

Quel système électrique pour la France en 2050 ?

par

■ **Didier Roux** ■

Membre de l'Académie des sciences
Président du conseil scientifique de l'ADEME

■ **François Moisan** ■

Directeur exécutif de la stratégie,
de la recherche et de l'international
Directeur scientifique de l'ADEME

■ **David Marchal** ■

Chef adjoint du service réseaux
et énergies renouvelables de l'ADEME

■ **Bernard Tamain** ■

Physicien, membre de l'association Sauvons le climat

■ **Claude Henry** ■

Professeur à l'université Columbia, président du Conseil scientifique de l'IDDRI
(Institut du développement durable et des relations internationales) – Sciences Po

En bref

À l'approche de la COP21, l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) a souhaité examiner la possibilité de mettre en place, en France et à l'horizon 2050, une production d'électricité s'appuyant à 100 % sur des ressources renouvelables. Une première version de l'étude a fuité dans la presse et a fait l'objet de nombreuses controverses. La version définitive a été publiée en octobre 2015, mais l'association Sauvons le climat continue à contester une grande partie de ses conclusions, que ce soit en matière de prévision de la consommation, de gestion de l'intermittence, de stabilité du réseau ou encore de coûts. Elle considère que le recours au nucléaire restera indispensable si l'on veut lutter efficacement contre le changement climatique. De son côté, Claude Henry estime que le temps de l'expansion du nucléaire est révolu (sauf en Chine et en Inde) et que les énergies renouvelables laissent présager une révolution technique et organisationnelle comparable à celle qu'a représentée l'invention du transistor...

Compte rendu rédigé par Élisabeth Bourguinat

L'Association des Amis de l'École de Paris du management organise des débats et en diffuse des comptes rendus, les idées restant de la seule responsabilité de leurs auteurs. Elle peut également diffuser les commentaires que suscitent ces documents.

Séminaire organisé grâce aux parrains de l'École de Paris (liste au 1^{er} mai 2016) :

• Airbus Group • Algoé¹ • ANRT • Be Angels • Cap Digital • Carewan² • CEA • Chambre de Commerce et d'Industrie de Paris Île-de-France • CNES • Conseil Supérieur de l'Ordre des Experts Comptables • Crédit Agricole S.A. • Danone • EDF • ESCP Europe • FABERNOVEL • Fondation Charles Léopold Mayer pour le Progrès de l'Homme • Fondation Crédit Coopératif • Fondation Roger Godino • Groupe BPCE • HRA Pharma² • IdVectoR¹ • La Fabrique de l'Industrie • La Poste • Mairie de Paris • MINES ParisTech • Ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique, DGE • NEOMA Business School • Orange • PSA Peugeot Citroën • Renault • SNCF • Thales • Total • UIMM • Ylios

1. pour le séminaire Ressources technologiques et innovation
2. pour le séminaire Vie des affaires

■ Introduction par François Moisan

L'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) est un établissement public placé sous la double tutelle du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, et du ministère de la Recherche. Elle a trois grandes missions : mener des études prospectives, conseiller l'État pour la mise en œuvre des politiques publiques et jouer le rôle d'opérateur pour leur mise en application. Pour cette troisième mission, elle dispose d'instruments dédiés à la "massification de la transition énergétique", comme le Fonds chaleur renouvelable ou les outils consacrés à l'innovation dans le cadre des Investissements d'avenir.

L'étude « Un mix électrique 100 % renouvelable ? » relève de la mission de prospective de l'ADEME. Il ne s'agit ni d'un scénario, ni d'une préconisation. Elle ne vise pas à conseiller l'État dans la définition des politiques publiques, mais simplement à analyser les conditions et les obstacles à la réalisation de certaines hypothèses, dans une approche purement technique et scientifique.

■ Exposé de David Marchal

À la suite de la publication à l'étranger de plusieurs rapports sur la faisabilité et les impacts d'un système électrique reposant à 100 % sur les EnR (énergies renouvelables), notamment aux États-Unis, il a paru intéressant d'en faire de même pour le cas français. L'étude « Un mix électrique 100 % renouvelable ? » devait répondre à plusieurs grandes questions : quel impact aurait l'augmentation massive des EnR dans le mix électrique de la France métropolitaine à l'horizon 2050 ? dans l'hypothèse d'une production électrique 100 % EnR, quels seraient le mix optimal, l'implantation géographique des moyens de production et l'impact économique d'un tel mix ?

Le choix de l'horizon 2050 était lié au besoin de nous appuyer sur des hypothèses déjà existantes en matière de démographie ou encore de coût des technologies. Nous nous sommes notamment servis de certains résultats d'une autre étude de l'ADEME, « Vision 2030-2050 », en particulier l'idée qu'il était envisageable d'atteindre une part de 46 % d'EnR sur le réseau électrique d'ici 2030, tout en équilibrant l'offre et la demande à chaque heure. À noter que pour limiter la complexité du modèle, nous avons retenu le pas horaire et non le niveau infrahoraire.

Nous avons, par ailleurs, utilisé les résultats d'un rapport sur les besoins de flexibilité et de stockage financé par l'ATEE (Association Technique Énergie Environnement), l'ADEME et le ministère de l'Économie. Selon ce document, la place du stockage économiquement viable dans le système électrique français devrait être relativement restreinte à l'horizon 2030. En effet, grâce aux STEP (stations de transfert d'énergie par pompage), dont la capacité actuelle est de 5 GW, ainsi qu'à l'hydraulique pilotable (10 GW), le système français est déjà très flexible. Même avec un développement important des EnR, le potentiel de stockage supplémentaire économiquement rentable à l'horizon 2030 ne serait que de 2 GW.

Il est très important de préciser que, tout en prenant en compte ces différents éléments, l'étude « Un mix électrique 100 % renouvelable ? » suit une approche très différente de la méthode des scénarios : elle ne se préoccupe pas de la trajectoire qui pourrait nous conduire de la situation actuelle à la situation envisagée pour 2050.

La maîtrise d'œuvre

L'étude a été confiée à un groupement de trois entreprises : Artelys, un bureau d'étude doté d'un logiciel d'optimisation et de simulation du réseau électrique ; Énergies demain, autre bureau d'étude spécialisé dans la modélisation de la demande d'électricité ; et le laboratoire Armines-Persée, qui a travaillé sur la modélisation de la production d'énergie renouvelable, en particulier l'éolien et le photovoltaïque.

Le modèle d'Artelys est utilisé par les gestionnaires de réseau ou les régulateurs pour étudier la pertinence économique d'investissements dans le réseau, en France et en Europe. Dans le cadre de l'étude, il nous a permis de procéder à une double optimisation. La première concerne le parc à installer : dans l'hypothèse d'un mix 100 % EnR, il s'agit de déterminer quelle capacité attribuer à chaque type d'énergie (photovoltaïque, éolien, biomasse, énergies marines, etc.) dans chaque région afin de minimiser le coût de production, en sachant qu'il est possible de jouer sur les capacités d'échange interrégionales et de stockage. La deuxième optimisation concerne le *dispatch* dans le système électrique, c'est-à-dire, à parc donné, la mobilisation de telle ou telle centrale de production au fil de l'année, en veillant à préserver les ressources rares, comme le déstockage des STEP ou l'hydraulique, toujours dans le but de minimiser les coûts.

Les hypothèses structurantes

Avant de lancer l'étude, nous avons commencé par définir quelques hypothèses structurantes.

Une demande estimée à 420 TWh

Pour évaluer le niveau de la demande en 2050, nous nous sommes inspirés des résultats du rapport « Vision 2030-2050 », qui était un exercice pluriénergies, tous secteurs confondus. Selon cette étude, il est envisageable de diviser par deux la consommation totale d'énergie en France d'ici 2050, ce qui est compatible avec les objectifs de la loi sur la transition énergétique pour 2050. En revanche, la réduction de la consommation d'électricité serait proportionnellement plus faible, en raison du développement de nouveaux usages, comme la multiplication des véhicules électriques, mais également du report d'usage (notamment la place plus importante prise par le chauffage électrique). Elle passerait de 500 TWh actuellement à 420 TWh, en particulier grâce à une plus grande efficacité énergétique du chauffage. La pointe serait légèrement plus faible qu'aujourd'hui : 96 GW contre 102 actuellement.

Nous avons également retenu l'hypothèse d'une forte flexibilité de la demande avec, par exemple, l'optimisation de la consommation des chauffe-eau électriques et de la recharge des véhicules électriques, ou encore la possibilité d'effacer une partie de la consommation de chauffage (c'est-à-dire d'éteindre certains appareils en période de pointe et de reporter cette consommation sur les heures suivantes).

La modélisation fine de la demande a été rendue possible par une approche *bottom-up* des consommations, portant sur l'ensemble des régions françaises, mais également européennes.

L'interconnexion

Le niveau d'interconnexion avec les voisins européens est celui que RTE (Réseau de transport d'électricité) estime atteignable à l'horizon 2030. Nous avons fait le choix d'un solde exportateur nul : chaque fois que la France importe de l'électricité, elle doit en avoir exporté à un autre moment de l'année. Quant aux mix étrangers, nous avons considéré qu'ils étaient composés d'EnR à 80 %.

Les gisements d'EnR

Pour que le logiciel d'Artelys puisse optimiser la composition des mix d'EnR, nous avons dû évaluer les gisements maximaux correspondant à chaque type d'énergie. L'équipe d'Armines-Persée a utilisé pour cela un système d'information géographique, s'est limitée aux gisements de meilleure qualité et a pris en compte des facteurs d'acceptabilité sociale déterminés a priori. Au total, elle n'a retenu que 5 à 10 % des gisements théoriques.

Sur la quinzaine de filières étudiées, les potentiels les plus importants concernent le photovoltaïque (47 GW au sol et 364 GW en toiture) et l'éolien (172 GW pour le terrestre et 66 GW en mer). À l'heure actuelle, la France dispose d'une capacité installée de 6 GW de photovoltaïque et de 10 GW d'éolien.

Le coût des technologies

Nous avons également dû adopter des hypothèses en termes de coûts des technologies exprimés en LCOE (*Levelized Cost of Energy*), c'est-à-dire prenant en compte à la fois l'investissement et l'exploitation des installations