



## Synthèse

# ANALYSES DE LA TRANSITION DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE À L’HORIZON 2050

Étude réalisée à la demande du CSEC d’EDF-SA

juin 2022

### Experts

Jean BARRA  
Jean-Marie BERNARD  
Denis BOUSCASSE  
Michel DONEDDU  
Dominique GHALEB  
Françoise LAURENT  
Jacques PATEL  
Ludovic ZANOLIN

### Logistique

Karima RAHMOUNI

15, rue Kléber  
93100 Montreuil  
Tél 01 48 51 17 00  
ied.montreuil@wanadoo.fr

<http://public.institut-energie-developpement.com>

La présente étude est prospective. Envisageant le long terme, elle ne répond pas aux questions, pourtant importantes, concernant le passage des pointes de consommation lors des prochains hivers. Elle ne prétend pas non plus prédire ce que sera le système électrique dans 30 ou 40 ans : il dépendra des décisions politiques prises dans l’intervalle dont il est difficilement possible de dire ce qu’elles seront. En revanche, elle cherche à éclairer vers où aller, quel système électrique viser, pour atteindre l’objectif climatique de la neutralité carbone, et ce en fonction de l’état actuel des connaissances techniques. Si le contexte et l’environnement étaient stable, le système électrique pourrait évoluer par retouches successives et une telle étude aurait peu d’intérêt. Mais ce n’est pas le cas. Les dérèglements climatiques menacent et même si des irréversibilités sont déjà atteintes et appellent à des adaptations, il importe de prendre rapidement les dispositions pour éviter des aggravations qui pourraient être catastrophiques pour l’humanité. Atteindre la neutralité carbone n’est pas un mieux disant environnemental, c’est un objectif indispensable. On ne peut pas pour autant perdre de vue que l’énergie est à la base de la vie : si une part alimente le luxe, elle est avant tout un besoin fondamental. C’est devant cette contradiction que se trouve l’humanité tout entière. Elle ne sera pas résolue par des simples slogans.

L’étude s’appuie largement sur le rapport de RTE « Les futurs énergétiques 2050 » (FE 2050), publié en octobre 2021 et février 2022, riche de données et d’analyses scientifiques, techniques, environnementales et sociétales. Elle en critique néanmoins des pans importants, notamment l’importante sous-estimation des difficultés techniques, économiques et sociales qu’entraînerait la transition vers un système électrique tout renouvelable.

## **1. Viser la satisfaction d’une consommation d’électricité de 850 TWh est une option nécessaire et sans regret.**

La stratégie nationale bas-carbone (SNBC), feuille de route gouvernementale de la transition énergétique, table à la fois sur une réduction importante de la consommation d’énergie finale au cours des trois prochaines décennies et sur une surestimation sensible de la ressource nationale en biomasse. Elle repose ainsi sur des objectifs pouvant être qualifiés d’ambitieux ou d’irréalistes, selon le point de vue. Leur résultat est de sous-estimer sensiblement le besoin d’électricité pour atteindre la neutralité carbone sans créer de dangereuses régressions économiques et sociales.

La SNBC envisage de réduire la consommation d’énergie par une combinaison des progrès des techniques des usages de l’énergie, conduisant à une meilleure efficacité énergétique, et par des changements comportementaux et sociétaux promouvant la sobriété énergétique, c’est-à-dire le renoncement à des consommations jugées superflues ou sans grande utilité. Mais il y a grand danger à dimensionner les capacités du futur système énergétique sur une surestimation des possibilités de gains d’efficacité et de sobriété. S’ils s’avèrent inatteignables, le système ne sera pas en mesure de répondre aux besoins économiques et sociaux, la sobriété sera alors vécue comme une pénurie ou une précarité énergétique frappant d’abord les plus faibles et les moins fortunés. Le danger n’est toutefois pas symétrique. Surestimer les besoins énergétiques futurs conduirait à des investissements dans des surcapacités de production d’énergie primaire dont le préjudice social serait nul et le coût économique sans commune mesure avec celui d’une pénurie.

La présente étude évalue à 850 TWh le besoin annuel d’électricité finale qu’il convient de couvrir pour atteindre la neutralité carbone, soit environ 200 TWh de plus que la trajectoire de référence de FE 2050. Ce chiffre s’appuie sur l’examen des variantes envisagées par RTE de nature à corriger les mésestimations

de la SNBC en matière de ressources en biomasse, sa négligence du besoin de réindustrialisation du pays, ses paris hasardeux en matière de gains d’efficacité et de sobriété énergétiques, tout en prenant en compte des économies réalisables par une sobriété acceptable. En outre, cette estimation est corroborée par la comparaison avec les scénarios européens exprimant le besoin d’électricité par habitant pour atteindre la neutralité carbone : entre 12 et 13 MWh/habitant/an, ce qui est cohérent avec une consommation de 850 TWh pour 69 millions d’habitants en France métropolitaine à l’horizon 2050.

## **2. Trois raisons plaident en défaveur des scénarios « tout ou quasi-tout renouvelables ».**

Concernant la transition énergétique vers la neutralité carbone, le débat le plus aigu porte sur l’alternative suivante : sortir du nucléaire et cibler un système électrique tout renouvelable ou bien maintenir et renouveler le parc de production nucléaire à côté d’autres moyens de production décarbonés. Au groupe historique des antinucléaires s’ajoute aujourd’hui les opposants aux éoliennes, qui prennent une certaine ampleur dans la ruralité.

FE 2050 a apporté un élément essentiel dans ce débat en confirmant que le parc nucléaire ne pouvait pas être remplacé seulement par des éoliennes et des panneaux solaires, bien d’autres moyens étant nécessaires pour équilibrer les fluctuations fatales de leur production : batteries, électrolyseurs, turbines à hydrogène, réservoirs souterrains de stockage et réseau de transport d’hydrogène, dispositifs de stabilité de l’onde électrique, extension des réseaux de transport, de distribution et des interconnexions au niveau de l’ensemble de l’Europe. De plus, doivent être mis en place des dispositifs rendant la consommation d’électricité « flexible », avec notamment des systèmes d’intelligence artificielle la réduisant automatiquement lors des périodes faiblement ventées et ensoleillées.

Il en résulte 3 raisons plaçant en défaveur des scénarios tout ou quasiment tout renouvelables :

### *1°) des raisons techniques.*

FE 2050 souligne que les technologies d’accompagnement de tels mix ne sont pas toutes encore mures. Certes, en retenant 6 scénarios de transition du système électrique dont 3 tout renouvelables et 1 quasiment tout renouvelable, le rapport de RTE peut livrer une lecture minimisant les problèmes techniques à résoudre. La présente étude souligne notamment ceux qui concernent la robustesse du réseau et les possibilités de stocker l’hydrogène en grande quantité. Elle montre qu’ils peuvent s’avérer des facteurs bloquants pour le tout renouvelable. Viser aujourd’hui une transition du système électrique vers un tel mix en pariant que ces problèmes seront résolus dans les 20 ans à venir, ce serait prendre le risque que le pari ne puisse être gagné. On ne pourrait pas alors compter sur une relance du nucléaire pour les palier : les capacités industrielles de la filière auraient été perdues et les délais entre une décision de construire et la mise en service se compteraient en dizaines d’années. Le pays serait alors immanquablement confronté au choix suivant : imposer une sobriété énergétique renforcée ou différer de quelques décennies l’atteinte de la neutralité carbone.

### *2°) des raisons économiques.*

L’analyse économique de FE 2050 compare les coûts complets de ses 6 scénarios, incluant non seulement ceux des moyens primaires, mais aussi des moyens d’équilibrage des fluctuations renouvelables (dits « de flexibilité ») et ceux des réseaux de transport et de distribution. RTE en conclut que plus la part de renouvelables est importante dans le mix, plus le coût complet de l’électricité est élevé. Ce résultat repose pourtant sur des hypothèses extrêmement optimistes de réduction de coût d’investissement des moyens éoliens et solaires qui se poursuivraient à un taux élevé durant les 30 années à venir. La présente étude

montre qu’avec des hypothèses plus réalistes, les écarts sont encore plus importants que ce qu’a publié RTE : le coût complet de la substitution d’une capacité nucléaire par des moyens primaires éoliens et solaires, les moyens complémentaires et l’extension des réseaux s’élève à environ 70 €/MWh (40 €/MWh selon FE 2050).

### *3°) des raisons sociales.*

Envisager la production d’électricité primaire uniquement à partir des énergies éoliennes, solaires et hydrauliques implique d’en limiter la capacité, notamment en raison de l’espace qu’occupent alors les moyens de production. Cette option a donc un corollaire : la consommation d’électricité doit être limitée bien en deçà de ce que les progrès d’efficacité énergétique laissent escompter. Autrement dit, elle doit reposer sur une réduction des usages de l’énergie risquant fort d’aller au-delà de ce qu’on peut considérer comme superflu et sur une sobriété contrainte pesant de façon inégale sur les différentes couches de la population.

En outre, la flexibilité de la demande, rendue nécessaire par l’absence de production pilotable, serait très différente de ce qu’on connaît déjà avec les doubles tarifs heures creuses-heures pleines. En effet les périodes de tarification sont connues d’avance par les usagers qui organisent en conséquence les usages de l’électricité. Mais les fluctuations de la production éolienne sont aléatoires et les variations tarifaires ou réductions de la fourniture d’électricité pilotées par le système électrique « intelligent » interviendraient souvent par surprise, ce qui pourrait être vécu comme une qualité de service dégradée. Sur le plan économique, la flexibilité de la demande peut évidemment nuire au bon fonctionnement des activités industrielles et par conséquent aux objectifs de réindustrialisation du pays.

### **3. La place du nucléaire nécessaire pour atteindre la neutralité carbone et éradiquer la précarité énergétique : la SNBC doit être corrigée et la PPE revue de fond en comble.**

La place à donner au nucléaire dans la transition du système électrique doit s’apprécier en contrepoint des limites, risques et inconvénients des scénarios tout renouvelables. S’il présente les inconvénients de consommer une ressource minérale, l’uranium, et de nécessiter des systèmes de gestion et de stockage des déchets radio-actifs, il présente le grand avantage d’être à la fois décarboné et pilotable. Certes, l’hydraulique et la biomasse renouvelable ont les mêmes atouts, mais leurs ressources sont géographiquement limitées ou sont confrontées à des conflits d’usage.

Pourtant les scénarios de RTE ont donné une place soit marginale (N1) soit modérée (N2 et N03) à la production nucléaire. Aucun n’envisage le maintien de la capacité actuelle de 61 GW, malgré le nécessaire accroissement de la production d’électricité. La raison invoquée est l’incapacité de la filière industrielle de soutenir un rythme de construction de nouveau nucléaire permettant de compenser les fermetures de tranches qui arriveront en fin de vie, même dans l’hypothèse où celle-ci serait prolongeable à 60 ans, voire au-delà. Mais les capacités de l’industrie française sont bien plus déficientes en matière d’éolien terrestre et de panneaux photovoltaïques, sans que cela n’empêche FE 2050 d’envisager des rythmes de mise en service accélérés dans ses scénarios tout ou quasi-tout renouvelables. Il en ressort que la transition énergétique a besoin de reposer sur une planification du développement des filières dans leur ensemble : moyens de production à installer et capacités industrielles de les fabriquer.

Deux grandes raisons plaident en faveur de l’intégration d’un parc nucléaire important dans la planification du système électrique de la neutralité carbone :

1°) pour couvrir un besoin d’électricité plus élevé que la cible de la SNBC, de l’ordre de 850 TWh par an, le

rythme de mise en service de nouveau nucléaire le plus rapide envisagé par FE 2050 se trouve largement insuffisant. En rester là conduirait à un système tout renouvelable 30 % du temps et serait confronté aux problèmes de robustesse, de capacités de stockage d’hydrogène et de coût des mix tout renouvelables. Pour s’en soustraire, il conviendrait de viser plutôt un mix de 90 GW de nucléaire complété par les 177 GW de renouvelables esquissés dans le discours de Belfort du Président de la République.

2°) un parc nucléaire français important répond aussi à un besoin européen. L’Allemagne et de nombreux autres pays visent des systèmes électriques décarbonés sans nucléaire fondés sur une part prépondérante de production renouvelable intermittente (jusqu’à 80 % de l’énergie annuelle). L’Union européenne considère quant à elle qu’un minimum de 20 % de nucléaire sera nécessaire sur le continent. Celui-ci ne pourra donc se situer que dans les pays qui y recourent de façon importante : France, Grande-Bretagne, Europe centrale.

L’énergie nucléaire a donné à la France un atout considérable dans la lutte contre le changement climatique. C’est un atout à valoriser. Pour cette raison, la PPE actuelle, qui planifie la fermeture prématurée de 12 tranches nucléaires, devrait être revue de fond en comble. Celle qui est en préparation pourrait baliser un chemin opposé : prolonger la durée de vie des centrales existantes et planifier un rythme de mise en service de nouveau nucléaire, afin de maintenir la capacité actuelle dans un premier temps et de l’accroître ultérieurement.

#### **4. La France doit se doter de capacités et compétences industrielles au niveau des ambitions de la transition énergétique.**

On constate aujourd’hui un fort déficit des capacités industrielles de la France au regard des besoins d’équipement du système électrique en vue de la neutralité carbone à l’horizon 2050 :

- la filière nucléaire a souffert de l’abandon de la stratégie des paliers successifs adoptée par EDF au 20ème siècle pour lui substituer la réalisation du prototype franco-allemand EPR, des difficultés survenues sur le chantier de Flamanville et de la politique de moratoire sur le nouveau nucléaire ;
- la constitution d’un parc de production d’électricité renouvelable, à un rythme accéléré depuis 2010, a reposé essentiellement sur l’importation des équipements essentiels (aérogénérateurs, panneaux solaires, onduleurs...). C’est une véritable rupture : auparavant, les centrales hydrauliques, thermiques, nucléaires avaient été essentiellement conçues par l’ingénierie d’EDF et fabriquées par l’industrie nationale.

Concernant la filière nucléaire, des dispositions importantes ont été prises pour la relancer, notamment avec le plan EXCELL qui vise à renforcer la qualité industrielle, les compétences et la gouvernance des grands projets nucléaires. Il doit notamment restaurer des relations de dialogue entre l’ingénierie et l’industrie, ce qui rejoint l’analyse de l’IED selon laquelle les approches par la seule contractualisation ont été source de défauts et non conformités. Il doit aussi renforcer les compétences humaines et l’attractivité des métiers du nucléaire. Mais la relance de la filière passe par des commandes fermes de nouvelles tranches EPR2, indispensables pour donner une visibilité de moyen terme et permettre les investissements et recrutements nécessaires dans l’ingénierie et l’industrie. Les engagements du Président de la République du 10 février à Belfort (prolongement de la vie des centrales existantes, commande ferme d’un premier palier de 6 tranches d’EPR2 devant être mises en service entre 2035 et 2045 et mise à l’étude de 8 tranches additionnelles) vont dans ce sens mais conservent une certaine incertitude tant qu’ils ne sont pas adoptés par le Parlement.

De surcroît ce seul programme n’est pas de nature à maintenir la capacité du parc existant au-delà de 2040-2045. A fortiori il ne suffit pas à répondre à un besoin d’électricité décarbonée supérieur aux projections de la SNBC et nécessaire pour atteindre la neutralité carbone sans imposer une sobriété pénalisant la

population et l’économie. Certes, le rythme du premier palier d’EPR2 semble peu compressible : la mise en œuvre du plan EXCELL ne peut pas porter instantanément les capacités de la filière et de l’industrie du niveau affaibli auquel elles se situent aujourd’hui à celui qu’elle connaissait dans la période 1980 – 1995. Vouloir bousculer le temps de la montée en charge et du retour d’expérience envisagés par EDF serait sans doute manquer de réalisme et de prudence. En revanche, il serait souhaitable de viser une forte accélération du volume et du rythme de construction du second palier. Il s’agit d’échéances intervenant à l’horizon d’une vingtaine d’années qui peuvent paraître lointaines. Mais il convient de prendre en compte les temps de la constitution des capacités industrielles et de génie civil, de l’extension du potentiel humain en ingénierie et en fabrication, du débat public lié la recherche de sites, qui sont du même ordre de grandeur. Pour répondre à une consommation de l’ordre de 850 TWh vers 2050-2060, il conviendrait de préparer la filière à assurer un rythme de mises en service de 2 à 3 tranches par an dès 2043-2045.

La relance du nucléaire ne peut s’affranchir de la question de sa durabilité sur le long terme, qui passe par la transition de la filière à eau légère vers celle à neutrons rapide. La fermeture prématurée de la centrale Superphenix en 1997 a porté un premier coup au savoir-faire de la France en la matière, suivi de l’ajournement en 2017 du projet ASTRID porté par le CEA. Dans un souci de préparation de l’avenir et de ne pas laisser la Russie, la Chine et les États-Unis seuls maîtres de cette filière, la PPE devrait reprogrammer la réalisation d’un prototype de réacteur de 4ème génération à neutrons rapides.

Concernant les énergies renouvelables, le potentiel industriel en matière de fabrication d’équipements n’existe en France que dans le domaine de l’éolien en mer, essentiellement à travers GE Wind France, anciennement Alstom Wind vendu avec Alstom Power à General Electric en 2014. En matière d’éolien terrestre et de solaire photovoltaïque, les capacités se limitent à l’assemblage des composants et à leur installation. À partir de là, plusieurs pistes méritent d’être poursuivies :

- assurer une maîtrise nationale de la filière éolienne en mer, garantissant notamment que General Electric développera les capacités de R&D, d’ingénierie et de fabrication, sans les sacrifier à sa stratégie financière ;
- veiller à ce que l’industrie nationale puisse prendre une place dans le développement annoncé d’une industrie européenne des cellules photovoltaïques, notamment à partir de la technologie et des brevets développés par le CEA.

La France et l’Union européenne ont annoncé des plans ambitieux de développement de la « filière hydrogène », tant pour préparer le futur usage d’un vecteur énergétique décarboné de substitution aux combustibles fossiles qu’en vue d’équiper le système électrique de moyens de report de production sur les moyen et long termes. La disponibilité et la faisabilité de capacités de stockage de masse de l’hydrogène sont des enjeux cruciaux sur lesquels un plus grande vigilance serait de mise dans la prochaine PPE.

La SNBC a écarté le recours aux technologies de séquestration du carbone dans la panoplie des moyens décarbonés à développer. Face aux incertitudes qui planent sur la possibilité de doter le futur système électrique de capacités suffisantes de production pilotable décarbonée (difficultés de faisabilité de la boucle hydrogène, retards sur les chantiers nucléaires...), cet a priori devrait être reconsidéré, notamment par le lancement d’études prolongeant les expérimentations réalisées.

## **5. EDF et la filière nucléaire doivent relever d’importants défis.**

Le maintien de la capacité nucléaire à son niveau actuel, requise par les objectifs conjoints de la neutralité carbone et d’une production d’énergie couvrant les besoins économiques et sociaux sans reposer sur des paris techniques hasardeux, nécessite de prolonger le fonctionnement du parc nucléaire historique au-delà de 50 ans, voire de 60, dans le respect des critères de sûreté. C’est pour EDF un défi d’autant plus

important que depuis quelques années la disponibilité du parc se dégrade, notamment en raison d’arrêts résultant d’incidents affectant la sûreté. Cette question devrait faire l’objet d’une réflexion approfondie reposant sur la visée de garantir à long terme la meilleure disponibilité de l’ensemble du parc, qui peut être différente de l’objectif d’optimiser la disponibilité immédiate de chaque tranche.

Concernant la construction du nouveau nucléaire, une certaine course contre la montre est engagée, à l’aune des échéances de la transition énergétique résultant de la rapidité du changement climatique. EDF et le GIFEN ont proposé un rythme de relance du nouveau nucléaire évitant l’emballement des esprits qui a prévalu au démarrage de l’EPR et reposant sur des considérations de réalisme et de prudence. Du coup, ce rythme doit être tenu et les conditions doivent être créées pour qu’il puisse s’accélérer dès le deuxième palier. Ainsi des moyens humains et des investissements importants doivent être consacrés à la réussite du plan EXCELL. D’autre part, celui-ci devrait être étendu au domaine encore trop laissé dans l’ombre du génie civil, qui constitue des moments essentiels d’un chantier nucléaire, décisifs quant au respect des délais et des coûts du chantier. Notamment, la question de la capacité des génies civilistes d’assurer plusieurs chantiers simultanés mériterait d’être examinée. Le plan EXCELL mériterait aussi d’être complété par une réflexion sur l’efficacité du management, en particulier les places respectives qu’y occupent la prescription par procédures et le dialogue, tant en interne que dans les relations clients-fournisseurs.

Le financement de la transition électrique est un sujet critique. La rémunération du capital a un impact considérable sur l’amortissement des investissements, dont la part est majoritaire dans le coût complet d’un système électrique décarboné. Or les conditions d’accès au crédit de l’entreprise publique EDF sont bien plus avantageuses que la rémunération exigée par les capitaux privés. Cela plaide pour que le financement du système électrique soit public ou à tout le moins repose sur des emprunts garanti par l’État. Cette question est très liée au fonctionnement du marché européen de l’électricité, qui montre son incapacité à dégager les ressources pour investir sur le moyen terme et qui mérite une véritable refonte.