

Électricité « 100 % renouvelable » : solution miracle ou mortifère utopie ?

Georges Sapy

@ 45614

La lutte contre le réchauffement climatique impose de fabriquer l'électricité sans émettre de CO₂, non seulement lors de sa propre production, mais parce qu'elle s'impose comme le vecteur indispensable capable de décarboner une très grande partie du reste de l'économie (industrie, habitat, mobilité, etc.) en se substituant aux combustibles fossiles, charbon, fioul et gaz.

Or, il n'existe que deux types d'énergies primaires (celles qui existent dans la nature) qui permettent d'atteindre ce but : l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables dont la plus anciennement utilisée, qui est toujours la plus répandue, est l'énergie hydraulique. Mais cette dernière a atteint l'essentiel de son potentiel de développement dans les pays développés, notamment en France, largement équipée et dont le potentiel résiduel de croissance est donc faible.

Parmi toutes les autres formes d'énergies primaires pouvant être utilisées pour produire de l'électricité, seules deux autres ont un potentiel de croissance très important, au moins « sur le papier » : l'énergie du vent captée avec des éoliennes et l'énergie solaire captée avec des panneaux photovoltaïques. Mais ces deux sources d'énergie ne sont pas des énergies « de stock » disponibles en permanence comme les stocks de combustibles fossiles ou nucléaires qui permettent de disposer de moyens de production d'électricité capables de moduler leur puissance en fonction de la demande, dits « pilotables » pour cette raison. Ce sont au contraire des énergies « de flux ». Et lorsque ces

flux disparaissent (la nuit pour le soleil) ou s'affaiblissent lorsque le vent faiblit, les productions d'électricité s'arrêtent ou deviennent très faibles. Ces sources sont dites « intermittentes et variables » pour ces raisons, et ne permettent plus de satisfaire à elles seules les besoins des consommateurs qui sont indépendants du vent ou du soleil.

Cette inadéquation entre production et consommation est d'autant plus problématique que l'électricité ne se stockant pas en tant que telle, il faut qu'à tout instant sa production soit strictement égale à sa consommation pour que le « système électrique » conserve son équilibre, dont le critère est sa fréquence de fonctionnement de 50 Hz qui ne tolère que de très faibles écarts. Rappelons qu'un « système électrique » est l'ensemble constitué par les moyens de production, les consommateurs de tous types (industriels, tertiaires, domestiques) et des réseaux électriques qui assurent le transport et la distribution de l'électricité entre les deux.

Les systèmes électriques des grands pays font partie des ensembles parmi les plus complexes et les plus vastes géographiquement jamais inventés par l'homme. Et ils jouent un rôle crucial, l'électricité étant un bien de première nécessité vital pour le bon fonctionnement de nos sociétés modernes en termes de santé, sécurité individuelle et collective, télécommunications, efficacité économique, mobilité, habitat, etc., qui le sera d'autant plus dans les années et décennies à venir. De plus, le rôle de l'électricité va croître avec les transformations technologiques annoncées telles que

la numérisation croissante de la société et de l'économie, la robotisation de l'industrie et surtout de par sa substitution croissante aux énergies fossiles. Elle devrait représenter nettement plus de la moitié de toute l'énergie consommée par le pays à l'horizon 2050 et 70 à 80 % à la fin du siècle selon l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie).

Jusqu'à présent, le taux d'introduction d'électricité intermittente dans les systèmes électriques est resté suffisamment faible pour que les moyens pilotables permettent de pallier instantanément les manques de vent ou de soleil pour équilibrer le système.

Mais avec la multiplication des éoliennes et des panneaux photovoltaïques, donc l'augmentation de la variabilité de la production d'électricité, cette compensation va devenir de plus en plus difficile. Alors que des diminutions massives de capacités de moyens pilotables sont annoncées un peu partout en Europe et que des systèmes de stockage-déstockage d'énergie, qui sont le complément naturel des moyens intermittents, sont encore très loin d'être disponibles à la bonne échelle (ces moyens de stockage-déstockage ont pour but de transformer les surplus d'électricité intermittente en une autre forme d'énergie — hydraulique, électrochimique, chimique, etc. — qui est stockable et qui est ensuite retransformée en électricité au moment où on en a besoin).

Si l'on résume la situation : on ne construit pratiquement plus que des moyens intermittents ; on ferme de plus en plus de moyens pilotables ; on ne dispose pas encore de moyens de stockage d'énergie à grande échelle qui permettraient de compenser un manque de vent profond et durable. Résultat : lors d'une soirée hivernale très froide et très peu ventée (cas d'une météo anticyclonique d'origine polaire), les éoliennes ne produisent pratiquement rien et le soleil a disparu depuis longtemps. Et comme il fait très froid, la consommation d'électricité est très élevée. L'énergie stockée dans les STEP (stations de transfert d'énergie par pompage) ou dans des batteries électrochimiques est limitée et s'épuise très vite.

Ne restent que les moyens pilotables, mais comme on les a beaucoup réduits, ils sont devenus largement insuffisants. Compte-t-on importer de l'électricité depuis les pays voisins ? Ils ont tous fait les mêmes choix de moyens de production et subissent la même météo, qui est la même dans une grande partie de l'Europe. Ils sont donc dans la même situation de pénurie et n'ont rien à exporter.

Seule solution pour éviter un écroulement non maîtrisé du réseau qui mettrait le pays dans le noir : procéder à des « délestages » volontaires, c'est-à-dire couper volontairement le courant à des groupes de consommateurs que l'on fait « tourner » toutes les heures pour répartir la pénurie, en évitant les consommateurs critiques (hôpitaux, etc.). Fiction ? Non, réalité vers laquelle s'achemine l'Europe dans les années à venir, sans doute avant l'horizon 2030-2035 si on continue la même politique. C'est l'objet d'une première partie.

Qu'en sera-t-il au-delà, à l'horizon plus lointain de 2050, censé avoir atteint la neutralité carbone ? On aura probablement quelques moyens de stockage de masse en plus d'ici là, mais l'objectif est pour l'instant inchangé : aller vers toujours plus d'éolien et de photovoltaïque. Jusqu'où ? RTE (gestionnaire du Réseau de Transport d'Électricité) et l'AIE viennent de publier fin janvier 2021 une étude commune qui apporte des éléments de réponse à cette question cruciale. C'est l'objet d'une deuxième partie.

Horizon 2035 : la sécurité d'alimentation en électricité de l'Europe en danger

Pourquoi évoquer d'emblée l'Europe ? Deux raisons à cela :

- À l'instigation de la Commission européenne fortement influencée par l'Allemagne et quelques autres pays qui ont décidé de sortir du nucléaire et veulent entraîner le reste de l'Europe dans la même voie, une politique à marche forcée fondée sur le « tout éolien + photovoltaïque » a été instaurée depuis de

Électricité « 100 % renouvelable » : solution miracle ou mortifère utopie ?

nombreuses années et n'a jamais été remise en cause depuis. Elle est même régulièrement accélérée. C'est effectivement le seul choix possible pour disposer d'une électricité peu carbonée si on refuse le nucléaire... Pour ce faire, tous les moyens sont bons : ces moyens de production sont grassement subventionnés et exonérés des règles communes de concurrence sur les marchés de l'électricité, qui sont par contre appliquées par la Commission européenne aux autres moyens de production avec une rigueur obtuse, ce qui rend très difficile le développement de moyens pilotables.

- Les pays européens ont des réseaux électriques de plus en plus interconnectés, ce qui lie de plus en plus leurs destins, pour le meilleur (mutualisation optimale des moyens de production économiquement intéressante) et pour le pire (risque de propagation des défaillances d'un pays vers ses voisins).

Cette politique est porteuse de grands dangers sur la sécurité d'alimentation en électricité du continent pour les raisons déjà évoquées plus haut : défaillances des productions éoliennes et photovoltaïques; attrition rapide du parc de moyens pilotables concomitante à la montée en puissance des productions éoliennes et photovoltaïques; non-disponibilité de moyens de stockage d'énergie à une échelle suffisante pour compenser l'absence durable de vent ou de soleil.

Un danger systémique : l'affaiblissement généralisé des flux d'énergies primaires éoliennes ou photovoltaïques

- L'absence de flux solaire est évidente la nuit, car liée au rythme diurne. Mais ce flux peut aussi être fortement affaibli, voire complètement masqué par de très nombreuses conditions météorologiques défavorables telles que pluie, brouillard, ciel uniformément plombé ou passages nuageux intenses et nombreux qui empêchent ou réduisent fortement la production photovoltaïque. Même s'il est de mieux en mieux prévisible grâce aux progrès de la météorologie, ce risque de non-production reste subi. Et surtout, sous nos latitudes, le photovoltaïque produit très peu d'électricité l'hiver

quand les besoins sont au plus haut : 4 à 5 fois moins qu'en été quotidiennement.

- La quasi-absence de vent à certaines périodes, à l'échelle de la France voire d'une partie importante de l'Europe, est également une réalité largement observée et validée par l'expérience et de nombreuses études scientifiques incontestées, qui contredisent de façon définitive le slogan «il y a toujours du vent quelque part» qui relève clairement de la méthode Coué ou du marketing. Là encore, des prévisions météorologiques de plus en plus précises permettent de mieux prévoir les productions éoliennes, mais elles resteront évidemment subies.

- La combinaison de ces absences de flux d'énergies primaires est particulièrement critique lors des pointes hivernales de consommation de 19 h, heure à laquelle le soleil a disparu depuis longtemps, en cas d'absence de vent ou de vent très faible. Dans ces circonstances, quelle que soit la puissance installée, même très importante, des parcs éoliens et photovoltaïques, leur production cumulée globale est au mieux dérisoire pour les premiers et nulle pour les seconds. En effet, avec l'apparition des sources intermittentes, la perte de production n'est plus dimensionnée par celle de quelques machines, mais par la disparition ou l'affaiblissement des flux d'énergies primaires, vent ou soleil : la perte de production qui en résulte est d'une tout autre ampleur et est d'autant plus grande que les parcs installés éoliens ou photovoltaïques sont importants. Cela peut concerner un pays, mais fréquemment plusieurs pays voisins, entraînant des pénuries simultanées qui annihilent toutes possibilités d'échanges et de secours mutuels qui font partie des règles majeures d'entraide entre les gestionnaires de réseaux.

Le stockage-déstockage d'énergie peut-il apporter la solution à cette échéance ?

«Sur le papier», le stockage-déstockage d'énergies produites à partir d'électricité intermittente qui peuvent être stockées puis retransformées ensuite en électricité en fonction des besoins apparaît comme la solution palliative de l'intermittence. La réalité se heurte

cependant à un certain nombre de paramètres déterminants, en particulier le rendement global des conversions successives électricité -> énergie stockable -> électricité qui a un impact majeur sur les capacités nécessaires des moyens mis en œuvre et par conséquent sur le coût de l'électricité déstockée.

De très nombreux moyens de stockage d'énergie existent, mais, de fait, trois d'entre eux émergent du lot du fait de leurs caractéristiques :

- Deux moyens se distinguent par leur rendement de stockage-déstockage très élevé : le stockage hydraulique par STEP dont le rendement de conversion se situe entre 75 et 80 % et le stockage par batteries électrochimiques dont le rendement de conversion atteint 85 %. Ces deux moyens sont de ce fait extrêmement précieux, mais tous deux ont des puissances instantanées ou des capacités de stockage limitées. Ils sont donc techniquement et économiquement très bien adaptés à la compensation d'un manque de vent ou de soleil d'amplitude moyenne pendant une durée limitée à quelques heures. Typiquement, pour passer la pointe méridienne qui dure environ 3 heures ou la pointe du soir de 19 h qui dure moins de 2 heures. Mais ils ne peuvent en aucun cas pallier des manques majeurs et durables de vent ou de soleil, qui peuvent statistiquement durer jusqu'à 8 à 15 jours consécutifs pour le vent, ce qui entraîne des déficits énergétiques cumulés considérables.

- La seule solution qui soit à la bonne échelle physique pour stocker l'énergie nécessaire pour faire face à des déficits de cet ordre est le recours aux gaz combustibles de synthèse, hydrogène ou méthane obtenu par méthanation du CO₂ à partir de cet hydrogène, car ils possèdent une densité massique d'énergie très élevée. Tout cela est techniquement possible. Mais les pertes énergétiques globales de ces chaînes de conversions électricité -> gaz combustible -> électricité sont très importantes : compte tenu des rendements actuels, pour pouvoir déstocker 1 kWh d'électricité, il faut en avoir dépensé 3 si on utilise la chaîne hydrogène et 5 si on utilise la chaîne méthane de synthèse! Cela implique en outre

de surdimensionner les moyens de production intermittents rien que pour compenser ces pertes. Au total, le coût de l'électricité déstockée est très élevé, ce qui soulève des incertitudes majeures sur la viabilité des modèles économiques de ces solutions.

Bien sûr, des progrès de rendement seront faits qui, joints à l'industrialisation de ces chaînes, pourront faire baisser les coûts de l'électricité déstockée. Mais probablement pas d'ici 2030-2035 selon les prévisions de RTE. Malgré l'utilité des STEP et des batteries, y compris en mettant à contribution les batteries d'un parc important de véhicules électriques pour soutenir le réseau, la solution du nécessaire stockage de masse, qui devra en outre être intersaisonnier pour stocker les surplus photovoltaïques de l'été, ne sera pas économiquement résolue d'ici là. Ce qui ramène aux besoins en moyens pilotables dont on ne pourra se passer. Or, leur réduction est programmée en Europe... y compris en France.

Une réduction des capacités pilotables annoncée partout en Europe

La sécurité d'alimentation reposera donc essentiellement sur les principaux moyens de production pilotables (hydrauliques, nucléaires, thermiques à énergies fossiles : charbon, fioul ou gaz) et les mesures complémentaires d'équilibrage entre production et consommation telles que les effacements volontaires des demandes des consommateurs industriels, tertiaires ou domestiques, très utiles, mais qui seront loin d'être à une échelle suffisante. Quant aux importations, elles seront indispensables... mais soumises à la disponibilité de capacités pilotables chez les voisins, lors des froides soirées d'hiver quand le vent sera tombé dans une grande partie de l'Europe.

Les capacités pilotables seront alors cruciales pour assurer la sécurité de la fourniture. Or, elles vont fortement s'atrophier en Europe dans les années qui viennent, comme le montrent les prévisions issues d'une récente étude de France Stratégie [1] : cf. Tableau 1 (avec N pour nucléaire et C/L pour charbon/lignite).

Électricité « 100 % renouvelable » : solution miracle ou mortifère utopie ?

Au total, entre le début de 2020 et 2035, les fermetures programmées de moyens pilotables, nucléaires ou fonctionnant au charbon/lignite, pour la France et 6 pays limitrophes atteindront près de 92 GW, soit 1,5 fois la puissance installée du parc nucléaire français actuel, ce qui est considérable (la réduction pour la France seule étant de près de 16 GW dont près de 13 GW de nucléaire).

Il ne fait aucun doute qu'une telle attrition des capacités pilotables ne sera pas tenable en termes de sécurité d'alimentation. Ce n'est pas là une vue de l'esprit : en avril 2019, RTE a publiquement déclaré que «les décisions des gouvernements européens visant à fermer des capacités de production d'électricité sans une

coordination plus large avec d'autres États européens pourraient mettre en péril le système électrique européen» du fait de la dépendance de plus en plus grande des pays du continent «aux importations d'électricité d'autres pays européens pour faire face aux déficits, en particulier pendant les périodes de forte demande».

Que se passera-t-il quand la réalité s'imposera enfin? La seule solution pour éviter des pénuries «tournantes» plusieurs fois par hiver sera de construire en catastrophe des moyens de secours au gaz, car très rapides à réaliser, qui ne pourront majoritairement que fonctionner au gaz fossile (gaz naturel), car les ressources en biométhane seront beaucoup trop faibles et beaucoup trop chères (4 fois le prix

Pays	2020	2022	2025	2030	2035
France (*)					
N	- 1,8			- 5	- 6
C/L		- 3			
Allemagne					
N		- 8,1			
C/L	- 4,8		-15,1	- 6,9	- 11
Royaume-Uni					
N			- 2,1	- 2	+ 5
C/L			- 4,3		
Italie					
C/L			0	- 6,4	
Espagne					
N				- 3,9	- 3,2
C/L				- 4,3	
Belgique					
N			- 5,9		
Suisse					
N			- 0,7	- 2,2	
Total 7 pays par échéance	- 6,6	- 11,1	- 28,1	- 30,7	- 15,2
Cumul 7 pays dans la durée	- 6,6	-17,7	- 45,8	- 76,5	- 91,7

Tableau 1. Fermetures de moyens pilotables annoncées par les 7 principaux pays d'Europe de l'Ouest en GW

Source des données : France Stratégie

N : nucléaire.

C/L : charbon/lignite.

(*) : selon PPE (Programmation pluriannuelle de l'énergie) actuelle.

du gaz naturel actuel) et les gaz de synthèse (hydrogène ou méthane de synthèse) ne seront pas non plus quantitativement au rendez-vous à cette échéance (voir ci-dessus) et seront encore plus chers que le biométhane.

Certains pays comme l'Allemagne et la Belgique ont d'ailleurs déjà anticipé la construction de tels moyens pilotables au gaz, la Belgique ayant l'ambition affichée de se priver d'ici 2025 de ses près de 6 GW de nucléaire qui lui fournissent près de la moitié de son électricité! Ce qui constituera une belle avancée en termes d'émissions de CO₂... sans parler de l'Allemagne qui va entrer à partir de 2023 dans une phase de remplacement partiel de son charbon-lignite par du gaz. Cela divisera certes par deux les émissions de CO₂, mais ne mènera en aucun cas jusqu'à la neutralité carbone, pourtant visée en 2050 par ces deux pays à l'instar de tous les autres pays européens...

Le cas de la France

La France est dans une situation exceptionnellement favorable : c'est le «grand pays électrique» du monde qui émet de loin le moins de CO₂ par kWh d'électricité produite. Elle le doit à son mix électrique essentiellement constitué de nucléaire et d'hydraulique, complété par de l'éolien et du photovoltaïque. Seuls deux pays font mieux : la Norvège, qui regorge d'hydraulique (96 % de sa production) et la Suède grâce à son mix également dominé par l'hydraulique et le nucléaire. Mais ce sont des pays beaucoup moins peuplés que la France.

Pourtant, notre pays se laisse malheureusement entraîner dans cette doxa «verte» européenne et ses illusions hors-sol dont l'orientation est clairement de... supprimer le nucléaire. Alors que les avantages majeurs de cette énergie, développée massivement à partir des années 1970 pour desserrer la dépendance au pétrole et augmenter l'indépendance énergétique du pays, n'ont pas disparu : les stocks stratégiques d'uranium disponibles sur le territoire français offrent deux ans d'autonomie (contre 3 mois pour les stocks pétroliers...) et pourraient être accrus si cela était nécessaire

de 7 à 8 ans par retraitement des stocks d'uranium appauvri à technologie constante actuellement opérationnelle!

L'impératif climatique est ensuite venu donner une légitimité supplémentaire essentielle à l'option nucléaire : elle a déjà évité d'énormes émissions de CO₂ depuis 40 ans et constitue le moyen de production d'avenir le moins carboné de tous, quand on tient compte des émissions de CO₂ relatives à la construction des installations (6 g de CO₂ par kWh seulement contre environ 15 pour l'éolien et 50 pour le photovoltaïque). Comment peut-on envisager de s'en passer dans ces conditions, face à l'urgence climatique qui constitue un défi extraordinairement difficile à relever? Et c'est en outre une production d'électricité parfaitement pilotable permettant de garantir la production en cas de manque de vent et de soleil.

Dans ces conditions d'exigence climatique et de risques sur la sécurité d'alimentation en électricité du pays du fait de l'arrêt annoncé de nombreux moyens pilotables en Europe, vouloir arrêter 12 réacteurs de 900 MW d'ici 2035 après les 2 réacteurs de Fessenheim en 2020, soit se priver de 13 GW de puissance nucléaire pilotable en 2035, relève d'une inconscience irresponsable. On s'est d'ailleurs aperçu très vite que les 1,8 GW de Fessenheim manquaient puisqu'il a fallu rallumer les centrales au charbon entre le 1^{er} et le 16 septembre 2020, ce qui ne s'était jamais produit à pareille époque car le vent est resté très faible pendant 16 jours.

En réalité, vouloir réduire à 50 % la production du nucléaire est une décision purement politique qui n'a jamais été justifiée rationnellement par ceux qui l'ont prise, sinon par une déclaration ministérielle digne du café du commerce : «on ne peut pas mettre tous nos œufs dans le même panier» qui cache la vacuité de la réflexion sur le sujet et l'absence d'études d'impact sérieuses.

Comme le souligne l'économiste Dominique Finon dans un article récent [2] : «L'argument sur l'intérêt d'une diversification du mix pour limiter les risques technologiques du nucléaire

est discutable car on ne parle ni de risque probabiliste, ni des précautions toujours plus rigoureuses prises par l'autorité de sûreté nucléaire française (ASN), reconnue parmi les plus sévères au monde. Aucun raisonnement probabiliste ne démontrera qu'un accident serait plus probable avec 70 % de nucléaire dans le mix qu'avec 50 %, comme avec 10 % d'ailleurs».

C'est d'autant plus injustifié que remplacer une part importante de la capacité nucléaire dans un but de «diversification» n'aurait de sens que si on pouvait le faire avec des moyens de production ayant les mêmes qualités globales : non-émetteurs de CO₂; pilotables; flexibles; non limités en puissance pour assurer la sécurité lors des consommations de pointe; économiquement compétitifs. Mais la réalité est qu'aucun autre moyen connu ne rassemble l'ensemble de ces qualités essentielles : l'hydraulique et la biomasse qui sont également non émettrices et pilotables sont limitées à de faibles extensions possibles pour la première et par la reconstitution naturelle annuelle pour la seconde. Par conséquent, prétendre diversifier avec des moyens qui produisent de l'électricité en fonction de la météo et du rythme diurne n'a aucun sens en termes de sécurité d'alimentation.

Comme le remarque Dominique Finon dans l'article précité : «S'il y a un problème posé à la sécurité de fourniture, c'est d'abord parce que les énergies renouvelables intermittentes prennent de l'importance dans le mix électrique avec le risque de "trou noir" pendant la période de pointe».

La réalité est que ces décisions ont été prises par idéologie et ignorance totale de la complexité du sujet, au nom du «tout renouvelable», pensée magique censée résoudre tous les problèmes. Folie dénoncée par Hervé Machenaud dans son livre *La France dans le noir* [3] : «Faut-il démonter les voies derrière le train dont on ne sait pas où il mène?»

Horizon 2050 : un système électrique « 100 % renouvelable » est-il techniquement possible ?

Le mercredi 27 janvier 2021, RTE a officiellement présenté en conférence de presse son étude réalisée en commun avec l'AIE intitulée : «Conditions et prérequis en matière de faisabilité technique pour un système électrique avec une forte proportion d'énergies renouvelables à l'horizon 2050» (Synthèse).

Une lecture rapide peut conduire à conclure «c'est possible»! Pourtant, entrer dans les conditions et prérequis au travers d'une lecture beaucoup plus attentive et approfondie permet de comprendre que les défis à relever sont en réalité extrêmement importants...

Ce double niveau de lecture apparaît dès le début du rapport d'étude lorsqu'on lit : «Même si elles doivent encore faire l'objet d'une démonstration à grande échelle, il existe un consensus scientifique sur l'existence de solutions technologiques permettant de maintenir la stabilité du système électrique sans production conventionnelle [...]. Cette solution a été testée avec succès en laboratoire (dans le cadre du projet européen MIGRATE, par exemple) et sur des microréseaux, mais pas encore à l'échelle d'un grand système électrique, où d'autres complications pourraient survenir. Des expériences à grande échelle sont nécessaires dans les années à venir pour valider ce concept».

Plus loin dans le corps du texte, il est ensuite question d'un : «large consensus scientifique sur la stabilité "théorique" d'un système électrique sans moyen de production conventionnel».

On notera qu'un consensus sur la seule «théorie» ne peut être «scientifique», le propre de la démarche scientifique étant de confronter la théorie à la réalité. Le point important est ici que la réalité se limite à des résultats de laboratoire et des expériences sur des microréseaux, qui n'ont rien à voir avec de grands réseaux. L'étude le note d'ailleurs un peu plus

loin : «Il n'existe aucune démonstration de la faisabilité d'une intégration très poussée d'EnR variables comme l'éolien et le photovoltaïque sur un grand système électrique, et des enjeux techniques nouveaux sont forcément appelés à émerger».

Les choses sont donc dites : tout reste à faire en matière de validation expérimentale sur les grands réseaux, ce qui implique de respecter «quatre ensembles de conditions strictes et cumulatives» pour permettre l'intégration d'une proportion très élevée d'énergies renouvelables :

1. Conserver la stabilité du système électrique malgré la réduction des moyens pilotables actuels à un niveau qui devra être équivalent à ce qu'elle est actuellement. C'est la condition *sine qua non* de viabilité d'un tel système, qui conditionne toute la suite et fait l'objet de développements plus approfondis ci-après.

2. Développer de nouveaux moyens de compensation de la variabilité considérable des sources éoliennes et photovoltaïques incluant notamment : de nouvelles unités de pointe pilotables qui devront fonctionner aux gaz combustibles de synthèse comme l'hydrogène ou au biométhane pour ne pas émettre de CO₂; des installations de stockage à grande échelle de ces gaz combustibles de synthèse ou biologiques; une flexibilité considérable du côté de la demande, c'est-à-dire en langage courant une large adaptation de la consommation à la production disponible éolienne et photovoltaïque.

3. Redimensionner complètement les réserves de sécurité pour compenser les aléas de production. Elles devront être fortement augmentées pour faire face aux incertitudes et à la nature intermittente, variable et décentralisée des productions éoliennes et photovoltaïques.

4. Étendre et renforcer très fortement les réseaux de transport et de distribution pour accueillir les flux supplémentaires d'électricité éolienne et photovoltaïque, largement répartis géographiquement, ce qui aura notamment un impact majeur sur l'occupation de l'espace et l'acceptabilité sociétale d'un très grand nombre de nouvelles lignes.

Si les mots ont un sens, «conditions strictes et cumulatives» signifie que si l'une de ces conditions n'est pas au rendez-vous, c'est tout l'édifice qui s'écroule. Or, cumuler quatre conditions qui seront toutes difficiles, voire très difficiles à satisfaire individuellement, diminue fortement la probabilité globale de réussite. En outre, viendront s'y ajouter d'autres difficultés non techniques, mais tout aussi essentielles, à commencer par l'acceptabilité sociétale de très nombreuses conditions, largement transverses à trois de ces quatre conditions.

La première condition énoncée ci-dessus est la plus critique, car elle implique un changement radical dans la conception et l'exploitation des systèmes électriques. Sa totale satisfaction conditionne donc la viabilité technique de tels systèmes. Les principales raisons en sont explicitées ci-après.

Pourra-t-on garantir la stabilité du système électrique malgré la réduction des moyens pilotables actuels?

La stabilité instantanée est la condition la plus fondamentale d'un fonctionnement opérationnel d'un système électrique. Or, dans un nouveau système 100 % renouvelable, les sources de courant seraient majoritairement raccordées au réseau par de l'électronique de puissance (onduleurs) et ne seraient plus essentiellement constituées par des alternateurs synchrones dont ne subsisteraient que ceux des centrales hydrauliques et à biomasse. Cette disparition massive des alternateurs synchrones aurait deux conséquences majeures :

- Dans le système actuel, l'inertie apportée par les rotors des alternateurs joue un rôle essentiel dans la stabilisation de la fréquence en amortissant ses variations brutales, ce qui laisse aux régulateurs de puissance des machines le temps de rétablir l'équilibre production-consommation. Il existe cependant une solution palliative indiquée dans l'étude, consistant à utiliser des «compensateurs synchrones» qui ne sont rien d'autre que des alternateurs raccordés au réseau qui tournent à vide sans fournir d'énergie. Cette question pourrait donc trouver une solution éprouvée,

mais dont «le déploiement généralisé pour assurer la stabilité du système à grande échelle reste à évaluer» selon l'étude de RTE.

- Contrairement aux alternateurs qui génèrent leur propre onde en fréquence et en tension et se synchronisent entre eux de façon autonome pour former naturellement le réseau (ils sont dits «*grid forming*» pour cette raison) les onduleurs actuels en sont incapables (ils sont dits «*grid following*»). Des onduleurs d'un nouveau type, capables d'assurer la même fonction apparente de «*grid forming*» que les alternateurs, ont donc été mis au point. Ils fonctionnent en laboratoire et sur des microréseaux.

Mais cela ne préjuge en rien de leur capacité à fonctionner massivement dans de grands réseaux. Car non seulement ils ne se synchronisent pas de façon autonome comme les alternateurs, mais un nouveau facteur est à prendre en compte : le «défi de la multitude». En effet, les sources intermittentes étant de puissances unitaires beaucoup plus faibles que celles des grands alternateurs et leur production beaucoup plus incertaine, il faudrait mobiliser des dizaines de milliers d'onduleurs «*grid forming*» pour former le réseau, là où moins d'une centaine de grands alternateurs suffisent actuellement. Il faudrait donc que cette multitude d'onduleurs soit capable de fonctionner ensemble de façon stable, sans conflits de priorité, sans oscillations de puissance entre eux, etc. Or, rien ne prouve que ce soit possible tant qu'on ne disposera pas de validations expérimentales extensives et approfondies à cette grande échelle. Il y a là une incertitude majeure qui serait bloquante s'il s'avérait impossible de garantir un fonctionnement stable de cette façon.

De plus, cette multitude d'onduleurs impliquerait de multiplier par un facteur extrêmement important le nombre des liaisons de contrôle-commande indispensables pour piloter en temps réel à la fois la fréquence-puissance et la tension de ces onduleurs «*grid forming*». Un tel système nécessiterait un recours étendu à l'intelligence artificielle (voir ci-dessous).

Enfin, un réseau électrique est fait pour transporter des courants électriques, dont la combinaison avec la tension génère la puissance électrique. Or, ces courants peuvent varier dans des proportions tout à fait considérables, notamment lors d'incidents tels qu'il en survient fréquemment sur les réseaux sous l'effet de la foudre, de défaillances techniques, etc. Ces incidents produisent des courts-circuits entraînant des intensités très élevées. La plupart d'entre eux sont fugitifs et s'éliminent naturellement en moins de quelques secondes. Lors de ces incidents, les alternateurs peuvent être soumis à des surintensités transitoires allant jusqu'à 5 à 6 fois leurs intensités nominales, ce qu'ils supportent sans difficulté et qui leur permet de rester couplés au réseau pour reprendre une fourniture normale aussitôt le défaut éliminé.

Par contre, les onduleurs électroniques ne supportent que des surintensités très limitées (de l'ordre de 1,2 à 1,5 fois leur intensité nominale). Pour qu'ils ne soient pas détruits en cas de courts-circuits sur les réseaux, il serait nécessaire de les déconnecter lors de tels incidents, ce qui entraînerait la perte de leur production et pourrait perturber gravement l'équilibre production-consommation global. Il y aurait alors risque de défaillances en cascade. Pour se prémunir contre de tels risques, il faudrait alors soit surdimensionner de façon extrêmement importante les onduleurs pour leur permettre de supporter des surintensités très importantes, soit utiliser une profusion de compensateurs synchrones ou de batteries pour les protéger; ces diverses solutions auraient probablement un coût considérable.

En résumé, il s'agit ni plus ni moins d'engager une véritable révolution technologique par rapport à la technologie actuelle qui, depuis son invention voici 130 ans, a permis de développer dans le monde entier les systèmes électriques actuels qui ont atteint des niveaux de fiabilité et de sécurité très élevés. En changer requiert à l'évidence des précautions et des validations approfondies pour pouvoir garantir que ces acquis seront préservés. Tout reste à faire à cet égard.

Un système électrique piloté par une intelligence artificielle nécessairement hypercomplexe pourra-t-il être cybersécurisé de façon absolue?

Il est évident que piloter en temps réel la fréquence et la tension de dizaines de milliers d'onduleurs ne sera pas à la portée d'actions humaines. Il faudra impérativement rajouter une couche supplémentaire numérisée (réseau informatisé de télécommunications) qui devra faire appel à l'intelligence artificielle, compte tenu de l'hypercomplexité de la gestion du système électrique dans son ensemble. Car outre le pilotage des moyens de production eux-mêmes, le système devra également piloter les stockages-déstockages d'énergie, la flexibilité de la demande et les échanges avec les pays voisins. Et il devra le faire de façon à la fois sûre et économiquement optimale.

Un système numérisé d'une telle complexité et d'une telle étendue géographique posera la question majeure de sa cyberrésilience qui devra être sans faille eu égard aux conséquences encourues en cas de cyberattaque, conséquences pouvant aller jusqu'à un *black-out* généralisé, c'est-à-dire la mise dans le noir du pays. Ce sujet d'importance majeure n'est curieusement pas évoqué dans l'étude, alors qu'il représentera un risque nouveau par rapport à la situation actuelle où les alternateurs sont naturellement synchronisés en base de façon extrêmement robuste par les lois de la physique et ne requièrent qu'un nombre réduit de liaisons non ou très peu informatisées pour leur télépilotage. L'expérience démontre d'ailleurs la résilience des systèmes électriques actuels : ils sont, comme les autres infrastructures industrielles, l'objet de nombreuses cyberattaques. À ce jour, une seule d'entre elles (attribuée aux Russes contre l'Ukraine) a semble-t-il réussi, et encore ne concernait-elle pas les alternateurs, mais des disjoncteurs dans les postes électriques du réseau.

La validation sur les réseaux réels existants sera probablement très difficile...

Cette difficulté tiendra notamment au fait que ces réseaux ne sont pas des instruments de laboratoire disponibles pour des expérimentations, mais devront continuer à alimenter à tout instant les besoins des citoyens et l'économie d'un pays tout entier : il ne serait pas acceptable de mettre leur alimentation en péril à des fins expérimentales. De plus, pour être représentatifs en toutes circonstances, les essais en vraie grandeur devront être réalisés à la bonne échelle. Un essai pourra-t-il être valablement réalisé sur un «petit» réseau d'une île isolée ou sur une portion d'un grand réseau? Sera-t-on assuré que l'extension à un grand réseau complet et fortement interconnecté avec le réseau européen ne fera pas apparaître des phénomènes non détectables à plus petite échelle? L'expérience seule sera à même d'apporter l'infinie richesse et diversité des leçons de la réalité. Les réponses à ces questions ne sont évidemment pas simples, mais doivent faire partie de l'instruction du sujet.

Enfin, des difficultés insurmontables risquant de survenir au cours du déploiement de ces nouvelles solutions, il faudrait qu'un retour en arrière reste possible, ce qui impliquerait de conserver l'existant pendant tout le temps nécessaire à une validation en toute certitude.

***In fine*, d'indispensables évolutions majeures seraient en jeu, toutes porteuses de risques de dégradation de la sécurité d'alimentation en électricité**

Le court bilan résumé ci-dessus des évolutions inhérentes au passage à des taux très élevés d'électricité intermittente va dans le sens d'une bien plus grande complexité du système électrique et de son pilotage, porteuse de risques nouveaux de dégradation de sa sécurité globale de fonctionnement : très forte augmentation de la variabilité de la production liée à l'utilisation massive de sources intermittentes, réduction drastique des moyens pilotables qui resteront (hydraulique, biomasse), réduction de l'inertie du réseau plus ou moins

Électricité « 100 % renouvelable » : solution miracle ou mortifère utopie ?

bien compensée, accroissement considérable du nombre des sources de production qui alimenteront le réseau, mais aussi des moyens de compensation (stockages-déstockages, effacements massifs, échanges accrus en interne et avec les pays étrangers) qui devront être pilotés, enfin et probablement le plus critique, introduction de risques supplémentaires de cybersécurité totalement nouveaux.

On peut donc légitimement craindre une baisse de la sécurité globale d'alimentation en électricité par rapport au niveau très élevé atteint depuis des décennies. Les citoyens consommateurs l'accepteraient-ils ?

Ce sujet devrait faire l'objet d'études de risques approfondies incluant cette préoccupation sociétale parfaitement légitime, qui devrait être ajoutée à la liste déjà longue des autres sujets d'acceptabilité sociétale identifiés par RTE.

Toute évolution du système électrique ne pourra être fondée que sur des technologies éprouvées

La conclusion très claire de ce qui précède est qu'on en est encore très loin de pouvoir affirmer que tout cela est « possible ». Il faudra encore beaucoup de R&D et surtout de validations approfondies en vraie grandeur sur de vrais réseaux pendant suffisamment longtemps avant de parvenir éventuellement à cette conclusion. Cela demandera des années aux dires mêmes de RTE et rien ne permet aujourd'hui d'en garantir la réussite.

D'ici là, comme annoncé par RTE, les études seront complétées à l'automne 2021 par :

- Un chiffrage économique du système électrique pris dans sa globalité, ce qui est la seule bonne approche, car elle englobe les coûts de tous les moyens d'équilibrage et de compensation nécessaires.
- Une évaluation exhaustive des conséquences environnementales incluant : les émissions de CO₂ ; l'empreinte territoriale des très nombreuses lignes électriques supplémentaires, des éoliennes et des centrales photovoltaïques au sol ; et enfin les besoins en

matériaux critiques nécessaires à ces nouvelles technologies.

- L'identification et la description des facteurs impactant l'acceptabilité sociétale qui porte déjà sur plusieurs domaines et serait aggravée par des changements de mode de vie (inversion de la logique entre demande et production conduisant à adapter la consommation à la production éolienne et photovoltaïque du moment de façon plus ou moins importante), ce qui serait révolutionnaire par rapport à la situation actuelle.

Ces différentes informations seront capitales pour éclairer l'avenir. Mais la faisabilité technique ne pouvant être acquise en 2022 (ni probablement avant longtemps), aucune décision stratégique engageant l'avenir énergétique du pays vers une hypothétique solution « 100 % renouvelable » ne pourra être prise à court terme. Car avec un système électrique qui fournira plus de 50 % de l'énergie finale du pays à l'horizon 2050 et 70 à 80 % à la fin du siècle, c'est bien l'avenir tout court du pays qui en dépendra. On rappellera à cet égard que le système électrique est classé parmi les infrastructures d'importance vitale en France et que RTE a été désigné comme opérateur d'importance vitale au titre de la sécurité nationale, y compris militaire, ce qui donne bien la mesure de l'enjeu.

La conclusion s'impose : l'avenir du système électrique ne peut être engagé que sur la base de technologies déjà parfaitement éprouvées et résilientes au moment où les décisions sont prises.

À ce stade, une question vient donc à l'esprit : au nom de quoi faudrait-il s'engager dans des évolutions du système électrique aussi complexes, aussi aléatoires, aussi porteuses de risques probablement très difficiles à maîtriser ? Aucune nécessité ne l'impose. Une combinaison intelligente de nucléaire et d'énergies renouvelables, comportant une part maîtrisée d'éolien et de photovoltaïque permettant d'éliminer les sources carbonées résiduelles, répondra de façon beaucoup plus rationnelle, efficace et sûre au défi du réchauffement climatique. Sans révolution technologique, sans

prise de risques inconsidérés et en minimisant les adaptations nécessaires, donc les coûts du système électrique.

Lors de leurs interviews par *Les Échos* du 28 janvier 2021, le directeur général et le président de l'AIE n'ont pas dit autre chose en déclarant respectivement «Ces technologies émergentes ont fait leurs preuves à une échelle réduite et sur des petits réseaux électriques, par ailleurs si elles sont disponibles cela ne signifie pas qu'elles sont économiquement et socialement souhaitables» et «Fermer les centrales nucléaires françaises serait une erreur. L'énergie nucléaire est un atout national pour la France. Ces dernières décennies, son développement a été une des composantes de la croissance économique française et sur le plan technique, elle a prouvé qu'elle fonctionne à grande échelle [...] L'objectif d'atteindre zéro émission à 2050 est un défi herculéen. Nous n'avons pas le luxe de nous priver de l'une ou l'autre des énergies propres. Pour la France, le nucléaire et les énergies renouvelables sont complémentaires».

RÉFÉRENCES

[1] «Quelle sécurité d'approvisionnement électrique en Europe à horizon 2030?» par Etienne Beeker, *France Stratégie*, janvier 2021.

[2] «La diversification du mix électrique français : une pseudo rationalisation» par Dominique Finon, article paru dans le numéro de juillet-août 2020 de *La Revue de l'Énergie*.

[3] *La France dans le noir. Les méfaits de l'idéologie en politique énergétique* par Hervé Machenaud, éd. Manitoba - Les Belles Lettres, mars 2017.