



Le système électrique du futur



Union Française de l'Électricité
L'Électricité, c'est l'Avenir !

Janvier 2018

Table des matières

1. Un système électrique en plein bouleversement	4
• L'électricité est l'énergie du futur	4
• L'appétence sociétale pour les EnR, les actions liées à la transition énergétique et la montée en compétence des collectivités locales sont des vecteurs de décentralisation	4
• Les attentes des consommateurs se renforcent	4
2. Les défis techniques du système électrique du futur sont nombreux	6
• Le maintien de l'équilibre offre - demande	7
• L'adaptation réseaux électriques	7
• La stabilité du système électrique	7
• L'intégration du numérique	8
3. Les solutions techniques existent mais leurs mises en œuvre doivent être anticipées	9
• La modulation du parc programmable	9
• Le développement des réseaux électriques	9
• L'intelligence embarquée des infrastructures électriques	9
• Le stockage	9
• La participation des nouvelles énergies renouvelables	10
• Le pilotage de la demande	10
• L'articulation de cette multitude d'acteurs	10
• L'électronique de puissance	10
4. Préparer aujourd'hui le système électrique de demain	11
• Encourager l'électrification des usages	11
• Anticiper les bifurcations technologiques du système électrique	11
• Se préparer à l'évolution de l'architecture du fonctionnement du système électrique	11
• Déployer un mix de production composé d'énergies renouvelables variables et de centrales programmables à faibles émissions de carbone cohérent avec le système électrique	12
• Coordonner les strates de la prise de décision	12



Logements confortables et connectés, centres urbains sains et peu bruyants, électricité distribuée sur l'ensemble du territoire national, mobilité propre dont véhicules électriques et véhicules autonomes et partagés... Le monde de demain est agréable à vivre, sobre en énergie et neutre en émissions de CO₂. La consommation d'énergie a diminué et l'électricité décarbonée en représente désormais la majeure partie. Le plus grand appareil industriel du monde, le système électrique européen, a poursuivi son aventure pour braver ses nouveaux défis : certains consommateurs ont choisi de produire leur électricité eux-mêmes, les énergies renouvelables sont devenues la principale source de production et les usages de l'électricité participent à l'équilibre du système électrique. Les réseaux électriques se sont adaptés pour maintenir l'indispensable équilibre entre consommation et production et permettre les échanges croissants d'informations associées aux flux énergétiques. Cette mue a parfois nécessité de repenser certains fondamentaux du système électrique. Plus important encore, la transformation du système électrique a été menée dans la continuité, en préservant la disponibilité et la qualité de l'électricité, ainsi que son atout d'être décarbonée grâce au nucléaire et aux énergies renouvelables.

L'UFE apporte sa contribution dans une vision d'ensemble des futurs possibles et pour éclairer les choix politiques et sociétaux qui s'offrent à nous.

A l'appui de ce travail de vision, la commission prospective et innovation de l'UFE a pris en compte les études faisant référence à date et les expertises des entreprises du secteur :

EDF, Technical and economic analysis of the European electricity system with 60 % RES, 2015

RTE, E-highway 2050, 2017

RTE, Projet MIGRATE, 2017

Enedis & ADEeF, Valorisation économique des Smart Grids, 2017

ENGIE, PACA 100 % EnR, 2016

EDF, How to increase the rate of renewables in French island electricity systems, 2016.

1 Un système électrique en plein bouleversement

L'électricité est l'énergie du futur

L'électricité est une énergie d'ores et déjà faiblement carbonée et de plus en plus renouvelable (19 % en 2016¹, 40 % en 2030², davantage en 2050). En se substituant aux énergies fossiles dans de nombreux usages (mobilité, bâtiment, industrie...), cette énergie est une arme dans la lutte contre le changement climatique, aux côtés de l'efficacité énergétique et des autres énergies décarbonées. Avec sa capacité à décarboner les usages énergétiques, l'électricité se révèle être une énergie incontournable pour de nombreux usages : chaleur, froid, mobilité, objets connectés... Enfin, l'électricité, lorsqu'elle est transformée en une autre énergie (grâce au power to x), permet aussi de décarboner d'autres vecteurs énergétiques (hydrogène, gaz, chaleur...), participant ainsi à la décarbonation de l'ensemble du mix énergétique.

Le caractère décarboné de l'électricité s'ajoute à des qualités environnementales certaines : l'électricité réduit la pollution sonore et son usage améliore significativement la qualité de l'air en milieu urbain par rapport à d'autres énergies. **Ces qualités climatiques et environnementales, associées à une distribution sur l'ensemble du territoire national et une simplicité d'utilisation, plaident pour une substitution de l'électricité à d'autres énergies dans le mix énergétique français et européen³.**

Aujourd'hui, l'électricité ne représente que 25 % de la consommation d'énergie finale française. (l'énergie la plus utilisée étant le pétrole). Le contenu CO2 de l'électricité française s'élève à environ 50 gCO2/kWh, soit 6 fois moins que celui du pétrole.

L'appétence sociétale pour les énergies renouvelables, les actions liées à la transition énergétique et la montée en compétence des collectivités locales sont des vecteurs de décentralisation

L'électricité est, avec les réseaux de chaleur, le principal vecteur de développement des énergies renouvelables. Celles-ci se développent en effet beaucoup plus rapidement dans l'électricité que dans les autres énergies⁴.

Les potentiels de développement des énergies renouvelables

existent dans tous les territoires, bien qu'ils ne s'agissent pas nécessairement des mêmes gisements en fonction de leurs caractéristiques (urbain ou rural, existence ou non de gisements éoliens, PV, énergies marines, biomasse forestière ou agricole, géothermie, hydroélectricité...). Elles représentent un enjeu majeur de développement territorial, tant en termes d'activité que d'emploi et d'attractivité. Les collectivités locales ayant la meilleure connaissance des gisements de leurs territoires, les lois de réformes territoriales leur ont attribué des compétences énergétiques nouvelles (loi MAPTAM, loi NOTRE, Réforme des régions...).

Au-delà des retombées économiques directes, il existe une appétence sociétale pour les énergies renouvelables⁵, en particulier lorsqu'elles sont produites localement et/ou autoconsommées (photovoltaïque sur toiture par exemple). Cela explique que **le secteur électrique soit au début d'une phase de décentralisation avec à la fois la montée de l'autoconsommation et des énergies nouvelles renouvelables très locales.**

En 2017, l'autoconsommation a représenté plus de la moitié des raccordements photovoltaïques, avec près de 20 000 installations au total. D'après l'étude IFOP pour Synopia de janvier 2017, 87 % des interrogés se disent prêts à faire évoluer leurs habitudes de consommation pour les adapter à la production locale (vent, soleil...).

Les attentes des consommateurs se renforcent

Un nombre croissant de consommateurs aspirent à participer à la protection de l'environnement ainsi qu'à consommer local, dans la mesure où leurs besoins individuels sont remplis. Le système électrique doit s'adapter pour répondre à cette nouvelle attente, en permettant par exemple de valoriser, le cas échéant, la valeur verte et la valeur locale de l'électricité. Cette nouvelle attente s'accompagne d'un renforcement des exigences vis-à-vis du système électrique.

Ainsi, malgré cette évolution des attentes sociétales, un nombre important de consommateurs ne comprendraient pas que le système électrique soit modifié si ses coûts augmentent. Au contraire, la réduction du poids de l'énergie dans leur budget est une attente de millions de ménages modestes. Trois écueils à la transformation du système sont identifiés dans le cas d'une non maîtrise des coûts :

1. RTE, Bilan électrique 2016, 2017.

2. Objectif de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte.

3. Dans son Scénario énergie-climat 2050, publié fin 2017, l'ADEME voit la part de l'électricité passer de 25 à 40% de la consommation d'énergie finale.

4. La part des énergies renouvelables s'élève à 19% pour l'électricité, 45% pour la chaleur, 7% pour les carburants et 0.05% pour le gaz.

5. Cette appétence est souvent moindre pour les projets de dimension industrielle, qui peuvent être qualifiés de « centralisés ».

1. La faible acceptabilité de la transformation du système électrique (augmentation des recours, refus de la transformation...);
2. La réduction de la compétitivité de l'économie française et ses conséquences en termes d'activité économique et d'emplois ;
3. Le déport des consommations énergétiques vers des énergies plus carbonées.

La transformation du système électrique doit donc être menée tout en maintenant **un prix de l'électricité acceptable**. Cette exigence **ne doit pas non plus être réalisée au détriment de la qualité de la fourniture d'électricité** : les consommateurs s'attendent *a minima* au maintien de la continuité de fourniture offerte par les réseaux⁶ et à la préservation de la qualité de l'onde. Cet enjeu de la qualité de fourniture est d'autant plus important que de nombreux objets électroniques sont ajoutés chaque jour au système électrique. Pour ces mêmes raisons, le courant alternatif est à préserver au niveau des consommateurs finals afin de leur éviter de changer leurs équipements (électroménager, câblage, équipements industriels...)⁷. Quant à la qualité de l'onde électrique, à laquelle les objets électroniques sont particulièrement sensibles, elle devra être maintenue alors même que certains équipements à fort contenu électronique ont un potentiel fort à la dégrader⁸.

Ceci étant, de plus en plus de clients sont prêts à envisager la **flexibilisation de leurs consommations** contre des remises de prix. Les fournisseurs peuvent en effet différencier leurs offres en fonction des attentes, ce qui va dans le sens de la personnalisation de la relation fournisseur/client. Cette différenciation s'inscrit dans le cadre plus large du renforcement des attentes de certains consommateurs dans le domaine de l'énergie. Ceux-ci souhaitent mieux connaître et maîtriser leurs consommations (et donc leur facture énergétique), et

sont prêts à participer au système électrique en réduisant leur consommation à certains moments en échange de remises de prix. Cette démarche s'inscrit dans une relation fournisseur/consommateur fluide, personnalisée et en temps réel.

Enfin, l'électricité se révèle être **l'énergie de l'économie du partage** : les consommations et les productions sont mutualisées aux niveaux local, national et européen via les réseaux, permettant ainsi à chacun de disposer d'une électricité à coût beaucoup plus faible que dans le cas d'une superposition de systèmes électriques isolés. Cette imbrication des mailles géographiques du système électrique est permise par la numérisation du système électrique, qui permet aux consommateurs de prendre de plus en plus part à son fonctionnement (pilotage des consommations, tarification dynamique...). **Les réseaux sont, par ailleurs, porteurs d'un certain nombre de choix politiques de solidarité.**

La transformation du système électrique doit donc être mise en œuvre dans un contexte de renforcement des attentes des usagers, non seulement en termes de qualité de fourniture et de prix, mais aussi en termes de participation au système électrique.

Les prix de l'électricité facturés aux ménages et aux entreprises français figurent parmi les plus faibles d'Europe. Le prix de l'électricité représente également un enjeu de compétitivité important pour les industriels et les acteurs du secteur tertiaire. Leur capacité à flexibiliser leurs consommations est un levier concurrentiel supplémentaire déjà exploité par un certain nombre d'entre elles.

6. C'est-à-dire un taux de fourniture supérieur à 99.9% du temps.

7. Le courant continu est pertinent dans certains cas, pour transporter l'électricité sur de longues distances par exemple.

8. Certains équipements électroniques perturbent la forme de l'onde, provoquant, entre autres, des échauffements qui menacent l'intégrité des composants.

2 Les défis techniques du système électrique du futur sont nombreux

LA PUISSANCE

La puissance consommée a un rôle essentiel dans le dimensionnement du parc de production électrique et du réseau nécessaire pour répondre aux besoins des consommateurs.

La courbe de charge d'un consommateur final est la résultante des puissances consommées de l'ensemble de ses équipements électriques. Toutes les puissances de ses appareils ne sont pas appelées au même moment : il y a un foisonnement. Le cumul de toutes les courbes de charge de tous les consommateurs de France constitue la courbe de charge nationale. Ici encore il y a foisonnement entre des consommateurs qui utilisent leurs appareils électriques à des instants différents. La puissance maximum atteinte par cette courbe est la pointe nationale de consommation.

L'approvisionnement en électricité d'un consommateur suppose l'existence d'un câble raccordé à son logement, son magasin, son usine, son immeuble de bureau et un réseau en amont de ce câble qui lui permet d'avoir accès à de la puissance qu'il a souscrite, même s'il ne l'utilise que quelques heures dans l'année. Les investissements nécessaires pour construire et entretenir ces câbles et ces réseaux constituent essentiellement des coûts fixes, c'est-à-dire des investissements lourds, à long terme (durée de vie des plusieurs dizaines d'années) qui ne dépendent pas de leur durée d'utilisation.

PRODUCTION VARIABLE / PRODUCTION PROGRAMMABLE

L'équilibre entre la production et la consommation d'électricité doit être rigoureusement maintenu, sous peine d'effondrement du système électrique. Aussi, la demande variant au cours de la journée, de la semaine et de l'année, le système électrique doit répondre à ces variations. Cet ajustement peut être opéré par la modulation de la production des centrales situées sur le territoire national ou dans des pays voisins, ainsi que par le pilotage de la demande.

Le développement des énergies renouvelables variables rend cet équilibrage plus complexe. En effet, ces énergies dépendent directement des conditions météorologiques (soleil, vent...) qui varient dans le temps. Le système électrique doit donc désormais répondre aussi à ces variations de production, non corrélées aux variations de consommation.

Ces variations sont en partie prévisibles. Mais, si par exemple les erreurs de prévision de la production éolienne française pour le lendemain sont, en moyenne, faibles, certaines erreurs de prévision peuvent être importantes dans des situations extrêmes auxquelles le système électrique doit savoir faire face.

Ainsi, **plus il y a de capacités de production d'EnR variables installées, plus le système électrique doit être en mesure de faire face à des variations d'envergure et à des situations extrêmes** (surproduction d'EnR par rapport à la demande, ou au contraire production d'EnR très faible devant être compensée par la flexibilité des centrales programmables en « back-up » à faibles émissions de CO₂, de type nucléaire, hydraulique, biomasse solide ou biogaz).

LA STABILITE DU SYSTEME

Le réseau de transport électrique est maillé au niveau européen. Le transport d'électricité s'effectue en courant alternatif à une fréquence de 50 Hertz en situation d'équilibre offre/demande. Selon que la production est supérieure ou inférieure à la consommation, la fréquence augmente ou diminue. Or, pour le bon fonctionnement de tous les appareils connectés au réseau, il est essentiel que la fréquence soit extrêmement stable (moins de 1 % de variation), ce qui exige un équilibre quasi-parfait à chaque instant entre production et consommation.

En cas de déséquilibre entre injection et soutirage, le gestionnaire du réseau de transport doit pouvoir réagir le plus rapidement possible pour rétablir l'équilibre du système électrique. Pour ce faire il dispose de deux types d'outils : les services système et le mécanisme d'ajustement. Ceux-ci interviennent à des échelles de temps et de puissance différentes.

L'INERTIE DU SYSTEME ELECTRIQUE

L'inertie n'est pas un service système, néanmoins ce phénomène physique participe en lui-même à l'équilibre du système électrique.

La fréquence de l'onde électrique conditionne la vitesse de rotation de la plupart des moteurs électriques alimentés par le réseau électrique, mais aussi la vitesse de rotation des alternateurs injectant de l'électricité dans le réseau (on dit qu'ils sont « couplés » au réseau).

Les technologies classiques de production d'électricité à l'aide d'alternateurs comme ceux utilisés dans les centrales thermique (nucléaire ou à combustible fossile) ou par certaines énergies renouvelables comme l'hydroélectricité constituent des masses tournantes, quelquefois de plusieurs dizaines de tonnes, qui sont autant de résistance au ralentissement ou à l'accélération de leur rotation. L'inertie physique de ces moyens de production est importante pour le maintien de la fréquence du réseau au quotidien. Les moyens qui génèrent de l'électricité à l'aide de masses tournantes ont un effet un rôle stabilisateur important pour le réseau. Ces moyens de production sont actuellement très majoritaires dans le système électrique européen, offrant une abondance d'inertie.

Un changement important de technologies de production pourrait entraîner une baisse de l'inertie de la fréquence de l'onde électrique, qu'il faudrait prendre en compte en introduisant des dispositifs complémentaires : techniques, réglementaires ou commerciaux. Au stade actuel des connaissances, le système électrique ne peut néanmoins pas se passer totalement de machines tournantes, qui sont notamment nécessaires pour créer la forme de l'onde électrique.

Le maintien de l'équilibre offre - demande

Historiquement, la modulation des productions des moyens programmables a permis à l'offre d'électricité de s'adapter aux variations de la demande pour maintenir l'équilibre offre-demande. Néanmoins, l'augmentation de la production variable complexifie progressivement le suivi de la charge.

Au pas horaire, de petites erreurs de prévision météorologique pourront générer des écarts de production de l'ordre de plusieurs dizaines de GW, qui devront être compensés par l'action de ressources de flexibilité. C'est pourquoi la prévision météorologique représente un enjeu clé du maintien de l'équilibre offre-demande.

Au pas de temps annuel, l'équilibre offre - demande sera de plus en plus difficile à maintenir sans l'adaptation des marges opérationnelles et des capacités de back-up⁹ pour compenser les périodes sans vent ou la baisse de la production photovoltaïque en hiver. Autrement dit, **avec une forte pénétration des énergies renouvelables, l'enjeu réside moins dans la gestion des épisodes de froid que des épisodes d'écart important entre la production variable et la consommation (périodes sans vent, la nuit).**

Selon la réglementation française, le dimensionnement du système électrique doit permettre de garantir une durée moyenne de défaillance¹⁰ qui soit au plus de 3 heures par an en moyenne. Aujourd'hui, les réseaux électriques et la modulation de la production d'électricité représentent la majeure partie des ressources de flexibilité du système électrique. Le pilotage de la demande, notamment industrielle, se développe et représente un important gisement.

L'adaptation des réseaux électriques

Le premier enjeu de développement des réseaux électriques consiste à relier les sources d'énergie au reste du système électrique, et en particulier aux consommateurs. Or, ces gisements ne sont pas distribués uniformément sur le territoire. Dans certains cas, les gisements d'énergie peuvent être particulièrement concentrés et éloignés des lieux de consommation (éolien maritime par exemple, mais aussi grand parc photovoltaïque et grands sites éoliens terrestres...). Il s'agit d'un défi puisque les puissances de raccordement sont importantes et que dans certains cas ces raccordements exigent des prouesses technologiques. Transporter de l'électricité sous la mer ou sur de grandes distances nécessite par exemple d'utiliser du courant continu pour réduire les pertes de réseaux.

Tout en cherchant à relier les sites de production renouvelable au système électrique, le développement des réseaux doit viser à limiter les épisodes de congestion lors des pics de production renouvelable, qui peuvent avoir des effets sur la stabilité du réseau à la fois au niveau local, national et européen¹¹. Pour cela, les réseaux doivent permettre de mutualiser les productions variables afin de bénéficier des dynamiques de vent ou d'ensoleillement géographiquement différents, ainsi que des décalages de consommation¹². Ce défi passe par un renforcement des réseaux existants et **un maillage plus dense du système électrique européen**. Lorsque le foisonnement de

la production n'est pas suffisant, les réseaux doivent également **permettre de mutualiser les ressources de flexibilité du système électrique (stockage, pilotage de la demande, effacements, production programmable...).**

Enfin, les équipements électriques des réseaux doivent être adaptés pour être capable d'absorber de fortes variations de production renouvelable et continuer à garantir la sécurité d'approvisionnement du système électrique et la qualité de fourniture.

Aujourd'hui, le réseau électrique français est constitué de 104 000 km de lignes de transport et 1 300 000 km de lignes de distribution. Il est également déjà largement interconnecté avec ses voisins européens. Pour autant, on observe l'apparition de nouveaux besoins en termes d'infrastructures avec la transformation des mix de production européens.

La stabilité du système électrique

L'insertion des énergies renouvelables variables entraîne de nouveaux défis en termes de bonne tenue du système électrique. L'expérience dans les Zones Non Interconnectées (ZNI) a montré que **le dépassement de certains seuils de pénétration d'énergies variables dans le mix de production nécessite des réponses technologiques adaptées.**

Ces seuils dépendent de la taille du système électrique (à la fois en termes de niveau de consommation et de maillage des réseaux). A l'échelle de la plaque continentale européenne, les seuils identifiés sont, en l'état des technologies disponibles, les suivants¹³ :

> De 30 à 40 % en moyenne d'énergies variables dans le système : le système électrique actuel connaît des situations d'instabilité, en particulier lors des périodes de faible demande et/ou de forte production EnR variable.

> De 60 à 100 % en moyenne d'énergies variables dans le système¹⁴ : le fonctionnement du système électrique change de paradigme. La stabilité du système électrique ne peut plus s'appuyer sur l'inertie des machines tournantes. Tandis que la signification de la « fréquence » perd de son sens, apparaissent de nouveaux problèmes de stabilité pour lesquels les solutions opérationnelles n'existent pas encore et sur lesquels des travaux de recherche sont en cours.

Ces seuils ont été identifiés dans de nombreux systèmes électriques (notamment dans les systèmes insulaires, comme celui de l'Irlande) et nécessitent d'accompagner le développement des énergies renouvelables variables par une adaptation du fonctionnement des équipements électriques, tout en mettant à profit la complémentarité et les synergies avec les moyens de production existants. Les seuils indiqués ci-dessus sont par ailleurs beaucoup plus faibles dans de petits systèmes isolés.

Aujourd'hui, ces seuils n'ont pas été atteints en France métropolitaine. On pourrait s'approcher des 30 % d'ici à 2030. En revanche, ils sont déjà atteints dans certaines zones non interconnectées, qui représentent des lieux d'expérimentation importants pour l'industrie électrique.

9. Les capacités de back up sont des moyens de production ou d'effacement qui entrent en œuvre lors des épisodes de forte demande ou de faible production variable.

10. Il ne s'agit pas de « black-out » mais de situations pendant lesquelles des mesures exceptionnelles doivent être activées : effacements dans le cadre de contrats d'interruptibilité, baisse de tension, délestages tournants.

11. Les pics de production photovoltaïque et éolien en Allemagne génèrent des perturbations sur les réseaux limitrophes, au point que la République Tchèque a mis en place des systèmes de sécurité spécifique au niveau de ses interconnexions avec l'Allemagne.

12. L'Europe couvrant plusieurs fuseaux horaires, les besoins d'éclairage sont par exemple différents d'un bout à l'autre du système électrique.

13. Ces seuils ont notamment été identifiés dans l'étude d'EDF, Technical and economic analysis of the European electricity system with 60 % RES, 2015

14. Ce qui signifie que la production renouvelable variable peut dépasser 100 % de la demande à certaines heures de l'année.

L'intégration du numérique

La pénétration des objets connectés (l'Internet of Things ou IoT) dans le quotidien des consommateurs représente de nouveaux enjeux pour le système électrique. Ces équipements exigent en effet une qualité de fourniture particulièrement élevée. Une mauvaise qualité de l'onde et d'éventuelles microcoupures sont susceptibles de mettre en péril l'intégrité de ces équipements.

Le numérique représente toutefois des opportunités importantes pour le fonctionnement du système. En particulier, la part croissante des énergies renouvelables variables dans le système électrique renforce la nécessité de connaître l'état du système électrique en temps réel et le besoin de réagir dans des délais très courts. La gestion du système électrique en présence d'une production renouvelable importante et injectée

sur le réseau via des interfaces électroniques représente un véritable changement de paradigme par rapport aux interfaces électromécaniques traditionnelles. Un défi du numérique est de permettre les échanges d'informations entre des équipements existants et des équipements neufs et futurs, en désolidarisant par exemple les systèmes de contrôle commande des équipements pour permettre leur mise à jour régulière¹⁵.

L'enjeu du numérique est de repousser les limites du système électrique et de le faire évoluer pour l'adapter à la pénétration des énergies renouvelables, à la décentralisation, à la numérisation et aux modifications des attentes des consommateurs tout en conservant un objectif de moindre coût, de très faibles émissions de CO2 et d'une forte résilience.

15. Par exemple, le système de contrôle commande de Linky n'est pas adhérent de l'équipement physique et peut donc être mis à jour en fonction des évolutions technologiques.

3 Les solutions techniques existent mais leur mise en œuvre doit être anticipée

Selon les niveaux de pénétration des EnR variables, différentes réponses techniques existent pour optimiser le fonctionnement du système électrique, tant au niveau des modulations des productions que des infrastructures de réseaux et de la demande. D'autres solutions, comme celles relatives à la numérisation du système électrique ou à l'organisation des acteurs, concernent l'ensemble de la chaîne de valeur du système électrique. **La bonne coordination de ces différentes solutions est l'enjeu fondamental de ces prochaines années pour garantir le bon fonctionnement et l'optimisation économique du système électrique.**

La modulation du parc programmable

Historiquement, la principale source de flexibilité du système électrique réside dans les variations de la production du parc de production programmable, essentiellement nucléaire et hydraulique. Les centrales programmables sont capables de moduler le niveau de leur production en fonction des besoins du système. Chaque centrale a des caractéristiques différentes (vitesse de démarrage, vitesse de la modulation de la charge, seuils techniques minimaux...), ce qui permet de répondre à de nombreux besoins de flexibilité. **La modulation du parc de production programmable représente, à court et moyen terme, la principale source de flexibilité du système électrique pour stabiliser le réseau et en garantir le niveau de fréquence¹⁶.**

Le développement des réseaux électriques

Comme évoqué précédemment, le développement des réseaux électriques (transport et distribution) poursuit différents objectifs. Il vise à relier les gisements de production renouvelables au système électrique et à optimiser son fonctionnement à toutes les mailles géographiques (locale, nationale et européenne) pour participer à en minimiser les coûts. Par ailleurs, le développement des véhicules électriques et des solutions de pilotage de la recharge pourront apporter des services au système électrique. De plus, l'interopérabilité des réseaux électricité/gaz/chauffage à partir d'une vision intégrée des usages au niveau local fait l'objet de recherche dans le cadre de démonstrateurs comme Interflex.

L'intelligence embarquée des infrastructures électriques

Toutes les infrastructures électriques (de production, de réseaux et de demande) doivent évoluer qualitativement pour intégrer les technologies de smart grid. Ces technologies ont pour objectif d'optimiser la gestion dynamique du système électrique, ce qui permet de réduire les besoins de renforcement de réseaux et de moyens de production¹⁸. Elles permettent d'améliorer la gestion prévisionnelle, la résorption automatique de certains incidents,

la régulation centralisée de la tension, le réglage dynamique de la puissance réactive des producteurs... Concrètement, ces différentes solutions smart grid s'appuient sur un ensemble de composants techniques :

- des capteurs pour mieux connaître l'état des grandeurs électrotechniques du réseau, pour le pilotage en temps réel ainsi que pour alimenter les prévisions de production/consommation,
- des équipements numériques de traitement et de transmission des données collectées sur les réseaux vers les systèmes de pilotage ou d'aide à la décision,
- des compteurs communicants,
- des dispositifs d'échanges d'exploitation avec les producteurs,
- de nouvelles fonctions logicielles de supervision et contrôle temps réel¹⁹,
- des outils d'étude et de simulation de réseau,...

L'implantation de ces composants techniques dans les infrastructures électriques rendent possible le pilotage des ressources énergétiques flexibles et des flux sur le réseau avec un pas de temps et une résolution spatiale de plus en plus fins.

Le stockage

Le stockage, à plus ou moins grande échelle, peut fournir de la flexibilité et remplir différentes fonctions :

- Lisser les pics de production et de consommation au pas quotidien et hebdomadaire,
- Optimiser les flux énergétiques à la fois au niveau local et global,
- Améliorer la stabilité du réseau avec des services système,
- Compenser les fluctuations intersaisonnières des productions renouvelables variables et participer à décarboner d'autres énergies.

Ces fonctions sont assurées par différentes technologies de stockage à la fois en concurrence et complémentaires puisque leurs constantes de temps et leurs capacités de stockage peuvent répondre à des besoins différents. Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompes participent à l'équilibrage du système au niveau national, tandis que les batteries des véhicules électriques et les batteries associées aux panneaux photovoltaïques ou aux infrastructures de réseaux contribuent surtout à son optimisation au niveau local. La production d'hydrogène par électrolyse, de méthane «vert» par méthanation et de chaleur à partir d'électricité permettent de valoriser une partie de la production d'électricité pour décarboner d'autres énergies, qui peuvent ensuite être réutilisées pour produire de l'électricité sous certaines conditions économiques. Ce procédé permettra notamment de réaliser du stockage intersaisonnier s'il parvient à être porteur d'une valeur économique et à accéder au marché, en progressant en termes de rendements et de coûts.

16. EDF, *Technical and economic analysis of the European electricity system with 60 % RES*, 2015.

17. RTE, *E-highway 2050*, 2017.

18. Enedis & ADEEF, *Valorisation économique des Smart Grids*, 2017.

19. Les sciences prédictives, par l'intégration du digital, sont une source d'amélioration déjà mise en œuvre avec un potentiel de développement encore important.

Les expérimentations en cours permettent de confirmer la place incontournable du stockage dans le système, tant sur le plan économique qu'écologique et sociétal. Des ruptures technologiques sur ce sujet entraîneraient des modifications profondes du fonctionnement du système électrique.

La participation des nouvelles énergies renouvelables

Les nouvelles énergies renouvelables peuvent également participer à la stabilité du système. En particulier, dans certaines situations, la sécurité du système ne pourra être maintenue que si les énergies renouvelables contribuent aux services systèmes et aux réserves (réglage de tension et de fréquence, inertie synthétique...). Dans un certain nombre de cas de figure, l'écrêtement de la production renouvelable sera une solution économiquement pertinente pour le bon fonctionnement du système électrique. Cette mesure peut aussi permettre de réduire les besoins de réseaux²⁰ et donc le coût de leur raccordement.

Le pilotage de la demande

Le pilotage de la demande est appelé à jouer un rôle croissant dans le fonctionnement du système électrique grâce à la multiplicité des usages. Si les ballons d'eau chaude électriques, associés à des signaux tarifaires «heures pleines - heures creuses» fonctionnent déjà aujourd'hui sur ce principe, la pénétration des équipements électriques pilotables dans les logements accroît le potentiel de flexibilité de la demande. Ainsi, les pompes à chaleur, les radiateurs électriques performants ou les chauffe-eaux thermodynamiques sont pilotables. Tout en respectant le confort des utilisateurs, ils participent donc au bon fonctionnement du système électrique grâce à des incitations tarifaires.

Le pilotage de la demande d'électricité du secteur industriel, en particulier des industries électro-intensives²¹, permet de trouver une rémunération complémentaire sur les marchés de l'électricité. Pour des activités intensives en électricité, produire à certains moments sera moins coûteux qu'à d'autres. La flexibilité des processus de production d'une industrie représente donc une source de compétitivité pour l'industrie tout en participant au bon fonctionnement du système électrique.

L'articulation de cette multitude d'acteurs

L'architecture des marchés de l'électricité doit avoir pour ambition de fournir aux acteurs les signaux économiques susceptibles d'assurer le fonctionnement du système électrique au moindre coût, tout en favorisant l'innovation. La transformation physique du système électrique s'accompagne donc de l'adaptation des marchés, qui permettent de révéler de nouvelles raretés (capacité, flexibilité, services systèmes...).

De nouvelles solutions de transaction émergent pour faciliter les échanges de la multitude d'acteurs et d'équipements connectés. Ces solutions permettent de réaliser des transferts (d'énergie, de capacité, de garanties d'origine...), de tenir des registres transparents et sécurisés et de conclure automatiquement des contrats à très faibles coûts. La fréquence élevée des transactions s'appuie nécessairement sur des capacités de calcul importantes.

Certaines applications de la blockchain peuvent représenter des solutions envisageables, mais une application réellement valorisable de cette technologie à l'énergie reste à développer.

L'électronique de puissance²²

La gestion du système électrique en présence d'une production renouvelable importante et injectée sur le réseau via des interfaces électroniques représente un véritable changement de paradigme par rapport aux interfaces électromécaniques. **La stabilité du système électrique repose moins sur l'inertie mécanique de machines en rotation et davantage sur la capacité à piloter ces interfaces numériques. Pour maintenir la qualité de l'onde électrique, une partie de l'injection de puissance des énergies renouvelables n'est plus en simple « suivi » du signal fréquence délivré par le réseau mais contribue activement à sa formation et à sa stabilité.**

Des travaux de recherche sont encore nécessaires pour garantir la faisabilité, la fiabilité et la qualité de service d'un système basé sur l'intégration massive de composants d'électronique de puissance, côté production mais aussi de plus en plus côté consommation (LED, ordinateurs, systèmes régulés électroniquement...). Le pilotage d'un tel système embarquera une dépendance accrue dans les logiciels, au moins pour la coordination des protections et certaines actions de contrôle, commande et conduite du système : un tel système sera beaucoup plus complexe. Ce changement de paradigme se manifestera lorsque le système électrique européen atteindra 60% de production d'énergie renouvelable en moyenne, mais sa mise au point pour garantir le niveau de sûreté actuel du système électrique nécessite du temps et requiert dès aujourd'hui des investissements significatifs dans la recherche.

L'ensemble de ces solutions n'émergeront que si elles accèdent à une rémunération en rapport aux services qu'elles rendent au système et qui permette d'investir dans les technologies adéquates sur toute la chaîne de valeur.

Enfin, les niveaux d'investissements, notamment pour les particuliers, peuvent être un frein aussi important que la question de la rentabilité ou du temps de retour sur investissement.

20. EDF, *Technical and economic analysis of the European electricity system with 60 % RES*, 2015 ; ENGIE, *PACA 100 % EnR*, 2016 ; RTE, *E-highway 2050*, 2017 ; EDF, *How to increase the rate of renewables in French island electricity systems*, 2016.

21. Papier-carton, chimie, matières plastiques, sidérurgie, ciment, métallurgie...

22. RTE, *Projet MIGRATE*, 2017.

4 Le système électrique de demain doit être préparé aujourd'hui

Encourager l'électrification des usages

Dès à présent, l'électrification des usages doit être incitée (usages thermiques, mobilité, usages industriels...). L'usage de l'électricité en lieu et place des énergies fossiles est déjà bénéfique dans la lutte contre le changement climatique et contre la pollution de l'air. Les nouveaux moyens de production d'électricité sont par ailleurs essentiellement renouvelables. Le respect des objectifs des politiques publiques annoncées (« fin des ventes de voitures essence et diesel en 2040²³ ») est une opportunité majeure pour la qualité de vie des Français et pour le système électrique.

Les investissements dans l'électrification (remplacement des chaudières fioul par des pompes à chaleur par exemple) doivent néanmoins être réalisés avec le souci de garantir la sécurité d'approvisionnement en chaque instant. C'est pourquoi les technologies « smart », y compris le chauffage de l'eau, doivent être intégrées aux nouveaux usages afin de permettre le pilotage des consommations.

Cela nécessite d'adapter le cadre réglementaire pour flexibiliser les équipements électriques, en faisant par exemple évoluer la réglementation sur les équipements électriques pour les rendre « smart grid ready », c'est-à-dire en y intégrant des systèmes de pilotage, des possibilités de démarrage différé (machine à laver par exemple) ou d'interruption temporaire (réfrigérateur).

Anticiper les bifurcations technologiques du système électrique

Les deux grands tournants du système électrique européen (30 à 40 % de production variable puis 60 % de production variable) représentent des sauts technologiques conséquents, qui nécessitent le développement de nouvelles solutions techniques. Les infrastructures électriques (de production, de réseaux et de demande) ont des durées de vie longues, supérieures à 50 ans pour certaines, et n'ont pas vocation à être remplacées simultanément. Les 3900 postes électriques ne pourront par exemple pas être tous remplacés en même temps.

C'est pourquoi **il est essentiel de prendre en compte les enjeux de la coexistence des infrastructures existantes avec les infrastructures de demain pour assurer la continuité du service rendu sur toute la période.** Pour réduire cette période de coexistence d'équipements classiques avec des équipements « smart grid », il est nécessaire, d'imposer aujourd'hui l'installation d'équipements « smart grid ready » dans tout le système électrique (demande, mais aussi réseaux et production), afin que les équipements installés aujourd'hui puissent accompagner la transformation du système électrique à des évolutions futures, notamment à des évolutions logicielles. Par ailleurs, il n'est pas envisageable de poursuivre la transformation du système électrique sans en traiter les enjeux en amont. Les bifurcations du système électrique doivent être anticipées avec la mise en place de démonstrateurs, pour garantir la transformation du système sans dégradation de la qualité de fourniture.

La transformation du système électrique ne pourra pas s'exonérer du traitement de questions transversales au système électrique, telles que sa protection (physique et cybernétique), la fiabilité et la qualité de la fourniture ou encore l'impact sur les centrales programmables existantes.

Le besoin de solutions de stabilité qui permettront de sécuriser le système avec peu ou pas de centrales programmables appelle dès à présent la mise en œuvre d'efforts de R&D importants, des cadres de coopération internationale et des expérimentations, en particulier dans les zones non interconnectées. La coexistence des solutions de demain avec les infrastructures existantes doit être traitée comme un défi technique en tant que tel.

Se préparer à l'évolution de l'architecture du fonctionnement du système électrique

La transition du système électrique est guidée par l'équilibre coût-crédation de valeur des nouvelles solutions. L'architecture des marchés de l'électricité doit permettre à l'ensemble des solutions de révéler leur valeur pour le système électrique, la concurrence sélectionnant les plus intéressantes à un instant et en un point des réseaux donnés. Le market design du système électrique doit permettre la réalisation des projets qui ont le plus d'intérêt du point de vue collectif. **Il devra notamment rémunérer les acteurs pour la capacité et l'énergie, ainsi que pour la flexibilité qu'ils offrent au système électrique.**

Néanmoins, les règles des marchés de l'électricité sont d'abord adaptées aux problématiques et aux technologies actuelles du système, et pas nécessairement à celles de demain. En particulier, l'optimisation de court terme basée sur les coûts variables, ne répond pas à l'enjeu de long terme de décarbonation grâce à des solutions de coûts fixes (production, réseaux...)

De surcroît, **la numérisation croissante des infrastructures et de la transmission des données va ouvrir de nouvelles opportunités de création de valeur dans le système électrique, pour lesquelles le cadre réglementaire n'est pas nécessairement adapté.** Les cadres réglementaires et les modèles économiques vont devoir s'adapter pour permettre l'accès des ressources distribuées (flexibilité, production, stockage...) aux différents marchés de l'électricité tout en respectant le bon fonctionnement du système électrique et en offrant un minimum de visibilité de long terme sur les objectifs aux acteurs. Les décisions d'investissements doivent en effet être prises dans un cadre réglementaire dont la finalité est claire puisque les composants du système électrique ont une durée de vie importante et une part importante des actifs développés aujourd'hui seront encore présents en 2050.

Ainsi, les codes réseaux au niveau européen devront être revus régulièrement pour s'adapter à l'évolution des technologies et à leur pénétration dans le système électrique. Enfin, la diffusion et le partage des données sur le fonctionnement du système électrique est un enjeu majeur du développement de ces nouvelles solutions.

De la même façon, le Tarif d'Utilisation des Réseaux Publics d'Electricité (TURPE) devra évoluer avec les usages des réseaux. La tarification actuelle des réseaux s'appuie en effet essentiellement sur une part variable, dépendant de l'énergie soutirée. Aujourd'hui, le montant payé par un consommateur qui décide de diminuer ses soutirages du réseau (par exemple en devenant autoconsommateur à titre individuel) peut donc décroître significativement, sans que cela ne reflète nécessairement une diminution correspondante des coûts de réseau, ni le fait que ce consommateur continue à bénéficier des autres **services rendus par le réseau, tels que la desserte et l'accès aux marchés de l'électricité, une puissance garantie, la qualité de l'électricité, avec une tension et une fréquence stables, ou encore la puissance de court-circuit**²⁴.

Enfin, les données afférentes aux échanges électriques devront être partagées entre les acteurs au profit de l'intérêt collectif, dans le respect de la législation et des droits des différentes parties²⁵.

Déployer un mix de production composé d'énergies renouvelables variables et de centrales programmables à faibles émissions de carbone cohérent avec le système électrique

Le rythme actuel de développement des énergies renouvelables électriques (photovoltaïque, éolien terrestre, hydraulique, énergies marines...) est inférieur à ce qui est nécessaire pour atteindre l'objectif de la loi relative à la transition énergétique (40 % de la production d'électricité d'origine renouvelable en 2030).

A court terme, le rythme de développement des énergies renouvelables électriques doit donc être accéléré pour atteindre les objectifs fixés par la PPE pour 2023, puis maintenu pour être compatible avec l'objectif de 40 % de production électrique d'origine renouvelable en 2030. Le caractère décarboné de l'électricité doit être assuré dans cette phase de déploiement par l'utilisation de centrales programmables à faible émission de CO₂, s'appuyant sur le socle du parc nucléaire et hydraulique existants et gérant la pointe sans recours à de nouveaux moyens thermiques fossiles.

Progressivement, la production programmable va diminuer au bénéfice de la production variable. Cette évolution devra être cohérente avec les capacités de résilience technologique du système électrique face aux fluctuations de la production et de la demande. Cette répartition évoluera avec l'intégration de nouvelles technologies et l'évolution du fonctionnement du système électrique, ce qui nécessite une importante capacité d'anticipation. Ces centrales programmables vont de plus en plus avoir pour rôle de répondre à la demande et aux déséquilibres ou incidents se produisant pendant des périodes de faible production des énergies renouvelables variables.

La prise en compte des conséquences pour le système d'une forte pénétration d'énergies renouvelables variables, des solutions encore émergentes et des contraintes de vitesse d'évolution du réseau est nécessaire pour construire ce mix. **Dans le cas où les progressions des productions programmables et variables seraient mal coordonnées, des investissements ponctuels dans des capacités de production seraient nécessaires pour assurer la sécurité d'approvisionnement du système électrique. Or, ces investissements sont in fine répercutés dans la facture**

des consommateurs, raison pour laquelle il est essentiel que la trajectoire du mix électrique ne génère pas de tels besoins ponctuels. Ces investissements se transformeraient en coûts échoués qui pèseraient sur l'économie nationale.

Coordonner les strates de la prise de décision

Le système électrique du futur étant plus décentralisé, son déploiement dépend nécessairement de décisions à de nombreux niveaux.

L'Union Européenne fixe d'abord des objectifs de long terme sur le développement des énergies renouvelables ou encore le développement des interconnexions. Ces objectifs ont des conséquences majeures sur l'évolution du mix électrique français et européen. Sur le plan technique, le système électrique étant synchrone sur toute la plaque continentale, un certain nombre de règles de fonctionnement du système électrique sont décidées au niveau européen (les codes réseaux par exemple). Enfin, sur le plan économique, l'architecture des marchés de l'électricité doivent respecter les principes européens de la concurrence.

Si l'Union Européenne fixe des objectifs au système électrique, l'Etat Français décide de la façon d'y parvenir. Ainsi, la Programmation Pluriannuelle de l'Energie fixe les objectifs d'évolution du mix de production électrique, notamment les trajectoires des énergies renouvelables. Un certain nombre de règles de marché et d'organisation des acteurs relève également de la prérogative nationale. La sécurité d'approvisionnement étant une prérogative nationale, le marché de capacité²⁶ a été mis en place au niveau national. Surtout, un certain nombre de financements de R&D relève du budget de l'Etat (les Programmes d'Investissements d'Avenir par exemple).

Depuis les lois de réforme territoriale, les régions sont devenues les « cheffes de file » de la transition énergétique. Elles définissent notamment les grands objectifs en termes de maîtrise et de demande d'énergie, ainsi que de lutte contre le changement climatique, à travers les Schémas Régionaux d'Aménagement, de Développement Durable et d'Egalité des Territoires (SRADDET). Les régions disposent donc d'un rôle de planification important dans le cadre de la transition énergétique en général, et de la transformation du système électrique en particulier.

Enfin, le niveau communal (les communes et les Établissements Publics de Coopération Intercommunale) forme le maillon de décision de proximité du système électrique. Les règles d'urbanisme déterminent par exemple la possibilité ou non pour les consommateurs d'installer des panneaux photovoltaïques sur leurs toits. Le développement de l'électromobilité résulte également souvent d'une volonté politique locale forte, notamment lorsqu'il s'agit de déployer des infrastructures de recharge pour véhicules électriques ouvertes au public.

Tous les niveaux de décision sont concernés par le déploiement du système électrique du futur. Cette multiplication des strates de décision peut représenter une source de complexification en termes de coordination et de multiplication des acteurs. Mais il s'agit également d'une source d'optimisation pour le système électrique puisqu'elle engage chaque territoire à exploiter au mieux ses gisements, à condition que l'addition des engagements pris forme un tout cohérent et s'inscrive dans la logique des choix politiques concernant la péréquation et la solidarité entre territoires.

24. La puissance de court-circuit permet de connaître le niveau de l'intensité de courant de court-circuit d'un réseau, elle donne une image de la sensibilité d'un réseau à une perturbation (plus elle sera élevée, plus le réseau sera insensible).

25. En particulier, le partage des données doit respecter les droits des personnes.

26. Le mécanisme d'obligation de capacité français est un dispositif visant à assurer le respect du critère de sécurité d'approvisionnement (appelé également « critère de défaillance ») fixé par voie réglementaire par les pouvoirs publics. Pour plus de détails, voir OIE, [Le mécanisme de capacité français est lancé ! que va-t-il changer ?](#), 2017