

NOTE DE SYNTHÈSE

# L'évolution du système électrique : réalités et recommandations



**JANVIER / 2022**  
**LES CAHIERS FUTURIS**

Sous la présidence d'Olivier Appert, ancien président d'IFPEN, membre de l'académie des technologies,  
et de Denis Randet, ancien directeur du CEA-LETI, ancien délégué général de l'ANRT

Directrice de publication, Clarisse Angelier, déléguée générale de l'ANRT

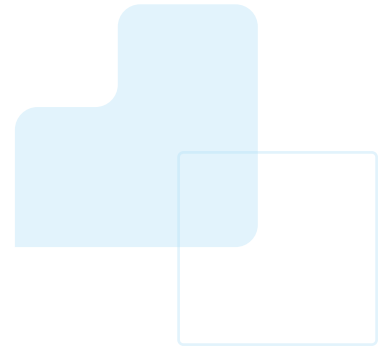


# SOMMAIRE



<b>INTRODUCTION</b>	5
<hr/>	
<b>1. LES GRANDES LIGNES DE L'ÉVOLUTION DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE - PRINCIPALES RECOMMANDATIONS</b>	6
<b>2. RÉALITÉS OPÉRATIONNELLES DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE ET DISPOSITIONS SOUHAITABLES</b>	8
<b>1 Assurer la continuité et la qualité de la fourniture dans un système bouleversé</b>	8
1-1/ Le stockage de longue durée, les espoirs prématurés mis dans l'hydrogène	8
1-2/ Le stockage de quelques heures, les batteries	9
1-3/ Quelle capacité de stockage apporteraient les véhicules électriques ?	9
<b>2 Comment corriger les instabilités dues aux fluctuations des ENRi ?</b>	9
2-1/ Moduler la production	9
2-2/ Effacer une partie de la demande	10
2-3/ Développer les interconnexions entre éléments du réseau	10
2-4/ Compenser les fluctuations rapides	10
2-5/ Améliorer les prévisions météorologiques	11
<b>3 Le pilotage d'un réseau de plus en plus décentralisé</b>	11
<b>4 Le numérique : apports et vulnérabilité</b>	12
<b>5 Le marché, la régulation</b>	12
<b>6 La modélisation</b>	13
<b>7 Le positionnement français (SWOT)</b>	14
<b>8 La nécessité d'une vision collective, le bon usage des plans</b>	15
<b>9 Les rôles de l'État</b>	15





# INTRODUCTION



Cette note est destinée aux décideurs, d'abord dans la perspective des prochains événements qui vont engager pour plusieurs années la politique de l'énergie : présidence française de l'Union européenne et négociations du Paquet « Fit for 55 », élections présidentielle et législatives, formation d'un nouveau gouvernement.

Elle est tirée d'un travail de plusieurs années d'un groupe rassemblant entreprises, organismes de recherche et pouvoirs publics. Ce groupe a été réuni par l'ANRT sous la présidence d'Olivier Appert, ancien président de l'IFPEN, membre de l'académie des technologies, et de Denis Randet, ancien directeur du CEA-LETI, ancien délégué général de l'ANRT. Il s'est consacré à l'analyse du fonctionnement du système électrique et de son évolution. Il l'a fait d'un point de vue pragmatique, concret, correspondant à l'expérience de ses membres.

Le système électrique est de plus en plus complexe : interviennent non seulement la combinaison de technologies multiples et leurs effets directs et indirects sur l'environnement, mais les coûts d'investissement et de fonctionnement, les effets sur la compétitivité des entreprises, le pouvoir d'achat des ménages et l'acceptabilité sociale, notre position internationale et notre indépendance. On ne peut prendre de décision importante sans tenir compte de tous ces éléments et de leurs interactions.

C'est la raison pour laquelle nous avons complété les travaux du groupe par les conclusions d'une table ronde sur la prospective énergétique organisée dans le cadre d'un colloque à la mémoire de Jacques Lesourne, un des tout meilleurs prospectivistes français, particulièrement attentif aux problèmes de l'énergie.

Dans le même esprit, nous n'avons pas séparé dans ce qui suit la recherche, le développement et l'industrie. Le manque de lien entre les trois, avec le creusement de « vallées de la mort », est d'ailleurs trop souvent une faiblesse française.

En France et dans le monde, la demande d'électricité va croître, à cause de l'électrification de plusieurs usages (ex : voiture électrique) – qui contribuera à l'indispensable effort de sobriété énergétique –, du développement économique (ex : les technologies de l'information), et des énormes besoins non satisfaits dans beaucoup de pays.

La production d'électricité, son transport et sa distribution sont donc un enjeu majeur. Ses conditions sont profondément modifiées par l'introduction massive des énergies renouvelables éolienne et photovoltaïque. Celle-ci crée pour le système électrique une situation radicalement nouvelle.

# O1 LES GRANDES LIGNES DE L'ÉVOLUTION DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE - PRINCIPALES RECOMMANDATIONS

## UNE SITUATION NOUVELLE, AVEC DE GRANDS RISQUES ET DES OPPORTUNITÉS

### Auparavant, le système électrique français était sûr et stable :

- une capacité de production suffisante pour donner des marges de sécurité ;
- un parc de centrales très peu sensible aux fluctuations des approvisionnements extérieurs ;
- un pilotage centralisé, sous une responsabilité bien définie ;
- un fonctionnement capable de répondre aux aléas climatiques, grâce à une production pilotable à la demande ;
- une fréquence et une tension stables, grâce à l'inertie des rotors des centrales ;
- un réseau techniquement homogène, les échanges étant régis par l'électrotechnique.

La seule grande incertitude était les conditions de renouvellement du parc nucléaire.

### L'introduction massive de productions intermittentes et la baisse des capacités pilotables change la donne :

- une production d'électricité non pilotable, qui peut faire défaut pendant plusieurs semaines et entraîner des coupures générales se propageant à tout le réseau européen ;
- en conséquence, une interdépendance accrue avec nos voisins, comportant des risques, mais aussi des bénéfices dont il faudra savoir tirer parti ;
- une multiplication des sources qui oblige à gérer un réseau complexe et décentralisé et à revoir l'organisation des responsabilités dans un système qui s'étend à un très grand nombre d'acteurs ;
- des investissements lourds, avec, pour faire face aux aléas de production, des marges de puissance qui risquent d'être considérables et coûteuses, et qu'il faut essayer de réduire en utilisant divers moyens pour compenser les variations de fourniture de courant ;

- de gros besoins de financement, qui impliquent de modifier l'organisation du marché pour attirer et orienter convenablement les investissements privés ;
- des dépendances extérieures, non pas tant pour les sources elles-mêmes que pour la construction des composants des générateurs et du réseau. Les enjeux de recherche et d'industrialisation sont énormes et couvrent toute la chaîne de valeur de l'électricité (électronique de puissance, numérique, nucléaire, batteries, électrolyseurs, piles à combustible, pompes à chaleur, CCS, etc.). L'arrivée de techniques nouvelles entraîne des risques de perte d'autonomie stratégique et de captation de valeur par l'étranger, mais elle offre aussi des opportunités pour conquérir des positions internationales ;
- des effets macroéconomiques induits pouvant affecter la stabilité interne et externe de l'Union, par exemple une remontée rapide de l'inflation liée à une trop grande dépendance au gaz ;
- des dispositions à prendre pour maintenir la stabilité de la fréquence et de la tension en combinant l'électronique et l'électrotechnique ;
- un besoin de numérisation du système afin de le piloter au plus fin, avec des risques d'intrusion et de cyber-attaques déstabilisantes.

# PRINCIPALES RECOMMANDATIONS

Pour éviter des ruptures de fourniture ou des dégradations de la qualité du service et maintenir les coûts du changement vers la neutralité carbone à un niveau acceptable, **toutes les ressources dont on dispose doivent être mises en œuvre** : technique, organisation des responsabilités, règles du marché et sources de financement, communication, taxonomie européenne.

Compte tenu du temps nécessaire à la restauration d'une capacité industrielle, **il faut lancer dès maintenant le renouvellement du parc nucléaire.**

Il est indispensable de ne pas confondre souhaits et réalité, et **de tenir compte, pour les solutions envisagées, de leur maturité, de leur temps de développement et d'industrialisation, de leur prix de revient.** L'exemple le plus net est l'espoir prématuré mis dans l'hydrogène pour résoudre le problème aujourd'hui sans solution du stockage de longue durée (inter saisonnier).

Tout en préparant les techniques du futur (dont l'hydrogène), il faut **concentrer les investissements de recherche-développement et de production industrielle sur des technologies décarbonées déjà éprouvées : nucléaire, hydraulique, solaire, éolien, captage et stockage de CO<sub>2</sub>, électronique de puissance, numérique** (y compris les technologies accroissant sa propre « sobriété numérique ») ; cela en se souciant de maîtriser autant que possible la totalité de la chaîne, de la mine au recyclage, dans un contexte de coopération européenne. Notre souveraineté et notre avenir économique en dépendent.

Comme le signal prix à trop court terme donné par le marché de l'électricité mis en place au niveau européen n'est pas pertinent pour déclencher les investissements nécessaires, il est nécessaire de **développer des mécanismes adaptés : capacité, CfD, couverture, PA, contrats long terme, achats groupés, compensation carbone, etc.**

Pour concevoir au mieux l'évolution du système électrique en tenant compte des nombreux paramètres dont il dépend, il est indispensable de **se doter d'une vision collective appuyée sur quelques ambitions directrices, basée sur des modèles de prospective inspirant confiance**, et couvrant l'échelle de temps nécessaire, c'est-à-dire plusieurs dizaines d'années.

**L'État doit assumer pleinement sa responsabilité** fondamentale dans la conception, le pilotage et le financement de cette évolution, et **intervenir plus vigoureusement dans la définition des positions européennes** (en particulier pour la taxonomie).



# 02

## RÉALITÉS OPÉRATIONNELLES DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE ET DISPOSITIONS SOUHAITABLES

### 1/ ASSURER LA CONTINUITÉ ET LA QUALITÉ DE LA FOURNITURE DANS UN SYSTÈME BOULEVERSÉ

La montée des énergies renouvelables intermittentes (EnRi), en pratique de l'éolien et du photovoltaïque, et la décentralisation du système électrique (autoconsommation) bouleversent les caractéristiques et le fonctionnement du réseau électrique. Ces sources sont irrégulières et font appel à deux énergies primaires – le vent et le soleil – qui ne se stockent pas.

La tendance à la hausse de la consommation d'électricité fait désormais l'objet d'un quasi-consensus, en raison de la nécessaire électrification des usages. Ce « game changer » sur l'offre d'électricité a été documenté par l'Agence Internationale de l'Energie dans ses dernières publications.

Par ailleurs, les écarts au fil de l'année entre l'offre et la demande d'électricité se manifestent avec une amplitude et une fréquence plus grande. C'est une problématique mondiale, comme l'a rappelé l'AIE.

#### COMMENT RÉAGIR ?

D'abord, on ne peut transiger avec la sécurité d'approvisionnement : comme il arrive que simultanément, sur de vastes étendues, les EnRi ne produisent pas d'électricité pendant plusieurs jours, le système électrique finit par se heurter au difficile problème du stockage de longue durée.

Il est essentiel de maintenir la stabilité de la tension et de la fréquence, malgré l'absence d'inertie naturelle de l'éolien et du photovoltaïque.

D'autre part, la production et la distribution d'électricité se décentralisent, sous l'effet des directives européennes, de la multiplication des producteurs d'EnRi – surtout en photovoltaïque – et en accord avec un mouvement qui favorise l'autoconsommation et plus généralement des circuits de production plus courts.

Les enjeux internationaux sont forts, et notre position

économique et stratégique est en cause. On entend parfois dire qu'il n'y a pas d'urgence. C'est oublier, d'une part l'interconnexion électrique de la plaque européenne, qui nous exposera dès 2022 aux conséquences de l'arrêt chez nos voisins de centrales nucléaires et à charbon, et d'autre part le temps nécessaire pour préparer le renouvellement du parc nucléaire.

Enfin, les nouvelles installations et les modifications qu'elles entraînent dans la structure du réseau ont un coût considérable. Il s'agit de le réduire autant que possible, et d'attirer les financements privés sans nuire à la qualité du résultat.

#### 1-1/ LE STOCKAGE DE LONGUE DURÉE, LES ESPOIRS PRÉMATURÉS MIS DANS L'HYDROGÈNE

Les défaillances saisonnières simultanées du photovoltaïque et de l'éolien obligent, si on veut confier à ces deux technologies une part importante de la fourniture d'électricité, à installer des capacités de stockage massives portant sur plusieurs semaines.

Il n'y a aujourd'hui qu'une technologie vraiment utilisée : les barrages équipés de stations de pompage (STEP). Malheureusement, en Europe, la géographie et les obstructions de l'opinion publique empêchent de les développer significativement au-delà de ce qui existe. Les STEP ne permettent de stocker que quelques jours, au plus quelques semaines d'électricité.

Beaucoup d'espoirs sont mis dans l'hydrogène. Sans négliger les impératifs de sécurité liés à sa manipulation, le principal défi est de parvenir à un coût de revient acceptable. Ce coût va dépendre du rendement énergétique et du coût des électrolyseurs et des piles à combustible. Une partie de la réponse viendra de la recherche, dont on attend des ruptures, mais une autre sera liée à l'ampleur des investissements industriels et à leur montée en puissance.

Le stockage d'énergie électrique sous forme d'hydrogène trouvera sa valeur économique quand de nouveaux usages seront ouverts à l'énergie décarbonée (industrie,



transport, résidentiel). Les modèles économiques d'emploi de l'hydrogène dans l'énergie (Power to H2, pile à combustible, méthanation) sont plus lointains, d'autant que nous risquons de manquer d'électricité pendant plusieurs années. Le marché moteur sera d'abord celui de l'hydrogène industriel.

En France, les ballons d'eau chaude sanitaire ont une capacité de stockage estimée à 4 GW. Cette capacité n'est pas négligeable, mais elle reste de très court terme et la chaleur stockée ne peut physiquement pas revenir sous forme d'électricité.

## **1-2/ LE STOCKAGE DE QUELQUES HEURES, LES BATTERIES**

Pour compenser les fluctuations à l'échelle de la seconde ou de la journée, les batteries sont désormais utilisables, en raison de la forte chute de leur prix. C'est une conséquence du développement des voitures électriques et des énormes investissements asiatiques sur la filière lithium-ion. Il y a encore de grands progrès à faire : accroître la capacité de stockage, prendre en compte le cycle de vie complet de la batterie - profondeur de décharge, vieillissement en température, cycle de charge/décharge, maintien des performances -, la provenance et la recyclabilité des matériaux, la sécurité. Cependant, la technologie Li-ion domine tellement que les efforts de R&D devront porter principalement sur son amélioration, sans toutefois oublier les technologies d'avenir que semblent être par exemple les batteries « tout solide ».

Comme transporter des batteries coûte cher, il y aura des usines en Europe, mais pourront-elles être contrôlées par des industriels européens ? L'avenir des plans en cours dépendra de l'attitude des constructeurs de voitures : accepteront-ils de privilégier des fournisseurs européens ?

## **1-3/ QUELLE CAPACITÉ DE STOCKAGE APPORTERAIENT LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES ?**

Selon des estimations faites en 2017, Enedis retenait pour 2035 une fourchette comprise entre 3 et 9 millions de véhicules électriques, et une consommation annuelle entre 8 et 25 TWh ; le comité français des constructeurs automobiles s'appuyait sur un scénario médian de 9 TWh, soit 3% de la consommation nationale. En termes de puissance, l'impact pourrait cependant être significatif, en obligeant à renforcer le réseau de distribution. En réalité, cet impact dépendra des comportements et des modes de recharge. Là-dessus, il existe une grande

incertitude : les estimations varient en effet de 1,6 GW à 10,2 GW, la valeur extrême dépendant du pic de consommation du soir. Un cadre de régulation pourrait s'avérer nécessaire, par exemple un signal tarifaire ou un système de gestion de la charge.

Pour le stockage, 15 millions de voitures avec chacune une batterie de 30 kWh fourniraient une capacité équivalente à la production du parc nucléaire français pendant 7 heures. Mais comment cela se répartira-t-il dans la journée ? Et puis, il faudrait que les installations de charge et les voitures soient conçues pour échanger de l'électricité dans les deux sens. Cela fait beaucoup d'hypothèses. En tout état de cause, il serait utile de chiffrer le coût des investissements, la valeur du service potentiel et de voir comment rémunérer ceux qui le rendraient.

## **2/ COMMENT CORRIGER LES INSTABILITÉS DUES AUX FLUCTUATIONS DES ENRI ?**



Les arrêts de plusieurs semaines des installations éoliennes et photovoltaïques sont heureusement rares. En revanche, leur production ne cesse de fluctuer au gré des variations du vent et de l'ensoleillement. Rappelons que la production d'une éolienne varie comme le cube de la vitesse du vent. Si on ne les compensait pas, ces fluctuations finiraient par se traduire chez l'utilisateur par des variations de fréquence et de tension que les appareils électriques ne peuvent supporter, ou par des disjonctions pouvant se propager à l'ensemble de l'Europe. Que peut-on faire ?

### **2-1 / MODULER LA PRODUCTION**

On peut facilement faire varier la quantité d'électricité produite par les centrales thermiques et les barrages. Contrairement à la plupart des autres pays, les centrales nucléaires françaises ont été conçues pour pouvoir faire du « suivi de charge », tout en étant utilisées comme un moyen de base. On peut programmer deux baisses par jour par réacteur, pouvant aller jusqu'à 80% de la puissance nominale en 30 minutes environ. Cela représente un atout pour l'intégration des EnRi. Cependant le fonctionnement à bas régime ne peut pas durer ; il est nécessaire de remonter la puissance ou d'arrêter le réacteur. D'autre part, mettre des centrales nucléaires à l'arrêt entraîne un manque à gagner important pour

la collectivité. Si l'on augmente trop la proportion d'éolien et de photovoltaïque, il faudra cependant accepter de tels arrêts pour maintenir l'équilibre du réseau.

## **2-2 / EFFACER UNE PARTIE DE LA DEMANDE**

L'effacement de la demande est pratiqué depuis longtemps avec les consommateurs industriels, en particulier les entreprises électro-intensives (« interruptibilité »). Aller plus loin que les 5 GW actuellement estimés passerait par une « flexi-conception » des installations industrielles, afin de préserver la production malgré les interruptions de courant. Cependant, comment cet investissement sera-t-il financé pour ne pas réduire la compétitivité des entreprises françaises ? Pour les particuliers, l'effacement de consommation pendant de courtes durées commence à apparaître, via les solutions proposées par les agrégateurs, qui sont facilitées par les interfaces numériques.

Le pilotage de la demande par les opérateurs d'effacement fait le plus souvent appel à des algorithmes intelligents, et permet d'offrir des solutions qui s'étendent du temps réel au long terme : services d'ajustement de très faible capacité et très rapides afin de maintenir la fréquence à 50 Hz (réserve primaire automatique) ; vente d'énergie effacée au marché de l'énergie ; vente de disponibilité de puissance au marché de capacité ; ou encore services au réseau de distribution pour aider à résoudre les contraintes du réseau. Il faut aussi s'assurer que ce pilotage ne vient pas créer des congestions.

Les blocs d'effacement créés par les opérateurs représentent ainsi une alternative à la production, mais aussi aux investissements sur le réseau en matière de déploiement, de renforcement, ou de maintenance des ouvrages.

## **2-3 / DÉVELOPPER LES INTERCONNEXIONS ENTRE ÉLÉMENTS DU RÉSEAU**

Les interconnexions sont depuis longtemps un facteur important de stabilité du réseau européen. Elles permettent la compensation des défaillances locales. Pour les installations éoliennes et photovoltaïques, elles ont une vertu potentielle supplémentaire : moyenniser les variations de vent et de soleil en élargissant la surface concernée. Malheureusement, dans les pays européens, construire de nouvelles lignes à haute tension est difficile : en 2019, l'Allemagne, malgré son besoin évident de connecter les éoliennes du Nord et les usines du Sud, n'a pu construire que 36 km de lignes.

## **2-4 / COMPENSER LES FLUCTUATIONS RAPIDES**

En régime transitoire (par exemple suite à une forte perturbation), il s'agit de retrouver rapidement l'équilibre et d'éviter le blackout. Actuellement, la fréquence est la base de l'exploitation du réseau électrique européen, où la France et l'Allemagne occupent une situation géographique privilégiée, au sein de la zone UCTE. Si un déséquilibre local se produit, il est instantanément compensé par les réserves constituées par l'ensemble des moyens de la zone interconnectée, qui rétablissent l'équilibre production-consommation, et la fréquence. Plus le réseau est grand, plus l'énergie cinétique globale est importante, plus le système est sûr : c'est la tendance qui a prévalu jusqu'à présent.

Mais les installations éoliennes et photovoltaïques participent peu, ou pas, aux énergies magnétique et cinétique qui stabilisent le réseau. Plus leur taux de pénétration est important, plus la baisse de la fréquence sera rapide en cas d'incident : on risque d'atteindre le seuil critique de délestage des charges avant activation des systèmes de défense. L'injection d'énergie par des batteries associées à de l'électronique de puissance ou par des rotors supplémentaires (compensateurs synchrones) est un moyen de réduire le risque en fournissant l'équivalent d'une inertie artificielle. Des travaux complémentaires permettront d'évaluer les besoins et de définir le dimensionnement des réserves de stockage et leur répartition géographique, ainsi que le pilotage du système.

Du fait du raccordement des EnRi, on fait face à un système mixte combinant électronique et électrotechnique. La gestion des situations critiques nécessite une forte adaptation des protections, via de l'électronique de puissance. Une attention particulière devra notamment être portée aux composants nécessaires à la chaîne de coupure (protection, relais et disjoncteurs), aux interactions AC/DC et à la transformation DC.

Enfin, le besoin de régulation locale est croissant. Aujourd'hui l'équilibre du réseau interconnecté européen est géré par les gestionnaires de réseaux de transport (GRT). Afin de prendre en compte l'autoconsommation et la décentralisation de la production il sera nécessaire de mettre en place une coordination locale/nationale avec les gestionnaires de réseaux de distribution (GRD). Les actions au niveau local peuvent avoir des impacts au niveau global et vice versa.

La résilience du réseau électrique après un incident majeur est également une problématique importante. Avec du numérique, des productions décentralisées,

des boucles locales et de l'autoconsommation, le schéma habituel doit être repensé.

Il faut aussi identifier les synergies possibles entre réseaux d'énergie (électricité, gaz naturel, chaleur).

Les zones non-interconnectées (ZNI) et les territoires insulaires permettent, en admettant des coûts plus élevés, de tester de nouvelles solutions.

## **2-5 / AMÉLIORER LES PRÉVISIONS MÉTÉOROLOGIQUES**

Les productions éoliennes et photovoltaïques dépendent directement des conditions météorologiques. Dans le cas de la production éolienne, les erreurs de prévision à J+1 sont assez faibles, mais des erreurs plus importantes peuvent arriver quelques fois par an. La production photovoltaïque est plus difficilement prévisible, notamment à maille fine, en raison de la difficulté à prévoir la formation des nuages et leur position précise. Pour gérer le système électrique au plus près du temps réel, et faire le meilleur usage des dispositifs de compensation des écarts entre offre et demande, il faut coupler les prévisions de consommation avec les prévisions météorologiques. La qualité et la précision des modèles de prévision météo (notamment à maille fine) sont importantes, dans un contexte d'exposition croissante du système électrique aux aléas climatiques.

## **3/ LE PILOTAGE D'UN RÉSEAU DE PLUS EN PLUS DÉCENTRALISÉ**

Plus de la moitié des nouvelles installations de production d'électricité aujourd'hui construites en Europe sont à énergie renouvelable intermittente (EnRi). Toutefois, si la puissance ainsi installée est considérable, leur contribution moyenne en énergie reste globalement faible par rapport aux moyens conventionnels (nucléaire, hydraulique, thermique, ...) et de fortes disparités existent entre les pays européens. En France, les scénarios d'évolution proposés par RTE sont très contrastés, avec à l'horizon 2035 une proportion d'électricité issue d'énergies renouvelables comprise entre 40 % et 70 %, incluant éolien, photovoltaïque et hydraulique. La progression serait principalement le fait de l'éolien (production multipliée par 3 à 5) et du photovoltaïque (multiplication par 5 à 7). Les installations éoliennes sont majoritairement

grandes, avec des puissances de plusieurs MW. La plupart des installations photovoltaïques sont plus faibles et nécessitent des investissements importants de raccordements au réseau.

L'autoconsommation, encore marginale en France (moins de 1% des 37 millions d'abonnés), devrait se développer significativement à partir de 2025, et massivement à partir de 2035. La puissance installée pourrait alors atteindre 10 GW, mais la consommation restera faible. Cependant, l'impact local, en termes de gestion du réseau, devra être pris en compte. Les boucles locales peuvent mettre en commun des moyens de production et de distribution de divers types, mais elles ne disposent pas des réserves de flexibilité du réseau électrique, et le raccordement au réseau demeure une sécurité indispensable.

La tarification actuelle de l'acheminement - TURPE 2 - à 80 % d'énergie et 20 % de puissance ne fait pas payer cette sécurité à son juste prix. Le développement de l'autoconsommation pourrait remettre en question la solidarité nationale apportée par le réseau électrique et, a fortiori, le modèle de financement des infrastructures (principe du TURPE et péréquation tarifaire).

Quoi qu'il en soit, la multiplication des installations et de ceux qui les mettent en œuvre va obliger à gérer de façon cohérente un système de plus en plus décentralisé, en faisant appel à de nouvelles ressources en matière d'intelligence de contrôle et de pilotage, grâce au numérique. C'est la distribution de l'électricité, avec plusieurs opérateurs et le contact direct avec des millions d'usagers, qui constitue la partie la plus complexe.

La reconfiguration du paysage énergétique européen conduit à l'apparition de nouveaux métiers et de nouveaux acteurs : agrégateurs et opérateurs de flexibilité, nouveaux fournisseurs d'électricité, pilotes énergétiques locaux, acteurs des technologies de l'information... La coordination de ces acteurs est indispensable et permettra une adéquation entre : (i) les technologies qui seront conçues et déployées (nouveaux équipements, nouveaux moyens de production ou de stockage) ; (ii) l'évolution des processus industriels de production ; (iii) l'évolution des marchés de l'énergie (contrats proposés aux clients, adaptation de la tarification...).

## **4/ LE NUMÉRIQUE : APPORTS ET VULNÉRABILITÉ**

Le numérique contribuera au pilotage décentralisé et permettra d'ouvrir de nouveaux produits et services B2C et B2B pour moduler et agréger les offres et les demandes. Déjà, les dizaines de millions de compteurs Linky collectent les données de consommation toutes les heures et les remontent toutes les 24 heures.

L'utilisation de ces données peut faciliter, au niveau territorial, l'équilibre entre la demande et la production décentralisée, en s'appuyant sur des logiciels de pilotage du système. Pour favoriser le développement de nouveaux services, certains préconisent de repenser le cadre réglementaire français, en s'inspirant par exemple de la directive européenne DSP2 (Directive de Services de Paiement) qui oblige les banques à mettre à disposition des nouveaux acteurs les données bancaires de leurs clients. Les données peuvent être des données de production, d'usage et de contexte, de retour d'expérience du consommateur ou encore des prévisions. Leur utilisation, couplée à l'intelligence artificielle et à l'internet des objets, peut également répondre à d'autres besoins du réseau tels que la gestion des actifs, la maintenance, le diagnostic des défauts, l'électromobilité, la visualisation & le traitement des données, l'observation des réseaux, etc.

### **L'AUTRE FACE DU NUMÉRIQUE : SA PROPRE CONSOMMATION D'ÉNERGIE**

Comme le cholestérol, le numérique superpose le bon et le mauvais.

Bien au-delà de leurs applications bénéfiques au secteur de l'énergie, la consommation électrique des objets connectés et des opérations numériques connaît une telle croissance que tout le développement du numérique en est affecté. La consommation est désormais ressentie comme une limite à la conception des matériels et aux méthodes de programmation et de calcul, même si les niveaux de consommation (y compris les 40 % liés à la production des appareils) n'atteignent pas les sommets dénoncés par certaines associations écologistes.

Avec la fin des facilités que la loi de Moore a permises pendant soixante ans, on va vers une révision complète de la chaîne matériels, architectures et logiciels, depuis la technologie des circuits intégrés jusqu'aux supercalculateurs. Cette contrainte est pleinement prise en compte aujourd'hui par les acteurs du numérique.

La France est le seul pays européen actif sur la totalité

de la chaîne. C'est un atout qui nous donne une responsabilité et un leadership dans la construction d'une position européenne.

### **LES RISQUES DE CAPTATION DE VALEUR ET DE CYBER-ATTAQUES**

La décentralisation du réseau, la multiplication des points d'injection, la disponibilité des données et l'arrivée de nouveaux services ouvrent de nouvelles opportunités, mais exposent à des captations de valeur par des opérateurs étrangers (GAFAM et autres)

Elles ouvrent aussi la voie à des cyber-attaques. Pour s'en défendre, deux axes sont à privilégier : 1) empêcher la survenue d'une attaque, 2) étudier ses conséquences et les modalités de redémarrage du réseau. Le redémarrage est une opération complexe : le retour à un fonctionnement nominal peut prendre plusieurs jours.

## **5/ LE MARCHÉ, LA RÉGULATION**

Financement et garantie publique seront primordiaux, mais les pouvoirs publics français et européens doivent organiser le marché pour attirer le plus possible de financement privé. Avec l'arrivée des EnRi, la nécessité de compenser leurs variations, l'accroissement considérable du nombre de sources et d'acteurs, il faut introduire de nouvelles règles permettant de rémunérer les nouveaux équipements et services en fonction de leur utilité à court, moyen et long terme. Ainsi, par exemple, le stockage peut trouver une valeur économique dans les écarts de prix de l'énergie et les différents services qu'il peut rendre aux réseaux.

Le cadre conceptuel permettant de définir les investissements à long terme est à repenser. Les analyses pointent un défaut de confiance dans les règles mises en place : la taxe carbone, les certificats d'économie d'énergie, les planifications régionales d'EnRi, les mécanismes de fixation des prix pour l'électricité, les nouveaux compteurs à retour dynamique.

Les principes de coordination de l'action par fixation de signaux-prix incitatifs ou l'imputation d'efforts selon la règle du pollueur-payeur sont de plus en plus critiqués.

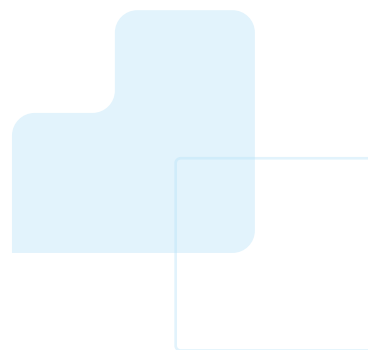
Tous ces outils (y compris les normes, qui ont sur ce qu'elles interdisent l'effet d'une taxation infinie) seront d'autant mieux acceptés qu'ils se référeront aux objectifs essentiels (CO<sub>2</sub>, coût, sécurité) et qu'ils s'appuieront sur des modèles économiques d'aide à la décision.

## 6/ LA MODÉLISATION

Le système énergétique mondial est confronté à des transformations profondes : lutte contre le réchauffement climatique, introduction du numérique, nouveaux modes de vie, émergence du fait local et du rôle du citoyen, arrivée de nouveaux acteurs internationaux sur les marchés, développement en masse des EnRi due à la législation et à la baisse du coût de certains de leurs composants... Les décideurs ont besoin d'outils afin d'orienter la politique énergétique française vers une trajectoire bas carbone, notamment pour la prochaine PPE prévue d'ici 2023. Les modélisations prospectives des réseaux électriques s'insèrent pleinement dans cette ambition d'éclairage de l'avenir énergétique du pays.

Cependant, la diversité des attentes des différents acteurs impliqués, la pluralité des méthodologies de modélisation, et parfois l'opacité des hypothèses rendent les exercices de prospective complexes à appréhender, et peuvent susciter une certaine méfiance. Nous recommandons :

- La transparence et la rationalisation des hypothèses, après mise en commun et confrontation des données non concurrentielles utilisées par les acteurs.
- L'intégration des dimensions systémiques négligées dans certains modèles (notamment les dimensions macroéconomique, multi-vecteurs et multisectorielle, climatique, et SHS).
- L'articulation de modèles d'optimisation des systèmes techniques et de modèles d'équilibre général macro-économique, pour représenter dans un même cadre des modèles d'activités humaines généralement développés séparément (énergie, transport, occupation des sols) et des travaux portant sur des échelles géographiques différentes.
- Des modélisations intégrant l'ensemble des sources d'énergies (électricité, gaz, chaleur, hydrogène, ...) en tenant compte des contraintes d'acceptabilité.
- En relation avec les organismes de recherche, la mise en place d'un réseau capable de répondre rapidement aux sollicitations des élus et du gouvernement.
- La mise en commun des travaux des modélisateurs à une échelle nationale et européenne.
- Il importe également que la France puisse influencer sur la prospective menée au niveau européen sur le même sujet (notamment via le JRC).



## 7/ LE POSITIONNEMENT FRANÇAIS (SWOT)

La méthode SWOT permet de cartographier le positionnement d'un acteur par rapport à un projet, et l'effet d'un environnement extérieur sur ce positionnement. « L'acteur » considéré ici est le système électrique français, comprenant les producteurs d'électricité, les opérateurs de réseau, les administrations publiques compétentes,

les laboratoires de recherches et les universités, les principaux fournisseurs de rang 1, les consommateurs actuels et futurs connus.

On peut appliquer cette méthode à tel ou tel élément du système. D'une manière générale, nous ne tenons pas assez compte de notre positionnement, c'est-à-dire de nos forces réelles et de celles de nos concurrents : ainsi, négliger la détermination et les capacités chinoises en panneaux photovoltaïques nous a conduits à subventionner cette production avec nos impôts...

### FORCE - STRENGTH

Production de base et semi-base décarbonée et stable

Coordination quotidienne fine entre producteurs et opérateurs de réseau

Dispositifs élaborés de relations avec les consommateurs (tarifs d'effacement, agrégateurs...)

Forte R&D sur les éléments techniques et sur leur intégration

Outils de prospective énergétique reposant sur une tradition quantitative et qualitative

Des groupes industriels de rang mondial en énergie, électrotechnique et électronique de puissance, composants intégrés et informatique

### FAIBLESSE - WEAKNESS

Manque d'organisation par l'Etat d'une vision collective

Absence de signal prix de long terme pour favoriser les investissements

Dispersion des responsabilités et du financement public dans le domaine de l'énergie

Manque de coordination entre politique de l'énergie et politique industrielle

Perte de compétences industrielles

Dispersion des mix européens et absence de coordination

Visibilité limitée pour la transition énergétique et la neutralité carbone à 2050

Réseau électrique et parc de production ayant quelques fragilités liées à l'âge et au changement climatique

Sous-estimation fréquente des temps et des coûts de développement et d'industrialisation,

Faible acceptabilité de tout grand projet d'infrastructure

### OPPORTUNITÉ - OPPORTUNITY

Soutiens européens aux aides d'Etat pour certaines innovations industrielles (IPCEI)

Volonté de ré-industrialisation européenne avec des logiques d'autonomie stratégique

Forte mobilisation de communautés énergétiques et de nouveaux vecteurs énergétiques

### MENACES - THREATS

Tensions sur les approvisionnements : gaz, matières premières minérales, semi-conducteurs, ...

Pressions géopolitiques utilisant l'énergie comme moyen d'influence.

Coûts élevés (acceptabilité sociale)

Financement potentiellement complexe

Absence de mécanismes de solidarité adaptés au projet de décarbonation du système énergétique européen (plus large que l'électricité)

Difficulté à faire valoir les spécificités du système électrique français dans les institutions publiques européennes

## 8/ LA NÉCESSITÉ D'UNE VISION COLLECTIVE, LE BON USAGE DES PLANS

L'évolution du système électrique dépend de paramètres multiples, techniques, économiques, politiques, sociaux, culturels, d'autant plus que ses conséquences affectent quasiment tous les secteurs d'activité. Il est donc indispensable de construire une vision collective capable d'inspirer l'action publique et privée. C'est à l'État d'organiser cette construction en rassemblant les acteurs, comme le faisait autrefois le Commissariat au Plan.

Aujourd'hui, la vision est incomplète, et les éléments disponibles sont dispersés entre plusieurs institutions qui ne travaillent pas à l'élaboration de repères communs. L'action publique prend la forme de plans, plus ou moins vastes. Les titres ne manquent pas : PIA, relance, énergies renouvelables, nucléaire, batteries, hydrogène, électronique de puissance, ... Cependant, leur nombre et l'absence de cadrage commun, de correspondances et de hiérarchisation explicites risquent d'engendrer de la confusion, d'autant que la responsabilité est morcelée entre plusieurs ministères et agences.

Et il importe de suivre plus méthodiquement leur exécution, en tenant compte des retours d'expérience et de l'évolution de la situation.

## 9/ LES RÔLES DE L'ÉTAT

Plusieurs choix cruciaux conditionnant l'avenir de nos systèmes énergétiques dépendent de l'État :

- Le mix de production d'électricité, en relation avec le système européen, et en tenant compte de la situation internationale.
- La coordination nationale des investissements, qui permettra à terme de planifier l'intégration croissante des EnRi et des nouveaux usages sur les réseaux.
- Les repères de long terme indispensables pour fournir un point d'appui aux marchés de l'énergie dans le cadre européen, tels que l'envoi de signaux économiques incitatifs.
- Les règles d'accès permettant de rendre visibles et de rentabiliser les actifs qui ont de la valeur,

avec entre autres une adaptation des architectures de marché et/ou des grid codes.

- Tout cela fait appel à cinq fonctions : stratège et organisateur d'une vision collective, législateur, investisseur, régulateur, garant international.

### STRATÈGE ET ORGANISATEUR D'UNE VISION COLLECTIVE

L'importance pour le pays de l'avenir du système électrique, l'ampleur et la longue portée des investissements, l'étendue de la chaîne de valeur, depuis les approvisionnements miniers jusqu'à la consommation et au mode de vie des particuliers, les effets sur l'environnement, la sensibilité et les questions des citoyens, les implications internationales, rendent nécessaire la restauration de l'État stratège et l'organisation par lui d'une vision globale de long terme, partagée par les principaux acteurs.

Avec des régimes politiques très différents, c'est ce que font aujourd'hui les États-Unis et la Chine. En France, la prospective publique a perdu son influence en étant éparpillée entre plusieurs institutions (Haut-Commissariat au Plan, France Stratégie, SGPI, CRE, Ademe, ministères ...), et l'action dans le domaine de l'énergie est dispersée entre plusieurs agences et ministères (le rattachement de l'énergie au ministère de l'environnement étant une particularité française).

Une forte initiative de l'État, accompagnée d'une réorganisation de ses propres services, paraît indispensable pour fédérer et rendre efficace nos compétences.

### LÉGISLATEUR

Depuis déjà longtemps, la loi encadre le développement du système électrique. En 1946, un nouveau cadre a été instauré pour que le gaz et l'électricité contribuent à la réindustrialisation. A partir des années 2000, conformément aux directives européennes de 1996, la loi française a ouvert les marchés du gaz et de l'électricité.

Le législateur peut définir un cadre normatif adapté à des objectifs nationaux combinant efficacité et justice sociale.

## **INVESTISSEUR**

Dans le secteur de l'énergie, une grande partie des investissements est en dehors des conditions de rentabilité acceptées par les capitaux privés, car les retours sont lointains (des dizaines d'années) et partiellement indirects. C'est à l'État d'investir et il l'a fait massivement pour les EnRi. Il dispose pour cela de plusieurs moyens : dotation des opérateurs nationaux, garanties d'emprunt, avantages fiscaux, compensation d'avantages tarifaires.

## **RÉGULATEUR**

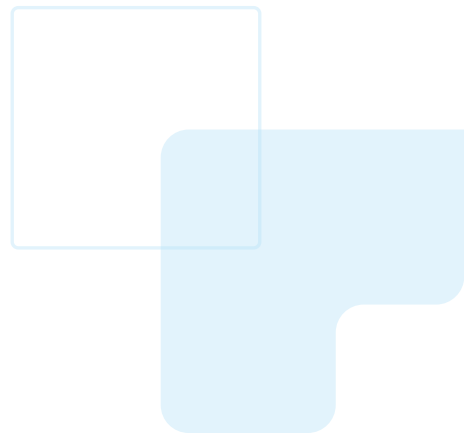
L'Etat assure d'abord une normalisation technique (Afnor). Il participe à la régulation des tarifs sur les réseaux d'électricité et de gaz avec la Commission de Régulation de l'Energie et les procédures réglementaires conduites par le ministère en charge de l'énergie. Il régule aussi par la fiscalité de l'énergie et les tarifs de rachats de l'électricité issue d'EnRi.

Antérieurement, le marché avait été organisé pour favoriser l'utilisation optimale à tout instant des investissements de production et de distribution. Avec l'arrivée des EnRi, l'accroissement considérable du nombre de sources, l'imprévisibilité de leur production, il faut introduire des règles permettant de rémunérer les nouveaux équipements et services en fonction de leur utilité à court, moyen et long terme. La CRE et la Commission européenne sont les garants de la régulation de ces marchés et doivent donc être associées au processus.

## **GARANT DE LA SOLIDARITÉ EUROPÉENNE ET DES ACCORDS INTERNATIONAUX :**

L'Europe des centrales pilotables était électriquement homogène. Aujourd'hui, alors que chaque pays reste pour partie responsable de son mix électrique (modulo la part renouvelable et la décarbonation nécessaire du mix), la montée de l'éolien et du photovoltaïque crée des divergences profondes. Cependant l'interconnexion de la plaque européenne rend la solidarité nécessaire. Laquelle ? On en débat à Bruxelles. L'exemple le plus net est celui de la taxonomie, c'est-à-dire la liste des technologies éligibles aux aides d'Etat en Europe : le nucléaire en fera-t-il partie ? La France essaie de faire valoir son point de vue.

Plus largement, l'énergie est sans doute le sujet « civil » qui mêle le plus confrontation et coopération entre les grands ensembles économiques internationaux. Le rôle de l'État est indispensable.









**anRT**

ASSOCIATION NATIONALE  
RECHERCHE TECHNOLOGIE

33 rue Rennequin  
75017 - PARIS  
Tél : +33(0)1 55 35 25 50  
com@anrt.asso.fr  
www.anrt.asso.fr