertation consistent, en grand nombre, en des demandes d'ajouts de scénarios qui s'éloignent du cadrage initial : des scénarios de sortie rapide du nucléaire (entre « tout de suite » et « d'ici 2030 ») d'une part, des scénarios reposant sur le maintien du *statu quo* actuel et/ou de moratoire sur le développement des EnR

(et notamment l'éolien) d'autre part. **Au titre de l'engagement pris dans le cadre de la concertation, RTE étudiera ces configurations alternatives et décrira les enjeux qu'elles soulèvent notamment en ce qui concerne le respect de la trajectoire climatique de la France.** Les analyses techniques menées à l'issue de la consultation montrent que ces configurations alternatives présentent, à des degrés divers, une ou plusieurs incompatibilités en particulier par rapport à l'objectif de réduction des émissions à l'horizon 2030.

7. RTE a, enfin, pris en compte un grand nombre de remarques et demandes d'études complémentaires : ajustement des hypothèses sur le PIB et la population, usages prospectifs de l'hydrogène, coût des différentes technologies, intégration d'une variante des scénarios M intégrant un déclassement plus lent des réacteurs nucléaires, etc.

Des points de débat qui demeurent très vifs

La consultation publique permet également de mettre l'accent sur des points d'incompréhension ou de non-consensus forts :

1. La SNBC est la trajectoire de référence pour la France, permettant de décliner l'engagement du pays à atteindre l'objectif de neutralité carbone d'ici 2050. Or ses principales caractéristiques apparaissent mal connues, que ce soit celles qui la rapprochent des autres stratégies nationales d'atteinte de la neutralité carbone (part de l'électricité dans la consommation finale en nette hausse, part majoritaire des énergies renouvelables, développement de l'utilisation de la biomasse) ou celles qui lui sont propres (recherche d'une forte indépendance énergétique, recours modéré au vecteur hydrogène, importance du biogaz). De nombreuses remarques reçues durant la consultation ne portent ainsi non pas sur les travaux de RTE, mais sur le cadrage de la SNBC.

2. La lecture de la « part de la production française » projetée en 2050 pour chaque filière de production a suscité de très nombreuses réactions. Celles-ci apparaissent très largement conditionnées par le débat politique institué par la loi de 2015, puis par sa révision de 2019, sur la part du nucléaire dans le mix. Ainsi, plusieurs répondants ont interprété le chiffre de 50% pour la part du nucléaire dans la production d'électricité en 2050 comme une contrainte de nature politique. Or ce chiffre résultait bien d'une analyse technique : en intégrant les contraintes sur la durée de vie du parc existant, les rythmes maximaux de renouvellement du parc nucléaire par la construction de nouveaux réacteurs de troisième génération ainsi que l'effort d'électrification nécessaire pour atteindre la neutralité carbone, une part du nucléaire l'ordre de 50% de la production d'électricité en 2050 apparaît comme un maximum. L'atteindre nécessiterait de mobiliser l'ensemble des moyens mentionnés dans le scénario N03 sur la durée de vie des

réacteurs actuels ainsi que sur les réacteurs de troisième génération (en intégrant des SMR).

3. La gestion de la variabilité de l'éolien et du solaire demeure un sujet essentiel de divergence d'appréciations. Les questions des parties prenantes portent ainsi régulièrement sur l'illustration du fonctionnement du système dans des situations météorologiques spécifiques. Pour bien appréhender les conséquences des différents scénarios en matière de sécurité d'approvisionnement électrique, RTE rappelle qu'il présentera, pour les différents scénarios, non seulement une analyse de risque probabiliste en lien avec le critère public de sécurité d'approvisionnement défini dans le code de l'énergie, **mais également une analyse approfondie et une illustration du fonctionnement du système dans certaines situations extrêmes (logique de « stress-tests »).**

4. L'appariement des variantes de consommation et des scénarios de production soulève un débat méthodologique. Contrairement au Bilan prévisionnel publié en 2017, RTE propose de présenter l'ensemble des scénarios par rapport à la même trajectoire de consommation (trajectoire de référence), dans la mesure où il s'agit de la meilleure façon de pouvoir comparer les options de mix. Certains acteurs proposent une logique différente, où chaque scénario correspond à une « histoire ». Sans méconnaître l'importance du raisonnement par scénario et de construction d'univers cohérents, les appariements alternatifs proposés ne vont pas de soi. À titre d'exemple, rien n'impose que les scénarios de sortie du nucléaire en 2050 doivent par essence se combiner avec plus de sobriété, ou que la volonté de promouvoir une réindustrialisation du pays implique *a priori* un scénario reposant plus largement sur le nucléaire. C'est la raison pour laquelle RTE maintiendra le dispositif initial, qui pourra être complété par des analyses croisées.

Un dispositif d'étude complété

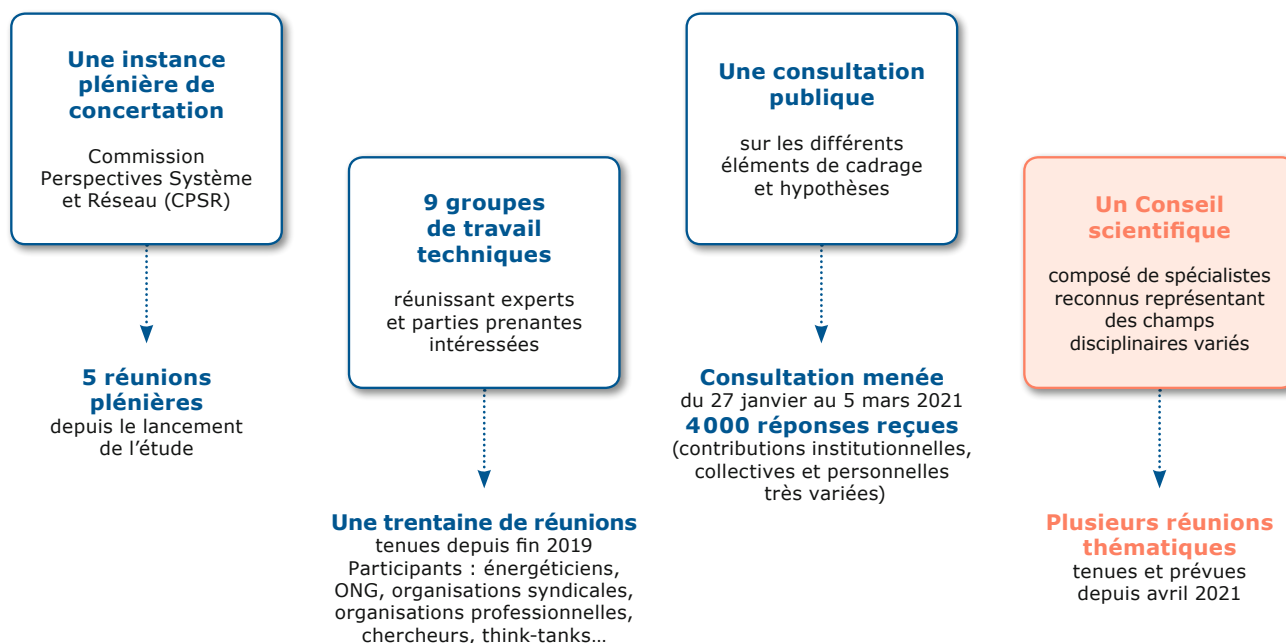
L'adaptation du dispositif d'étude aux demandes issues de la concertation et de la consultation publique conduit à des conséquences pratiques pour la phase II.

1. RTE va **simuler davantage de variantes qu'initialement envisagé**. Indépendamment du temps de calcul et de partage dans les instances de concertation, ceci soulève des enjeux en matière de restitution des résultats.
2. Il n'est pas envisageable de délivrer l'ensemble des scénarios, variantes et analyses de sensibilité en un seul document. **La phase II sera achevée à l'automne** et donnera lieu à la

publication d'un rapport de synthèse, puis d'un rapport détaillé. Elle sera **poursuivie par des études complémentaires au cours de l'année 2022**.

3. **Le dispositif de concertation, qui a fait ses preuves, est complété d'un conseil scientifique qui fournira un avis indépendant sur les travaux réalisés dans la phase II de l'étude**. Le comité est composé de différentes disciplines universitaires (macroéconomie, économie de l'énergie et de l'environnement, philosophie, climatologie, architecture). Le compte-rendu de ses travaux sera rendu public en même temps que celui des études.

Figure 3 Processus de concertation



LES TRAJECTOIRES DE CONSOMMATION*

À L'HORIZON 2050 - VERSION JUIN 2021

CADRE DE RÉFÉRENCE

RÉFÉRENCE

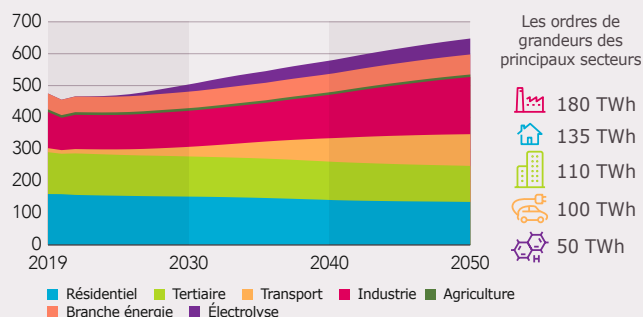
Trajectoire combinant électrification progressive d'usages aujourd'hui dépendants des énergies fossiles et progrès d'efficacité énergétique, selon les orientations générales de la SNBC. La trajectoire repose sur un cadrage macroéconomique réajusté (hypothèse de croissance à 1,3% à partir de 2030 et scénario fécondité basse de l'INSEE) et tient compte des effets escomptés du plan de relance et des politiques publiques sectorielles (RE 2020 et réforme du DPE dans le secteur du bâtiment, stratégie hydrogène, etc.). La trajectoire intègre un effort de réindustrialisation caractérisé par un maintien de la part de l'industrie dans le PIB à son niveau actuel ou des phénomènes comme l'effet rebond dans les logements rénovés.

CONSO EN 2050**

~
645 TWh
(y compris production d'hydrogène)

ÉVOLUTION

Consommation d'électricité dans la trajectoire de référence



LES VARIANTES

HYPOTHÈSES

CONSO 2050**

COMPARAISON par rapport à la référence

Sobriété

Les habitudes de vie évoluent dans le sens d'une plus grande sobriété des usages et des consommations (moins de déplacements individuels au profit des mobilités douces et des transports en commun, moindre consommation de biens manufacturés, économie du partage, etc.), occasionnant une diminution générale des besoins énergétiques, et donc également électriques.

Entre
550 et 600 TWh

-

-

Réindustrialisation forte

Sans revenir à son niveau du début des années 1990, la part de l'industrie manufacturière dans le PIB s'infléchit de manière forte pour atteindre 12-13% en 2050. Le scénario modélise un investissement dans les secteurs technologiques de pointe et stratégiques, ainsi que de la prise en compte de possibles relocalisations de productions fortement émettrices à l'étranger dans l'optique de réduire l'empreinte carbone de la consommation française.

Entre
700 et 750 TWh

+++
=
+
=
+

Efficacité énergétique dégradée

Les hypothèses de progrès de l'efficacité énergétique des matériels électriques généralement retenues ne se matérialisent pas, ou s'accompagnent de phénomènes de surconsommation au-delà de ce qui est prévu dans la trajectoire de référence. Cela se traduit par un rythme de rénovations plus lent mais également par des équipements moins performants dans l'électroménager, les moteurs ou encore l'industrie.

Entre
700 et 730 TWh

+
++
+
+
+

Électrification +/-

La part de l'électricité dans la consommation finale s'accroît de manière plus ou moins forte par rapport à la SNBC. Certains usages basculent plus rapidement ou fortement vers l'électricité (scénario d'adoption très rapide du véhicule électrique et d'électrification de certaines catégories de poids lourds), ou d'autres moins (par exemple dans l'industrie dans le cas où l'électricité ne parvient pas à être compétitive)

Entre
580 et 720 TWh

-
-
-
-
++
+

Hydrogène +

Une «révolution hydrogène» se produit, avec notamment un fort développement de ce vecteur dans l'industrie (sidérurgie verte), la mobilité lourde ou le transport aérien. La consommation d'hydrogène est portée à plus de 120 TWh en 2050, contre de l'ordre de 50 TWh dans la trajectoire de référence. L'approvisionnement en hydrogène nécessite alors de mobiliser plus d'électrolyse en France ou de trouver d'autres modes d'approvisionnement.

Entre
680 et 770 TWh

=
=
=
=
+++

* Trajectoires construites à partir des orientations de la SNBC

** Valeurs provisoires à ce stade des simulations, amenées à évoluer à la suite du bouclage en flexibilités

LES SCÉNARIOS DE MIX DE PRODUCTION* À L'HORIZON 2050 - VERSION JUIN 2021

	NARRATIF	RÉPARTITION DE LA PRODUCTION EN 2050**	CAPACITÉS INSTALLÉES EN 2050 (EN GW)**				
			Solaire	Éolien terrestre	Éolien en mer	Nucléaire historique	Nouveau nucléaire
M0 100 % EnR en 2050	Sortie du nucléaire complète en 2050. La fermeture des réacteurs nucléaires existants est accélérée dès 2030, et les rythmes d'installation du photovoltaïque, de l'éolien et des énergies marines sont poussés au maximum.		~ 208 GW (soit x21)	~ 74 GW (soit x4)	~ 62 GW	/	/
M1 EnR répartition diffuse	Système 100 % EnR en 2060 articulé autour de la recherche d'une répartition diffuse d'installations renouvelables – majoritairement solaires – de petite taille sur le territoire. Cet essor repose sur une mobilisation systématique des collectivités et acteurs locaux.		~ 200 GW (soit x20)	~ 58 GW (soit x3,5)	~ 45 GW	16 GW	/
M23 EnR grands parcs	Massification du développement des renouvelables via de grands parcs éoliens sur terre et en mer et de grandes centrales solaires. La minimisation des coûts est systématiquement recherchée et conduit à cibler les technologies et les zones bénéficiant des meilleurs rendements et permettant des économies d'échelle.		~ 125 GW (soit x12)	~ 72 GW (soit x4)	~ 60 GW	16 GW	/
N1 EnR + programme nouveau nucléaire 1	Un programme « minimal » de construction de nouveaux réacteurs de troisième génération est lancé, mais le remplacement du parc existant et l'électrification repose en majorité sur les EnR. Les nouveaux réacteurs sont développés sur des sites existants à raison d'une paire tous les 5 ans à partir de 2035.		~ 110 GW (soit x11)	~ 55 GW (soit x3,3)	~ 45 GW	16 GW	13 GW (soit 8 EPR)
N2 EnR + programme nouveau nucléaire 2	Lancement d'un programme plus conséquent et rapide de construction de nouveaux réacteurs nucléaires, à raison d'une paire tous les 3 ans environ à partir de 2035 avec montée en charge progressive. Le développement des énergies renouvelables se poursuit et représente deux tiers de l'électricité produite en 2050.		~ 85 GW (soit x8,5)	~ 50 GW (soit x2,9)	~ 35 GW	16 GW	23 GW (soit 14 EPR)
N03 50 % EnR - nucléaire en 2050	Mix de production reposant à part égale sur les renouvelables et le nucléaire à l'horizon 2050. Fonctionnement étendu des réacteurs actuels tant qu'ils respectent les normes de sûreté, construction de nouveaux réacteurs selon un rythme volontariste avec diversification des technologies de troisième génération (EPR 2 + SMR).		~ 70 GW (soit x7)	~ 43 GW (soit x2,5)	~ 22 GW	24 GW	~ 28 GW (soit ~14 EPR + quelques SMR)
Hypothèses communes	 Hydraulique ~29 GW	 Hydrolien + EMR Entre 0 et 3 GW	 Thermique Selon résultats simulations	 Flexibilités (batteries, effacements, power-to-X-to-power) Selon résultats simulations	 Bioénergie dédiée à la production d'électricité ~2 GW		

* Scénarios compatibles avec la SNBC

** Valeurs provisoires à ce stade des simulations, amenées à évoluer à la suite du bouclage en flexibilités



RESTITUTION DÉTAILLÉE



SUR LA CONCERTATION ET LE DÉROULEMENT DE LA CONSULTATION PUBLIQUE

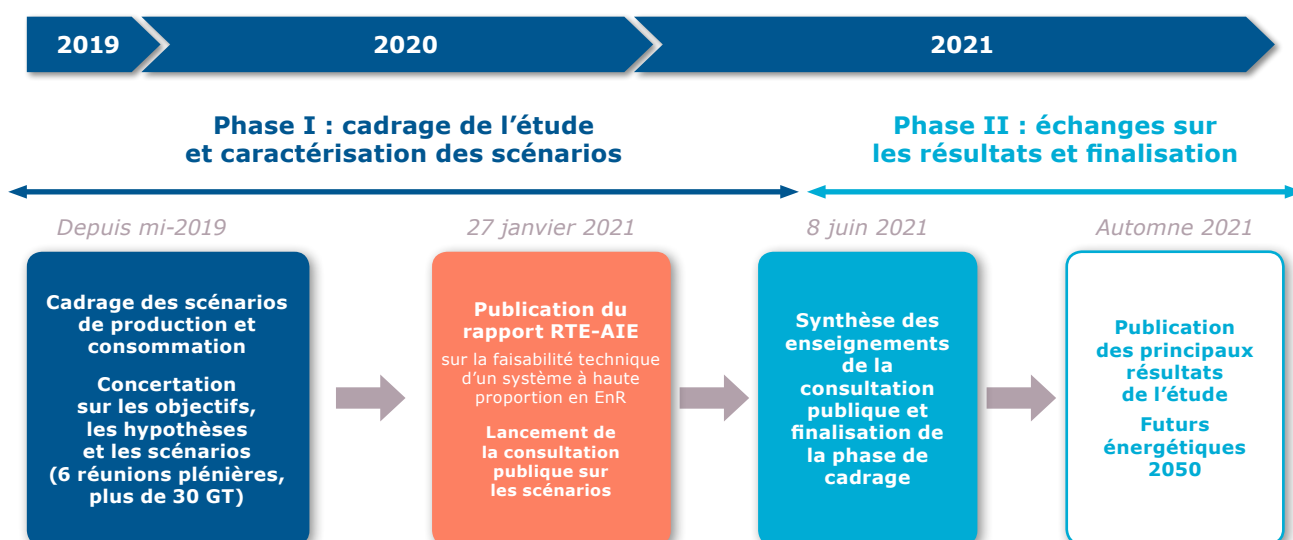
La consultation publique organisée du 28 janvier au 5 mars 2021 sur les scénarios 2050 a permis de collecter près de 4 000 réponses individuelles, avec des contributions allant de quelques mots à une centaine de pages.

Elle vient conclure la première phase de l'étude et fait suite à un processus de concertation systématique lancé en 2019 et prévu pour accompagner le cadrage de l'étude, la fixation des hypothèses, la définition et la production des scénarios, jusqu'à la formulation des résultats. À ce jour, plus de

30 réunions thématiques ont été menées, et ont rassemblé des experts d'une centaine d'organismes différents (énergéticiens, producteurs et fournisseurs d'électricité, gaziers, ONG, associations, *think-tanks* et instituts, régulateurs et organismes d'État, etc.). Ces groupes de travail se poursuivent à l'heure actuelle.

Dans l'ensemble, le processus de concertation a conduit à rédiger une trentaine de documents de cadrage, qui sont publics et intégralement disponibles sur le site de la concertation¹.

Figure 4 La séquence globale de l'étude



1. <https://www.concerte.fr/content/actualite-de-la-commission-perspectives-systeme-et-reseau>

Figure 5 Une trentaine de réunions de concertations tenues dans le cadre de l'étude « Futurs énergétiques 2050 »

Groupes de travail	Réunions
GT 1 «Référentiel climatique»	● ● ● ●
GT 2 «Consommation»	● ● ● ● ● ●
GT 3 «Cadrage et scénarisation»	● ● ● ● ●
GT 4 «Interfaces électricité et autres vecteurs»	● ● ● ●
GT 5 «Dynamiques sociétales»	● ● ● ●
GT 6 «Environnement»	● ● ● ●
GT 7 «Flexibilités»	● ● ●
GT 8 «Fonctionnement du système électrique»	● ● ● ●
GT 9 «Coûts»	● ● ● ●
Réunions plénières de la CPSR*	● ● ● ● ● ●

*Commission perspectives système et réseau ● prochaine réunion à venir

Le présent document expose les orientations générales retenues par RTE à l'issue de la consultation publique pour faire évoluer les scénarios, la méthode et les hypothèses de l'étude. Il ne s'agit pas, en revanche, d'une réponse

exhaustive à l'ensemble des contributions : les différents points d'attention, suggestions et commentaires spécifiques ont été notés et trouveront des réponses dans le rapport final.



SUR LE CADRE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE

Objectifs et grille d'analyse

Par définition, tous les scénarios de l'étude «Futurs énergétiques 2050» sont construits pour atteindre la neutralité carbone en 2050, c'est-à-dire un objectif cohérent avec le cadre de l'accord de Paris et l'ambition de maintenir l'augmentation des températures nettement en-dessous de +2°C en moyenne à l'échelle mondiale, et si possible à +1,5°C. **Ce cadrage est très largement accepté par les répondants.** Les demandes de construire des scénarios s'en écartant sont peu nombreuses et n'ont pas été retenues.

Ces scénarios donnent à voir une **transformation complète du secteur énergétique**, aujourd'hui responsable d'environ 75% des émissions de gaz à effet de serre dans le monde, et d'environ 70% en France. Cette transformation doit être menée à bien en trois décennies : il s'agit d'un bouleversement complet, dont les implications n'apparaissent pas encore pleinement perçues. L'objectif de l'étude consiste à décrire ces modifications sur le plan technique, à les chiffrer, à en estimer les conséquences environnementales au sens large et à en mesurer les impacts sur les modes de vie.

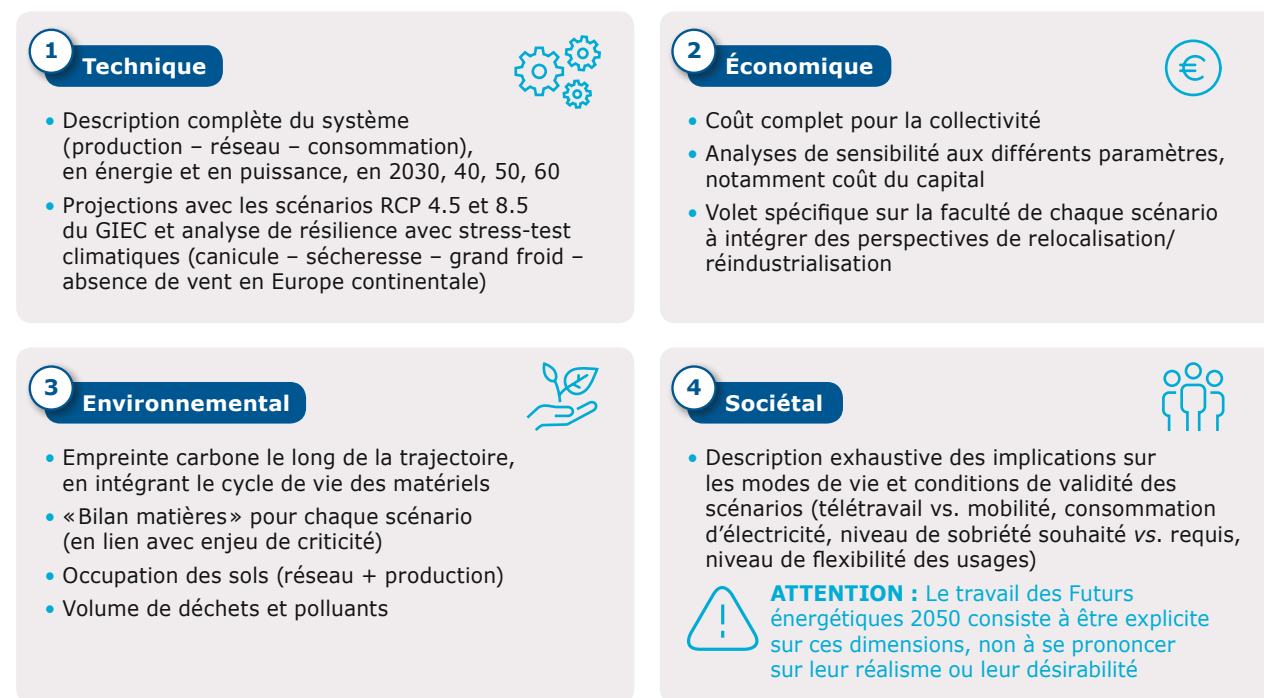
Pour analyser les scénarios, **RTE a proposé une grille d'analyse systématique (technique, économique, environnementale, sociétale) : cette grille apparaît largement confortée par la consultation publique**, qui a permis de recueillir de nombreuses suggestions. Celles-ci recoupent des indicateurs déjà envisagés ou en proposent des nouveaux :

- ▶ sur le volet **technique**, les demandes portent notamment sur la caractérisation du fonctionnement du système en conditions climatiques extrêmes, sur les différents bouquets de flexibilités et sur les risques associés à chaque

scénario, sur la description des briques technologiques et des jalons décisionnels permettant de réaliser chaque scénario ;

- ▶ sur le volet **économique**, les retours ont plutôt porté sur certaines hypothèses de coût (éolien flottant, nucléaire) y compris en ce qui concerne la gestion de la fin de vie des installations actuelles ou projetées (avenir des fondations des éoliennes, démantèlement des réacteurs, traitement de déchets, etc.) et les taux d'actualisation utilisés ;
- ▶ sur le volet **environnemental**, les demandes conduisent à approfondir la grille présentée autour du thème de l'empreinte carbone, de la consommation de matières, de l'occupation des sols et de la production de déchets et polluants. Si la plupart des demandes correspondent à des thèmes que RTE avait prévu d'intégrer, d'autres (traitement systématique de l'incidence des scénarios sur la préservation de la biodiversité, analyse des enjeux d'utilisation de l'eau – à la fois s'agissant des énergies renouvelables et le nucléaire – ou description de l'impact sur les paysages) se situent au-delà ;
- ▶ sur le volet **sociétal**, les remarques reçues concernent, comme cela était attendu, la façon dont les différents scénarios peuvent correspondre à des choix de société différents. Plusieurs contributions demandent à prolonger les travaux par des indicateurs d'impact sur les emplois créés ou détruits.

RTE fera ses meilleurs efforts pour enrichir la grille d'analyse, même s'il apparaît d'emblée que toutes les demandes ne pourront pas être traitées dans le cadre de la phase II de l'étude d'ici l'automne. RTE listera les prolongements possibles à l'issue de cette phase ainsi que la façon dont ils pourraient être traités.

Figure 6 Principaux axes d'analyse des scénarios

Cadre temporel

Même si 2050 s'impose comme l'horizon central de l'analyse en raison de l'objectif français et européen d'atteinte de la neutralité carbone à cette date, l'étude « Futurs énergétiques 2050 » porte sur une durée de 40 ans (2020-2060) et analyse les trajectoires d'évolution du système et de décarbonation sur l'ensemble de la période.

Il apparaît en effet **indispensable d'analyser les scénarios jusqu'en 2060 au moins**, dans la mesure où c'est à cette échéance que le parc nucléaire actuel de seconde génération devrait être

entièrement déclassé pour raison d'âge. De ce fait, les effets complets d'une décision de renouvellement ou de non-renouvellement du parc nucléaire se matérialisent à cet horizon.

C'est également uniquement en analysant la trajectoire – et notamment les deux premières décennies – que peut se mener l'analyse de la contribution des scénarios aux objectifs climatiques de la France.

Ainsi, le point de passage 2030 apparaît un jalon majeur dans l'analyse des scénarios. Les études climatiques alertent en effet de manière

récurrente sur l'étroitesse de la fenêtre d'action pour lutter contre le changement climatique et l'importance des dix prochaines années pour infléchir les courbes en direction de l'objectif fixé. **Les réponses reçues dans la consultation invitent à explorer tous les leviers d'accélération de la transition disponibles au cours**

des dix prochaines années et à jauger les scénarios selon leur « potentiel d'accélération », c'est-à-dire d'entraînement dans la réduction des émissions à l'horizon 2030. Cet indicateur figurera ainsi en bonne place dans les livrables de l'étude.

Lien avec la SNBC

L'étude « Futurs énergétiques 2050 » se situe dans le prolongement de la stratégie nationale bas-carbone (SNBC). Celle-ci a été publiée en avril 2020 et fait ainsi partie de la première génération de scénarios d'atteinte de la neutralité carbone. Elle a vocation à être actualisée dès 2023 dans le cadre d'une loi de programme.

Pour être le plus à jour possible, le cadrage général de l'étude « Futurs énergétiques 2050 » doit intégrer la SNBC mais peut également être complété à divers niveaux :

- ▶ plusieurs politiques sectorielles ont été adoptées depuis la finalisation de la SNBC, et doivent être intégrées à la construction de la trajectoire (France relance, stratégie hydrogène, loi climat-résilience, réglementations sur le bâtiment...) ;
- ▶ les études techniques menées par RTE sur les perspectives d'électrification dans le secteur des transports, de l'industrie ou du bâtiment permettent de disposer d'éléments techniques

et économiques plus récents, notamment sur l'évolution de la consommation d'électricité moyenne et les pointes électriques ;

- ▶ des plans de charge remontées par les acteurs industriels évoluent, avec notamment des perspectives d'électrification plus importantes y compris dans des flottes de poids lourds, ou des projets d'implantation d'usines de batteries plus conséquents ;
- ▶ plusieurs organisations (Agence internationale de l'énergie) ou États ont publié des stratégies d'atteinte de la neutralité carbone, qu'il est intéressant de prendre en compte afin de dégager des points de comparaison ;
- ▶ la consultation publique permet de faire émerger des questionnements qui conduisent à des évolutions sur les scénarios.

Ces différents éléments ont conduit RTE à procéder à des aménagements dans les trajectoires de référence, et à traiter l'ensemble des incertitudes par un jeu de variantes très large.



SUR LE TRAITEMENT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le climat

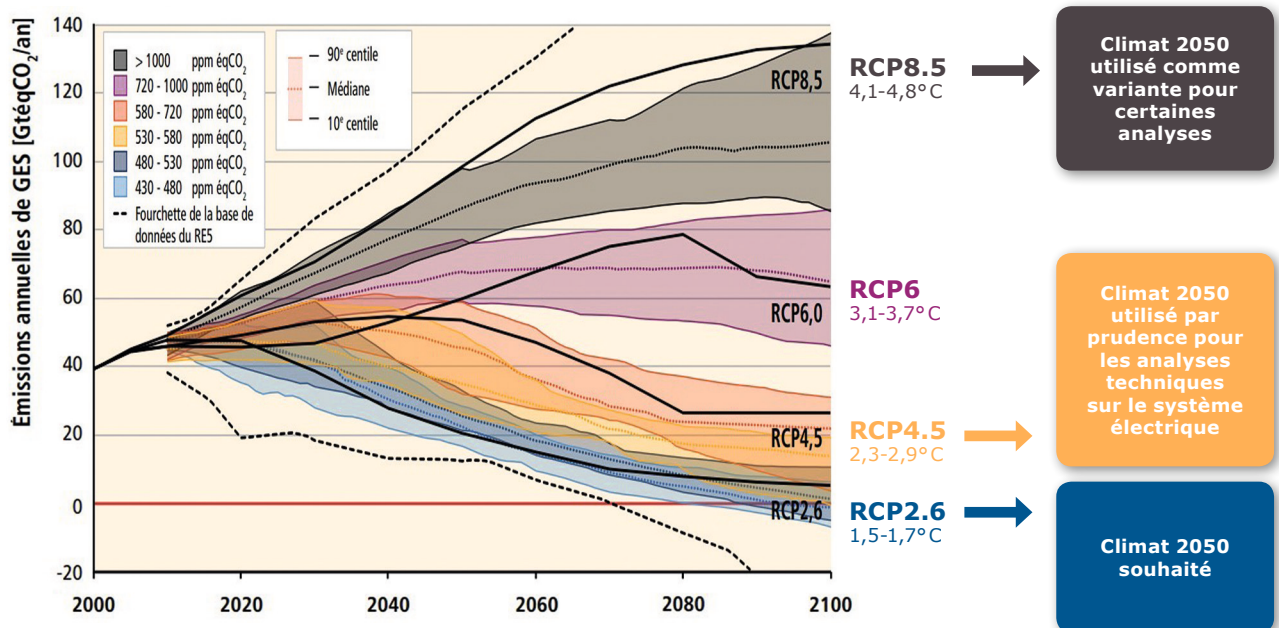
L'étude «Futurs énergétiques 2050» vise à présenter les options permettant de respecter l'objectif de neutralité carbone en 2050. Elle décrit des infrastructures de production, d'acheminement, de stockage et de consommation d'électricité ou d'hydrogène. Or ces infrastructures sont elles-mêmes sensibles au changement climatique.

Afin de traiter cet aspect, un volet de l'étude est consacré à la résilience des différents scénarios

au changement climatique. La résilience peut être étudiée par le biais de stress-tests sur des phénomènes de probabilité faible mais réelle, associée à des impacts forts.

RTE a proposé, dans le cadre de la consultation publique, de mettre l'accent sur **l'étude des situations de canicule, de sécheresse, de grand froid et de vent faible**. Ces stress-tests ont très largement été approuvés.

Figure 7 Trajectoires climatiques du GIEC et scénarios retenus pour l'étude à l'horizon 2050-2060



Source : Contribution du Groupe de travail III au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC

L'analyse du fonctionnement du système électrique s'appuiera sur une description complète du climat, **en tenant compte d'une projection de son évolution future.** Ceci constitue une première en Europe pour une étude de ce type, qui permet de mieux prendre en compte l'augmentation de la probabilité d'événements extrêmes.

Le scénario climatique utilisé par RTE pour réaliser les analyses techniques sur le système électrique correspond à la trajectoire RCP 4.5 du GIEC. Celle-ci conduirait à une augmentation moyenne de la température à la fin du siècle supérieure à l'objectif des accords de Paris sans pour autant représenter une trajectoire tendancielle. Certains répondants se sont interrogés sur le choix de RTE de ne pas retenir par principe une trajectoire de respect strict de l'accord de Paris : **ce choix méthodologique s'explique par un principe**

de prudence visant à éviter tout biais à la sous-estimation des conséquences concrètes du changement climatique. Ainsi, les analyses de résilience qui pourront être menées sur les différents scénarios intégreront d'emblée la possibilité que les émissions mondiales ne s'infléchissent pas à la hauteur de ce qui serait nécessaire pour atteindre les accords de Paris.

Des analyses spécifiques portant sur la trajectoire RCP 8.5, c'est-à-dire une trajectoire d'emballement climatique (aujourd'hui jugée peu probable par la plupart des répondants au regard des ambitions climatiques au niveau mondial), seront également menées de manière à évaluer les effets du réchauffement et la résilience du système dans les situations les plus défavorables ou qui pourraient correspondre à des horizons plus lointains.



SUR LA CONSOMMATION

Trajectoire de référence

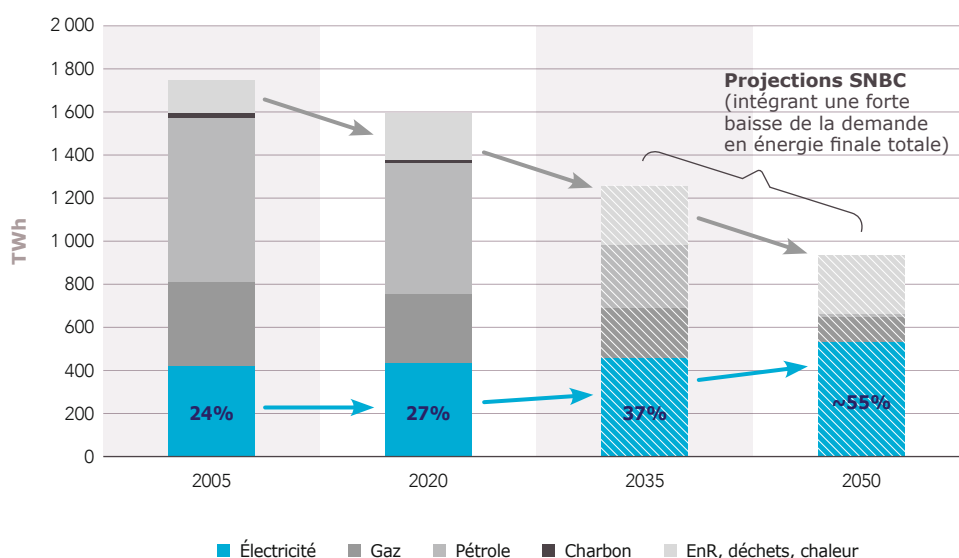
L'étude «Futurs énergétiques 2050» retient comme trajectoire de référence une évolution structurelle de la consommation d'électricité au cours des prochaines décennies. Le mouvement global dessiné par la SNBC, mais également par de nombreuses autres études comme le récent rapport de référence de l'Agence internationale de l'énergie (*Net zero by 2050 – A roadmap for the Global Energy Sector*), **conduit à une part de l'électricité dans la consommation finale d'énergie d'environ 50 à 55 % en 2050.**

La trajectoire de référence inclut par ailleurs une **diminution de la consommation énergétique**

de la France d'environ 40 % en 2050 par rapport à aujourd'hui. Un tel niveau de réduction de la demande d'énergie est significativement plus important que dans les scénarios mondiaux, mais cohérent avec les scénarios européens.

Même en tenant compte des effets baissiers liés aux progrès de l'efficacité énergétique, les effets haussiers associés aux transferts d'usages apparaissent plus importants et conduisent à une consommation d'électricité en hausse modérée à l'horizon 2050 (environ +35% dans la trajectoire de référence). Cette tendance est également observée dans les projections européennes et dans

Figure 8 Évolution de la consommation énergétique finale et part de l'électricité en France métropolitaine



les stratégies de décarbonation d'autres pays comparables à la France.

De manière détaillée, la trajectoire de référence pour la consommation annuelle d'électricité en France prévoit une légère augmentation d'ici 2030 (avec un retour sur les niveaux de consommation antérieurs à la crise sanitaire d'ici 2025), puis une augmentation plus sensible ensuite au fur et à mesure que se matérialiseraient les transferts depuis les combustibles fossiles.

La trajectoire est différenciée selon les secteurs :

- **pour le secteur des transports**, la trajectoire prévoit des transferts vers l'électricité dès la décennie 2020 (pour les véhicules légers et certains bus et camions opérant en zone urbaine) puis, massivement, au cours de la décennie 2030. Près de la moitié du parc automobile léger serait composée de véhicules électriques ou hybrides rechargeables en 2035, en cohérence avec une interdiction en 2040 de la vente

de voitures et véhicules utilitaires légers neufs utilisant des énergies fossiles ;

- **pour le secteur de l'industrie**, les transformations prévues consistent en un remplacement de l'utilisation de l'hydrogène fossile (issu notamment du reformage du méthane) par de l'hydrogène bas-carbone entre 2025 et 2035, ainsi qu'en une électrification partielle des procédés via le remplacement de chaudières fossiles par des pompes à chaleur – un mouvement qui serait surtout visible dans les décennies 2030 et 2040 ;
- **pour le secteur du bâtiment**, l'évolution prévue est plus modérée : elle touche essentiellement les nouveaux logements qui n'utilisent plus de combustibles fossiles à compter de 2021 pour les maisons (respectivement 2026 pour les immeubles) en application de la RE 2020, et partiellement les logements existants. Le parc immobilier passerait de 40 % des logements chauffés à l'électricité aujourd'hui à 50 % en 2030 et 70 % en 2050, et il serait largement rénové dans les 30 prochaines années.

Discussion et variantes

Plusieurs contributions ont contesté le choix de considérer la trajectoire de la SNBC comme une *hypothèse*.

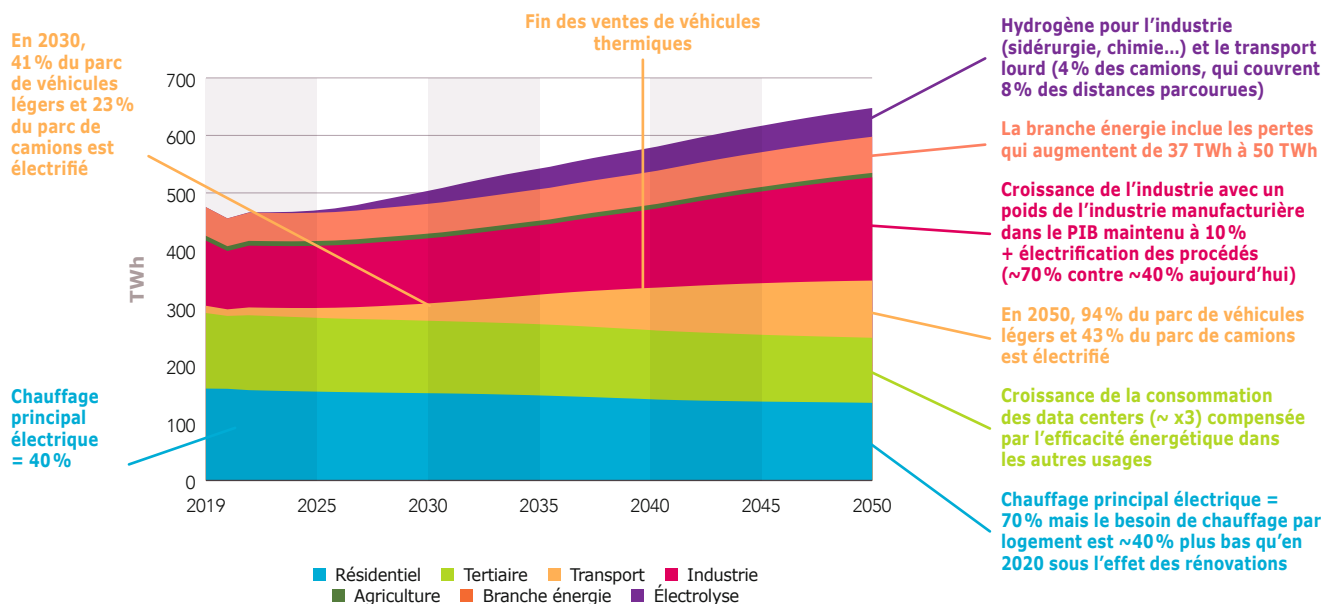
Néanmoins, une analyse plus fine montre que ces contributions ont des fondements opposés. Ainsi, plusieurs considèrent que la SNBC sous-évalue de manière importante les quantités d'électricité nécessaires pour atteindre la neutralité carbone et mettent en avant un risque de surestimation des effets de l'efficacité énergétique ou une sous-estimation de l'impact des transferts d'usage dans les transports, le bâtiment ou le numérique. Au contraire, d'autres jugent les niveaux de consommation d'électricité surévalués et reprochent à la SNBC une ambition trop faible en matière de sobriété, ou un recours trop faible au vecteur gaz.

Le dispositif d'analyse finalisé par RTE à l'issue de la consultation publique vise à apporter des réponses à ce type de remarque.

Premièrement, RTE proposera bien, dans le document final, plusieurs trajectoires de consommation, et celles-ci résulteront d'une modélisation spécifique. En d'autres termes, **la trajectoire de consommation de l'étude « Futurs énergétiques 2050 » ne constitue pas une hypothèse de l'étude, mais un de ses résultats.**

Deuxièmement, un jeu de cinq variantes accompagne la trajectoire de référence. Celles-ci visent à refléter des trajectoires contrastées s'agissant des modes de vies, des politiques publiques en matière de décarbonation de l'économie ou des rythmes de transformation du système et à en dégager les conséquences pour le dimensionnement du système électrique.

Figure 9 Décomposition sectorielle de la consommation d'électricité dans la trajectoire de référence



Notamment, de manière à faciliter la lecture des trajectoires de consommation et leur appropriation dans le débat public, le niveau de sobriété est fortement différencié entre la trajectoire de référence et la variante «sobriété».

D'une part, **la trajectoire de référence ne comprend pas d'élément de sobriété reposant sur une évolution des modes de vie qui s'écarterait des tendances actuelles** ou qui ne serait pas assise sur des mécanismes économiques, des évolutions technologiques observées ou sur des dynamiques sociétales avérées. Il en résulte que des leviers possibles comme une diminution de la température de consigne dans les logements ou du niveau de confort attendu ne figurent pas dans la trajectoire de référence. Ce choix méthodologique constitue une hypothèse prudente pour le dimensionnement du système électrique, dans un contexte où un éventuel surdimensionnement de la production d'électricité a des conséquences moins coûteuses qu'un sous-dimensionnement du mix : il n'invalidé en rien l'intérêt de la sobriété comme levier pour la neutralité carbone.

D'autre part, **la variante «sobriété» explore plus en détail, dans une approche systémique et dans des proportions beaucoup plus importantes que la SNBC les conséquences d'une inflexion structurelle des modes de vie vers la recherche d'un moindre impact sur l'environnement.** Elle illustre l'intérêt que revêtirait une telle évolution pour l'atteinte des objectifs climatiques.

D'autres observations sur l'efficacité énergétique ou encore les niveaux d'électrification ont également fait l'objet de nombreux commentaires dans le cadre de la consultation publique.

Sur l'efficacité énergétique, plusieurs répondants ont remis en cause l'intérêt de certaines mesures d'efficacité prévues par la SNBC en mettant en avant le coût important de ces mesures par rapport à d'autres leviers de décarbonation ou le caractère trop optimiste des trajectoires retenues. À l'inverse, d'autres répondants indiquent que les leviers d'efficacité énergétique possèdent de nombreux bénéfices au-delà de la réduction de

la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre et qu'ils sont sans regret et nécessaires pour atteindre les objectifs climatiques que la France s'est fixée. Pour apporter un éclairage sur ces questions, RTE étudiera de manière approfondie une variante sur le rythme de déploiement des mesures d'efficacité énergétique.

Sur le rythme et le niveau cible d'électrification des usages, les contributions sont tout aussi divergentes. Certains suggèrent que la SNBC accorde une place trop importante à l'électrification, notamment dans l'industrie voire dans le résidentiel et les transports, par rapport à d'autres sources comme la biomasse ou les imports de combustibles

énergétiques décarbonés. D'autres soulignent à l'inverse les incertitudes sur le gisement de biomasse pouvant être consacrée à l'énergie (via le biogaz ou les biocarburants) ou encore la capacité à déployer plus rapidement des solutions électriques, et mettent ainsi en évidence l'intérêt de cibler une électrification plus rapide et/ou plus poussée des usages, notamment dans les transports. Les travaux de l'étude «Futurs énergétiques 2050» intégreront ainsi des variantes contrastées sur cet aspect, avec un éclairage spécifique sur la possibilité d'accélérer l'électrification de certains usages (en particulier le transport) d'ici 2030 en vue d'atteindre les nouveaux objectifs européens sur les émissions de gaz à effet de serre.



SUR LES PERSPECTIVES DE RÉINDUSTRIALISATION

Au cours des quinze dernières années, les émissions de gaz à effet de serre en France ont diminué : selon l'inventaire national, les émissions sont passées d'environ 540 MtCO₂eq à environ 440 MtCO₂eq entre 2000 et 2015, soit une baisse de près de 20 %. Cependant, dans le même temps, **l'empreinte carbone de la France demeure globalement stable autour de 700 MtCO₂eq entre 2000 et 2015**, même si elle tend à baisser légèrement sur les toutes dernières années.

La désindustrialisation du pays au cours de ces trente dernières années constitue l'un des principaux facteurs explicatifs de ce constat : malgré les progrès dans l'efficacité énergétique des procédés en France et dans le monde, une partie des émissions a simplement été déplacée hors de France.

Les pouvoirs publics en France mettent aujourd'hui en avant une volonté de mettre fin à cette tendance et de relocaliser certaines activités considérées comme stratégiques.

RTE retient **un scénario central de consommation considérant une inflexion de la tendance actuelle à la désindustrialisation, avec une part de l'industrie manufacturière se stabilisant à 10 % du PIB en 2050**. Cette stabilisation de la part de l'industrie dans le PIB a fait l'objet de divergences d'appréciation dans les réponses à la consultation publique : certains voient dans cette hypothèse une évolution volontariste pour l'activité industrielle en France quand d'autres considèrent qu'il s'agit d'un renoncement et qu'il serait souhaitable de revenir à des parts de l'industrie dans le PIB encore plus élevés, comme 16 % (correspondent au niveau de 1990).

Or, l'analyse fine des tendances passées sur l'industrie réalisée dans le cadre des travaux sur la réindustrialisation et présentée en groupe de travail², montre que la diminution de la part de l'industrie dans le PIB résulte en grande partie d'effets structurels (gains de productivité plus importants dans l'industrie que dans le tertiaire, évolution de la structure de consommation qui porte de manière croissante sur les services que sur les biens manufacturés, externalisation et comptabilisation des dépenses en services de l'industrie...) et ne sont pas liés à la désindustrialisation de la France. **Le maintien de la part de l'industrie dans le PIB à 10 % apparaît donc déjà comme une stratégie de redéploiement industriel en France**, cohérent avec les ambitions publiques sur la relocalisation d'une partie des importations et la relance d'une dynamique industrielle en ce qui concerne certains secteurs stratégiques.

La trajectoire de référence pour l'industrie constitue donc un scénario contre-tendanciel mais réaliste, qui reflète déjà un effort de réindustrialisation du pays et bénéficie d'un soutien de nombreux répondants à la consultation publique.

Au-delà de cette trajectoire de référence, l'étude complète d'une variante « réindustrialisation », qui en constitue un volet spécifique, et vise à explorer les conséquences d'une inversion forte de tendance sur la part de l'industrie dans le PIB en matière de consommation d'électricité, d'émissions de gaz à effet de serre et d'économie du système énergétique. Dès 2020, RTE a priorisé ce travail et bâti **un modèle permettant de mettre en lien les scénarios d'évolution du secteur électrique (consommation et mix), le coût du système**

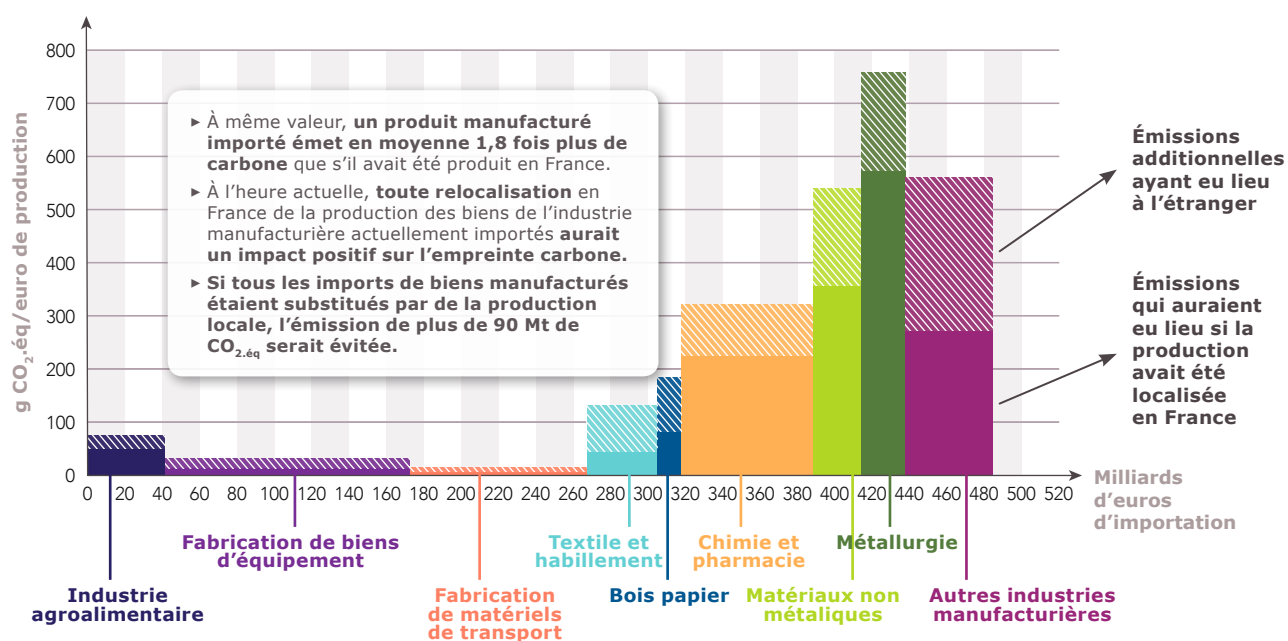
2. https://www.concerte.fr/system/files/u12200/2021-03-19-Documents-concertation-GT_reindustrialisation_hors%20annexes-min.pdf

et l'empreinte carbone. L'intérêt de cette analyse ressort très largement renforcé de la consultation publique.

Dans cette variante, la part de l'industrie dans le PIB augmenterait pour se porter à 12-13%. La réindustrialisation interviendrait plus fortement dans des secteurs technologiques de pointe et stratégiques, et serait complétée de possibles relocalisations de productions fortement émettrices à l'étranger dans l'optique de réduire l'empreinte carbone de la consommation française.

Les premiers résultats de simulation montrent **qu'une telle trajectoire de ré industrialisation s'appuyant sur le caractère décarboné du mix de production français est susceptible de réduire de manière substantielle l'empreinte carbone de la France.** Elle se traduirait par une augmentation de la consommation directe d'électricité de l'industrie de l'ordre de 50 à 80 TWh dans les scénarios les plus volontaristes, accompagnée par une hausse dans la consommation industrielle de combustibles, qui se traduirait potentiellement par un besoin accru de recours à l'électrolyse en cas de recours à l'hydrogène.

Figure 10 Comparaison des émissions directes et des émissions en amont associées à la production de l'électricité pour un bien produit en France et pour un bien importé (résultats provisoires)





SUR L'ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Principes généraux de construction des scénarios

Le volet sur le mix de production est celui qui a suscité le plus de commentaires lors de la consultation publique.

Le travail réalisé dans le cadre des ateliers avait conduit à identifier huit scénarios. À l'issue de la consultation publique, RTE propose de ramener leur nombre à six de manière à simplifier la lecture des conclusions.

Ces scénarios présentent plusieurs points communs.

D'une part, avec ou sans nouveaux réacteurs nucléaires, **ils ont tous pour caractéristique de prévoir une forte progression des énergies renouvelables**, en valeur absolue (avec une capacité installée minimale, à ce stade des simulations, de l'ordre de 29 GW pour l'hydraulique, de 22 GW pour l'éolien en mer, de 43 GW pour l'éolien terrestre, et de 70 GW pour le solaire) et en valeur relative (avec une part minimale de 50 % de la production d'électricité totale en France en 2050).

Ce type de projections se situe dans la lignée des autres scénarios d'atteinte de la neutralité carbone élaborés par des pays ou des organisations internationales. Ainsi, dans le récent scénario « zéro émission nette » de l'Agence internationale de l'énergie, les deux-tiers de l'énergie consommée dans le monde en 2050 sont d'origine renouvelable, de même que 90 % de l'électricité produite.

D'autre part, **ces scénarios prévoient tous une diminution progressive de la capacité du parc nucléaire de seconde génération sur la période s'étendant d'aujourd'hui**

à 2060, pour des raisons techniques. En effet, l'étude prend pour hypothèse – sans que ce point n'ait fait l'objet d'une contestation de la part des acteurs de la filière – que parc actuel sera progressivement déclassé et que la durée d'exploitation des réacteurs ne pourra pas, dans le cas général, excéder 60 ans. Ainsi, la fermeture rapprochée d'un grand nombre de réacteurs actuels est prévue dans les décennies 2040 et 2050 en application de la trajectoire industrielle actuelle, ce qui conduit à une capacité du parc historique en forte diminution sur cette période.

Au-delà de cette contrainte de nature industrielle, la trajectoire de déclassement peut être accélérée dans certains scénarios en raison de choix politiques : c'est le cas dans le scénario M0, dans une certaine mesure dans les scénarios M1 à N2 qui se conforment à l'objectif fixé par la loi de 50 % pour la part du nucléaire en 2035, mais pas dans N03 qui s'en affranchit.

De la même façon, les éoliennes et panneaux solaires sont considérés comme devant être remplacés ou démantelés lorsqu'ils atteignent leur fin de vie théorique, et les travaux nécessaires à l'extension de la durée de vie des installations hydroélectriques est également prise en compte.

S'agissant des différences entre scénarios de production, elles portent essentiellement sur le degré de réinvestissement dans le parc nucléaire, et sur le rythme de croissance des énergies renouvelables.

La part relative du nucléaire à l'horizon 2050 varie ainsi dans les différents scénarios

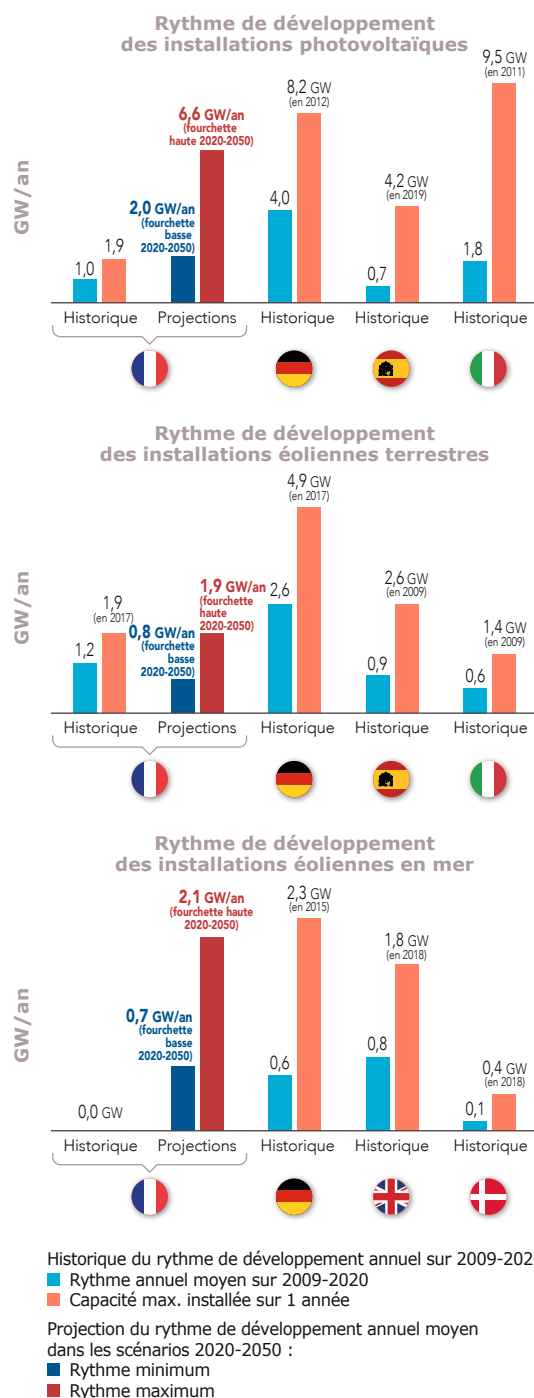
mais n'est limitée, dans l'étude, par aucune contrainte politique : l'étude «Futurs énergétiques 2050» est un exercice prospectif sous contrainte, visant à déterminer des scénarios permettant d'atteindre les objectifs climatiques de la France, à en débattre de manière ouverte et structurée, à permettre aux pouvoirs publics de disposer d'outils pour la prise de décision, et il n'y a donc pas lieu de limiter *a priori* la part du nucléaire. Cependant, pour être utile, l'étude doit intégrer les contraintes industrielles qui ont été portées à la connaissance de RTE sur (i) la durée de vie du parc nucléaire actuel (de seconde génération) et (ii) les rythmes envisageables pour la construction de nouveaux réacteurs de troisième génération, sur la base des éléments remontés par les acteurs de la filière nucléaire au cours de la phase I de l'étude. La prise en compte simultanée de ces deux contraintes conduit à envisager que le parc nucléaire ne puisse dépasser une capacité installée de l'ordre de 50 GW en 2050 (la capacité est portée à 52 GW dans N03, en mobilisant de manière simultanée tous les leviers envisageables). Ceci correspond à une part du nucléaire d'environ 50% dans la production totale d'électricité, mais ce chiffre ne constitue pas un objectif.

D'autre part, **les rythmes d'installation des énergies renouvelables varient selon les scénarios** (à l'exception de l'hydraulique pour laquelle le potentiel exploitable au-delà des gisements actuels est jugé limité mais exploité dans tous les scénarios) :

- ▶ les niveaux à atteindre sur chaque filière sont échelonnés entre les scénarios et sont ajustés de manière à couvrir la consommation et à respecter la sécurité d'approvisionnement ;
- ▶ les rythmes de croissance des énergies renouvelables envisagés apparaissent élevés au regard des tendances observées en France ces dix années, mais une vision européenne permet de les remettre en perspective. Ces volumes apparaissent généralement en ligne avec les projections des autres scénarios internationaux construits autour de l'objectif de neutralité carbone ;
- ▶ les chiffres sont établis à l'issue de plusieurs tours de simulations, qui visent à assurer un équilibrage en énergie puis un équilibrage en puissance dans le respect du critère de sécurité d'approvisionnement. Les chiffres actuels sont provisoires et seront amenés à évoluer, même si l'ordre de grandeur présenté aujourd'hui a été vérifié.

Description des scénarios

Figure 11 Comparaison des rythmes de développement des énergies renouvelables, en France et dans d'autres pays européens



La construction des scénarios obéit aux principes présentés lors de la concertation.

Les scénarios M sont ceux dans lesquels la France ne déciderait pas de la construction de nouveaux réacteurs nucléaires au cours des prochaines années. Ils se distinguent par l'horizon de sortie du nucléaire ainsi que par leur logique de construction :

- Le scénario M0 est un scénario de sortie du nucléaire en 2050. Il implique une accélération de la fermeture des réacteurs par rapport à la trajectoire actuellement retenue par la PPE.
- Le scénario M1 est un scénario 100 % renouvelable à l'horizon 2060. Il est fondé sur le maintien de la trajectoire d'évolution du parc nucléaire actuellement prévue par la PPE, et sur le développement des renouvelables selon une logique de répartition très diffuse des infrastructures sur le territoire, en recherchant des configurations de proximité entre production et consommation. Il se fonde majoritairement sur l'énergie solaire.
- Le scénario M23 est également un scénario 100 % renouvelable en 2060. Il repose sur une massification du développement des énergies renouvelables et est organisé autour de grands parcs éoliens à terre, éoliens en mer et photovoltaïques, en considérant que la recherche d'effets d'échelle devant permettre d'atteindre les objectifs du scénario à moindre coût (ce que l'analyse économique devra confirmer ou infirmer en intégrant le coût des flexibilités et du réseau).

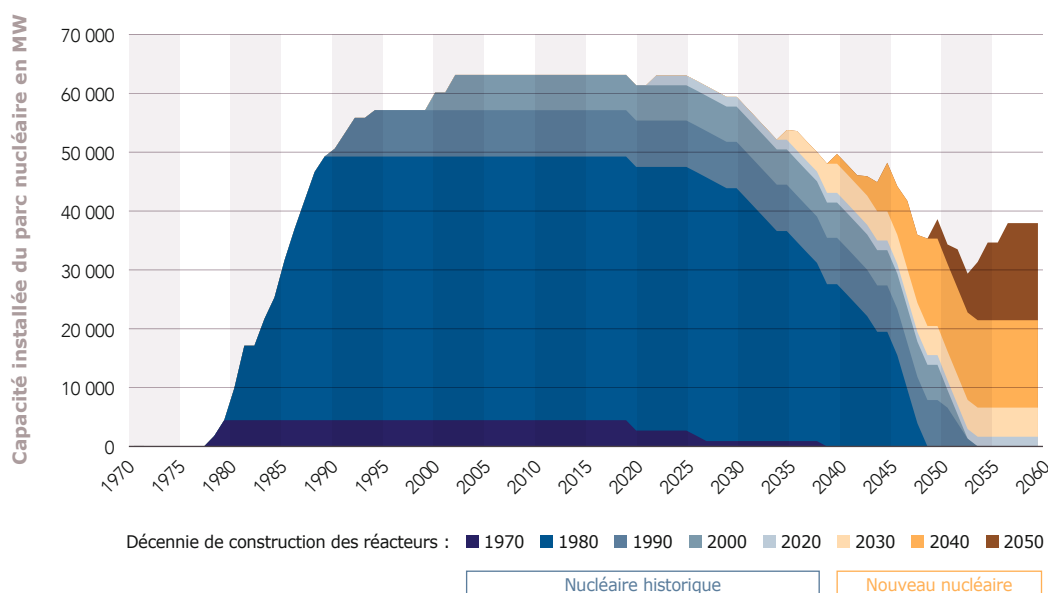
Ces différents scénarios reposent sur une très forte croissance des rythmes d'installations en éolien et en solaire, ainsi que sur de nouveaux projets de centrales hydrauliques. Pour l'éolien en mer et le photovoltaïque, les trajectoires d'équipement sont sans commune mesure avec le rythme effectif de déploiement en France aujourd'hui : par exemple dans le cas des centrales photovoltaïques, le rythme d'installation, historiquement de l'ordre de 1 GW par an, devra atteindre près de 7 GW par an en moyenne sur la période 2020-2050 dans le scénario M0.

Les scénarios N se distinguent selon le rythme de déclassement du parc nucléaire existant et de construction de nouveaux réacteurs :

- Les scénarios N1 et N2 respectent la trajectoire fixée par la PPE (fermeture de 14 réacteurs de 900 MW d'ici 2035, inclus ceux de Fessenheim) et prévoient respectivement la construction de 8 et 14 nouveaux réacteurs nucléaires entre 2035 et 2050. N1 consiste donc à prolonger la trajectoire du programme nouveau nucléaire France (NNF) proposé par EDF à l'État, tandis que N2 prévoit une accélération au rythme haut envisagé par la filière. Ces éléments de cadrage conduiraient le nucléaire à représenter un cinquième de l'électricité produite en France dans N1, et un tiers dans N2.
- Le scénario N03 est restructuré autour de l'idée d'une part du nucléaire durablement importante. L'analyse technique et les retours de

la consultation ont montré que tout scénario conduisant à une part du nucléaire de 50% en 2050 dans le respect de la neutralité carbone reposait sur trois piliers : (i) une prolongation importante de la durée de vie des réacteurs de seconde génération, à la fois sur le début de trajectoire (moins de fermeture entre 2025 et 2035 que dans la PPE) et la fin de trajectoire (atteinte de la VD 6 pour la quasi-totalité des réacteurs et quelques prolongations au-delà sous réserve d'acceptation par l'ASN), (ii) un rythme de construction élevé pour les réacteurs de troisième génération (de l'ordre d'une paire tous les deux ans en rythme de croisière) et (iii) la possibilité d'autres types de réacteurs nucléaires, comme des SMR. Ceci montre bien que la part de 50% ne constitue pas un plafond introduit par RTE mais bien la résultante de contraintes industrielles.

Figure 12 Évolution du parc nucléaire dans le scénario N2, en MW
Trajectoires avant optimisation des durées de mises en service et d'arrêts des réacteurs



Statut des scénarios et perspectives d'évolution

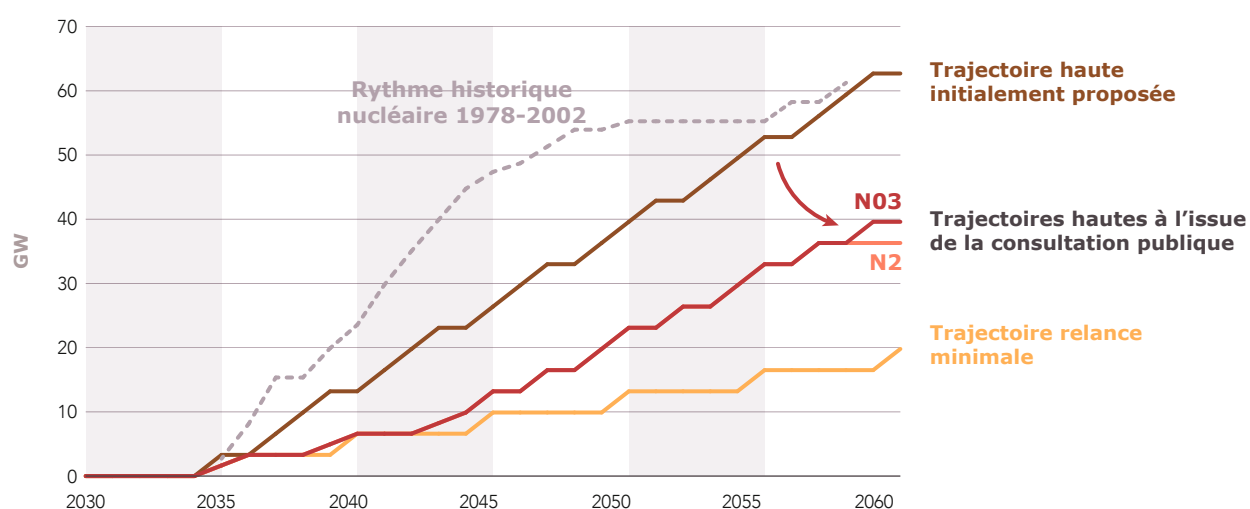
La description des scénarios s'appuie sur une évaluation de la capacité installée de chaque filière qui résulte de deux premiers exercices de simulation. Ce travail de simulation est approfondi par étapes successives et est amené à se poursuivre en optimisant le besoin de flexibilités (flexibilité de la demande, batteries dédiées au système, mobilisation des batteries utilisées pour la mobilité, *power-to-X-to-power*, etc.). Cette optimisation conduit à affiner progressivement les trajectoires pour chaque filière : **les chiffres présentés p. 15 constituent ainsi des ordres de grandeur qui seront encore amenés à évoluer.**

Parmi les évolutions possibles, **certaines pourront porter sur la répartition précise des volumes entre l'éolien terrestre, l'éolien en mer et le solaire, par exemple dans les scénarios N**, en

fonction de la suite des simulations et dans le respect des grands équilibres des scénarios présentés dans ce document.

Enfin, autour de ces six scénarios principaux, RTE a déjà annoncé que certaines configurations associant différentes caractéristiques des scénarios «M» et «N» et demandées par certains répondants à la consultation feront l'objet d'analyses complémentaires : en particulier, RTE élaborera et étudiera **une variante associant l'absence de construction de nouveaux réacteurs et un déclassement des réacteurs existants plus lent que dans les scénarios «M»**, afin d'assouplir les rythmes de développement des EnR par rapport dans les scénarios de sortie du nucléaire et de permettre la comparabilité économique avec l'ensemble des scénarios «N».

Figure 13 Trajectoire de développement du nouveau nucléaire (hors SMR) selon différentes configurations



Configurations alternatives proposées

De très nombreux répondants à la consultation publique ont demandé à RTE d'étudier d'autres types de scénarios.

Ceux-ci peuvent être classés schématiquement en deux catégories :

- (1) des scénarios de sortie immédiate ou du moins très rapide du nucléaire (entre « tout de suite » et d'ici 2030),
- (2) des scénarios de maintien de la part du nucléaire dans le mix, associé dans un grand nombre de cas à des demandes de moratoire ou du moins de limitation de la croissance des EnR en général et de l'éolien en particulier.

Ces configurations constituent des futurs énergétiques possibles en tant que tels. **Au titre de**

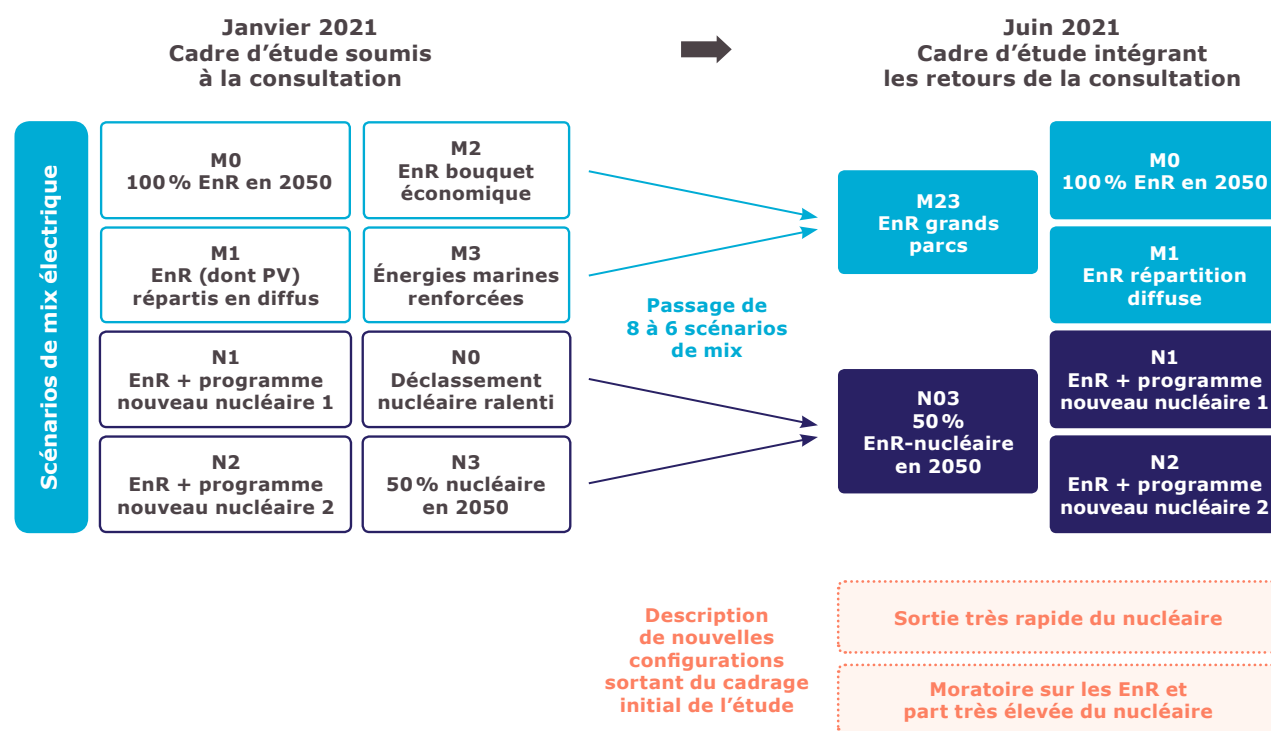
l'engagement pris dans la concertation, RTE étudiera ces configurations alternatives.

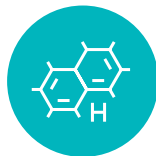
Notamment, les mix de production et les trajectoires de consommation correspondant à ces scénarios seront décrits et feront l'objet de simulations dans le cadre de variantes dédiées.

Cependant, les analyses techniques montrent que ces configurations présentent, à des degrés divers, une ou plusieurs incompatibilités avec la trajectoire souhaitée de réduction des émissions – notamment à l'horizon 2030 – en tenant compte des rythmes possibles de développement des filières ayant fait l'objet d'une concertation par ailleurs.

Ces analyses seront approfondies dans le cadre de la deuxième phase de la concertation.

Figure 14 Principaux ajustements réalisés sur les scénarios de mix électriques à l'issue de la consultation publique





SUR L'HYDROGÈNE ET LE COUPLAGE SECTORIEL

Le développement de l'hydrogène bas-carbone constitue l'une des solutions mises en avant pour atteindre la neutralité carbone. Au cours des dernières années, des visions ambitieuses de développement de l'hydrogène se sont développées, et les pouvoirs publics ont adopté en septembre 2020 une stratégie hydrogène en lien avec le plan de relance post-COVID.

Dans l'étude «Futurs énergétiques 2050», la production d'hydrogène bas-carbone est intégrée aux scénarios. Elle constitue un poste de consommation d'électricité, qui peut être significatif. Le vecteur hydrogène peut également, dans certains scénarios, être utilisé pour stocker de l'énergie injectée depuis le réseau électrique ou produite directement par des énergies renouvelables dédiées.

RTE a investigué en détail les modes de production d'hydrogène dans un rapport dédié publié en janvier 2020. Ce rapport avait déjà mis en évidence les deux raisons distinctes qui peuvent justifier le développement de l'hydrogène à long terme. Ces deux motifs sont bien distingués dans la nouvelle étude.

D'une part, **l'hydrogène constitue un moyen de décarboner des secteurs difficiles voire impossibles à électrifier sur le plan technique ou économique (production d'ammoniac, sidérurgie, aviation, certains volets de la mobilité lourde).** Pour certains usages, l'hydrogène apparaît en compétition avec l'usage direct de l'électricité, avec des avantages (les véhicules à hydrogène n'ont pas besoin de batteries et peuvent donc parcourir de longue distance ou transporter de lourdes charges) et des inconvénients (la production d'hydrogène bas-carbone nécessite une étape de transformation supplémentaire ce qui occasionne des pertes et le stockage d'hydrogène doit obéir à des normes très strictes). Les

incertitudes associées se traitent par les variantes.

D'autre part, **le développement d'une boucle «power-to-gas-to-power» pour garantir l'équilibre offre-demande et couvrir les besoins de stockage inter-saisonnier apparaît indispensable dans certains scénarios** comprenant de larges proportions d'énergies renouvelables variables. Dans l'étude «Futurs énergétiques 2050», le bouquet de flexibilité de chaque scénario (combinaison de batteries, flexibilité de la consommation, écrêtements de production, construction de centrales thermiques utilisant des combustibles décarbonés comme l'hydrogène bas-carbone ou du méthane de synthèse) est déterminé par optimisation en choisissant la solution de moindre coût. Dans ce cadre, les premières simulations ont montré que le recours à des moyens fonctionnant aux gaz de synthèse apparaît nécessaire *a minima* dans les scénarios M dans la mesure où il n'existe pas d'autres technologies permettant de stocker des quantités importantes d'énergie sur des durées longues. **Des approfondissements sont nécessaires pour qualifier proprement le type de gaz de synthèse et de couplage avec l'électricité à privilégier :** utilisation de l'hydrogène, méthane de synthèse (qui requiert une étape supplémentaire de transformation et dégrade le rendement énergétique d'ensemble mais permet d'utiliser les infrastructures gazières existantes sans devoir les adapter à un gaz différent) voire combustibles fossiles associés au captage et stockage du carbone (cette option est considérée par plusieurs pays et mise en avant par certains répondants dans le cadre de la consultation publique).

Les réponses à la consultation publique confortent RTE dans le parti d'étudier des trajectoires contrastées, intégrant une possible accélération forte sur le développement de l'hydrogène (trajectoire «hydrogène + »). Par rapport aux trajectoires proposées initialement,

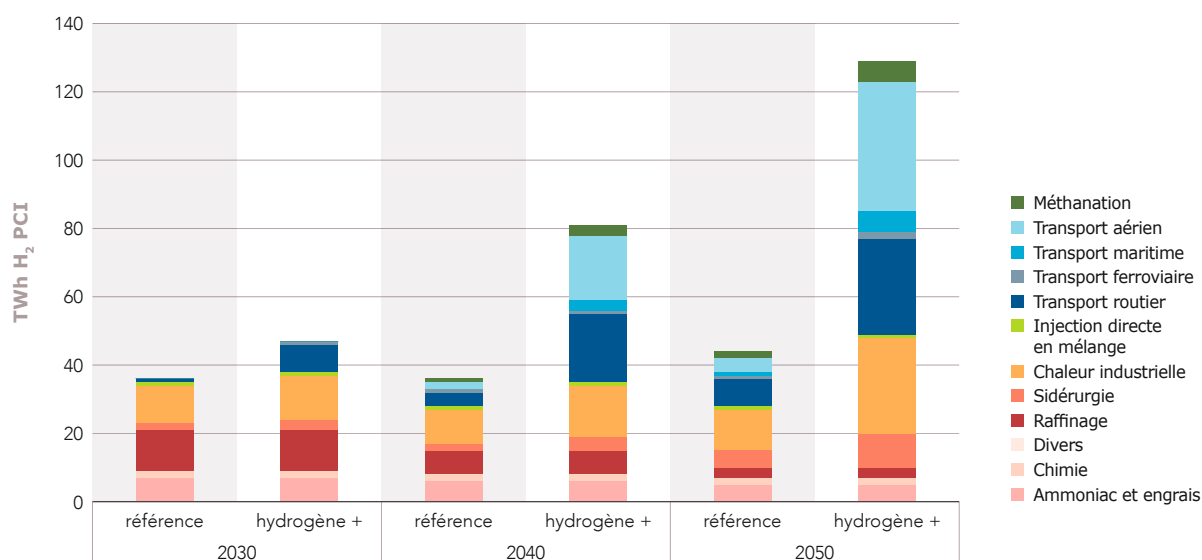
plusieurs ajustements ont été apportés pour tenir compte des retours de la consultation et de la publication de la stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné :

- la production d'hydrogène bas-carbone a été légèrement rehaussée dans la trajectoire de référence par rapport à la SNBC (environ 45 TWh en 2050 contre moins de 40 TWh dans la SNBC), et des ajustements sur la répartition entre secteurs ont été intégrés : abaissement des volumes dans le secteur des engrais en lien avec les objectifs de réduction de l'utilisation d'engrais azotés, rehaussement des volumes dans les secteurs de la sidérurgie, de la chaleur industrielle et des transports lourds ;
- la variante «hydrogène +» conduit à des volumes totaux d'hydrogène supérieurs à 120 TWh à l'horizon 2050, avec une répartition

entre les différents secteurs qui a été ajustée à l'issue de la consultation publique : abaissement des volumes dans le secteur des engrais et dans le transport aérien pour tenir compte d'une diffusion moins rapide de l'hydrogène et des combustibles de synthèse dans ce secteur, rehaussement des volumes dans les secteurs de la sidérurgie et de la chaleur industrielle.

Il convient de rappeler que ces trajectoires ne comprennent pas, à ce stade, la demande d'hydrogène éventuellement nécessaire pour la production d'électricité, à travers la boucle *power-to-gas-to-power*. Les études d'équilibre offre-demande menées par RTE permettront de préciser les besoins dans chacun des scénarios de mix étudiés et de compléter les trajectoires de demande d'hydrogène à long terme.

Figure 15 Consommation d'hydrogène (hors utilisation pour la production électrique) dans les trajectoires de référence et «hydrogène +»



Note : une partie de l'hydrogène consommé est couvert par de la coproduction fatale



SUR L'ANALYSE ÉCONOMIQUE

L'analyse économique constitue l'un des livrables les plus attendus de l'étude «Futurs énergétiques 2050», d'autant que diverses études économiques visant à chiffrer le coût comparé des options «100% renouvelables» et «renouvelables + nouveau nucléaire» ont été publiées au cours des dernières années en conduisant à des conclusions très différentes.

La méthode exposée par RTE lors des ateliers et proposée dans le document de consultation publique consiste à comparer le coût complet des scénarios en intégrant l'ensemble des composantes du système électrique (production, réseau, consommation).

Cette méthode vise à dépasser les limites d'une analyse fondée sur la comparaison des seuls coûts totaux actualisés de chaque filière (indicateur du LCOE, ou *Levelized Cost of Electricity*) ou des résultats des appels d'offres spécifiques à chaque technologie. En effet, ce type d'indicateur présente plusieurs inconvénients :

- il ne prend pas en compte les conséquences de l'insertion de chaque filière sur le système électrique. Or, en pratique, l'insertion d'un parc

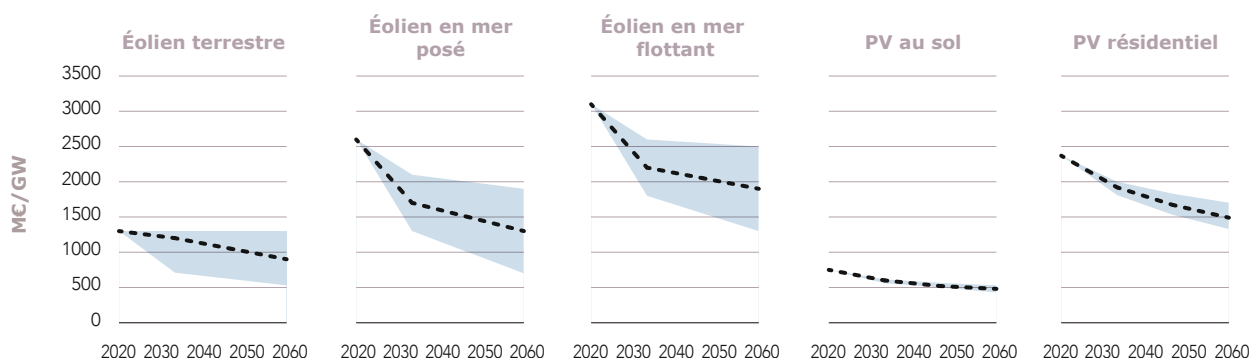
éolien, d'un parc solaire, d'une centrale hydraulique ou d'un réacteur nucléaire n'entraîne pas les mêmes conséquences sur le système et occasionne, à des degrés divers, des coûts spécifiques (besoins de flexibilité, raccordement, renforcement du réseau amont) qu'il convient d'intégrer à l'analyse ;

- il est calculé en retenant des hypothèses normatives sur le facteur de charge, alors que cette valeur devrait être endogène à chaque scénario (un réacteur nucléaire sera amené à ne pas produire à pleine puissance en cas de pic de production éolien, les grandes centrales photovoltaïques pourraient devoir être écrêtées dans certains scénarios fondé largement sur le développement de l'énergie solaire, etc.).

Par opposition, **la méthode proposée intègre le chiffrage de tous les coûts ainsi que les véritables taux de charge des différents actifs : pour éclairer les décisions publiques, cette méthode apparaît donc préférable.**

La consultation publique fait émerger un fort degré de consensus sur cette méthode, qui a déjà été

Figure 16 Trajectoires de CAPEX des différentes filières renouvelables proposées par RTE (médiane et amplitude)



utilisée par RTE dans de précédents rapports. Les commentaires ont été concentrés sur certains points spécifiques concernant les hypothèses de coût ou les taux d'actualisation.

S'agissant des hypothèses, les coûts de certaines filières ont fait l'objet d'interrogations : l'éolien flottant (dont l'évolution des coûts à long terme présente des incertitudes étant donné la moindre maturité de la filière), l'hydrogène et le thermique décarboné, ou encore le nouveau nucléaire (dont les coûts projetés sont en cours de consolidation par la filière nucléaire sous le contrôle des pouvoirs publics). La tendance baissière des coûts de l'éolien en mer posé et du photovoltaïque est à l'inverse largement partagée par les acteurs.

La question du taux d'actualisation a suscité de nombreux commentaires parmi les répondants à la consultation publique. Le taux d'actualisation constitue en effet un des paramètres déterminants dans l'analyse économique de scénarios reposant

en majorité sur des infrastructures capitalistiques et à durée de vie longue. **Le choix d'utiliser un taux unique pour toutes les technologies ou à l'inverse un taux différencié reflétant les risques et/ou conditions de financement des différentes technologies ne fait pas consensus parmi les parties prenantes.** La plupart des répondants proposent toutefois d'utiliser des valeurs faibles (par exemple, taux d'actualisation socio-économiques recommandés pour les investissements publics voire taux d'actualisation nul) afin d'accorder une valeur importante au futur, d'éviter de reporter les coûts de transformation du système électrique à plus tard et ainsi de préserver les générations futures.

La diversité des valeurs proposées en réponse à la consultation publique plaide pour la **réalisation de nombreuses variantes afin d'évaluer la sensibilité du chiffrage économique aux hypothèses** sur le taux d'actualisation appliqué aux différentes filières.



SUR L'ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

La transition du système énergétique en France et dans le monde entraîne des effets sur l'environnement qui dépassent la seule question du réchauffement climatique et des émissions de gaz à effet de serre.

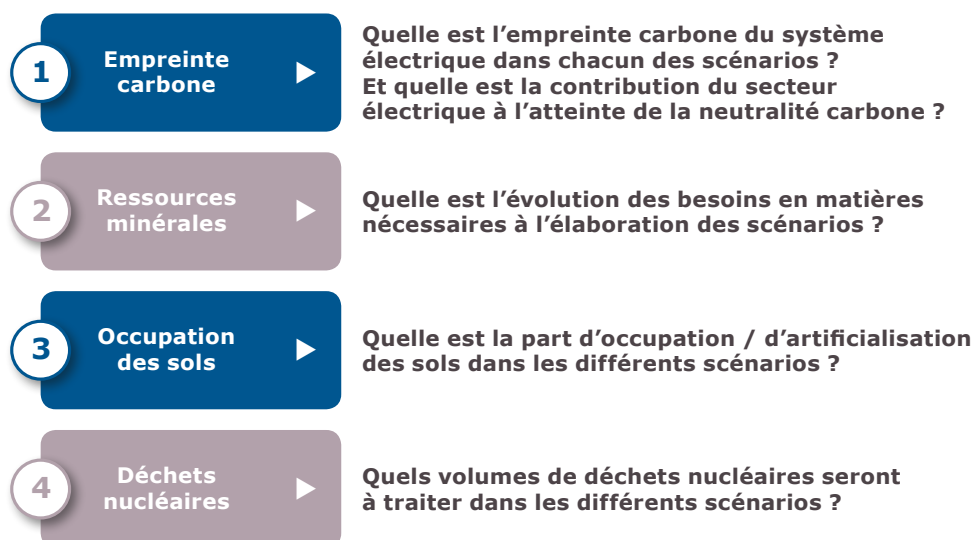
L'étude «Futurs énergétiques 2050» inclut une analyse environnementale des scénarios d'une ampleur inédite et dont le périmètre a été soumis à la consultation publique.

RTE avait proposé d'étudier particulièrement quatre thèmes environnementaux spécifiques : **l'empreinte carbone tout au long de la trajectoire, la consommation de ressources minérales, l'occupation des sols, et la production de déchets.** Ces priorités ressortent largement confortées de la consultation publique et elles conduisent à un volume d'analyse important au sein de la phase II de l'étude.

Certaines contributions – notamment celle de l'Office français de la biodiversité – soulignent l'intérêt de décrire de manière plus exhaustive les objectifs environnementaux (maintien en bon état de conservation de la biodiversité et des écosystèmes, utilisation durable et protection de l'eau, de la biomasse et des ressources marines, prévention et contrôle de la pollution, «adaptation» aux effets du changement climatique). Les différents éléments collectés mettent également en évidence **l'intérêt d'une approche globale du sujet de la biodiversité au travers d'une analyse d'incidence des différents scénarios.** Ce type d'analyse, très large, n'est probablement pas accessible d'ici la fin de la phase II à l'automne, mais pourra être envisagé dans le cadre des prolongements.

Un thème spécifique, non couvert par la consultation publique, a fait l'objet de demandes concordantes, bien qu'opposées dans ses conséquences supposées : **la consommation d'eau nécessaire**

Figure 17 Évaluations quantitatives prévues dans le BP 2050 dans le cadre de l'analyse environnementale



dans chaque scénario, et de manière plus générale les conséquences de potentiels conflits d'usage sur l'eau ou les enjeux sur la qualité de l'eau. Le changement climatique et l'évolution des usages concurrents, par exemple pour l'irrigation de terres agricoles, sont ainsi susceptibles d'entraîner une incidence sur l'exploitation de la ressource naturelle en eau pour l'hydrogène (alimentation des électrolyseurs en eau), pour le nucléaire (refroidissement des réacteurs durant les périodes de canicule ou de sécheresse) ou pour l'hydraulique. Par ailleurs, des altérations de la qualité de l'eau, notamment via le rejet de composés phosphatés, peuvent intervenir à différentes étapes du cycle de vie des infrastructures : par exemple, au cours de l'extraction des matières ou de la fabrication des équipements en particulier pour le photovoltaïque, dans la phase de traitement des déchets radioactifs dans le cas du nucléaire, ou encore par les centrales de raffinerie du carburant servant à transporter les composants des moyens de production en particulier dans le cas de l'éolien. Cette problématique est délicate et nécessite des approfondissements spécifiques, sur lesquels RTE ne peut se prononcer à l'heure actuelle.

Plusieurs contributions notent en outre l'importance de prendre en compte des éléments paysagers. RTE estime que ces sujets seront traités par l'analyse d'emprise sur le territoire.

Sur le plan de la méthode, à l'issue de la phase I, **RTE confirme la réalisation du bilan carbone et du bilan matières en analyse de cycle de vie « du berceau à la tombe »**, méthodologie standard et désormais bien étayée pour mener les analyses complètes. Ces analyses sont conduites au périmètre du système dans son ensemble et non à celui uniquement d'un matériel. Elles permettent par exemple de montrer que le bilan carbone d'un panneau solaire, même fabriqué en Asie, est positif si celui-ci conduit à augmenter la part d'électricité décarbonée remplaçant une production à base de gaz ou de charbon ou permettant un transfert d'usage vers l'électricité. Les analyses livrées à l'issue de la phase II permettront de hiérarchiser les scénarios sur la base de cette métrique, en comparant notamment les mix avec nucléaire, éolien et solaire et en distinguant les lieux possibles de fabrication et l'influence d'une relocalisation de certaines activités de la chaîne de valeur.



SUR L'ANALYSE SOCIÉTALE

Au-delà des enjeux techniques, économiques et environnementaux, la transition du système électrique présente des enjeux sociétaux. Dans le cadre de l'étude «Futurs énergétiques 2050», RTE s'est engagé à décrire précisément les sous-jacents des différents scénarios sur les modes de vie des français.

Les trois principaux axes de travail proposés pour l'analyse sur les dynamiques sociétales (acceptabilité, sobriété, flexibilité) sont très souvent repris par les répondants à la consultation publique et ressortent donc largement confortés. Le lien avec les paramètres des scénarios sera approfondi conformément aux éléments présentés dans la consultation publique et dans les documents de travail.

Au sujet de la notion «d'acceptabilité», des débats portant sur la sémantique persistent, plusieurs répondants suggérant d'utiliser plutôt les termes «d'appropriation sociale» ou de «construction collective des solutions techniques ou non-techniques» pour éviter une connotation statique et top-down. Ce point a déjà fait l'objet de nombreuses discussions dans le cadre des groupes de travail dédiés et ne fait

toutefois pas consensus. Si le fait que les tendances sociétales ne sont pas figées dans le temps est globalement partagé par tous – ce qui avait d'ailleurs conduit à renommer le groupe de travail n°5 «dynamiques sociétales» – le terme d'acceptabilité reste largement employé, y compris dans la littérature scientifique, et fait écho à de nombreuses remarques adressées dans le débat public sur le développement des infrastructures énergétiques.

Par ailleurs, plusieurs répondants ont insisté sur l'importance de traiter les questions d'acceptabilité sur l'ensemble des filières et pas uniquement les énergies renouvelables. RTE s'attachera à mettre en évidence les enjeux d'acceptabilité associés aux différents types d'infrastructures.

Sur les questions de consommation en lien notamment avec le thème de la sobriété, un certain nombre de réponses mettent en évidence le lien avec le modèle de société souhaité et suggèrent de corréliser les scénarios de sobriété énergétique avec des scénarios de sortie du nucléaire. Ce point ne fait toutefois pas consensus. D'une part, **une grande partie des répondants sont favorables à conserver une description des scénarios par rapport à une même trajectoire de consommation afin de permettre la comparaison des différentes options sur le mix toutes choses étant égales par ailleurs.** D'autre part, les appariements alternatifs proposés ne vont pas de soi : certaines parties prenantes défendent également des scénarios intégrant à la fois une forte sobriété énergétique et la construction de nouveaux réacteurs nucléaires.

Enfin, de nombreuses contributions ont mis en avant des demandes d'étudier les impacts des différents scénarios sur l'emploi, la planification territoriale ou encore le coût des scénarios pour le consommateur et les effets redistributifs associés aux différents modes de tarification de l'énergie. Ces thématiques ne pourront être traitées que de manière partielle d'ici l'automne 2021 et pourront faire l'objet de prolongements au-delà de la phase II.

Figure 18 Thématiques abordées dans l'analyse sociétale



ANNEXE 1 :

ATTRIBUTIONS ET MEMBRES DU CONSEIL SCIENTIFIQUE

Afin d'assurer la pertinence des analyses et de la méthodologie utilisée, RTE a mis en place un conseil scientifique en accompagnement de la réalisation des études et de la concertation.

Le conseil scientifique a pour mission de vérifier la qualité et la rigueur scientifique des études et d'apporter une prise de recul sur les résultats obtenus et leurs conditions de validité. Il est ainsi sollicité pour avis sur la méthodologie d'analyse, les modèles et données utilisés, ou encore pour discuter les résultats à plusieurs reprises au cours de l'année 2021.

Les travaux et avis du conseil scientifique seront rendus publics à l'occasion de la publication de l'étude « Futurs énergétiques 2050 ».

Le conseil scientifique est composé de sept membres, représentant plusieurs disciplines :

Laurence BOONE	<i>Économiste en chef de l'OCDE</i>
Pierre CAYE	<i>Philosophe, directeur de recherche au CNRS, directeur du Centre Jean Pépin (ENS-CNRS-PSL)</i>
Jean-Michel GLACHANT	<i>Économiste, directeur de la Florence School of Regulation à l'Institut universitaire européen de Florence, Président élu de l'IAEE, l'Association Internationale des Économistes de l'Énergie</i>
Christian GOLLIER	<i>Économiste, directeur général de Toulouse School of Economics, Président de l'EAERE, l'Association Européenne des Économistes de l'Environnement</i>
Jan-Horst KEPPLER	<i>Économiste, professeur à l'Université Paris-Dauphine, directeur scientifique de la Chaire European Electricity Markets</i>
Dominique ROUILLARD	<i>Architecte, professeure à l'École Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais, directrice du Laboratoire Infrastructure, Architecture, Territoire (LIAT)</i>
Robert VAUTARD	<i>Climatologue, directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace, coordinating lead author pour le 6^e rapport du GIEC</i>

ANNEXE 2 : ORGANISATIONS AYANT PARTICIPÉ À LA CONSULTATION PUBLIQUE

Liste des organisations ayant répondu à la consultation publique sur les hypothèses et le cadrage de l'étude «Futurs énergétiques 2050» :

- | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| ▶ 350.org | ▶ ERG | ▶ Office français de la biodiversité |
| ▶ 4D | ▶ FNAU | ▶ Orano |
| ▶ Académie des technologies | ▶ FNE | ▶ Oxfam France |
| ▶ Ademe | ▶ FNE-Haute provence | ▶ PNC France |
| ▶ AFG | ▶ FNE-Languedoc | ▶ REFEDD |
| ▶ Agir pour l'environnement | ▶ FNH | ▶ Réseau Action Climat |
| ▶ Alofa Tuvalu | ▶ Force ouvrière | ▶ Réseau Sortir du nucléaire |
| ▶ Alternatiba | ▶ France Énergie Éolienne | ▶ Sauvons le climat |
| ▶ Aquind | ▶ France Hydrogène | ▶ Secours Catholique-Caritas France |
| ▶ Arclès | ▶ France territoire solaire | ▶ Syndicat des énergies renouvelables |
| ▶ Boralex | ▶ FUB | ▶ SFEN |
| ▶ CARE France | ▶ GIFEN | ▶ Sortir du nucléaire Bugey |
| ▶ CCFD – Terre Solidaire | ▶ Global Chance | ▶ The Shift Project |
| ▶ CEA | ▶ GRDF | ▶ TNE Occitanie Environnement |
| ▶ Cérémé | ▶ Greenpeace | ▶ Total |
| ▶ CFE-CGC | ▶ GRTGaz | ▶ UARGA |
| ▶ CGT | ▶ Hespul | ▶ UNIDEN |
| ▶ CLER | ▶ IED | ▶ Virage Énergie |
| ▶ EDF | ▶ IESF | ▶ Voix du nucléaire |
| ▶ Enedis | ▶ JPG Conseil | ▶ Voltalis |
| ▶ Énergie Partagée | ▶ Les Amis de la Terre | ▶ WECF |
| ▶ Energy pool | ▶ LPO | ▶ WWF |
| ▶ Enerplan | ▶ Luciole | ▶ Zero Waste France |
| ▶ Engie | ▶ négaWatt | |
| ▶ Équilibre des énergies | ▶ Notre affaire à tous | |

Cette liste ne comprend pas les contributions émises à titre individuel ni les signataires des lettres ouvertes, pétitions et cyberactions. Toutes les contributions reçues ont toutefois bien été prises en compte dans le processus de consultation publique et sont publiées sur le site de RTE (les contributions individuelles étant anonymisées).

ANNEXE 3 :

ORGANISATIONS AYANT PARTICIPÉ AUX RÉUNIONS DE CONCERTATION

Liste des organisations ayant participé aux réunions de la Commission perspectives système et réseau et aux différents groupes de travail sur l'étude «Futurs énergétiques 2050» :

- | | | |
|---|---------------------------------|---------------------------------------|
| ▶ Académie des technologies | ▶ Direction générale du trésor | ▶ NovaJoule |
| ▶ Acajoo Advisory | ▶ Dreev | ▶ Orano |
| ▶ ADEME | ▶ EDF | ▶ PFA |
| ▶ AFG | ▶ ELE | ▶ Planète Oui |
| ▶ Agence des participations de l'État | ▶ Enedis | ▶ PNC-France |
| ▶ Agora Energiewende | ▶ Energy Pool | ▶ PSA |
| ▶ Alpiq | ▶ Enerhy | ▶ Région Pays de la Loire |
| ▶ AlterGrids | ▶ Enerplan | ▶ Renault |
| ▶ Arcadia | ▶ Enertrag | ▶ Renault Trucks |
| ▶ Arcelor Mittal | ▶ Engie | ▶ RES |
| ▶ Arkema | ▶ Equinov | ▶ Réseau Action Climat |
| ▶ Artelys | ▶ Équilibre des énergies | ▶ Sauvons le climat |
| ▶ Autorité de sûreté nucléaire | ▶ Exeltium | ▶ Sciences Po |
| ▶ ATEE | ▶ Flexcity Energy | ▶ Syndicat des énergies renouvelables |
| ▶ AVAIX | ▶ FNE | ▶ SFEN |
| ▶ AVERE-France | ▶ FNH | ▶ SHEM |
| ▶ BCM Energy | ▶ FO Énergie et Mines | ▶ Solstyc |
| ▶ Boralex | ▶ France énergie éolienne | ▶ Solvay |
| ▶ Bouygues Énergie Services | ▶ France Hydrogène | ▶ SUD-Énergie |
| ▶ Bulane | ▶ France Stratégie | ▶ SystemX |
| ▶ Callendar Climate Intelligence | ▶ France Territoire Solaire | ▶ Teréga |
| ▶ CEA | ▶ Gazel Energie | ▶ Tesla |
| ▶ Centrale-Supélec | ▶ GÉRÉDIS | ▶ The Shift Project |
| ▶ Centre O.I.E. | ▶ GIMELEC | ▶ Total Direct Energie |
| ▶ Cérémé | ▶ GRDF | ▶ UFE |
| ▶ Ceren | ▶ Greenpeace | ▶ UFR SEGM |
| ▶ CFDT | ▶ GRTgaz | ▶ UMR Pacte |
| ▶ CFE Énergies | ▶ H2V Industry | ▶ UNIDEN |
| ▶ CGT | ▶ Haut-Commissariat au plan | ▶ Union TLF |
| ▶ CIRED | ▶ Haya Energy | ▶ Université Grenoble Alpes |
| ▶ CLER | ▶ Hespul | ▶ Université Nantes |
| ▶ CNR | ▶ Iddri | ▶ URM Metz |
| ▶ Collectif Paysages de l'après-pétrole | ▶ IED | ▶ Vattenfall |
| ▶ Commissariat général au développement durable | ▶ IESF | ▶ Virage Énergie |
| ▶ Compass Lexecon | ▶ Institut Jacques Delors | ▶ Virta |
| ▶ Conseil général de l'économie | ▶ Institut Pierre-Simon Laplace | ▶ Voltalis |
| ▶ CRE | ▶ Institut Rousseau | ▶ Watt & Well |
| ▶ Direction générale de l'énergie et du climat | ▶ IRSEM | ▶ WISE-Paris |
| | ▶ LPO | ▶ WWF |
| | ▶ Météo-France | ▶ Ykems |
| | ▶ négaWatt | |
| | ▶ Next Energy Consumer | |



Le réseau
de transport
d'électricité

RTE

Immeuble WINDOW - 7C Place du Dôme,
92073 PARIS LA DEFENSE CEDEX
www.rte-france.com