




INTÉRÊT GÉNÉRAL
LA FABRIQUE DE L'ALTERNATIVE

PLANIFIER L'AVENIR DE NOTRE SYSTÈME ÉLECTRIQUE - 1/2

LES ENSEIGNEMENTS DES SCÉNARIOS
DE TRANSFORMATION DU SYSTÈME
ÉLECTRIQUE

NOTE#21 - MARS 2022



Ces travaux prennent la forme de deux épisodes qui se complètent, les propositions politiques de l'épisode II se lisent à la lumière des différents enjeux mis en évidence dans l'épisode I. Ces deux épisodes se concentrent sur le mix électrique et n'abordent pas directement l'ensemble de la bifurcation écologique et énergétique. Des fiches techniques publiées conjointement proposent un contenu pédagogique détaillé afin de comprendre le système électrique français et propose un état des lieux des connaissances scientifiques, techniques et sociales concernant les différents moyens de production d'électricité.

Épisode I. Les enseignements des scénarios de transformation du système électrique. Cette note présente une comparaison inédite des différents scénarios de transformation du système électrique français : RTE 2021, négaWatt 2021, ADEME 2018, négaTep 2017, etc. Elle considère l'ensemble des enjeux liés à chaque moyen de production d'électricité : impacts sur le climat, sur la biodiversité, consommation de ressources, pollutions, coûts, sûreté et sécurité, création d'emplois, précarité énergétique et paris technologiques.

Épisode II. Planifier un système électrique au service d'impératifs sociaux, écologiques et démocratiques. Cette note propose une stratégie politique générale de planification sociale, écologique et démocratique de notre système électrique sur le long terme, afin de nous conduire à la neutralité carbone en 2050. Différentes hypothèses sont étudiées pour faire face aux enjeux décarbonation la plus rapide possible et d'une dénucléarisation planifiée. Cette note s'appuie notamment sur l'ensemble des connaissances scientifiques afin de répondre aux incertitudes inhérentes à la prévision des trajectoires de production électrique sur la base de principes écologiques et démocratiques.

Pour citer cette note :

Intérêt général, « Planifier l'avenir de notre système électrique - Épisode I : Les enseignements des scénarios de transformation du système électrique », note #22, février 2022.



INTRODUCTION : ÉTUDIER LES SCÉNARIOS POUR PENSER LA TRANSITION DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE4

I. L'ANALYSE PAR SCÉNARIO, CLÉ DE VOÛTE DE LA PROSPECTIVE ÉNERGÉTIQUE5

- A. Les scénarios permettent de penser l'interdépendance des outils de la transition énergétique.....5
- B. Comparer des scénarios, c'est aussi choisir les critères6
- C. La médiatisation des scénarios occulte l'importance des hypothèses qui les sous-tendent7

II. UN CONSENSUS SUR LA NEUTRALITÉ CARBONE QUI MET EN ÉVIDENCE DES INCERTITUDES ET DES QUESTIONS ESSENTIELLES SUR LE MODE DE PRODUCTION ET DE CONSOMMATION.....8

- A. En matière d'ambitions climatiques, ne pas s'arrêter à l'annonce d'un objectif de neutralité carbone8
- B. Une production électrique future essentiellement à base d'éolien, de photovoltaïque,
d'hydroélectricité et, selon le choix démocratique effectué, potentiellement de nucléaire10
- C. Développer le stockage et la flexibilité de la consommation est indispensable 11
- D. Des incertitudes sur la quantité d'électricité nécessaire en 2050, mais la certitude qu'elle augmentera12
- E. Un échec de la transformation de notre système électrique mènerait à l'impossibilité
de la neutralité carbone en 2050 ou à des pénuries d'électricité12
- F. Le système électrique futur n'aura que peu d'impact sur la biodiversité14
- G. Le coût prévisionnel ne doit pas être le premier facteur de choix d'un système électrique 15

INTRODUCTION : ÉTUDIER LES SCÉNARIOS POUR PENSER LA TRANSITION ÉLECTRIQUE

Planifier la transformation de notre système électrique implique, d'une part, de s'appuyer sur la connaissance des enjeux techniques, sociaux et économiques propres au fonctionnement du système électrique et en particulier de chaque moyen de production d'électricité et, d'autre part, de **faire des choix politiques entre les différentes options techniquement envisageables qui s'offrent à la France.**

Ces travaux adoptent une approche émancipatrice et antilibérale, qui considère la bifurcation écologique et la justice sociale comme les grandes priorités de notre pays. Ces travaux arrivent à la conclusion qu'au vu de l'inefficacité des politiques de dérégulation, de démantèlement et de libéralisation, une planification démocratique de la transformation écologique de notre système électrique est indispensable.

Pour planifier cette transformation, ce **premier épisode propose une analyse comparative inédite des principaux scénarios de transformation électrique centrés sur la France.** Cet épisode propose une contribution originale visant à étudier les différents scénarios publiés par différentes institutions, qui souvent adoptent des objectifs distincts et des hypothèses variées qu'il s'agit de comparer pour fonder une stratégie politique. Ces scénarios se différencient principalement dans le débat public par la part respectivement accordée au nucléaire et aux énergies renouvelables, laissant trop souvent de côté les conditions de leur faisabilité, ainsi que l'impact de cette transformation en matière de justice sociale, de gouvernance et de respect des limites planétaires dans leur ensemble. Il s'agit de mettre en évidence les enseignements utiles et les limites de chacun de ces scénarios, pour en tirer les propositions politiques concrètes qui sont détaillées dans la note conjointe « [Planifier l'avenir de notre système électrique - Épisode II : Planifier un système électrique au service d'impératifs sociaux, écologiques et démocratiques](#) », note #22, février 2022. Celui-ci fournit une synthèse politique afin de planifier le système électrique français, à l'aune des connaissances scientifiques et des objectifs politiques identifiés.

Au vu des enjeux soulevés par l'avenir de notre système électrique - faire face au changement climatique, conserver un approvisionnement stable en électricité, bâtir une société plus juste - il est essentiel que les forces politiques analysent en détail les scénarios de transformation de notre système électrique et restituent dans le débat politique et médiatique ces enjeux, sans éviter les difficultés et les défis qui se posent au suivi de chacune des orientations qui s'ouvrent à la France. C'est cette grille d'analyse que propose ce premier épisode.

La rédaction de cette note a été précédée par un travail de synthèse des connaissances scientifiques sur les différents moyens de production d'électricité. Ces connaissances ont été rassemblées dans dix fiches techniques, publiées conjointement :

- Fiche 1 - Le système électrique Français en 2022
- Fiche 2 - Enjeux climatiques
- Fiche 3 - Enjeux écologique hors climat
- Fiche 4 - Enjeux de justice sociale
- Fiche 5 - Enjeux économiques
- Fiche 6 - Enjeux de sûreté et de sécurité
- Fiche 7 - Enjeux de sécurité d'alimentation
- Fiche 8 - Enjeux de gouvernance et de propriété
- Fiche 9 - Enjeux industriels et technologiques
- Fiche 10 - Spécificités propres aux outre-mers

I - L'ANALYSE PAR SCÉNARIO, CLÉ DE VOÛTE DE LA PROSPECTIVE ÉNERGÉTIQUE

A - LES SCÉNARIOS PERMETTENT DE PENSER L'INTERDÉPENDANCE DES OUTILS DE LA TRANSITION DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE

L'analyse comparée des avantages et des inconvénients de chaque technologie de production d'énergie prise séparément est un exercice nécessaire, finement dans les fiches techniques associées à ces travaux, mais insuffisant pour éclairer des choix politiques. **Aucun système de production d'électricité ne peut reposer sur une seule source de production** : aucune d'entre elles n'est parfaite, chacune a des avantages et des inconvénients, qui peuvent être partiellement compensés ou complétés lorsqu'on les considère comme faisant partie d'un système électrique plus vaste. Par exemple, le caractère non pilotable de moyens de production d'énergie renouvelable peut être en partie compensé par le foisonnement, à savoir la coexistence de sources d'énergie variées : le soleil peut briller lorsque le vent ne souffle pas. **Il est également essentiel de considérer les systèmes électriques dans leur ensemble** pour considérer leur acceptabilité, l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité, la vitesse de déploiement de chaque moyen de production d'électricité, etc.

L'analyse par scénario permet donc de sortir des débats stériles entre les impacts de chaque source d'énergie pour répondre aux questions réellement pertinentes : globalement sur l'ensemble du pays, quels impacts aurait le remplacement d'un moyen de production d'électricité donné par un autre, ou par un bouquet d'autres ? Sur l'ensemble des critères considérés, est-on gagnant ou perdant et selon quels critères ? Quelles hypothèses sous-tendent ces résultats, c'est-à-dire dans quelle situation s'imagine-t-on pour que ce scénario puisse réellement avoir lieu ? Il permet également de considérer l'ensemble des coûts qu'entraîne l'usage de tel ou tel mode de production d'électricité, sans oublier le stockage, les réseaux de transport et de distribution, etc.

Ce point est particulièrement crucial. L'ensemble des scénarios récents (les six scénarios RTE et négaWatt 2022) anticipent maintenant une augmentation des besoins de production d'électricité d'ici 2050, dans des proportions variables en fonction des efforts de sobriété et d'efficacité. De manière générale, il est indispensable d'explicitier toutes les hypothèses et la méthodologie de chaque exercice de scénarisation pour pouvoir interpréter et comparer, certaines hypothèses étant susceptibles de changer du tout au tout l'interprétation d'un scénario.

“ L'ensemble des scénarios récents anticipent maintenant une augmentation des besoins de production d'électricité d'ici 2050, dans des proportions variables en fonction des efforts de sobriété et d'efficacité. ”

B-COMPARER DES SCÉNARIOS, C'EST AUSSI CHOISIR LES CRITÈRES

Cette note présente une analyse des scénarios de transformation du système électrique français effectuée sur les principaux scénarios publiés ces dix dernières années en France. Ont été considérés tant les scénarios focalisés sur le système électrique que ceux qui traitent de l'ensemble de notre système énergétique, du moment que la transformation du système électrique y est suffisamment détaillée. N'ont pas été considérés les scénarios qui envisagent la transformation de notre système électrique à l'échelle européenne, les données concernant la France y étant trop limitées pour une analyse approfondie. Les publications scientifiques qui cherchent à identifier le système électrique optimal uniquement en fonction d'optimisations-coûts, se concentrant uniquement sur les coûts futurs du système électrique n'ont pas non plus été étudiées.

L'étude des scénarios nécessite la mise en place d'un cadre d'analyse. Pour cela, cette note s'appuie notamment sur le rapport « Explorer l'avenir pour planifier la transition énergétique » du laboratoire d'idées *The Shift Project*¹ et le rapport « Comprendre les scénarios de transition » du laboratoire d'idées *I4CE*². **Ces deux rapports pointent notamment le manque de transparence des hypothèses des scénarios, et le périmètre trop restreint de paramètres pris en compte pour analyser les impacts de ces scénarios.** Un cadre d'analyse large, qui tente de prendre en compte l'ensemble des impacts de cette transformation, sous les angles écologiques, sociaux, économiques, de gouvernance et de sûreté a donc été mis en place pour cette note. Ces enjeux sont examinés en deux temps : d'abord d'un point de vue factuel, ensuite en commentant les éventuels manquements ou les non-dits du scénario.

Le commentaire des scénarios n'est pas neutre : il se fait à l'aune non seulement de l'état des lieux des connaissances scientifiques et techniques établies dans les fiches techniques, mais également en fonction d'objectifs écologiques impérieux, notamment en matière de baisse incontournable de nos émissions de gaz à effet de serre, de lutte contre les autres risques liés à la production d'énergie électrique et d'impératifs en matière de justice sociale, de transparence et de démocratisation des enjeux énergétiques

La plupart des scénarios envisagés ont choisi de se concentrer sur un ou quelques aspects particuliers de la transformation de notre système électrique, notamment en termes d'impacts économiques. **L'analyse de ces scénarios met souvent en lumière l'absence d'étude d'impact sur de trop nombreux enjeux.** Ces critiques ne doivent pas être prises comme des reproches : les choix effectués par ces études sont légitimes, ces critiques ne sont que des mises en lumière de ce qu'il est possible de dire ou de ne pas dire à partir de ces scénarios, ce qui ne remet en aucun cas leur sérieux en cause.

“ L'analyse de ces scénarios met souvent en lumière l'absence d'étude d'impact sur de trop nombreux enjeux. ”

1. “Explorer l'avenir pour planifier la transition énergétique”, The Shift Project, 2019.
2. “Comprendre les scénarios de transition”, I4CE, 2019.

C - LA MÉDIATISATION DES SCÉNARIOS OCCULTE L'IMPORTANCE DES HYPOTHÈSES QUI LES SOUS-TENDENT

La communication qui est faite des résultats des scénarios fait trop souvent l'impasse sur les hypothèses qui les sous-tendent. Pourtant cruciales, ces hypothèses sont peu discutées, ce qui empêche les politiques qui s'en saisissent de considérer l'ensemble des politiques publiques qu'ils impliquent. C'est pourquoi les scénarios sont fréquemment instrumentalisés pour avancer la faisabilité ou non d'un mix de production (souvent résumé à : avec ou sans nucléaire), en masquant les conditions de leur faisabilité. Ces conditions sont par exemple : des mesures de sobriété énergétique fortes, le déploiement d'une importante capacité industrielle dans le cadre de la relocalisation d'une partie de nos besoins de production, des mesures d'efficacité énergétique ambitieuses (notamment dans le secteur du bâtiment), des paris technologiques ou industriels plus ou moins réalistes, etc.

La transformation de notre système électrique implique de s'appesantir au moins autant sur les hypothèses qui fondent les scénarios et les politiques publiques à mettre en place pour les atteindre que sur la part finale de nucléaire et de renouvelable dans le système électrique, sous peine de mésestimer les risques en cas d'échec. **Un effort de transparence de la part des initiateurs des scénarios est tout aussi souhaitable** : certaines informations, pourtant cruciales pour la réalisation des objectifs du scénario, sont peu mises en avant dans les rapports qui les présentent, voire ne sont pas disponibles sauf à contacter directement leur rédacteur.

Scénarios étudiés

- La **Programmation Pluriannuelle de l'Énergie du Ministère de la Transition Écologique**, « Stratégie Française pour l'Énergie et le Climat 2019-2023 - 2024-2029 » de 2019,
- Les **six scénarios de RTE** « Futurs énergétiques 2050 » parus en 2021,
- Le « **Scénario négaWatt 2022-2050** » de l'association négaWatt paru en 2021 (en prenant en compte qu'à date de la publication de cette note le scénario n'a été que partiellement publié),
- Le « **Scénario négaWatt 2017-2050** » de l'association négaWatt paru en 2017,
- Les **quatre scénarios élaborés par RTE**, « Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France » parus en 2017 : Ampère, Hertz, Volt, Watt.,
- Le **scénario central des travaux de l'ADEME**, « Trajectoires d'évolution du mix électrique à horizon 2020-2060 » paru en 2018,
- Le « **Scénario Négatep 2017** » de l'association Sauvons le Climat, paru en 2017,
- Le **scénario de Bibas et al. (CIRED et RAC France)**, « Élaboration d'un scénario bas carbone pour la France », 2012.
- À la date de publication de cette note, le volet « mix électrique » du rapport ADEME 2021 « Transition(s) 2050 » n'avait pas encore été rendu public. Ses scénarios ne sont donc pas inclus dans cette analyse.

II - UN CONSENSUS SUR LA NEUTRALITÉ CARBONE QUI MET EN ÉVIDENCE DES INCERTITUDES ET DES QUESTIONS ESSENTIELLES SUR LE MODE DE PRODUCTION ET DE CONSOMMATION

A - EN MATIÈRE D'AMBITIONS CLIMATIQUES, NE PAS S'ARRÊTER À L'ANNONCE D'UN OBJECTIF DE NEUTRALITÉ CARBONE

La plupart des scénarios étudiés, et notamment les plus récents, ont pour objectif d'entrée l'atteinte de la neutralité carbone en 2050. Objectif qui est également celui des propositions de l'épisode II « [Planifier un système électrique au service d'impératifs sociaux, écologiques et démocratiques](#) », note #22, février 2022. Mais l'analyse et la comparaison de ces différents scénarios montrent que l'atteinte de cette neutralité carbone passe, dans le laps de temps qui nous sépare de 2050, par des émissions de gaz à effet de serre plus ou moins importantes en fonction des scénarios, et donc un impact climatique variable. **Plusieurs points importants ne sont par exemple pas explicites dans les hypothèses de la plupart de ces scénarios :**

- Les **besoins de production d'électricité supplémentaire qu'entraînera la réindustrialisation** qui est indispensable pour faire baisser les émissions de gaz à effet de serre liées à la production des biens actuellement importés en France.
- Les **paris technologiques ou industriels qui rendent plus incertaine ou difficile l'atteinte de la neutralité carbone** (voir la partie dédiée).
- D'ici 2035, le **déploiement rapide et important de nouveaux moyens de production d'électricité renouvelable (essentiellement éolien terrestre, maritime et solaire) est indispensable** pour respecter les objectifs de réduction d'émissions de gaz à effet de serre de la France et pour assurer une fourniture d'électricité suffisante afin d'éviter une rupture d'approvisionnement. Cette construction doit être déclenchée au plus tôt au vu des délais entre la décision et la mise en service de ces moyens de production : entre 5 et 10 ans.
- Après 2035, la **fermeture progressive des centrales nucléaires actuellement en activité implique d'être compensée** par des moyens de production qui compléteront la production d'électricité renouvelable non pilotable :
 - soit par l'hypothèse de nouvelles centrales nucléaires (dont la construction devrait, le cas échéant, être déclenchée au plus tôt : environ 15 ans de délai entre la décision et la mise en service d'une centrale nucléaire en France) ;
 - soit par l'hypothèse d'un réseau d'électrolyseurs, de moyens de stockage, de transport d'hydrogène et de centrales thermiques destinées à des combustibles décarbonés.

“ La plupart des scénarios les plus récents ont pour objectif d'entrée l'atteinte de la neutralité carbone en 2050. ”

Quel que soit le choix fait, il doit nécessairement être effectué rapidement et implique des paris industriels et technologiques d'ampleur variable.

- Les **scénarios font largement consensus sur l'impossibilité de prolonger l'exploitation des centrales nucléaires actuellement en service en France après 60 ans de durée d'exploitation**. Dès lors, afin d'éviter des émissions de gaz à effet de serre supplémentaires en France, la mise en service progressive d'une quantité suffisante de moyens de production d'électricité décarbonée est essentielle quand il s'agit d'arrêter l'exploitation des centrales nucléaires. À ce titre, les scénarios les plus volontaristes en matière de sobriété énergétique et d'installation de nouveaux moyens de production d'électricité renouvelable considèrent la poursuite de l'exploitation de certaines centrales nucléaires jusqu'à au moins 50 ans pour rendre l'atteinte de la neutralité carbone envisageable. Cela implique de poursuivre le programme du "Grand Carénage" d'EDF³, mais aussi, et là encore même dans les scénarios les plus favorables, de conserver des centrales en activité jusqu'à au moins 2045.
- **Les systèmes électriques européens étant interconnectés**, la production électrique française déjà décarbonée à 93% en 2021 peut permettre, toutes choses égales par ailleurs, une réduction d'émissions de gaz à effet de serre de 9 MteqCO₂ d'ici 2030 de nos voisins en raison des exportations⁴ dans l'hypothèse où aucun réacteur nucléaire n'est fermé d'ici cette date. Ce cas de figure est également soumis aux incertitudes des trajectoires de sobriété et des besoins de consommation électrique français.
- **D'autres leviers peuvent aussi avoir des effets significatifs sur les émissions directes de la production d'électricité à l'horizon 2030** : accélération des efforts d'efficacité énergétique, politiques publiques de sobriété énergétique, accélération du développement des énergies renouvelables, flexibilité des nouveaux usages tels que la recharge de véhicules électriques, le tout pour réduire la sollicitation des moyens thermiques fossiles encore en activité.
- Dans tous les scénarios, **la mise en place de politiques ambitieuses d'électrification, d'efficacité énergétique et de sobriété énergétique** facilite l'atteinte de la neutralité carbone dans un laps de temps raisonnable et en limitant rapidement nos émissions de gaz à effet de serre, quel que soit le système électrique considéré. Les politiques publiques de sobriété énergétique, en limitant la hausse de la consommation d'électricité et donc les besoins de production réduisent également les besoins industriels de mise en service de nouveaux moyens de production d'électricité, la consommation de matériaux associés - et donc la vulnérabilité aux ruptures d'approvisionnement, la production de déchets et de pollutions associées, et *in fine* les risques d'échec de la bifurcation écologique.
- Dans les différents scénarios, le choix de mise en place de politiques sobriété n'implique pas nécessairement le choix d'un système à 100% renouvelable. À l'inverse, la volonté de promouvoir une réindustrialisation du pays n'implique pas automatiquement l'usage du nucléaire.

3. Le Grand Carénage vise à améliorer la sûreté et à poursuivre l'exploitation des centrales nucléaires françaises au-delà de 40 ans. Il est évalué entre 50 et 100 milliards d'euros pour l'ensemble des réacteurs en fonction du périmètre de coûts considéré. Malgré cela, au vu de la quantité d'électricité que produiront les centrales grâce à ce prolongement, ce prolongement est comparativement moins onéreux à quantité d'électricité produite équivalente que tout autre moyen de production d'électricité actuellement mobilisable (voir « Futurs énergétiques 2050 - Coûts », RTE, 2021. Ce programme a commencé en 2015 et doit se terminer en 2025, il est donc avancé et la plupart des coûts ont donc été engagés par EDF.

4. Soit l'équivalent de l'empreinte carbone de 100 000 Français durant cette période, à raison d'une empreinte carbone d'environ 9 teqCO₂/habitant/an en 2021 selon le Ministère de la Transition Écologique. Concernant la réduction d'émissions de gaz à effet de serre, voir « Futurs énergétiques 2050 - Analyse environnementale », RTE, 2021.

B - UNE PRODUCTION ÉLECTRIQUE FUTURE ESSENTIELLEMENT À BASE D'ÉOLIEN, DE PHOTOVOLTAÏQUE, D'HYDROÉLECTRICITÉ ET, SELON LE CHOIX EFFECTUÉ, POTENTIELLEMENT DE NUCLÉAIRE

Les industriels du secteur nucléaire déclarent eux-mêmes que même dans les scénarios les plus volontaristes, la capacité de production d'électricité d'origine nucléaire sera plafonnée à 50% en 2050 pour des raisons de capacité industrielle de renouvellement des centrales nucléaires actuellement en activité, qui atteindront la limite des 60 années d'exploitation avant 2050⁵⁶. Quels que soient les scénarios récents, la part de la production d'électricité renouvelable dans le système électrique (21% en 2019) a donc vocation à progresser fortement, pour atteindre entre 50% et 100% en 2050. Ces moyens de production d'électricité renouvelable sont dans tous les scénarios un mix d'éoliennes terrestres, d'éoliennes en mer (posé et/ou flottant), de panneaux photovoltaïques et d'hydroélectricité.

Seuls les moyens éoliens et photovoltaïques progressent fortement dans tous les scénarios, un consensus existant sur l'inacceptabilité de la construction d'un nombre conséquent de nouveaux moyens de production hydroélectriques en France, pour des raisons géographiques (voir fiches techniques jointes). **Les moyens de production d'électricité éolienne terrestre, en mer, hydroélectrique et photovoltaïque sont les seuls moyens de production d'électricité renouvelable technologiquement et industriellement matures** et soutenus par des filières industrielles capables de les déployer fortement et rapidement dans les décennies à venir.

Au vu de l'ampleur du déploiement de moyens de production renouvelable, des oppositions locales pourraient freiner la construction des nouvelles installations. Des mouvements locaux d'opposition à la construction de nouveaux réacteurs nucléaires dans des centrales existantes pourraient avoir le même effet, voire davantage. Le déploiement très important de l'éolien terrestre, en mer, et du photovoltaïque ne pourra se construire sans un contexte politique et social favorable à l'acceptabilité de ces moyens de production d'électricité, qu'il convient donc de l'annoncer et l'encourager autant et aussi tôt que possible.

Concernant les moyens de production nucléaire, leur part dans la production d'électricité varie entre 0% et 50% en 2050 dans les scénarios étudiés. Ces moyens de production constituent, selon les scénarios, un mix de centrales actuellement en service, utilisées jusqu'à 50 ou 60 années d'exploitation, et potentiellement de nouvelles centrales de type EPR. Seul un scénario envisage la prolongation de l'usage de certaines centrales au-delà de 60 années d'exploitation, ainsi que l'usage en France de capacité limitée, pour une production totale de 4 GW.

“ Le déploiement très important de l'éolien terrestre, en mer, et du photovoltaïque ne pourra se construire sans un contexte politique et social favorable à l'acceptabilité de ces moyens de production d'électricité, qu'il convient donc de l'annoncer et l'encourager autant et aussi tôt que possible. ”

5. Voir « Futurs énergétiques 2050 - Production d'électricité », RTE, 2021.

6. Qui plus est avec des hypothèses peu réalistes, à savoir un rythme élevé de construction de réacteurs nucléaires de nouvelle génération EPR, l'usage de France de petits réacteurs SMR, et la poursuite de l'exploitation de certaines centrales actuellement en service au delà de 60 ans

Certains scénarios anticipent qu'une faible part de la production d'électricité pourrait être fournie en 2050 à l'aide « d'énergies marines », potentiellement des hydroliennes. Ces moyens de production d'électricité, qui ne sont pas encore matures technologiquement, constituent un gisement de production d'électricité en France limité, de l'ordre de 4 à 5 GW. Des incertitudes persistent quant à la mise en place d'une filière industrielle capable de les déployer largement d'ici 2040-2050. En l'état actuel des connaissances scientifiques, l'analyse des différents scénarios montre donc qu'elles ne seront à l'origine que d'une part très mineure de la production d'électricité en 2050⁷.

Aucun scénario récent n'anticipe de production d'électricité en France avec des centrales à gaz fossile équipées de systèmes de capture et de stockage de carbone (CSC), du fait du faible déploiement à date de cette technologie, de son coût énergétique et financier élevé, de ses performances en matière d'émissions de gaz à effet de serre en analyse de cycle de vie plus faibles que celles des énergies renouvelables, des questions d'acceptabilité que pose le stockage profond de carbone, et de l'usage du nucléaire qui est en France capable de pallier le caractère non pilotable.

En cela, **les scénarios centrés sur la France diffèrent beaucoup de ceux élaborés dans les autres pays développés**, dans lesquels des centrales thermiques à gaz fossile sont équipées de dispositifs CSC pour pouvoir continuer à être utilisés pour assurer la pilotabilité du système. Aucun scénario ne mise non plus sur l'usage de centrales à fusion nucléaire, ou autre moyen de production dont un usage de grande ampleur ne semble pas sérieusement envisageable d'ici 2050, pour des raisons de maturité technologique, de gisements disponibles et de coûts.

C - DÉVELOPPER LE STOCKAGE ET LA FLEXIBILITÉ DE LA CONSOMMATION EST INDISPENSABLE

Tous les scénarios reposant sur une forte part d'énergies renouvelables nécessitent l'usage de trois types de stockage d'électricité pour assurer en permanence la sécurité d'approvisionnement :

- des moyens de production hydroélectriques STEP (réversibles), déjà en fonctionnement en France pour le stockage de moyen-terme,
- des batteries électrochimiques déjà matures industriellement, notamment à l'aide de batteries fixes pour le stockage de court terme,
- du *Power-to-X*, X pouvant être de l'hydrogène ou du méthane (qui n'est pas encore mature industriellement et présentera un rendement très faible, entre 20 et 30%). Le stockage sur le long-terme permet ensuite de l'utiliser pour produire de l'électricité, ce qui nécessite le déploiement d'infrastructures dédiées à l'électrolyse pour la production d'hydrogène, le stockage et transport de ce ou ces gaz, et éventuellement des centrales thermiques capables de transformer ce gaz en électricité. Les moyens de stockage actuellement utilisés pour le gaz fossile ne peut supporter qu'un mélange limité d'hydrogène. **De nouveaux moyens de stockage et de transports deviennent donc indispensables** quand les moyens de production d'électricité renouvelable non pilotables représentent plus de 50% de la production d'électricité, et commencent généralement à être mis à contribution à partir de 2035.

Ces scénarios nécessitent également une plus grande flexibilité en matière d'usage de l'électricité : effacement industriel, c'est-à-dire de cesser d'être alimenté en électricité durant les pointes de consommation, contre rémunération), chauffage domestique, etc. Cette flexibilité en matière de consommation d'électricité implique des changements dans nos modes de vie ainsi que des dispositifs techniques spécifiques et doivent selon les scénarios être progressivement mis à contribution jusqu'à 2050.

7. Soit 4,9 TWh de production annuelle en 2050 dans le scénario RTE - M0 100% EnR en 2050 et 4,9 TWh de production annuelle dans négaWatt 2022, soit de l'ordre de 1% de la production d'électricité.

D - DES INCERTITUDES SUR LA QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ NÉCESSAIRE EN 2050, MAIS LA CERTITUDE QU'ELLE AUGMENTERA

L'évaluation des besoins de production d'électricité en 2050 est fortement incertaine : si la plupart des scénarios élaborés il y a cinq ans l'anticipaient comme quasi-stable d'ici 2050, les scénarios récents l'évaluent tous à la hausse d'ici 2050 : de 550 TWh en 2050 dans le scénario négaWatt 2022 (avec sobriété et réindustrialisation) à 755 TWh dans les scénarios de RTE de 2021 « réindustrialisation profonde » (sans sobriété). Cet écart ne s'explique pas uniquement par la prise en compte ou non de politiques publiques de sobriété énergétique : le scénario RTE 2021 qui cumule politiques publiques de sobriété énergétique et de réindustrialisation profonde estime à 645 TWh nos besoins en électricité en 2050, soit plus de 100 TWh supplémentaires que dans le scénario négaWatt 2022. L'effet haussier résultant du développement de nouveaux usages électriques l'emporte sur celui, baissier, associé au renforcement de l'efficacité énergétique et à la sobriété.

Cette hausse des besoins en électricité survient, dans tous les scénarios étudiés, dans le cadre d'une baisse globale de la consommation d'énergie d'environ 40 % d'ici 2050. Si l'électricité ne constitue en 2019 qu'environ 20% de notre consommation finale d'énergie, cette part monte à environ 50% en 2050 dans tous les scénarios, pour rendre possible la décarbonation de notre société, d'où l'apparente contradiction entre la baisse globale de la consommation d'énergie et la hausse des besoins de production d'électricité. **La hausse de la demande d'électricité à long terme est liée à l'électrification (dans les transports, l'industrie, la production d'hydrogène, le chauffage résidentiel et tertiaire), qui ne peut être qu'en partie compensée par la progression de l'efficacité et de la sobriété énergétiques.**

Les besoins d'électricité en 2050 dépendent donc des ambitions en matière de réduction de nos émissions de gaz à effet de serre, de choix politiques en matière de sobriété et de réindustrialisation, ainsi que de paris technologiques.

E - UN ÉCHEC DE LA TRANSFORMATION DE NOTRE SYSTÈME ÉLECTRIQUE MÈNERAIT À L'IMPOSSIBILITÉ DE LA NEUTRALITÉ CARBONÉ EN 2050 OU À DES PÉNURIES D'ÉLECTRICITÉ

En cas de retard ou de développement de moyens de production insuffisants, le risque serait d'émettre une grande quantité de gaz à effet de serre supplémentaires avec le recours à des centrales à gaz fossile pour compenser le manque de production, ou de faire face à des pénuries d'électricité. Ce risque est encore plus prononcé du fait de la concomitance de choix similaires dans les autres pays d'Europe auxquels le système électrique français est interconnecté.

Il est donc essentiel de bien estimer les besoins en électricité de la France durant les prochaines décennies en prenant en compte la possibilité de politiques publiques insuffisamment ambitieuses en matière de sobriété ou d'efficacité énergétique en fonction des efforts qu'implique chaque scénario, de sous-estimation du surcroît d'électricité qu'implique l'électrification des usages, d'une réindustrialisation forte ou des effets rebond (notamment dans le cas de l'isolation thermique des bâtiments), etc.

En outre, **l'ensemble des scénarios étudiés est exposé à un risque croissant de pénuries, même temporaires, de métaux nécessaires à cette transformation, dans le cadre d'une augmentation des besoins** (non suivie d'une augmentation équivalente de la production) en métaux liés à la bifurcation écologique et à l'électrification des usages, cuivre, lithium et cobalt principalement. **En contrepartie, les risques de pénuries de pétrole et de gaz disparaissent.** Leur comparaison montre que ce risque croît avec la hausse de la part des moyens de production renouvelables dans le système électrique, puisque les éoliennes et les panneaux photovoltaïques sont à quantité d'électricité produite plus consommatrices de matériaux que les centrales nucléaires en raison de la faible densité énergétique mais aussi de processus de fabrication, de contraintes de raccordement au réseau et des moyens de stockage nécessaires.

D'ici 2050, chaque scénario implique également deux risques spécifiques : technologique et industriel, dont les conséquences dépendent de leurs objectifs et hypothèses. Nos travaux identifient cinq types de scénarios selon la place qu'ils accordent à la future production nucléaire.

- **Les scénarios « avec nouveau nucléaire »** impliquent d'ici 2050 la prolongation de certaines centrales nucléaires et la construction de nouvelles centrales pour fournir entre 26 et 50% des besoins en électricité ainsi que le déploiement de nouveaux moyens de production d'électricité renouvelable non pilotable pour fournir entre 50% et environ 80% des besoins en électricité. Ils impliquent des paris industriels concernant le nucléaire, alors que le programme EPR connaît actuellement des développements positifs (un réacteur en fonctionnement à Taishan, avancée normale des travaux à Hinkley Point) et des échecs retentissants (Flamanville, Olkiluoto). La construction de plusieurs nouveaux réacteurs EPR en France à un rythme soutenu, entre 8 et 14 d'ici 2050 selon les scénarios, représenterait un défi industriel de taille pour la filière nucléaire française. Elle dépend en outre de la validation par l'Autorité de Sûreté Nucléaire de la sûreté de la prolongation de l'exploitation de certaines centrales nucléaires au-delà de 50 ans. Ces scénarios impliquent également des défis industriels inédits liés au déploiement indispensable d'un grand nombre de moyens de production d'électricité renouvelable non pilotable, avec *a minima* un développement du photovoltaïque deux fois et demi plus rapide que ce qui a été fait en France entre 2009 et 2019, équivalent pour l'éolien terrestre, et pour l'éolien en mer environ équivalent au rythme moyen de déploiement au Royaume-Uni sur la même période. Il implique également des paris technologiques et industriels pour stabiliser le réseau électrique (technologies type *grid-forming*) et produire, stocker et transporter l'hydrogène ou le méthane (technologie *power-to-gas-to-power*) nécessaire pour équilibrer à tout moment l'offre et la demande d'électricité que nécessite l'intégration d'une part importante de moyens de production d'électricité renouvelable non pilotable. Plus la part du nucléaire est importante dans le futur système électrique et moins ces paris technologiques sur le stockage et le transport et industriels sur le rythme de déploiement des renouvelables sont ambitieux. Ces scénarios impliquent également un risque d'accident nucléaire grave pouvant entraîner dans les pires scénarios - considérés comme très peu probables mais non nuls - des dégâts sanitaires, écologiques et économiques de grande ampleur, ainsi que la mise à l'arrêt temporaire des centrales nucléaires de même type.
- **Les scénarios « avec nouveau nucléaire exagéré » visant à fournir plus de 50% des besoins en électricité via le nucléaire** impliquent d'ici 2050 la prolongation de certaines centrales nucléaires au delà de 60 années d'exploitation et la construction de plus de 14 nouvelles centrales d'ici 2050. Ils sont voués à l'échec pour des raisons industrielles, la filière nucléaire ayant indiqué qu'il n'était pas réaliste de construire suffisamment de nouveaux réacteurs pour compenser la hausse de la consommation d'électricité et la fermeture de la plupart des réacteurs actuellement en usage au-delà de 60 années d'exploitation.
- **Les scénarios « sans nouveau nucléaire »** impliquent d'ici 2050 la prolongation de certaines centrales nucléaires et le déploiement de nouveaux moyens renouvelables pour fournir plus de 80% des besoins en électricité à partir de ces derniers. Ils reposent sur des paris industriels concernant le nucléaire, avec la validation par l'Autorité de Sûreté Nucléaire de la sûreté de la prolongation de l'exploitation de certaines centrales nucléaires au-delà de 50 ans. Ces scénarios impliquent également des défis industriels inédits liés au déploiement d'un grand nombre de moyens de production d'électricité renouvelable non pilotables, ce qui implique *a minima* un développement du photovoltaïque quatre fois plus rapide que ce qui a été fait en France entre 2009 et 2019, deux fois plus rapide pour l'éolien terrestre, et pour l'éolien en mer le rythme maximal atteint par l'Allemagne ou le Royaume-Uni au cours des dernières années. Comme pour les scénarios précédents, ils impliquent également des paris technologiques et industriels importants

pour stabiliser le réseau électrique et produire, stocker et transporter l'hydrogène ou le méthane et des risques d'accident nucléaire, mécaniquement moindres que dans l'hypothèse de construction de nouvelles centrales.

- **Les scénarios « sans nouveau nucléaire et sortie accélérée »** impliquent d'ici 2050 la sortie totale du nucléaire, avec la prolongation de certaines centrales au-delà de 50 années d'exploitation et le déploiement en remplacement de nouveaux moyens renouvelables. Ils supposent des défis industriels inédits liés au rythme de développement du photovoltaïque sept fois plus rapide que ce qui a été fait en France entre 2009 et 2019, un peu moins de deux fois plus rapide pour l'éolien terrestre et pour l'éolien en mer le rythme maximal atteint par l'Allemagne ou le Royaume-Uni au cours des dernières années. Comme dans les scénarios précédents, ils impliquent également des paris technologiques et industriels très importants pour stabiliser le réseau électrique et produire, stocker et transporter l'hydrogène ou le méthane ainsi que des risques d'accidents nucléaires moindres.
- **Les scénarios « sans nouveau nucléaire et sortie précipitée » bien avant 2050** impliquent une sortie totale du nucléaire plus rapide que le déploiement de nouveaux moyens de production d'électricité renouvelable non pilotables et notamment l'absence de prolongation de certaines centrales au-delà de 50 années d'exploitation. Ces scénarios sont voués à l'échec du fait d'un rythme inatteignable de déploiement de nouveaux moyens de production renouvelable, si bien que cette hypothèse n'est plus examinée dans les scénarios récents. Dans ce cadre, le risque de pénuries et d'ouverture de nouvelles centrales fossiles est très important et, donc, le risque d'échec de la bifurcation écologique également.

Face à l'ensemble de ces risques, des politiques publiques ambitieuses de sobriété énergétique permettent de limiter les défis technologiques et industriels liés au déploiement d'un grand nombre de moyens de production d'électricité, au stockage nécessaire au bouclage énergétique, et limitent donc d'autant les risques de pénuries de métaux et de retard dans le rythme d'installation. Mais cela ne les fait pas disparaître les paris technologiques propres à chaque scénario, sobriété ou non.

F - LE SYSTÈME ÉLECTRIQUE FUTUR N'AURA QUE PEU D'IMPACT SUR LA BIODIVERSITÉ

L'analyse des différents scénarios montre qu'à fourniture d'électricité identique, les scénarios « 100% renouvelables » sont responsables d'une proportion légèrement plus importante d'artificialisation des sols que les scénarios qui impliquent la reconstruction de centrales nucléaires, et sensiblement d'autant en matière de surfaces imperméabilisées. Globalement, l'artificialisation annuelle des sols associée au système électrique ne représente qu'environ 1 à 3 % du rythme actuel d'artificialisation et 2 à 6 % de l'objectif fixé pour les prochaines années, soit beaucoup moins que la construction de nouvelles routes, de nouveaux habitats et de nouvelles surfaces commerciales. L'impact du système électrique en matière d'artificialisation des sols, quel que soit le scénario choisi, sera donc faible vis-à-vis du service rendu.

“ Les importations de pétrole et de gaz ont coûté entre 30 et 75 milliards d'euros par an durant la décennie 2010-2020. ”

Un accident nucléaire pourrait avoir des conséquences néfastes sur les espèces les plus sensibles aux radiations (tout en permettant à la fois le sauvetage et de reprendre certains droits comme c'est par exemple le cas dans les zones d'exclusion de Tchernobyl ou Fukushima).

Les principaux facteurs de destruction de la biodiversité étant le changement d'usage des sols, l'exploitation directe des sols, les émissions de polluants et la propagation d'espèces exotiques envahissantes, le futur système électrique projeté n'aura donc qu'un impact faible sur la biodiversité vis-à-vis des autres activités humaines. Au contraire, toute trajectoire ne reposant pas sur la décarbonation serait néfaste sur la biodiversité, notamment dû à l'accélération du réchauffement climatique.

G - LE COÛT PRÉVISIONNEL NE DOIT PAS ÊTRE LE PREMIER FACTEUR DE CHOIX D'UN SYSTÈME ÉLECTRIQUE

L'analyse des scénarios récents de transformation de notre système électrique semble indiquer que le coût complet de cette transformation⁸ représenterait entre 59 et 77 milliards d'euros par an. Cela conduirait à une hausse limitée du prix de l'électricité (en comparaison des prix moyens sur la décennie passée, et non les très hauts niveaux atteints sur 2021-2022), entre une quasi-stabilité et une hausse de 30%. Celle-ci serait compensée en tout ou partie par la disparition d'une partie des autres dépenses énergétiques contraintes actuelles, notamment les carburants pour la mobilité, le fioul ou le gaz fossile pour le chauffage. **Les importations de pétrole et de gaz ont coûté entre 30 et 75 milliards d'euros par an durant la décennie 2010-2020. Il semble donc possible que la transformation de notre système électrique, et plus globalement de notre système énergétique, ne conduise pas à un surcoût important par rapport à un système fossile.** Elle pourrait même offrir dans certains cas des opportunités de stabilisation voire de réduction des dépenses énergétiques contraintes.

Les coûts prévisionnels de cette transformation doivent considérer les coûts complets : la flexibilité et le stockage d'électricité, le raccordement des nouveaux moyens de production, le démantèlement des centrales, le stockage des déchets radioactifs, etc. D'après les estimations actuelles, les coûts les plus élevés correspondent aux systèmes 100% basés sur les moyens renouvelables en comparaison des scénarios qui impliquent la poursuite de l'exploitation de centrales nucléaires. Si les coûts de production sont sensiblement les mêmes d'un scénario à l'autre, les coûts de flexibilité varient significativement et entraînent des différences notables. Ainsi, **toutes choses égales par ailleurs, les scénarios à « 100% renouvelable » coûtent plus cher que les scénarios avec du nouveau nucléaire.** Les coûts des réseaux de transport et distribution, et ceux liés au réseau hydrogène sont plus élevés pour les scénarios « 100% renouvelable ». Ce résultat est robuste, les analyses de sensibilité menées en prenant en compte les coûts complets semblent montrer que l'avantage reste aux scénarios impliquant la reconstruction de centrales nucléaires, même en cas d'hypothèses de coûts de production plus favorables aux moyens renouvelables non pilotables de production de l'électricité.

Néanmoins, ces écarts restent globalement limités d'un scénario à l'autre. Hors coût des moyens de production d'électricité, le facteur ayant le plus d'influence sur le coût complet des scénarios est celui de rémunération du capital à l'origine des investissements dans les nouveaux moyens de production d'électricité. Les travaux menés dans le cadre du dernier rapport RTE montrent qu'une rémunération du capital à 7% au lieu de 4% peut faire augmenter le coût du système électrique de 30 % en coût complet annuel. **Une implication et un financement directs de l'État avec un faible taux de rémunération du capital a donc pour conséquence une diminution importante du coût de la transformation du système électrique.**

8. L'analyse des coûts futurs de transformation de notre système électrique doit impérativement se faire en prenant en compte l'intégralité des coûts complets : coûts du réseau de distribution, y compris ouvrages de raccordement ; coûts du réseau de transport, y compris ouvrages de raccordement et interconnexions ; coûts des flexibilités et du stockage, y compris production renouvelable utilisée pour produire de l'hydrogène ; coûts de la production renouvelable hors production visant à stocker/déstocker et hors ouvrages de raccordement ; coûts du nucléaire y compris l'aval du cycle (retraitement et stockage des déchets) et provisions pour démantèlement ; et recettes d'exports.

Au final, le coût prévisionnel des différents scénarios analysés est du même ordre de grandeur et son estimation est largement spéculative. Il est donc essentiel que ce critère de choix ne prenne pas le pas sur d'autres critères essentiels au bon fonctionnement d'une société socialement juste et écologiquement soutenable : risques de non atteinte de la neutralité carbone, consommation de matériaux et risques de pénuries, acceptabilité des mesures de sobriété, créations et destructions d'emplois, résilience face au changement climatique, etc.

Plus globalement, **aucun scénario n'envisage une modification du cadre juridique qui organise le fonctionnement des différents moyens de production d'électricité, et plus largement ne remet en cause la libéralisation du marché de l'électricité**, ce qui aurait pourtant un impact conséquent sur les coûts de la transformation du système électrique : tous considèrent la situation existante comme un invariant (voir « [Planifier l'avenir de notre système électrique - Épisode II : Planifier un système électrique au service d'impératifs sociaux, écologiques et démocratiques](#) », note #22, février 2022). De la même manière, aucun scénario n'envisage les conséquences sociales et économiques d'une stagnation ou d'une décroissance du PIB sur la transformation de notre système électrique, alors que la richesse produite dimensionne mécaniquement la capacité de la société à modifier et faire fonctionner le système énergétique.