

## La transition 100 % renouvelable est-elle possible ?

Débats autour du mix électrique de demain



Nathan BERTHO  
Joseph PAILLARD  
Lilia BOURAOUI  
Maxence MAHÉ

Paul ROVEL  
Philippe MATHIEU  
Yasser GHELLAB  
Aida ZAHIRI

Cette publication a été réalisée par des étudiants en troisième année du cycle ingénieur de Mines Paris PSL Research University. Il présente le travail réalisé dans le cours intitulé « Descriptions de controverse », qui a pour objectif d'introduire les étudiants à l'univers incertain de la recherche scientifique et technique et de les sensibiliser aux enjeux de la participation citoyenne.

Mines Paris décline toute responsabilité pour les erreurs et les imprécisions que peut contenir cet article. Vos réactions et commentaires sont les bienvenus. Pour signaler une erreur, réagir à un contenu ou demander une modification, merci d'écrire à la responsable de l'enseignement : [madeleine.akrich@mines-paristech.fr](mailto:madeleine.akrich@mines-paristech.fr)

## ■ Cadrage du problème et méthodologie

Ce document porte sur l'étude de la controverse sur le futur du mix électrique français, en particulier sur la question clivante de la faisabilité et la souhaitabilité d'un mix 100 % renouvelable. Cette question est au cœur des débats et des discussions concernant la lutte contre le réchauffement climatique et la capacité des pays à décarboner leur mix électrique.

### ■ Cadrage français

Nous limiterons notre étude au cas français, pour pouvoir nous concentrer sur des enjeux énergétiques qui nous sont propres. Le nucléaire représente 70 % de la production d'électricité en France contre 5 % dans le monde en 2020. Cet aspect rend les débats français structurellement différents de ceux qui peuvent avoir lieu à l'étranger. Effectivement, à l'international, la discussion se concentre sur la rapidité et la faisabilité du renouvelable, sans considérer, en général, l'énergie nucléaire. En France, la forte présence de celle-ci déplace le débat et soulève ainsi de nouvelles problématiques et sujets de controverses.

### ■ Différents acteurs

Nous avons pu identifier les principaux acteurs de cette controverse, et en sélectionner certains. Ce sont des acteurs industriels directement impliqués comme EDF ou RTE (Réseau de Transport d'Électricité), des acteurs gouvernementaux comme le Gouvernement ou l'ADEME ou encore des acteurs associatifs tels que négaWatt, le Shift Project, ou le Céréme ; il en existe bien d'autres, que nous ne citerons pas dans cette étude. Certaines personnalités peuvent aussi être considérées comme des acteurs au vu du poids de leurs interventions publiques. C'est par exemple le cas du fondateur du Shift Project, Jean Marc Jancovici, du porte-parole de négaWatt, Yves Marignac, de la ministre de la Transition énergétique Agnès Pannier-Runacher ou encore de la fondatrice du mouvement *On est Prêt*, Magalie Payen.

Dans cette controverse, deux questions principales font consensus : Premièrement, il y a bien une urgence climatique<sup>1</sup> (nous excluons du débat les climato-sceptiques). Deuxièmement, pour répondre à ce défi, il sera nécessaire de mettre en place une électrification croissante des usages énergétiques.

### ■ Méthodologie

Dans cette étude, nous nous appuyons sur la lecture de rapports, d'articles scientifiques et de presse, ainsi que d'analyses quantitatives ; cependant, notre source

---

<sup>1</sup> IPCC, "AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023," 2022, <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>.

majeure d'informations reste les entretiens avec les acteurs principaux du débat. Il ne s'agit aucunement de trancher le débat ni de donner un avis final, mais bien de permettre de comprendre ce qui nourrit cette controverse et comment elle s'articule dans le débat public. Le but est d'avoir une vision globale du débat, des acteurs, des points de vue ainsi que des problématiques levées.

Nous avons également tenté d'effectuer une analyse quantitative sur les données de Scopus et d'Europresse qui n'a malheureusement pas abouti. Nous reviendrons en détails sur les éléments de méthodologie dans la partie matériel et méthode à la fin de ce rapport.

## ■ Évolution du débat dans le temps et formulation de la problématique

Pour bien comprendre la nature du débat sur le mix électrique en France, il convient de remonter à son origine dans les années 1970. Ceci permet de mieux comprendre comment les acteurs du débat se sont positionnés historiquement sur les points controversés.

### ■ Origines du débat

Le débat prend racine à l'international dans les années 1970 où certains papiers scientifiques commencent à traiter de la faisabilité d'un mix énergétique 100 % renouvelable. Le choc de la publication du rapport Meadows<sup>2</sup> qui met en avant le danger représenté par l'épuisement des ressources naturelles et les pollutions de l'environnement, pousse l'idée d'un système de production électrique basé sur des sources renouvelables. Cette idée est accentuée par la perspective d'épuisement des ressources pétrolières et par le premier choc pétrolier en 1973.

En France, les idées d'une production électrique renouvelable prennent racine dans les années 2000. La prise de conscience des enjeux du réchauffement climatique fait ressurgir les idées de développement des énergies renouvelables. Les gouvernements successifs, en accord avec les objectifs européens, commencent à viser un objectif de développement des énergies renouvelables (Grenelle de l'environnement en 2007). Ces idées sont soutenues par l'arrivée à maturité industrielle de deux technologies de production d'énergie renouvelable que sont les éoliennes et les panneaux solaires photovoltaïques. Le développement de ces énergies est alors considéré comme souhaitable. Cependant, les feuilles de route ne sont arrivées que plus tard avec les Programmes Pluriannuels de l'Énergie (PPE) de 2015 et 2019.

Les associations qui traitent de l'écologie s'emparent du sujet du changement climatique et recommandent les moyens de production d'électricité d'origine renouvelable. Greenpeace qui a historiquement lutté contre le nucléaire militaire, puis civil, y voit également un moyen de sortir de cette forme d'énergie. En 2001, est fondée l'association négaWatt, qui présente des scénarios énergétiques basés sur la sobriété, l'efficacité et les renouvelables. À

<sup>2</sup> Donella H. Meadows et al., *The Limits to Growth; a Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, 1972.

contre-courant, Jean-Marc Jancovici et le Shift Project <sup>3</sup> (association fondée en 2010) commencent à dénoncer certains inconvénients des énergies renouvelables et poussent pour un usage renforcé du nucléaire.

À la suite de l'accident de Fukushima en 2011, le Gouvernement français se détourne de l'énergie nucléaire en positionnant les renouvelables comme un moyen de substitution. En Europe, la décision allemande de sortir à marche forcée de l'énergie nucléaire en développant massivement les énergies renouvelables (*Energiewende*) crée un exemple qui pousse le gouvernement français à développer encore plus les énergies renouvelables. Ces idées sont également reprises par le nouveau parti écologiste EELV (Europe Écologie Les Verts) qui est fondé en 2010 par fusion de différents partis de protection de l'environnement, historiquement portés sur la lutte contre le nucléaire civil et militaire.

Des décisions gouvernementales de développement des EnR (Énergies nouvelles Renouvelables) découlent les PPE de 2015 et 2019 qui prévoient des fermetures importantes de réacteurs et fixe un objectif de 34 GW de capacité éolienne installée en 2028 soit un doublement de la capacité par rapport à celle de 2019. Ces décisions vont de pair avec la ratification des accords de Paris.

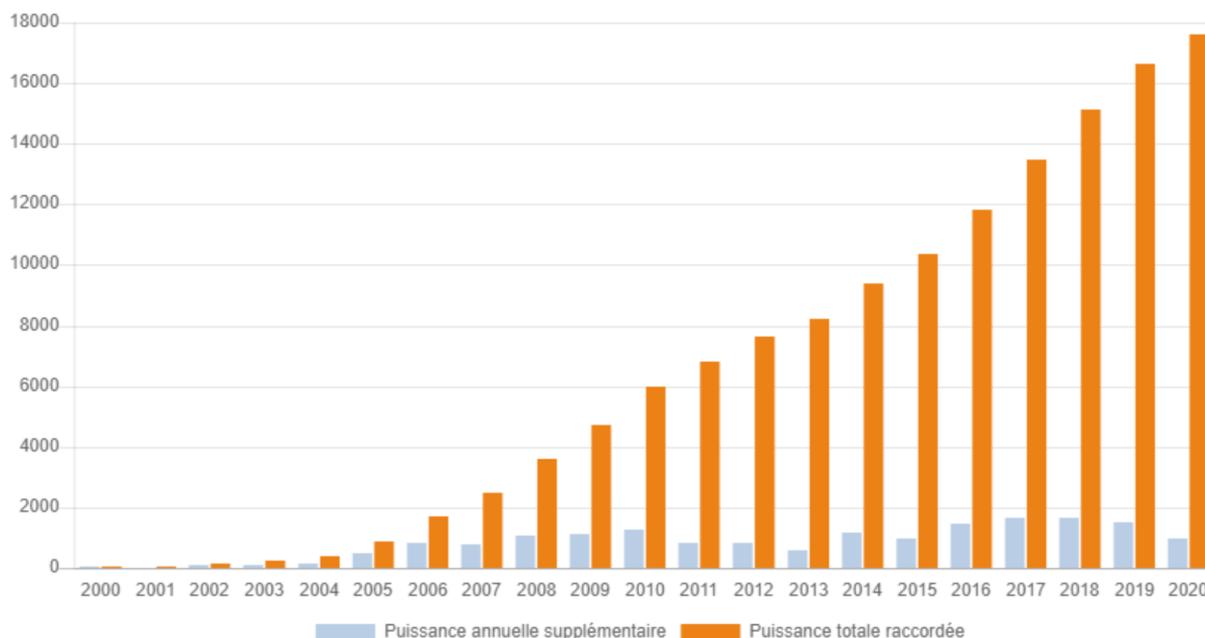


Figure 1 : Évolution du parc éolien en MW. À partir des données du Service des données et études statistiques en 2019. <https://transition-energetique.eco/combien-eolienne-france/>

## ■ Les mouvements anti-éoliens

En parallèle, de nombreuses contestations citoyennes émergent un peu partout en France pour s'opposer aux projets éoliens. Principalement à ancrage local, ces associations rétorquent que ce moyen de production d'énergie porte atteinte aux paysages, et crée des nuisances sonores pour les riverains. Le débat s'étend avec des accusations de la part des

<sup>3</sup> Jean-Marc Jancovici, "100% Renouvelable Pour Pas plus Cher, Fastoche?," 2017, <https://jancovici.com/transition-energetique/renouvelables/100-renouvelable-pour-pas-plus-cher-fastoche/>.

riverains d'impacts sanitaires sur les populations et la faune locale. Ces impacts ont également tendance à dévaluer les biens immobiliers à proximité, ce qui renforce ces mouvements locaux.

En 2008, l'Académie nationale de médecine préconise une distance minimale de 1500 m entre une éolienne et les habitations. En 2011, la législation est modifiée pour assurer un minimum de 500 m. Ces débats sur les impacts visuels et sonores des éoliennes continuent encore aujourd'hui, avec l'adoption en 2022 de la loi 3DS qui vise, entre autres, à encadrer ou à limiter les projets d'implantation d'éoliennes dans les plans locaux d'urbanisme.

Des critiques sur l'impact sur les populations d'oiseaux et chauves-souris déclenchent même des débats internes entre mouvements de protection de l'environnement. Ces points sont toujours controversés actuellement.

Cette partie de la controverse est globalement restée constante dans le temps et à ancrage local jusqu'à ce qu'elle converge avec les luttes pro-nucléaires dont nous allons parler ci-dessous.

## ■ Retournements récents

La fermeture anticipée des réacteurs de Fessenheim les 22 février et 30 juin 2020 constitue un point de bascule dans le débat. De nombreuses personnes perçoivent comme un gâchis la fermeture anticipée d'un moyen de production bas carbone. La publication des scénarios Futurs Énergétiques 2050 de RTE fin 2021, qui tentent de mettre des chiffres sur les différentes trajectoires possibles, permet également une prise de conscience des coûts et impacts des différentes solutions. Cette prise de conscience est exacerbée par la crise énergétique récente et l'élection présidentielle de 2022 qui s'empare du débat et lui donne une dimension publique. L'annonce récente par le président de la République de la construction de nouveaux réacteurs nucléaires met le nouveau nucléaire au cœur du débat en tant que solution potentielle aux émissions de gaz à effets de serre.

De nombreux acteurs associatifs tels que les Voix du Nucléaire (fondé en mars 2018), ou le Céréme (fondé en mai 2020) émergent pour promouvoir le rôle du nucléaire dans notre mix, ce qui relance le débat pleinement. Des scénarios alternatifs<sup>4 5</sup> sont préparés en réponse à ceux de RTE. Une forme de convergence des luttes s'effectue avec les mouvements anti-éolien locaux qui voient en le nucléaire une bonne alternative à l'éolien. Des acteurs institutionnels comme EDF qui avait, jusqu'à présent, gardé une position assez neutre, prennent également position en faveur du nucléaire avec leur programme de 3 paires d'EPR 2. Les difficultés actuelles du parc nucléaire font également s'élever des critiques sur la gestion de l'industrie de l'atome des années 2000 à 2020 ainsi que de vives critiques sur le bien-fondé des politiques de développement des EnR<sup>6 7</sup>.

<sup>4</sup> Voix du Nucléaire, "TerraWater," 2022, [https://d1sv16tvbglsd.cloudfront.net/app/uploads/2022/12/RAPPORT\\_Scenario-TerraWater\\_Futurs-Energetiques-France-2050\\_V1.21.pdf](https://d1sv16tvbglsd.cloudfront.net/app/uploads/2022/12/RAPPORT_Scenario-TerraWater_Futurs-Energetiques-France-2050_V1.21.pdf).

<sup>5</sup> Berger Roland and Céréme, "Scénario Alternatif Aux 'Futurs Énergétiques 2050' de RTE : Le Rapport Roland Berger," 2022, <https://cereme.fr/wp-content/uploads/2022/04/Rapport-Roland-Berger-scenario-du-Cereme.pdf>.

<sup>6</sup> *Audition à l'Assemblée Nationale de Yves Bréchet*, 2022, <https://www.revuepolitique.fr/audition-a-lassemblee-nationale-de-yves-brechet/>.

<sup>7</sup> Marc Endeweld, "Déboires d'EDF et Du Nucléaire Français : Proglio et Lauvergeon Mettent Leur Rivalité de Côté Pour Accuser l'Allemagne," *La Tribune*, 2022, <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/energie->

## ■ Situation actuelle et formulation de la problématique

La situation actuelle, avec la crise sanitaire suivie de la crise énergétique, a également mis en lumière tous les enjeux de **souveraineté et de sécurité d'approvisionnement**. Ces enjeux, qui étaient primordiaux dans la décision historique de construction des réacteurs, avaient été moins pris en compte ces vingt dernières années.

L'urgence climatique, dont la prise de conscience a été exacerbée par les événements extrêmes de l'année 2022, a rendu toujours plus prédominante la question du futur mix électrique.

Pour répondre à ces enjeux, des solutions se profilent. Tout d'abord des solutions déjà installées comme le parc nucléaire historique, l'hydraulique, les énergies solaire et éolienne. Mais également de nouvelles solutions qui pourraient se développer comme les EPR (réacteur pressurisé européen), les centrales thermiques à hydrogène, le stockage par batteries ou la capture de carbone.

Ainsi, plusieurs voies sont débattues : soit viser le 100 % renouvelable, fermer le parc nucléaire existant et ne pas reconstruire de nouvelles centrales (c'est notamment la position de négaWatt, d'EELV et des associations anti-nucléaire telles que Sortir du Nucléaire) ; soit maintenir une part de nucléaire en prolongeant le nucléaire existant et en construisant de nouvelles centrales tout en développant les énergies renouvelables (c'est la position du Shift Project, des Voix du Nucléaire, du Gouvernement et d'EDF). C'est autour de la question : “ **Quel doit être le mix électrique français pour demain ?** ” que s'articule le débat dont nous traitons ici.

## ■ Enjeux économiques : coût et faisabilité technique

### ■ L'intermittence, anecdotique ou insurmontable ?

L'historique du système d'approvisionnement électrique français nous a accoutumés à bénéficier d'une énergie fiable, peu chère, et abondante<sup>8</sup>. Aujourd'hui, la transition énergétique et écologique nous impose de remplacer rapidement les énergies fossiles, qui pèsent entre 60 et 70 % de notre mix énergétique. La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) présente notamment l'engagement pris par la France de ne développer aucun nouveau projet de centrale thermique fossile. On assiste donc à un développement massif des énergies décarbonées, et en particulier des énergies renouvelables, et ainsi à l'apparition de nouveaux enjeux économiques et technologiques. Si l'on souhaite garantir un niveau d'approvisionnement qui prenne en compte l'électrification à venir sans baisser la consommation personnelle (ce qui sera discuté dans la partie sobriété), et de même qualité

---

environnement/deboires-du-nucleaire-francais-quand-proglio-et-lauvergeon-se-rejoignent-pour-accuser-l-allemande-945848.html.

<sup>8</sup> Jacques Printz, “Aspects Systémiques Du Système Électrique Français,” in *Introduction à La Systémique*, 2014, <https://www.afscet.asso.fr/msc/textes-2013/Printz-systeme-electrique-sept2014.pdf>.

que celle assurée par le mix énergétique actuel majoritairement fossile, les défis liés à la transition sont de taille.

Le principal enjeu de ces énergies renouvelables, sur lequel tous les acteurs s'accordent, est l'intermittence des moyens de production. Les énergies solaires (photovoltaïque) et éoliennes sont, en effet, intermittentes<sup>9</sup> : pour une même puissance installée, l'énergie qu'elles produisent varie selon les conditions extérieures (météo, heure de la journée, etc.). La courbe de production de ces énergies ne correspond actuellement pas avec la courbe de consommation de la population : elles produisent parfois trop, parfois pas assez. Pour assumer cette intermittence, il faut adapter le système et le réseau électrique en conséquence. C'est la faisabilité de cette adaptation qui fait débat, et la vision des solutions à cette intermittence est un point de divergence majeur entre les acteurs. Nous allons donc étudier les différentes solutions proposées, et mettre en avant les divergences de vues des acteurs sur ces propositions.

## ■ L'hydraulique : consensuel mais limité

L'énergie hydraulique est l'un des rares points où il existe un consensus entre les acteurs. Cette énergie renouvelable a la particularité de ne pas être intermittente (ou presque) et d'être aisément pilotable. Cependant, pour des raisons d'acceptabilité et de gisements, les différents acteurs s'accordent à maintenir les puissances actuellement installées, mais sans pousser particulièrement leur développement. Pour RTE par exemple, "le potentiel [hydraulique] exploitable au-delà des installations actuelles est jugé limité"<sup>10</sup>.

De la même manière, le stockage hydraulique (via les stations de transfert d'énergie par pompage ou STEPs) est une solution "sans regret" retenue par l'ensemble des acteurs pour participer à pallier l'intermittence des autres EnR, mais son potentiel est limité. Les STEPs consistent en deux bassins d'altitude différente séparés par un groupe hydroélectrique réversible : pour produire de l'électricité, on transfère l'eau du bassin supérieur vers le bassin inférieur et on alimente le groupe comme une turbine ; pour stocker de l'énergie, on transfère l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur en utilisant le groupe comme une pompe. RTE estime que la transformation de barrages existants en STEPs permettrait d'augmenter de 3 GW la capacité de ce levier de flexibilité, ce qui est souhaitable, mais ne suffira pas à couvrir l'entièreté des besoins en stockage longue durée. Les STEPs pourront participer à l'équilibre du réseau à l'échelle de la journée voire de la semaine.

## ■ Le stockage par batterie, une réponse infra-journalière aux problèmes d'intermittence ?

Une autre solution envisagée pour gérer le problème d'intermittence est l'utilisation de batteries, allant de petites batteries distribuées à la construction de grands parcs de batteries de stockage. Ce stockage ne concerne que les besoins de service système de court ou moyen

<sup>9</sup> N. L. Panwar, S. C. Kaushik, and Surendra Kothari, "Role of Renewable Energy Sources in Environmental Protection: A Review," 2011, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.037>.

<sup>10</sup> RTE, "Futurs Énergétiques 2050 - Résumé Complet," 2021, [https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapports/fichiers\\_joints/282232-resume-executif.pdf](https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapports/fichiers_joints/282232-resume-executif.pdf).

termes, inférieurs à la semaine. L'un des avantages majeurs des batteries est leur forte cyclabilité charge/décharge (1 à 2 cycles par jour). L'utilisation du stockage batterie varie selon les acteurs.

RTE associe directement le développement des batteries à la capacité photovoltaïque installée. L'usage qui en est fait est quotidien (charge des batteries grâce au photovoltaïque abondant à midi pour une décharge matin et soir). L'entreprise souligne toutefois que les batteries lithium-ion, répandues et de plus en plus économiquement compétitives, soulèvent des enjeux de criticité des matières premières et de dépendance à la Chine. Les besoins en batteries pour le système électrique sont malgré tout négligeables devant ceux nécessaires pour le développement de la mobilité électrique. NégaWatt s'accorde avec RTE pour l'utilisation du stockage batterie dans un mix 100 % renouvelable et considère que la question de la criticité des matières premières n'exerce pas une influence considérable au regard des besoins du numérique, des voitures électriques...

Le Céréme dénonce quant à lui les coûts incertains des batteries, qui varient selon leur durée de vie, les nuisances du déploiement de grands parcs de batteries, et la dépendance croissante à ces technologies. En cela, le scénario N4-2 pour 2050 du Céréme<sup>11</sup> rejoint les scénarios les plus volontaristes de RTE pour le déploiement de nouveau nucléaire et le prolongement du parc existant (le N03), en déployant moins d'1 GW de stockage batterie, contre 26 GW dans le scénario 100 % renouvelable de RTE.

Le stockage par batterie apparaît donc comme un point de divergence majeur selon le mix électrique choisi, son élasticité de déploiement atteignant un facteur supérieur à 25. Il a toutefois l'avantage de pouvoir être déployé plutôt rapidement et donc pallier un éventuel retournement de l'opinion public inattendu.

## ■ L'hydrogène, une solution miracle ?

L'utilisation de l'hydrogène peut servir à pallier l'intermittence des EnR en tant que moyen de stockage long terme. Elle est envisagée comme une technologie "power to gas", où l'on forme du dihydrogène (processus très consommateur en électricité) avec les surplus du renouvelable, et où l'on transforme ce dihydrogène en électricité en cas de besoin, lorsque la demande dépasse l'offre de production.

L'hydrogène bénéficie d'une attraction financière majeure aujourd'hui. Des fonds privés comme Ardian et Hy24 investissent plusieurs milliards d'euros dans le domaine<sup>12</sup>, et les États-Unis de Joe Biden subventionnent fortement la fabrication d'hydrogène dit vert, notamment *via* le plan *Inflation Reduction Act*. L'IFPEN mène des recherches sur la valorisation du CO2 capté en précombustion sous la forme d'hydrogène dit bleu. Les innovations dans ce domaine vont donc se multiplier, et la plupart des acteurs reconnaissent la place future de l'hydrogène dans le paysage énergétique français. RTE précise même que puisque la PPE (Programmation Pluriannuelle de l'Énergie) s'interdit d'utiliser du thermique à flamme avec stockage du carbone émis (CCS, pour "*carbon capture and storage*"), il faudra déployer de nouvelles centrales thermiques à hydrogène (ou gaz vert) si l'on souhaite

<sup>11</sup> Roland and Céréme, "Scénario Alternatif Aux 'Futurs Énergétiques 2050' de RTE : Le Rapport Roland Berger."

<sup>12</sup> Nicolas Rauline, "Un Fonds de 2 Milliards d'euros Pour Faire Décoller l'hydrogène Vert," *Les Echos*, 2022, <https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/un-fonds-de-2-milliards-deuros-pour-faire-decoller-lhydrogene-vert-1867508>.

bénéficier d'une énergie pilotable décarbonée. NégaWatt n'a même aucune inquiétude quant à l'émergence de nouvelles technologies hydrogènes.

“Même si [la solution de power to gas] n'est pas encore mûre aujourd'hui, il y a beaucoup de prototypes ; donc la question est plus de savoir laquelle aboutira, plutôt que de savoir s'il y en a une qui va aboutir” Un porte-parole de négaWatt.

Documents by year

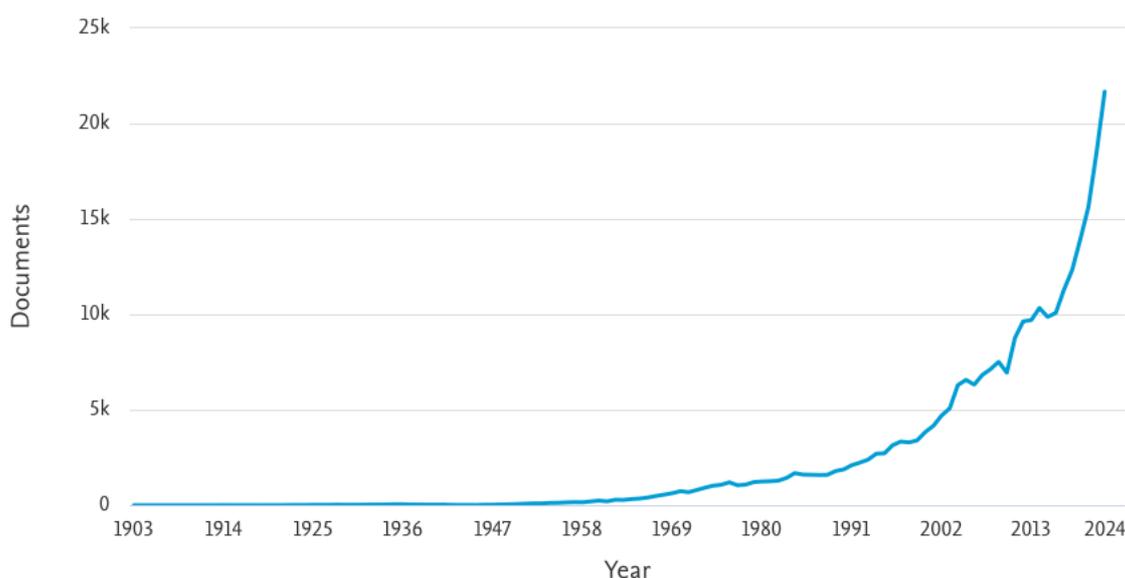


Figure n°2 : Évolution du nombre d'articles contenant "hydrogen energy". Données obtenues avec l'outil Scopus.

Cependant, d'autres acteurs tempèrent cet optimisme en soulevant des questions techniques, dont celle de l'échelle des infrastructures à déployer. Pour RTE, "il faut des capacités de stockage et de transport adaptées", en particulier aux plus gros écarts offre/demande. L'employé de l'IFPEN interrogé défend la place de choix des transporteurs gaziers historiques, comme Total Energies, dont l'expertise et le savoir-faire doivent être valorisées pour perdre moins de temps et d'argent, mais, en entretien, RTE questionne la capacité à injecter de l'hydrogène dans les réseaux de méthane existants. Il existe par ailleurs une incertitude sur la flexibilité du vecteur hydrogène, notamment liée aux technologies d'électrolyseur dont la rentabilité est également questionnée. Pour le Céréomé, le gaz vert est une technologie au coût de production incertain et déployer des centrales thermiques à gaz vert conduira, dès que ce gaz manquera, à utiliser du gaz naturel et à émettre plus de CO<sub>2</sub> que ce n'est le cas aujourd'hui.

En se basant sur ces différentes observations, la place de l'hydrogène dans le futur paysage énergétique français n'est pas exactement quantifiable bien que celle-ci devrait être conséquente. D'importants investissements économiques seront nécessaires pour en clarifier les modalités de production et d'emploi. L'hydrogène est donc aujourd'hui un pari économique et technologique ambitieux mais attirant pour de nombreux acteurs, nouveaux venus ou industriels historiques. Les scénarios de RTE donnent une idée de l'élasticité du déploiement des nouvelles centrales thermiques décarbonées selon le mix choisi : de 0 dans le scénario N03 (volontariste en nucléaire) à 29 GW de capacité en nouveau thermique décarboné pour le 100 % renouvelable en 2050 ! Or, cette solution semble moins flexible à déployer que le

stockage batterie (malheureusement, elles ne s'adressent pas aux mêmes durées de flexibilité et les acteurs ne leur reconnaissent donc aucune interchangeabilité...).

## ■ Quel dimensionnement optimal pour le réseau électrique?

Si le 100 % renouvelable entraîne un vif débat sur l'adaptation de l'appareil de production d'électricité, il donne également naissance à une question que les acteurs appellent le dimensionnement optimal du réseau. Doit-on adapter entièrement le réseau aux nouveaux moyens de production ? Est-ce faisable et souhaitable ? Est-ce que cela dépend de la part de renouvelable dans le mix électrique ?

D'abord, la capacité de transit du réseau (capacité du réseau à "transporter" l'énergie électrique) est limitée et varie selon les saisons. D'autre part, la production des énergies renouvelables étant fortement variable, elle n'atteint sa capacité de production maximale que quelques heures par an. Dimensionner le réseau en fonction de cette capacité maximale afin de ne jamais évacuer une surproduction implique des coûts importants d'adaptation. C'est ce qui fait la particularité des études "à la pointe", comme les mène le Céréme, en production comme en consommation. On peut cependant faire le choix de volontairement sous-dimensionner le réseau par rapport à la capacité de production maximale et d'évacuer la surproduction du parc renouvelable si l'offre dépasse la demande. Cette surproduction peut alors être redirigée vers des pays voisins, ou même être volontairement perdue. C'est un argument de choix des développeurs d'EnR<sup>13</sup> qui poussent via les syndicats, lobbys et associations pour une réglementation et des mécanismes économiques plus favorables à l'écrêtement. Du côté des acteurs du réseau, accepter de faire de l'écrêtement (perdre de l'énergie gratuite) quelques heures par an peut toutefois représenter un arbitrage économique favorable. Cela permet en effet de conserver le réseau de transport existant ou d'en limiter la modification. RTE considère donc qu'il est possible d'arbitrer de manière satisfaisante les écrêtements pour limiter l'adaptation du réseau et la rendre faisable.

Néanmoins, l'installation de parcs éoliens ou photovoltaïques de forte puissance nécessite quoi qu'il arrive un raccordement au réseau haute tension (HTA) ainsi que la création ou le renforcement de postes source (un des derniers éléments entre le client et le réseau électrique). De plus, afin de limiter les fluctuations temporelles de l'intermittence des énergies renouvelables, il peut être intéressant de connecter des sources éloignées sur un même réseau afin d'obtenir un effet de foisonnement : lorsque des sources d'énergies nombreuses et variées sont interconnectées par un vaste réseau électrique, les variations à l'échelle du réseau sont statistiquement réduites. Pour les EnR, cela leur permet par exemple de limiter la dépendance à la météo ("il n'y a pas toujours du vent ou du soleil partout, mais il y en a toujours quelque part"). NégaWatt assure que le foisonnement permet le passage au 100 % renouvelable. Contrairement à la presse spécialisée qui échange durement sur le sujet, la littérature scientifique est peu fournie (en particulier en revues d'articles traitant le foisonnement). Le foisonnement serait faible pour le solaire en Europe (d'abord du fait du même cycle jour/nuit sur le continent) et serait relatif pour l'éolien (les régimes de vent sont différents entre le Nord et le Sud de l'Europe, mais quasi-toute l'Europe de l'Ouest est soumise

<sup>13</sup> Joël Spaes, "L'écrêtement/Raccordement Intelligent Sur La Table Du Conseil Supérieur de l'énergie," *Pv Magazine*, 2023, <https://www.pv-magazine.fr/2020/04/17/lecretement-raccordement-intelligent-sur-la-table-du-conseil-superieur-de-lenergie/>.

au même régime de vent<sup>14</sup>). Après une étude sur 12 mois et une dizaine de parcs éoliens continentaux, le Céréme est encore plus catégorique : “Il n’y a pas de réalité au foisonnement sur la plaque européenne”. L’employé de RTE auditionné reconnaît que l’entreprise subit des accusations de parti-pris sur le développement du réseau sous prétexte de foisonnement, notamment via les interconnexions, puisque l’entreprise est gestionnaire du réseau.

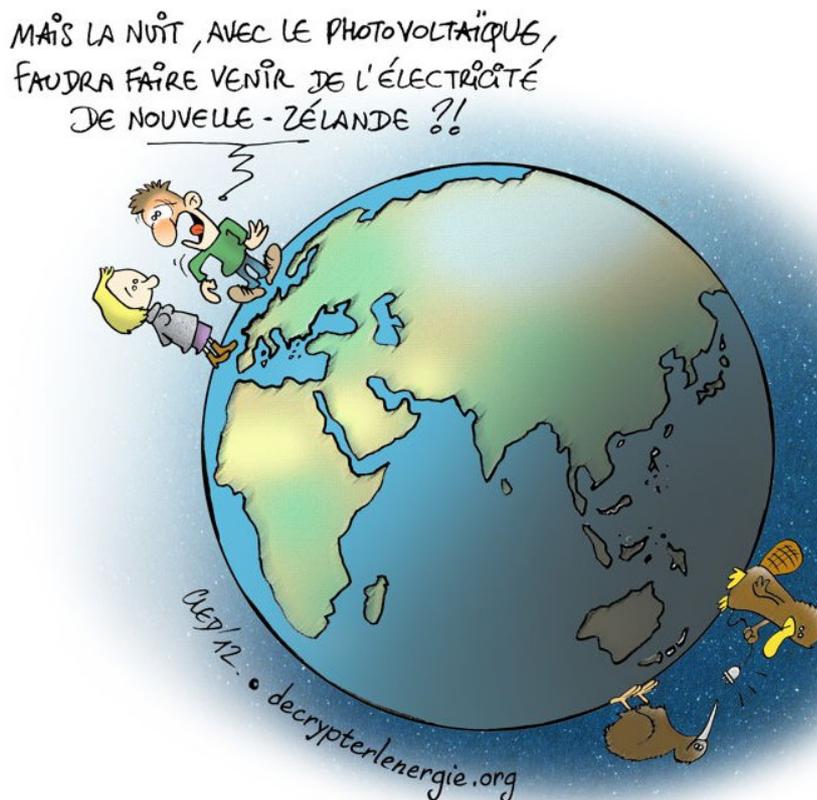


Figure n°3 : Illustration du foisonnement du réseau<sup>15</sup>.

Pour ERDF, le seul moyen d’éviter les modifications d’infrastructures réseau est de privilégier un raccordement local au réseau basse tension (surtout utilisé pour les usages domestiques)<sup>16</sup>. La clé d’un tel raccordement est la proximité entre le lieu de production et de consommation. Le rapport du CLER sur les villes 100 % d’énergies renouvelables<sup>17</sup> présente de nombreuses villes, dont Barcelone, qui ont su relever ce défi.

Les coûts globaux des scénarios énergétiques ont été quantifiés dans le rapport Futurs Énergétiques 2050 de RTE et sont présentés dans le graphique ci-dessous. Ils comprennent une modification en profondeur du réseau, y compris haute tension. Les scénarios M0, M1 et M23 qui incluent une plus grande proportion d’énergies renouvelables dans le mix électrique

<sup>14</sup> Jacques Percebois and Stanislas Pommeret, “Les Interconnexions Transnationales Fragilisent-Elles Les Réseaux Nationaux ? Application Au Cas de La France.,” *La Revue de l’Énergie*, 2016, <https://www.larevuedelenergie.com/wp-content/uploads/2018/09/Interconnexions-transnationales-fragilisent-elles-reseaux-nationaux.pdf>.

<sup>15</sup> “Les Énergies Renouvelables Sont-Elles Intermittentes ?,” Décrypter l’énergie (blog), 2023, <https://decrypterlenergie.org/les-energies-renouvelables-sont-elles-intermittentes-2>.

<sup>16</sup> François Blanquet, “Impact de l’intégration des EnR sur les réseaux de distribution d’électricité” (Mines ParisTech, 2013).

<sup>17</sup> CLER Réseau Pour La Transition Énergétique, Energy Cities, and Réseau Action Climat, “Vers Des Villes 100% Énergies Renouvelables et Maîtrisant Leur Consommation,” 2017, <https://reseauactionclimat.org/wp-content/uploads/2017/04/Vers-des-villes-100-e%CC%81nergies-renouvelables-.pdf>.

impliquent des coûts du réseau de transport, de distribution et des ouvrages de raccordements supérieurs aux scénarios N1, N2 et N03, reposant sur la prolongation du nucléaire existant et l'ouverture de nouveaux réacteurs.

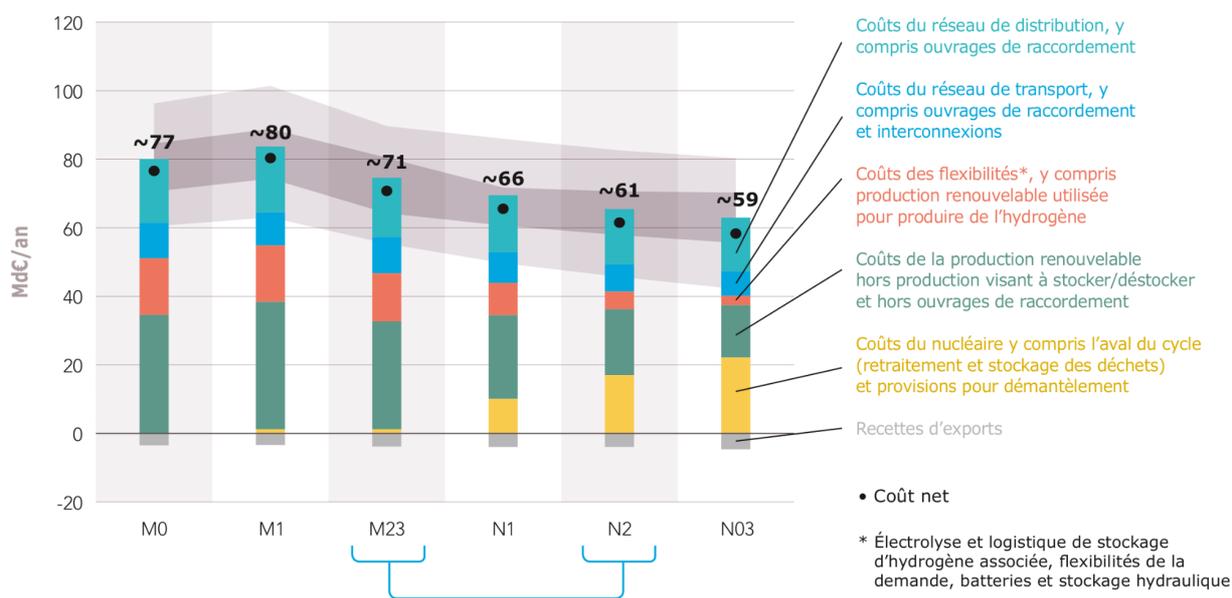


Figure 4 : Coûts complets annualisés des scénarios RTE à l'horizon 2060 <sup>18</sup>.

## ■ Qu'en est-il de la prolongation du nucléaire historique?

Pour ceux qui pensent que la résolution de ce problème d'adaptation du système et du réseau à l'intermittence renouvelable est impossible, comme le Céréme, le charbon et le gaz ne doivent pas être remplacés par des EnR, mais par de l'énergie nucléaire. Plusieurs scénarios de RTE étudient des mix électriques comportant une part non négligeable de production nucléaire, mais cette part reste limitée à 50 %, pour des enjeux de prolongation et de renouvellement du parc nucléaire français qui ont été rapportés par les acteurs du secteur et que nous détaillerons plus loin. L'employé de RTE spécifie bien que ces contraintes ont été communiquées par les acteurs et témoigne de la vision du secteur à la date de la rédaction du rapport. Le Céréme questionne pourquoi des scénarios à plus de 50 % de nucléaire n'ont tout de même pas été simulés et présentés - puisque selon eux, la limite des 50 % n'existe pas. Le Céréme se fixe d'ailleurs comme objectif de revenir à 75 % de nucléaire dans le mix, en complétant par de l'hydraulique (et une très faible part d'éolien et de gaz). RTE répond que les équipes ont effectivement simulé de tels scénarios dans les premières versions du rapport, mais les ont abandonnées quand la faisabilité technique a été jugée impossible. Par ailleurs, ces scénarios donnaient des résultats assez similaires à ce que nous connaissons déjà aujourd'hui avec notre mix existant majoritairement nucléaire.

Le problème soulevé par les détracteurs actuels du nucléaire est l'approche de la date limite d'un grand nombre de réacteurs : c'est l'effet falaise. Pour assurer la sécurité de l'approvisionnement énergétique, la France, suivant l'exemple des États-Unis, a décidé de prolonger la durée de fonctionnement des centrales nucléaires à 50 ans d'abord et peut-être

<sup>18</sup> RTE, "Futurs Énergétiques 2050 - Résumé Complet."

à 60 ans, si certaines conditions sont vérifiées. Comme l'a indiqué le Céréme, Le Grand Carénage, programme industriel d'EDF de prolongation de la durée de fonctionnement du parc nucléaire français, représente un défi technologique dont l'objectif est d'étudier l'état actuel des réacteurs pour convaincre l'Agence de Sûreté Nucléaire (ASN) du bon fonctionnement des réacteurs. C'est près de 50 milliards d'euros qui seront injectés pour permettre aux centrales nucléaires de fournir au moins 10 ans d'électricité décarbonée supplémentaire.

Néanmoins, selon négaWatt la prolongation du parc nucléaire ne fait que retarder la fermeture du parc, qui est souhaitable et inévitable. Selon l'association, cette prolongation d'un parc vieillissant est bien trop dangereuse. négaWatt n'accorde que peu de confiance à l'IRSN, l'expertise technique de l'ASN, qui privilégierait parfois la sécurité de l'approvisionnement à la sûreté nucléaire malgré ce qu'annoncent publiquement les acteurs du secteur.

## ■ Faut-il préférer la construction de nouveaux réacteurs ?

Une question émerge alors : n'est-il pas plus intéressant de lancer la construction de nouveaux réacteurs plutôt que d'essayer à tout prix de prolonger les anciens ?

Dans les modélisations réalisées par RTE, on observe que certains scénarios prennent en compte la relance d'un nouveau programme de construction de centrales nucléaires. Ce programme de relance a été pour la première fois annoncé par le président de la République Emmanuel Macron lors des annonces de Belfort le 10 février 2022. Actuellement, un débat public est organisé du mois d'octobre 2022 au mois de février 2023 concernant la pertinence de la relance du nucléaire, plus précisément du projet EPR 2 (qui consiste en la construction de 6 paires d'EPR 2, des réacteurs de troisième génération français).

RTE rappelle cependant que, selon les réunions menées avec les acteurs de la filière, la France n'est pas en mesure de construire des nouveaux réacteurs pour assurer 70 % du mix électrique, qui est la part actuelle du nucléaire dans le mix électrique français. À nouveau, le plafond de verre de 50 % de nucléaire est atteint. Par ailleurs, lorsque l'on compare les scénarios énergétiques de RTE avec une relance du nucléaire et sans relance du nucléaire, on s'aperçoit que les coûts des deux scénarios sont similaires. RTE ne se prononce donc pas en faveur d'une relance complète du nucléaire français.

De la même manière, négaWatt émet de nombreuses réserves quant à la capacité de la filière de relancer ce programme nucléaire. Les retards accumulés du chantier de Flamanville font douter quant à la capacité de la filière nucléaire à construire rapidement et de manière compétitive ces nouveaux réacteurs. Les coûts de l'investissement, la prise en compte des risques seraient mal calculés en faveur du nucléaire. Les calculs de négaWatt obtiennent à l'inverse un défaut de compétitivité du nucléaire face aux EnR. EDF a annoncé des innovations et simplifications technologiques qui, selon eux, devraient permettre de retrouver un rythme de construction bien plus court. Mais ces innovations ne suffisent pas à convaincre l'association, qui ne croit pas en la relance d'un programme nucléaire français, mais qui, d'abord, ne le souhaite pas, pour des raisons de géopolitique, de gestion des déchets et de sûreté et de modèle de société.

Les modélisations économiques des membres du Céréme diffèrent fortement, puisqu'ils contestent l'hypothèse de RTE et négaWatt selon laquelle le coût de l'éolien et du

solaire vont continuer à baisser. Ceux-ci ont réalisé une étude complète sur les coûts de production. Quand tout est mis bout à bout, et en prenant en compte la sensibilité des différents coûts, le programme nucléaire massif donne un prix beaucoup plus compétitif que celui de l'éolien terrestre ou offshore, dont le coût explose en partie à cause de l'adaptation du réseau à l'intermittence renouvelable. Il deviendrait alors intéressant de relancer un programme nucléaire complet.

## ■ Conclusion sur les coûts et la faisabilité technique

Alors que les nœuds de la controverse sur le mix électrique français pour 2050 présentés ici semblent être les moins idéologiques et les plus factuels, les acteurs de la controverse débattent et arrivent déjà à des désaccords drastiques sur les hypothèses et les conclusions de leurs modèles.

Plusieurs lignes se dessinent. NégaWatt, aux côtés des développeurs d'EnR, estime la transition 100 % renouvelable possible et souhaitable, tandis qu'à l'inverse, le Céréme dénonce la mise en péril de notre système électrique et de ses fondements. Au centre, certains acteurs n'ont pas vocation à prendre parti et souhaitent analyser chaque possibilité : aussi, RTE dresse l'ensemble des mix possibles pour la France et en arrive à la conclusion que, si la neutralité carbone est atteignable à un coût maîtrisable quel que soit le scénario choisi par les Français et leurs représentants, il y a urgence à se mobiliser. Pour nuancer cette objectivité annoncée, le Céréme reproche toutefois à RTE de ne pas considérer tous les scénarios possibles pour la France (en remettant en question le plafond de verre de 50 % de nucléaire en 2050) et parle d'un possible "muselage" des industriels de la filière nucléaire avant 2022, quand l'opinion publique était particulièrement opposée au nucléaire.

Le rapport Futurs énergétiques 2050 de RTE nous paraît tout de même avoir entraîné un changement majeur de la controverse sur le 100% renouvelable et plus généralement aux débats sur le mix électrique et énergétique à adopter : il les a structurés, et on remarque que bon nombre d'acteurs, pour apparaître comme sérieux et en réponse au rapport de RTE, sont obligés de créer des scénarios complets et comparables à ceux du rapport.

## ■ Sobriété énergétique et changement des modes de consommation

### ■ Quelle place donner à la sobriété ?

Dans l'écriture de leurs scénarios, les différents acteurs font face à un défi primordial : réussir à prédire le profil de la consommation énergétique future. Ainsi, les valeurs retenues pour la consommation finale d'électricité en 2050 varient fortement selon les scénarios : RTE étudie une fourchette de valeurs allant de 555 TWh à 754 TWh, tandis que le Céréme monte aussi haut que 900 TWh et négaWatt descend aussi bas que 354 TWh. Se posent également des questions sur son profil journalier (à quelle heure de la journée consommera-t-on ?) et saisonnier (consommera-t-on plus en hiver ?). Dans cette partie, nous traiterons parfois pêle-mêle les questions de sobriété et de changement des modes de consommation.

La sobriété énergétique est l'un des leviers permettant de diminuer la consommation d'énergie. Cependant, les avis des acteurs auditionnés diffèrent sur cette question. D'un côté, RTE a collaboré avec négaWatt afin d'élaborer son scénario le plus sobre en consommation. Toutefois, comme le laisse deviner la fourchette précédente, le scénario de sobriété de RTE n'est que l'une des 7 trajectoires de consommation étudiée par l'entreprise. RTE, dans sa volonté de se placer comme un expert technique objectif au service de l'Etat, ne se prononce pas en faveur de l'une ou de l'autre de ces trajectoires, bien que la synthèse de son rapport statue : "Agir sur la consommation grâce à l'efficacité énergétique, voire la sobriété est indispensable pour atteindre les objectifs climatiques"<sup>19</sup>. À l'inverse, négaWatt considère et utilise la sobriété comme un levier de soutenabilité fort, c'est-à-dire que l'association ne conçoit son scénario de mix énergétique qu'à partir d'une transformation forte des modes de consommation et de l'ensemble des usages à la baisse. NégaWatt ne souhaite par ailleurs pas limiter la sobriété à l'énergie, mais l'étendre également à l'ensemble des ressources qui peuvent être consommées (eau, biodiversité, sols, etc.)

"Ça fait 20 ans que négaWatt place la sobriété au cœur de sa démarche"  
Porte-parole de négaWatt.

De l'autre côté, comme le laisse entendre la valeur de 900 TWh qu'il retient, le Céréme ne croit pas en cette sobriété. Le Céréme se base sur les chiffres de la consommation calculés par l'Académie des Sciences et celle des Technologies tout en admettant qu'il est difficile de prédire la consommation exacte à l'horizon 2050. Ce qui est sûr, pour les représentants du Céréme, c'est que l'avantage compétitif de la France passera par l'abondance d'une énergie bon marché disponible en permanence, et que la sobriété tuerait notre compétitivité. Il est donc inutile de perdre du temps à discuter la précision des valeurs retenues (700, 800, 900 TWh...) mais il sera bel et bien impossible de sortir des énergies fossiles et maintenir notre économie, voire la développer, sans avoir recours à l'électrification : le Céréme ne croit donc pas en la sobriété énergétique et encore moins en la sobriété électrique.

## ■ Sobriété ou progrès technologique ?

Il apparaît plus généralement que l'atteinte de la neutralité carbone repose sur un arbitrage entre le recours à des solutions technologiques, permettant de produire autant mais en maîtrisant les rejets de CO<sub>2</sub>, et la diminution massive de la production et de la consommation à l'échelle mondiale, nationale mais aussi individuelle - en bref, de la sobriété.

La diminution de la consommation énergétique atténue assurément les problèmes que pose un mix 100 % renouvelable puisqu'elle diminue les besoins en capacités supplémentaires de production. Une sobriété ciblée sur les écarts de production et de consommation participe également à la résolution du problème de non-pilotabilité et d'intermittence des énergies renouvelables. Toutefois, comme dit précédemment, négaWatt ne conçoit pas la sobriété comme une réponse à un changement de système énergétique mais comme une transformation fondamentalement souhaitable. C'est à long terme, dans une société qui aurait déjà modifié ses usages, que le nucléaire apparaîtrait comme superflu et le mix 100 % renouvelable comme accessible.

<sup>19</sup> RTE.

Diverses solutions techniques peuvent également être étudiées : que ce soit sur la consommation (efficacité énergétique, solutions d'effacement et de lissage de la demande) ou la production (interconnexions, stockage, moyens de production pilotables décarbonés). Ces moyens sont notamment étudiés par RTE, et ils varient en fonction de chaque scénario et chaque trajectoire de consommation prise pour hypothèse, et sont naturellement très sollicités dans les scénarios 100 % renouvelables à forte consommation. De la même manière, l'expert de l'IFPEN auditionné présente la complémentarité de l'ensemble des solutions qui s'offrent à nous, y compris le nucléaire dans le cas français, et le CCS sur les centrales thermiques classiques. Aussi, si l'on décide collectivement de se passer de l'une de ces solutions, il faudra redoubler d'efforts sur les autres. Pour le Céréme, la solution technologique existe déjà ; c'est le nucléaire, et il faut se méfier des leurres techno-optimistes qui ont encore beaucoup de chemin à faire avant d'être déployés à grande échelle (tant du point de vue technique que pour l'acceptabilité).

“Les Français vont-ils accepter d'avoir des horaires pour charger leurs batteries ? Soit on est en pays soviétisé soit on reste en démocratie.” Administrateur du Céréme, à propos du *vehicle-to-grid*<sup>20</sup>

“Pour qu'ils acceptent de recharger le réseau en retour, il faudra se lever un peu tôt” Administrateur du Céréme, à propos du *vehicle-to-grid*

## ■ Incertitudes sociales et économiques

Un plan ambitieux de sobriété énergétique et de changement des modes de consommation n'est cependant pas sans risques. NégaWatt, dont le scénario est celui qui repose le plus sur cette transformation, le reconnaît. Pour eux, la sobriété souffre d'une image négative sous au moins trois aspects. Du point de vue psychologique, la sobriété est vue comme une perte de confort et un effort subi. Du point de vue social, elle est une mesure contre le pouvoir d'achat, contre la liberté de choix et de consommation, en résumé contre le mode de vie moderne. Enfin, d'un point de vue économique, la sobriété est synonyme de décroissance et elle va donc contre le maintien du modèle social. C'est effectivement une partie des critiques adressées par les acteurs du Céréme lorsque nous les questionnons sur l'effacement, qui est une forme de changement des modes de consommation.

“[L'effacement], appelons les choses par leur nom, ça s'appelle des coupures [...] C'est tout de même un comportement de pays tiers-mondialiste” Administrateur du Céréme.

Aborder la controverse par le prisme de la sobriété a cependant le mérite de soulever la question épineuse de la durabilité et de la souhaitabilité de nos modes de vie. NégaWatt nous questionne : voulons-nous à tout prix conserver l'abondance énergétique dont nous disposons aujourd'hui ? Voulons-nous persévérer dans une croissance adossée au PIB qui est pourtant néfaste pour les hommes et l'environnement ? Ou allons-nous faire l'effort de déconstruire nos indicateurs de performance, consommer moins, mais consommer mieux ? Pour d'autres, en particulier ceux favorables au maintien d'énergies pilotables comme le

<sup>20</sup> Le *vehicle-to-grid* (V2G) est une technologie qui permet d'utiliser les batteries d'un parc de véhicules électriques comme une solution d'équilibrage du réseau (analogue au stockage sur batterie, hormis qu'ici un autre utilisateur de la batterie entre en jeu).

nucléaire, la réponse est claire : le mode de vie et l'excellence à la française ne sont pas négociables. La dimension idéologique, voire philosophique, de cette question explique en partie l'imperméabilité des idées et le dialogue difficile entre les deux extrêmes constatés dans notre controverse. Le thème de la sobriété et du changement des modes de consommation a toutefois le mérite d'ouvrir le débat à des questions plus larges que les spécificités techniques et économiques.

## ■ Comment prédire l'efficacité de la sobriété ?

Il est complexe de prédire les efforts nécessaires et les effets escomptés d'une politique de sobriété et de changement des modes de consommation. NégaWatt reconnaît là qu'il s'agit d'un défi auquel aucune société ne s'est encore affrontée : refuser volontairement à sa croissance. Le Shift Project, l'ADEME et négaWatt s'efforcent donc de construire des scénarios de mise en place de la sobriété à l'échelle de la société française et de quantifier leurs effets<sup>21 22 23</sup>. Mais, de leur propre aveu, ces différents organismes se retrouvent confrontés à un manque d'éléments documentaires (par exemple, sur la construction de pistes cyclables) comparé à ceux nécessaires pour des scénarios plus traditionnels (par exemple, sur l'efficacité des véhicules thermiques) et à l'absence de représentation et d'imaginaire existants à ce sujet. Toutefois, l'expert de négaWatt auditionné estime que le travail de longue haleine effectué par l'association commence à porter ses fruits.

## ■ Conclusion sur la sobriété

La sobriété est, au moins en théorie, un levier puissant pour modifier la consommation et, ainsi, limiter ou éliminer certains problèmes sur l'équilibre production-consommation qu'un mix 100% renouvelable pourrait soulever, comme l'intermittence et les capacités à déployer. Toutefois, les acteurs ne se mettent pas d'accord sur le réalisme, en faisabilité comme en souhaitabilité, de l'hypothèse de sobriété. Si le Céréme n'y croit presque pas, négaWatt place à l'inverse l'hypothèse de la sobriété au centre de son scénario, de telle sorte que les études des deux organismes ne sont pas comparables tellement leurs hypothèses de départ n'ont aucun point commun. Le débat sur la sobriété en devient plus idéologique que scientifique, et cela déteint sur le reste de la controverse. D'autres acteurs ont bien sûr des positions moins tranchées : comme attendu, RTE ne prend pas parti sur ce sujet, mais il arrive également que des acteurs souhaitent coupler relance du nucléaire et sobriété (Jean-Marc Jancovici en est l'exemple) ou 100% renouvelable et forte croissance (c'est le cas de certains scénarios de RTE, mais ce sont assurément les plus risqués).

<sup>21</sup> The Shift Project, *Plan de Transformation de l'économie Française*, 2022, <https://ilnousfautunplan.fr>.

<sup>22</sup> ADEME, "Transition(s) 2050 Choisir Maintenant Agir Pour Le Climat - Résumé Exécutif," 2021, <https://transitions2050.ademe.fr>.

<sup>23</sup> négaWatt, "Scénario NégaWatt 2022: La Transition Énergétique Au Cœur d'une Transition Sociétale," 2022, <https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2022>.

## ■ Qu'en est-il de l'acceptabilité de ces différentes technologies ?

### ■ Occupation du sol et influence sur la biodiversité des énergies renouvelables

Un des enjeux importants est également l'acceptabilité de ces différentes technologies. En effet, les scénarios prévoyant une grande part d'énergies renouvelables ont nécessairement des conséquences sur l'aménagement du territoire dues à la forte occupation au sol de ces installations, ce qui soulève la question de l'acceptabilité.

Considérons le cas de négaWatt, particulièrement concerné par cette thématique, puisque leur scénario (100% renouvelable) repose sur un déploiement très important des éoliennes terrestres et maritimes. Première source d'énergie en 2050, la production éolienne terrestre et en mer croît de façon soutenue dans leur scénario. En 2050, le parc terrestre est multiplié par 2,1 par rapport à 2020, pour atteindre un total d'environ 19 000 éoliennes.

**Comparaison des principales sources de production d'énergies renouvelables en 2019 et 2050 dans le scénario négaWatt.**

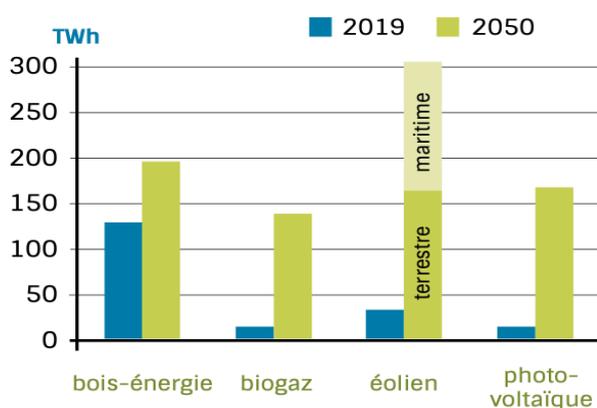


Figure 5 : Sources de production électriques dans le scénario négaWatt. <https://negawatt.org/IMG/pdf/synthese-scenario-negawatt-2022.pdf>

Pour ce qui est des scénarios de RTE, la part d'éolienne dans le mix électrique varie entre 134 GW installé pour le scénario 100 % renouvelable et 65 GW installé pour le scénario 50 % nucléaire. La majeure partie des autres acteurs prévoient eux aussi de devoir recourir de plus en plus aux capacités éoliennes pour faire face à la baisse du nucléaire dans le mix.

Nous observons que des contestations naissent face à ce déploiement massif. Le Cérémié, mentionne le problème que cela pose vis-à-vis de la biodiversité en expliquant que

les éoliennes constituent une source de nuisances pour les chauves-souris qui mourraient à cause des pâles d'éoliennes.

D'autre part, de nombreuses populations sont réticentes quant au développement des champs éoliens. Ce sont souvent des associations de protection du patrimoine et de l'environnement qui déposent des recours ce qui ralentit énormément les projets de construction d'éoliennes terrestres et maritimes.

Le contentieux contre les projets d'éoliennes en mer relève, depuis la loi d'accélération et de simplification de l'action publique du 7 décembre 2020 (art. 55), de la compétence du Conseil d'État, et de lui seul. L'objectif du législateur est d'accélérer ce type de projets en réduisant le délai de traitement des recours juridiques.

Un problème similaire réside dans le développement des champs de panneaux photovoltaïques. De nombreuses associations locales s'y opposent et ralentissent ces projets d'énergies renouvelables.

Néanmoins, la nouvelle loi sur l'accélération de la production d'énergies renouvelables adoptée par l'Assemblée Nationale le 10 janvier 2023 entend faciliter l'installation d'énergies renouvelables pour permettre de rattraper le retard pris dans ce domaine. Ainsi, il faudra installer des panneaux solaires dans les parkings extérieurs de plus de 1500 mètres carrés. Elle permettra aussi d'installer des panneaux solaires sur les friches en bord de mer. Cette loi a aussi pour but d'encadrer les projets d'agri-voltaïsme. C'est à dire l'implémentation de panneaux solaires sur des champs agricoles. Cet aspect de la loi permettra sans doute de sortir des recours et des polémiques autour des champs solaires dans les zones agricoles.

## ■ Nucléaire, accidents et déchets

Quant au nucléaire, l'acceptabilité de cette production d'énergie a toujours été au cœur du débat public et les réticences sont historiquement liées à la gestion des déchets et aux risques d'accidents. NégaWatt développe particulièrement les trois différents axes de réticences. Selon eux, la gestion des déchets pose un problème éthique. Le projet Cigéo d'enfouissement souterrain de déchets hautement radioactifs ne constitue pas pour eux une solution pérenne bien qu'ils soient conscients que l'industrie ne peut actuellement en proposer de meilleure. Cette solution de stockage géologique des déchets radioactifs les interpelle sur le transfert d'insécurité que cela représente.

L'autre grand sujet qui revient régulièrement dans le débat est celui du risque nucléaire. Il s'agit à la fois du risque d'accident nucléaire et de prolifération. D'après négaWatt, un accident nucléaire ce n'est pas seulement un nombre de victimes mais aussi une population de taille conséquente qui voit sa vie bouleversée car son environnement a été dégradé lors d'un accident nucléaire, comme cela a été le cas lors de l'accident de Tchernobyl et Fukushima. Selon eux, la guerre en Ukraine nous permet de mieux appréhender le risque de prolifération qui représente un danger pour l'humanité. Le déploiement du nucléaire civil fait croître ce risque de prolifération. Plus il y a d'armement nucléaire plus le risque de conflit nucléaire est grand. Et selon eux, le risque d'un tel conflit est d'égal importance à celui lié au changement climatique.

En conclusion, l'acceptabilité des technologies d'énergies décarbonées, renouvelables et nucléaire, est un sujet complexe qui dépend de nombreux facteurs. Pour ce

qui est du renouvelable, l'aménagement du territoire et l'impact sur la biodiversité sont des préoccupations majeures pour les populations locales ainsi que pour certains acteurs de la controverse. Les contestations des populations vis-à-vis de l'éolien ont causé beaucoup de ralentissement dans la mise en place des projets d'installation. Ce problème risque de s'accroître dans le temps au vu de l'installation massive prévue de ces installations, surtout pour les acteurs qui envisagent des déploiements massifs dans leurs scénarios. Le photovoltaïque est contesté lui aussi pour des raisons similaires, mais bien moins comparé à l'éolien.

De la même manière, le développement de l'énergie nucléaire est également source de préoccupation chez les populations ainsi que chez certains acteurs. Les arguments avancés concernent les déchets radioactifs que le nucléaire génère et les risques pour la sécurité liés aux accidents. Ces réticences restent encore au cœur du débat public mais on notera tout de même un avancement de l'acceptation de l'opinion publique en faveur de l'énergie nucléaire par rapport à il y a quelques années où la majeure partie de l'opinion publique se positionnait radicalement contre. Aujourd'hui le débat est bien plus partagé.

## ■ Les enjeux de souveraineté de la transition énergétique

## ■ Enjeu historique et contemporain

Historiquement, les enjeux de souveraineté étaient prépondérants dans la décision de développement du parc nucléaire puisqu'à la suite de la Seconde Guerre mondiale, la maîtrise du nucléaire était au cœur de la politique d'indépendance énergétique nationale voulue par De Gaulle. La crise énergétique actuelle pose au cœur du débat la nécessité pour l'Europe et la France d'assurer leur indépendance énergétique, et par extension leur souveraineté. La dépendance énergétique est actuellement de 55 % en France <sup>24</sup>. Une transition 100 % renouvelable permettrait-elle d'assurer une meilleure souveraineté, notamment par rapport à un scénario comptant aussi la production de nucléaire ? N'y a-t-il pas un risque de substituer une dépendance par une autre ? La souveraineté et l'indépendance énergétiques sont une forte préoccupation : l'Assemblée nationale tient actuellement une commission d'enquête qui s'attache aux causes de la perte de souveraineté provoquée notamment par les problèmes de production et d'approvisionnement électrique en France.

## ■ Échanges électriques : avantage ou dépendance ?

En 2021, la France a importé 11 % de sa consommation d'électricité et en a exporté 10 %. Les objectifs d'interconnexion à horizon 2030 en Europe incluent le renforcement de la coopération entre les pays de l'Union européenne pour gérer de manière plus efficace l'approvisionnement en électricité. L'objectif pour la France est de doubler sa capacité d'interconnexion en 15 ans, passant d'une quinzaine de GW aujourd'hui à une trentaine à horizon 2035. Ces interconnexions sont nécessaires pour assurer de la flexibilité dans le système. Au-delà des bénéfices technico-économiques, le développement des interconnexions à long terme induit une dépendance croissante du système électrique français aux importations.

Les acteurs ne sont pas en accord sur la place que doivent prendre ces interconnexions pour répondre aux besoins électriques français, notamment en heure de pointe. En effet, d'après le rapport de RTE, cette dépendance aux pays voisins sera réciproque et signifie une maîtrise partagée au niveau européen du pilotage du système. RTE souligne que dans une France neutre en carbone, la dépendance aux pays exportateurs d'hydrocarbures disparaît et qu'en contrepartie le système électrique possède une dimension européenne et un certain niveau de "co-dépendance" entre pays européens proches. Ce niveau de "co-dépendance" ne fait pas consensus et doit être évité pour certains acteurs. En effet, d'après le scénario alternatif du Céréme <sup>25</sup>, les Futurs énergétiques 2050 de RTE ne permettront pas à la France de passer les pointes de consommation de plusieurs jours les plus critiques. Pour le Céréme, on ne peut donc pas raisonnablement compter sur les importations, sauf à la marge. Aussi, compter sur ces interconnexions remet en cause la sécurité d'approvisionnement et donc l'indépendance énergétique.

Dans le scénario des Voix du nucléaire <sup>26</sup>, le système électrique modélisé doit être capable de fonctionner en configuration « France autonome ». Cela implique de garantir par

<sup>24</sup> Ministère de la transition écologique, "Bilan Énergétique de La France En 2021 - Données Provisoires," 2022, [https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2022-04/datalab\\_essentiel\\_275\\_bilan\\_energetique\\_provisoire\\_2021\\_avril2022.pdf](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2022-04/datalab_essentiel_275_bilan_energetique_provisoire_2021_avril2022.pdf).

<sup>25</sup> Roland and Céréme, "Scénario Alternatif Aux 'Futurs Énergétiques 2050' de RTE : Le Rapport Roland Berger."

<sup>26</sup> Voix du Nucléaire, "TerraWater."

lui-même sa capacité d’approvisionnement à chaque instant, y compris lors des pics de consommation. Ce choix permet de ne pas dépendre des interconnexions avec les pays voisins et donc de leurs choix énergétiques.

## ■ Matières premières importées

Le développement des énergies renouvelables requiert à la fois des ressources structurelles comme le cuivre, l’aluminium ou l’acier, et d’autres plus spécifiques comme le silicium pour les panneaux photovoltaïques. Les conclusions du projet ANR GENERATE<sup>27</sup>, mené par IFPEN entre 2017 et 2020 expliquent que les technologies de l’éolien demandent du cuivre, néodyme, dysprosium, terbium et les panneaux photovoltaïques du silicium, cuivre, cadmium, indium et du gallium. La croissance de production des EnR à des coûts de plus en plus avantageux entraîne de fait de nouvelles dépendances notamment pour ce qui concerne les matériaux dits « critiques » ou stratégiques. Le modèle met en évidence que le cuivre pourrait être le métal le plus contraint dans la dynamique de transition énergétique.

Le renouvellement éventuel du parc nucléaire implique une extraction de l’uranium. Il faut savoir en effet que l’uranium n’est pas une ressource renouvelable mais limitée dans le temps bien que les stocks à l’échelle mondiale soient très importants. L’uranium est une roche présente sur les cinq continents, notamment en Amérique (Canada, Brésil, États-Unis), en Europe (Ukraine, Russie), en Asie (Kazakhstan, Ouzbékistan, Chine, Mongolie), en Océanie (Australie) et en Afrique (Niger, Namibie, Afrique du Sud). En revanche, l’uranium se recycle et pourrait rentrer dans la catégorie des « énergies recyclables ». Enfin, de nombreuses recherches sont actuellement effectuées pour aboutir à des réacteurs nucléaires de Génération 4 qui seraient capables d’utiliser l’uranium recyclé pour fonctionner et produire de l’électricité. L’adaptation du réseau électrique sera également consommatrice de ressources minérales structurelles (béton, acier, cuivre...).

Les projections de demande sont difficiles à établir étant donné qu’elles dépendent fortement de la trajectoire choisie. Un enjeu fort est la concentration de la production des métaux nécessaires à la transition énergétique : la Chine produit 86 % des terres rares, la République démocratique du Congo 72 % du cobalt (mais monopole du raffinage par la Chine), l’Australie 52 % du lithium... L’Union européenne produit 3 % du volume mondial de métaux et en consomme environ 20 %.

Bien que l’épuisement des ressources soit un enjeu majeur de la transition, le nœud de la controverse quant aux matières premières est lié à la perte de souveraineté, qui dépend de la trajectoire choisie. D’après négaWatt, la dépendance à l’uranium due à une production d’énergie nucléaire est un enjeu géopolitique fort, car la problématique autour du nucléaire a toujours été marginalement énergétique mais surtout géopolitique. La guerre en Ukraine soulève des risques géopolitiques du nucléaire en temps de guerre. Yves Marignac de négaWatt considère ce risque comme rédhibitoire. L’acteur n’identifie pas de risque sur ce sujet pour les énergies renouvelables et affirme qu’une trajectoire 100 % renouvelable, sous réserve de sobriété, est porteuse de souveraineté car elle engendre moins de dépendance technologique, d’utilisation de matériaux rares et de tensions géopolitiques. L’IFPEN rappelle

<sup>27</sup> Agence Nationale de la Recherche, “Géopolitique Des Energies Renouvelables et Analyse Prospective de La Transition Energétique – GENERATE,” 2017, <https://anr.fr/Projet-ANR-17-CE05-0024>.

tout de même que le programme nucléaire a permis d'assurer une souveraineté puisque cela a permis la production d'énergie locale <sup>28</sup>.

RTE arbore une position neutre : l'acteur considère que les risques d'approvisionnement pour l'uranium (pour la production d'énergie nucléaire) sont faibles. Cependant, l'enjeu fort de l'utilisation des matériaux rares dans le cadre de cette transition énergétique est la dépendance géostratégique dans la mesure où la Chine exerce un monopole pour leur extraction et transformation, notamment pour le lithium, le cobalt, le nickel et le silicium. RTE souligne que le scénario de sobriété constitue un levier important pour réduire ces tensions sur l'approvisionnement.

Le débat sous-jacent qui se pose concerne la construction d'une stratégie de sécurité des matières premières, notamment la réouverture, ou non, des mines en Europe. Le discours du vice-président de la Commission européenne <sup>29</sup> à la conférence sur la sécurité des matières premières de septembre 2022 représente les grands axes de la stratégie européenne. L'Europe doit diversifier ses sources d'approvisionnement. Elle doit devenir plus agile et autonome en développant des projets nationaux selon les normes de durabilité les plus élevées, et en finançant les projets stratégiques durables liés aux matières premières. Des projets s'érigent déjà à échelle nationale comme le projet de l'industriel Imerys qui prévoit à horizon 2027 l'extraction de 34 000 tonnes par an de ce lithium dans le Massif central. Néanmoins, le vice-président souligne que c'est un sujet socialement sensible et qu'un nouveau contrat social autour des matières premières sera nécessaire. La Commission doit présenter au printemps 2023 un plan "Critical Raw Materials Act". L'enjeu d'acceptabilité sociale est très fort. De plus, des associations se prononcent aussi contre cette éventualité comme France Nature Environnement :

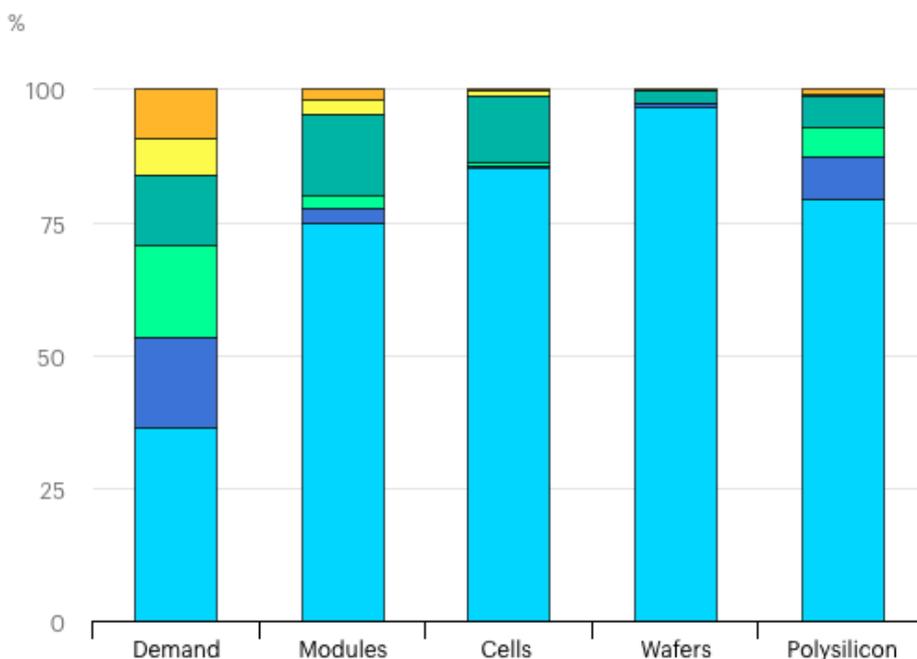
« Les mines ont toujours un impact sur l'environnement, et ces projets sous-estiment les conséquences à long terme pour les territoires concernés » Antoine Gatet, vice-président de la fédération.

## ■ Moyen de production énergétique (panneaux solaire et batteries chinoises)

Le rôle de la Chine a été important dans l'essor de la production d'énergie solaire, faisant baisser de 80 % le coût des panneaux en dix ans. D'après un rapport de l'Agence Internationale de l'Énergie, la Chine possède la plus grande partie des procédés industriels. En effet, environ 75 % des modules photovoltaïques y sont fabriqués et 90 % des "wafers", qui sont des fines tranches d'un matériau semi-conducteur.

<sup>28</sup> Audition à l'Assemblée Nationale des représentants d'IFP Énergies Nouvelles et Du Bureau de Recherche Géologique et Minières, 2022, <https://dai.ly/x8fr8vn>.

<sup>29</sup> Maroš Šefčovič, "Keynote Speech at the Raw Materials Security of Europe Conference" (Text, Prague, 2022), [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/SPEECH\\_22\\_5484](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/SPEECH_22_5484).



IEA. Licence: CC BY 4.0

● China ● Europe ● North America ● APAC ● India ● ROW

Figure 6 : Capacité de fabrication de panneaux solaires photovoltaïques par pays et par région en 2021.

Au vu du quasi-monopole de la Chine du silicium et de la production de panneaux photovoltaïques, certains acteurs s'inquiètent du risque que cela peut porter sur la souveraineté énergétique française. RTE précise dans son rapport Futurs Énergétiques 2050 qu'une relocalisation est aujourd'hui difficilement envisageable.

"Un tel niveau de concentration sur n'importe quelle chaîne d'approvisionnement représenterait une vulnérabilité importante, et le solaire photovoltaïque n'échappe pas à la règle" - Fatih Birol, Directeur de l'Agence Internationale de l'Énergie.

In fine, cette question de souveraineté pose des enjeux de géopolitique fort, notamment avec la Chine. Chaque technologie a ses enjeux propres, les acteurs privilégient alors les technologies qu'ils considèrent plus vectrices de souveraineté. Notons que le sujet du débat autour de la souveraineté énergétique existe depuis longtemps (à cause de l'importation de gaz et de pétrole). La crise en Ukraine a été source d'inquiétude pour tous les acteurs quant à la sécurité de l'approvisionnement et l'indépendance énergétique. Le débat évolue et continuera d'évoluer selon la trajectoire énergétique choisie.

## ■ Conclusion

Devant l'ampleur de la crise climatique qui s'annonce, la transition énergétique devient de plus en plus urgente. Dans le cas français, elle impose une électrification des usages qui fait consensus chez les acteurs. Le mix électrique français est à un tournant stratégique, avec le vieillissement du parc nucléaire historique qui impose un remplacement à plus ou moins long terme des capacités de production. La question du futur mix électrique français qui se décide actuellement fait débat.

Historiquement dirigé vers une réduction du nucléaire et un remplacement par des énergies renouvelables (PPE de 2015 et 2019), le débat public a récemment fait revenir sur la table l'énergie nucléaire. Le débat qui a longtemps été de niche entre les professionnels, ou locaux autour des sites d'implantation d'éoliennes, a pris une ampleur très importante avec l'élection présidentielle de 2022 et la crise énergétique récente.

Ce débat est structuré autour d'un questionnement très technique de faisabilité et de coût des différents mix possibles. Dans ces débats techniques la question de l'intermittence des énergies nouvelles renouvelables (solaire et éolien), qui seraient amenées à produire la majorité de l'électricité dans des mix 100 % renouvelables, est centrale. En effet, c'est un changement radical de méthodes de production en comparaison avec la situation actuelle, qui nécessite donc des nouvelles technologies de stockage et l'adaptation du réseau. Ces solutions sont incertaines et leur nouveauté génère des prévisions très divergentes de la part des différents acteurs. D'un autre côté, l'échec industriel de l'EPR de Flamanville sème le doute quant aux capacités de la filière nucléaire à construire de nouveaux réacteurs ou à maintenir en fonctionnement sur les réacteurs existants.

Cette question très technique et complexe fait émerger de tous côtés des scénarios prévisionnels qui arrivent à des conclusions qui divergent. Ces scénarios reposent en effet sur des hypothèses choisies très différemment en ce qui concerne les questions de sobriété, de souveraineté ou encore d'acceptabilité. Ces choix d'hypothèses reflètent les nœuds de la controverse autour de l'avenir du mix énergétique français ainsi que les préférences technologiques des différents acteurs. Elles traduisent ainsi les positionnements idéologiques, avec un refus du nucléaire de la part de certains acteurs (comme négaWatt) ou des EnR (de la part du Céréme). Ces acteurs sont donc plus enclins à prendre des hypothèses de départ confortant leur position idéologique initiale. Certains acteurs à l'inverse tentent au maximum de s'extraire de tout préjugé comme RTE qui proposent ainsi 18 scénarios. Il est à noter que cette neutralité revendiquée est critiquée d'un côté comme de l'autre (limitation à 50 % du nucléaire, égalité des taux d'intérêt de financement entre les EnR et le nucléaire, ...).

Un des points de divergence idéologique le plus fort est la question de la sobriété. Celle-ci permet, si elle est appliquée à grande échelle, de diminuer drastiquement la consommation électrique en 2050. Ceci rend bien plus facile la mise en œuvre des scénarios 100% renouvelables qui souffrent d'un manque de pilotabilité. Certains acteurs comme négaWatt considèrent qu'il s'agit du levier le plus important de décarbonation, et que c'est une condition sine qua non de la réussite de la transition énergétique. Ils construisent ainsi leurs scénarios autour d'une sobriété forte et acceptée globalement, ils considèrent qu'il s'agit d'un changement de philosophie profond de notre mode de consommation. À l'inverse, certains acteurs tels RTE ou les Voix du Nucléaire considèrent que c'est un levier intéressant mais non garanti. Ils construisent ainsi des scénarios qui s'en passent ou l'utilisent de manière modérée. Certains acteurs tel le Céréme la rejettent en bloc, l'assimilant à un recul plus qu'à une avancée.

L'acceptabilité fait également débat, avec des réticences à l'éolien pour les nuisances sonores, visuelles et pour son impact sur la biodiversité. Le nucléaire fait débat sur les risques d'accidents et la production de déchets. Les enjeux de souveraineté prennent également une importance croissante dans les débats. La provenance de l'uranium et les dangers géopolitiques que le nucléaire représente sont critiqués. D'un autre côté, c'est la consommation de métaux, la provenance des panneaux photovoltaïques, des batteries et des éoliennes. Les interconnexions et échanges grandissant avec nos voisins sont également remis en question...

Ces différents enjeux ne sont pas du tout perçus de la même manière par les différents acteurs, qui prennent donc des hypothèses et des critères de réussite différents. C'est pourquoi les résultats des scénarios divergent tant.

À la suite de cette analyse, il semble clair que tous les scénarios ont des risques qui leur sont propres : il revient à la société de prioriser ces risques en fonction des nécessités sociales du moment pour choisir le mix futur le plus souhaitable. Si le débat a été historiquement incomplet, sa démocratisation récente semble avoir fait émerger récemment de nombreux points techniques, sociaux et géopolitiques autrefois non discutés. Ceci devrait permettre un choix éclairé commun plus facile dans lequel les grands enjeux sont pris en compte. C'est d'ailleurs ce qui semble être en train d'arriver avec une consensualisation, à la fois politique mais également dans la population, de l'idée d'un mix partagé entre renouvelables et nucléaire. Ces événements étant toutefois assez récents, il peut être prématuré de vouloir en tirer des conclusions, en particulier, il ne peut être exclu que de nouveaux événements fassent surgir de nouveaux critères de choix (à l'instar de la crise énergétique et du covid qui ont fait ressurgir les préoccupations de souveraineté).

Par ailleurs, le traitement de la controverse à l'échelle de la France peut être étendu à une échelle européenne puis internationale. Le débat est alors assez différent car le nucléaire ne joue pas le même rôle dans l'historique de chaque pays.

A l'échelle de l'UE, les experts débattent sur la création de filières industrielles des énergies renouvelables ainsi que du développement des interconnexions entre les États membres qui pourraient permettre le foisonnement des énergies renouvelables. La question est alors plus une question de faisabilité d'un mix 100 % renouvelable et de ses implications sur nos modes de vie qu'un dilemme entre EnR et Nucléaire.

Hors de l'UE, le problème est également tout autre : par exemple, le cas de la Chine est éloquent. Le pays possède d'importants stocks de charbon qu'il exploite et exploitera malheureusement, certainement pour assurer son développement - tout comme elle exploite aujourd'hui les renouvelables et le nucléaire, à des rythmes quasi-inégalés dans le reste du monde. La question devient ainsi plus généralement d'opérer la décarbonation du mix énergétique, et pour cela, des solutions non considérées en France pourraient jouer un rôle primordial : parmi elles, les technologies de captage de carbone (CCUS), comme nous l'a partagé l'expert de l'IFPEN.

## ■ Matériel et méthodes

Afin d'étudier cette controverse, nous avons pu étudier de nombreux documents dans le but de nous documenter et d'établir un point de vue large et objectif sur la question du 100 % renouvelable. Cette documentation se concentre majoritairement sur la France. Les documents principaux composant notre base de réflexion sont les scénarios énergétiques des acteurs principaux de la controverse. Principalement, celui de RTE, de Négawatt et du Céréme nous ont permis de balayer une importante partie des hypothèses et projets existants aujourd'hui. Pour étayer les arguments avancés dans ces scénarios, nous nous sommes aussi concentrés sur de nombreux articles scientifiques analysant plus profondément la question de la faisabilité technique des solutions proposées par les scénarios cités précédemment. Également, nous nous sommes appuyés sur des rapports publics retraçant les différents nœuds du débat dans la sphère publique et politique. Ces documents sont indispensables pour comprendre la contribution des différents acteurs dans la controverse ainsi que leur rôle dans la prise de décision institutionnelle qui impacte directement l'évolution du débat. Par ailleurs, les commissions d'enquête parlementaire complétées par les rapports techniques d'entreprises faisant partie intégrante du tissu énergétique français nous ont permis de faire le lien entre la théorie scientifique ainsi que la projection des rapports, avec la conjoncture énergétique française. Enfin, pour trouver ces documents, en plus de recherches personnelles facilitées par notre base de connaissance acquise lors de nos cours en école d'ingénieur respectives, nous avons pu chercher sur des bases de données telles que Scopus ou Europresse.

Nous avons également essayé de mener une étude quantitative d'un corpus Scopus sur la phrase clef "Fully renewable power system" (en utilisant les titres et abstracts) via Cortext afin de voir si des tendances, nœuds et points d'intérêt supplémentaires pouvaient surgir grâce à cette analyse. Le résultat de l'analyse est présenté sous la forme d'une map de clusters de cooccurrence de certains termes présents dans les documents qui est disponible sur notre drive, dossier 3\_Quantitatif, sous le nom "Map-Résultat de l'analyse".

Nous n'avons pas pu tirer de conclusions particulièrement pertinentes à partir de ces clusters mais nous avons pu confirmer notre approche de la controverse dans la lecture des termes les plus fréquents. Il ressort que l'enjeu de la neutralité carbone est bien primordial dans la controverse via des mots comme "greenhouse gas emissions" ou "paris agreement". La controverse tourne bien autour de choix de société sur le mix électrique à adopter, défendu et étayé par des modèles des différents acteurs, comme l'indiquent "different scenarios", "generation mix", "optimal mix" ou encore "proposed model". De nombreuses questions techniques font partie du débat, ce qui justifie notre deuxième axe (coût et faisabilité technique) : en témoignent les termes "levelized cost of electricity", "storage technologies", "hydrogen production", "power system stability"... Nous ne voyons pas apparaître de termes sur la souveraineté, la sobriété ou l'acceptabilité, ce qui peut s'expliquer par le fait que ces sujets, que nous aborderons dans un troisième temps, se situent à la limite et en dehors des considérations scientifiques des revues dont sont issus les articles du corpus.

Nous aurions aimé comparer la map obtenue avec celle depuis un corpus français (sur la phrase clef "mix électrique 100% renouvelable") pour interpréter l'importance de tendances comme le nucléaire, l'hydrogène... Malheureusement, Scopus ne donnait que 2 résultats pour des articles concernant la France ce qui ne constituait pas un corpus suffisant.

Afin de compléter notre travail de recherche et de documentation, nous avons recueilli les témoignages de plusieurs acteurs majeurs de la controverse. Chaque acteur a un rôle ainsi qu'une opinion différente nous permettant d'avoir une vision plus globale des enjeux de la controverse.

Leurs interviews pertinentes ont pu être exploitées et intégrées à la fois dans notre article ainsi que dans notre présentation orale. Voici les personnes avec qui nous avons pu échanger :

- 2 administrateurs du Céréme avec un parcours pour l'un d'ancien haut cadre dirigeant d'EDF et l'autre étant un ancien député. Leur avis et expertise portent vers une libération de leurs avis qui étaient muselés durant leur parcours professionnel ;
- Un porte-parole de NégaWatt ayant un parcours ingénieur avec une forte appétence pour le nucléaire ;
- Une ingénieure recherche et développement chez RTE chargée d'études de Bilan Prévisionnel. Ayant une opinion objective quant aux scénarios afin de donner une vision globale et neutre ;
- Un chef de projet procédés en rupture pour le CCUS (Capture Carbone Utilisation Stockage) à l'IFPEN, ayant un parcours en tant qu'ingénieur recherche et développement ainsi que chercheur.

Il est nécessaire de remarquer que notre controverse a été étudiée uniquement à travers le prisme de la France. En effet, nous avons concentré nos efforts sur le territoire national pour autant cette controverse est une controverse mondiale. Chaque pays ayant ses spécificités et ses problématiques, ceci nous a empêché d'effectuer une étude mondiale ou continentale approfondie de qualité dans le laps de temps imparti.

## ■ Références

### ■ Articles de presse généraliste / presse professionnelle [Titre 2]

Endeweld, Marc. "Déboires d'EDF et Du Nucléaire Français : Proglieo et Lauvergeon Mettent Leur Rivalité de Côté Pour Accuser l'Allemagne." *La Tribune*, 2022.

<https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/energie-environnement/deboires-du-nucleaire-francais-quand-proglieo-et-lauvergeon-se-rejoignent-pour-accuser-l-allemande-945848.html>.

Spaes, Joël. "L'écrêtement/Raccordement Intelligent Sur La Table Du Conseil Supérieur de l'énergie." *Pv Magazine*, 2023. <https://www.pv-magazine.fr/2020/04/17/lecretement-raccordement-intelligent-sur-la-table-du-conseil-superieur-de-lenergie/>.

### ■ Articles de revue scientifique

Panwar, N. L., S. C. Kaushik, and Surendra Kothari. "Role of Renewable Energy Sources in Environmental Protection: A Review," 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.037>.

Percebois, Jacques, et Stanislas Pommeret. "Les Interconnexions Transnationales Fragilisent-Elles Les Réseaux Nationaux ? Application Au Cas de La France." *La Revue de l'Énergie*, 2016. <https://www.larevuedelenergie.com/wp-content/uploads/2018/09/Interconnexions-transnationales-fragilisent-elles-reseaux-nationaux.pdf>.

## ■ Rapports

- ADEME. "Transition(s) 2050 Choisir Maintenant Agir Pour Le Climat - Résumé Exécutif," 2021. <https://transitions2050.ademe.fr>.
- CLER Réseau Pour La Transition Énergétique, Energy Cities, and Réseau Action Climat. "Vers Des Villes 100% Énergies Renouvelables et Maîtrisant Leur Consommation," 2017. <https://reseauactionclimat.org/wp-content/uploads/2017/04/Vers-des-villes-100-e%CC%81nergies-renouvelables-.pdf>.
- IPCC. "AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023," 2022. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>.
- négaWatt. "Scénario NégaWatt 2022: La Transition Énergétique Au Cœur d'une Transition Sociétale," 2022. <https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2022>.
- Roland, Berger, and Céréme. "Scénario Alternatif Aux 'Futurs Énergétiques 2050' de RTE : Le Rapport Roland Berger," 2022. <https://cereme.fr/wp-content/uploads/2022/04/Rapport-Roland-Berger-scenario-du-Cereme.pdf>.
- RTE. "Futurs Énergétiques 2050 - Résumé Complet," 2021. [https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapports/fichiers\\_joints/282232-resume-executif.pdf](https://www.vie-publique.fr/sites/default/files/rapports/fichiers_joints/282232-resume-executif.pdf).
- Voix du Nucléaire. "TerraWater," 2022. [https://d1sv16tvvbglsd.cloudfront.net/app/uploads/2022/12/RAPPORT\\_Scenario-TerraWater\\_Futurs-Energetiques-France-2050\\_V1.21.pdf](https://d1sv16tvvbglsd.cloudfront.net/app/uploads/2022/12/RAPPORT_Scenario-TerraWater_Futurs-Energetiques-France-2050_V1.21.pdf).

## ■ Ouvrages

- Meadows, Donella H., Dennis L. Meadows, Jørgen Randers, and William Behrens. *The Limits to Growth; a Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, 1972.
- The Shift Project. *Plan de Transformation de l'économie Française*, 2022. <https://ilnousfautunplan.fr>.

## ■ Chapitres d'ouvrage

- Printz, Jacques. "Aspects Systémiques Du Système Électrique Français." In *Introduction à La Systémique*, 2014. <https://www.afscet.asso.fr/msc/textes-2013/Printz-systeme-electrique-sept2014.pdf>.

## ■ Littérature grise

- Blanquet, François. "Impact de l'intégration Des EnR Sur Les Réseaux de Distribution d'électricité." Mines ParisTech, 2013.
- Jancovici, Jean-Marc. "100% Renouvelable Pour Pas plus Cher, Fastoche ?," 2017. <https://jancovici.com/transition-energetique/renouvelables/100-renouvelable-pour-pas-plus-cher-fastoche/>.
- Ministère de la transition écologique. "Bilan Énergétique de La France En 2021 - Données Provisoires," 2022. [https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2022-04/datalab\\_essentiel\\_275\\_bilan\\_energetique\\_provisoire\\_2021\\_avril2022.pdf](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2022-04/datalab_essentiel_275_bilan_energetique_provisoire_2021_avril2022.pdf).
- Šefčovič, Maroš. "Keynote Speech at the Raw Materials Security of Europe Conference." Text, Prague, 2022. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/SPEECH\\_22\\_5484](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/SPEECH_22_5484).
- Agence Nationale de la Recherche. "Géopolitique des Énergies Renouvelables et Analyse Prospective de La Transition Énergétique - GENERATE," 2017. <https://anr.fr/Projet-ANR-17->

CE05-0024.

## ■ Entretiens

*Audition à l'Assemblée Nationale de Yves Bréchet, 2022.*

<https://www.revuepolitique.fr/audition-a-lassemblee-nationale-de-yves-brechet/>

*Audition à l'Assemblée Nationale Des Représentants d'IFP Énergies Nouvelles et Du Bureau de Recherche Géologique et Minières, 2022.* <https://dai.ly/x8fr8vn>.