



UNE NOUVELLE RÉVOLUTION ÉLECTRIQUE AU SERVICE DE LA DÉCARBONATION



RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Alors que les émissions de la combustion d'énergie fossile et des procédés industriels représentent près de 85 % des émissions de CO₂ dans le monde, l'électrification des usages de l'énergie est un des principaux leviers pour atteindre la neutralité carbone. Même en appliquant des mesures fortes de sobriété et d'efficacité énergétiques, la production d'électricité devra ainsi s'accroître fortement, via des moyens de production décarbonés (nucléaire et renouvelables). Le constat est unanimement partagé, aussi bien par le GIEC, l'Agence internationale de l'Energie (AIE) et l'Union européenne, que par RTE et Enedis qui tablent sur une croissance d'au moins 30% de la consommation d'électricité française d'ici 2050. L'électrification des usages » concernera avant tout les trois principaux secteurs émetteurs de gaz à effet de serre, à savoir le transport (environ 30% des émissions), le bâtiment (23%) et l'industrie (25%).

Mais une « nouvelle révolution électrique » est avant tout nécessaire et la réussite de celle-ci passe par une articulation cohérente entre déploiement des énergies renouvelables intermittentes et électrification croissante des usages. Afin de permettre au système électrique d'intégrer massivement et au meilleur coût tant ces productions renouvelables décarbonées que les nouveaux usages de l'électricité, le déploiement de nouvelles technologies de l'énergie et du numérique est en effet crucial pour une gestion plus fine et une optimisation des flux d'électricité, et ainsi garantir la « flexibilité » nécessaire au bon fonctionnement du système électrique. Cette révolution électrique pour décarboner notre mix énergétique sera associée à de multiples externalités positives, comme la création d'emplois dans nos industries, la réduction des dépenses énergétiques des ménages et des entreprises, ou encore une plus grande indépendance énergétique de la France.

PRINCIPALES RECOMMANDATIONS



Concernant **les bâtiments** d'habitation comme tertiaires, il s'agira notamment de financer le déploiement des pompes à chaleur qui permettent à la fois d'augmenter fortement l'efficacité énergétique et de remplacer des combustibles fossiles. Les pompes à chaleur et le solaire thermique présentent également des perspectives intéressantes de décarbonation pour le secteur agricole.



Pour **les transports**, alors que l'UE a fixé pour objectif la fin des véhicules thermiques en 2035, les impacts sur le réseau électrique doivent être pris en compte, notamment en développant le pilotage de la recharge des véhicules. Une stratégie ambitieuse d'augmentation de la durée d'usage des batteries puis de leur recyclage devra se développer pour prévenir les risques pesant sur la disponibilité des matériaux.



Pour **l'industrie**, la priorité est l'électrification des processus thermiques et autres processus utilisant des énergies fossiles chaque fois que cela est possible. Il s'agira aussi de soutenir le développement de la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau et l'innovation dans des technologies de ruptures comme la récupération de chaleur fatale.



Avec le développement des énergies renouvelables intermittentes d'une part, et l'électrification des usages d'autre part, garantir le bon fonctionnement du système électrique devient de plus en plus complexe. Il devient nécessaire de **déployer largement les outils numériques** qui permettent de moduler en temps réel la production et la consommation d'électricité, et ainsi d'apporter la flexibilité nécessaire pour garantir l'équilibre du réseau. Des enjeux de normalisation, d'interopérabilité des solutions déployées et de soutien à l'innovation devront notamment être pris en compte. Les règles de marché devront favoriser l'exploitation des gisements de flexibilités.



Les EnR et les bornes de recharge des véhicules électriques sont raccordées au réseau grâce à **l'électronique de puissance**. Faire coexister de manière croissante cette technologie avec les réseaux en courant alternatif va requérir des efforts importants de R&D et une meilleure coordination des acteurs académiques et industriels sur le développement de nouveaux composants et de filières dédiées à la fabrication de convertisseurs pour trouver des solutions technologiques à grande échelle aux défis que cela suppose.



Investir dans la recherche et le développement de nouvelles solutions smart grids et dans l'ensemble des composants des réseaux électriques sera essentiel pour garantir l'équilibre offre-demande en temps réel, la stabilité du réseau et préserver la qualité de fourniture. Il s'agira notamment de s'appuyer sur des technologies numériques innovantes pour permettre le pilotage flexible de la production d'électricité, de sa consommation, mais aussi du stockage et des réseaux électriques en eux-mêmes. Cette flexibilité est une condition nécessaire à la réussite de la transition énergétique.

INTRODUCTION

L'énergie est au cœur de nos sociétés modernes, indispensable à nos industries, notre agriculture, pour nous déplacer, communiquer, assurer notre santé et notre confort... La nature ou la géopolitique nous rappellent à l'occasion combien nous dépendons d'elle. Choisir la bonne énergie au bon endroit, tel a toujours été l'enjeu, afin de garantir nos approvisionnements selon un optimum technico-économique et environnemental pour la collectivité.

Aujourd'hui, l'énergie électrique représente environ un quart de l'énergie finale consommée en France. Alors que les émissions de CO₂ sont au cœur des préoccupations¹, nous nous tournons de plus en plus vers l'électricité d'origine bas carbone pour nos besoins dans les secteurs du bâtiment, des transports, et une partie des activités industrielles. C'est ce que l'on appelle « l'électrification des usages ». De nombreuses études de par le monde s'accordent sur cette tendance, et nous prédisent de ce fait une « nouvelle révolution électrique », dont l'ampleur peut certes différer selon les pays ou les continents, mais à laquelle il nous faut nous préparer dès maintenant. Ainsi, la transformation du système électrique commencée au début des années 2000 va s'amplifier et de nouvelles solutions « smart grid » doivent être imaginées et déployées.

Ce document porte la vision de l'association Think Smartgrids. Sa rédaction a été pilotée par son Conseil scientifique, présidé par Nourédine Hadjsaid (Université Grenoble Alpes).

Auteurs : Olivier DEVAUX, Marc PETIT, Christophe CROCOMBETTE, Michel BENA, Georges KARINIOTAKIS, Stéphane ROBIN, Pierre MALLET.

1. En France, la Stratégie Nationale Bas-Carbone donne la feuille de route pour une neutralité carbone à l'horizon 2050

LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE DOIT BAISSER MAIS LA PLACE DE L'ÉLECTRICITÉ VA AUGMENTER

Mise en évidence dès les années 1970, à la suite des crises pétrolières, la **nécessité de modérer la demande d'énergie** s'impose depuis de nombreuses années dans les politiques énergétiques en France, en Europe et dans le monde. Cette modération – que ce soit par de la sobriété ou de l'efficacité énergétique – répond en premier lieu à une pression démographique et industrielle croissante. Aujourd'hui, elle apparaît comme un levier essentiel non seulement dans la lutte contre le réchauffement climatique¹, mais aussi pour : assurer la sécurité de notre approvisionnement énergétique, améliorer la santé des populations et plus largement limiter l'impact environnemental global des activités humaines, en réduisant la pollution liée à l'exploitation des moyens de production de l'énergie.

Toutefois, même si la demande énergétique à long terme doit baisser pour atteindre les objectifs de décarbonation², l'électricité est amenée à jouer un rôle de plus en plus important dans les politiques énergétiques. En effet, sa performance énergétique intrinsèque, et sa production par des moyens décarbonés font de l'électricité le pilier central des politiques énergétiques actuelles. **L'électrification des usages énergétiques apparaît donc comme une nécessité** et se traduit par des besoins accrus de production d'électricité dans les années à venir, en dépit d'une baisse globale de la demande d'énergie. Le troisième volet du sixième rapport d'évaluation du GIEC publié en avril 2022 met ainsi fortement en avant le rôle de l'électrification parmi les mesures d'atténuation qui sont à la disposition des parties prenantes pour lutter contre le changement climatique.

Ce phénomène de diffusion massive des usages de l'électricité s'illustre à toutes les échelles géographiques :

- **À l'échelle mondiale**, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) a publié en 2021 un premier scénario pour atteindre l'objectif de neutralité carbone en 2050, condition sine qua non de la limitation du réchauffement climatique à +1,5°C, selon les experts du GIEC. Ce scénario prévoit que la part de l'électricité dans la consommation finale mondiale d'énergie passe de 20% en 2020 à 49% en 2050. En valeur absolue, cette consommation pourrait ainsi passer d'environ 25 000 TWh en 2020 à presque 60 000 TWh en 2050.
- **À l'échelle européenne**, la mise en œuvre des derniers paquets réglementaires comme le « Fit For 55 » promeut l'électrification comme l'un des principaux moyens pour décarboner l'économie.
- **À l'échelle française**, les scénarios de référence concernant l'évolution de la demande électrique (RTE, ADEME, DGEC) tablent sur un accroissement d'au moins 30% entre aujourd'hui et 2050, certains scénarios dépassant même 50% d'accroissement.

L'électrification portera avant tout sur les trois principaux secteurs émetteurs de gaz à effet de serre, à savoir le transport, le bâtiment et l'industrie.

L'ÉLECTRICITÉ, UN VECTEUR ÉNERGÉTIQUE AU POTENTIEL DE DÉCARBONATION INÉGALÉ

Un vecteur énergétique polyvalent et flexible

- Produite sans émissions de CO₂ par de multiples sources (photovoltaïque, éolien, hydraulique, nucléaire, électrochimie, chaleur...)
- Pour tous types d'usages (domestiques, industriels, transport et mobilité, santé, numérique...)
- Se transforme facilement en un autre vecteur (hydrogène, chaleur, etc.)

Une efficacité exceptionnelle

- Distribuée et accessible en permanence grâce au réseau électrique
- Rendement très élevé à l'usage
- Transportable sur de grandes distances, facilement et avec peu de pertes

1. En 2018, selon l'AIE, la production d'énergie électrique compte pour 41% des émissions mondiales de CO₂ résultant de la combustion d'énergie fossile et des procédés industriels, soit environ un tiers des émissions de CO₂ totales dans le monde et un quart des émissions de gaz à effet de serre.

2. La SNBC fixe comme objectif une baisse de 40% de la consommation d'énergie en 2050 par rapport à 2020.

ZOOM SUR L'ÉLECTRIFICATION DIRECTE DANS LES BÂTIMENTS, L'INDUSTRIE, LA MOBILITÉ ET L'AGRICULTURE

BÂTIMENTS

Ce secteur représente une part très importante de l'énergie consommée en France (43%). Bien que sa part dans les émissions de gaz à effet de serre soit moindre (23%, selon l'ADEME), du fait de la prééminence en France du chauffage à l'électricité et au bois, le secteur reste largement concerné par les objectifs de baisse des niveaux d'émission. **Pour atteindre la neutralité carbone en 2050, il faudra agir conjointement sur plusieurs leviers** : la sobriété, l'efficacité énergétique, la décarbonation du système énergétique et l'électrification pour remplacer les combustibles fossiles par de l'électricité bas carbone¹.

Les solutions techniques qui permettront d'atteindre cet objectif ont dès à présent une maturité suffisante et sont largement intégrables en construction neuve comme en rénovation. Elles doivent maintenant être bien plus largement diffusées. Dans le secteur du bâtiment, le verrou principal réside dans le temps nécessaire pour faire évoluer le parc existant, du fait des capacités d'investissement que cela nécessite et du faible taux de renouvellement (1%). Pour accélérer ce rythme, il faudra aborder différentes approches simultanément. Parmi celles-ci, **l'usage renforcé des pompes à chaleur (PAC)** est un choix parmi les plus pertinents, avec des solutions variées et de plus en plus compétitives, adaptées à la maison individuelle comme au logement collectif et des gains immédiats sur la facture d'énergie. L'intensification de l'usage des pompes à chaleur concerne aussi le tertiaire, et constitue donc un vecteur d'électrification important.



En moyenne, les pompes à chaleur pour le chauffage résidentiel produisent quatre fois plus d'énergie thermique qu'elles ne consomment d'électricité. Elles sont un levier majeur d'efficacité énergétique et de décarbonation du chauffage.

1. La réglementation environnementale 2020 (RE2020), qui entre en vigueur progressivement en 2022, a pour ambition de réduire les consommations d'énergie primaire, dans la continuité des précédentes réglementations du secteur du bâtiment, mais introduit également pour la première fois des exigences fortes pour limiter les émissions de gaz à effet de serre sur le cycle de vie du bâtiment.

INDUSTRIE

Le secteur de l'industrie représente près de 25% des émissions et de la consommation d'énergie finale française¹. Premiers consommateurs d'énergie, les usages thermiques représentent le principal gisement de décarbonation industrielle. L'électrification apporte déjà un certain nombre de solutions connues, dont il faut accélérer le déploiement, mais de nouvelles technologies de rupture devront également être développées. **Parmi ces solutions, on retrouve les leviers suivants :**

- L'électrification des process thermiques par des technologies existantes : génération de vapeur par des chaudières électriques, électrification ou hybridation des fours (verre, céramique...), déploiement de solutions thermiques via résistances, induction, micro-ondes, compression mécanique de vapeur, infrarouge, laser, UV, plasmas...
- La substitution de procédés utilisant des énergies fossiles par des procédés utilisant l'électricité.
- Le remplacement des hauts fourneaux par des fours à arc électrique dans la production d'acier en est l'exemple le plus marquant. Dans le secteur de la chimie, la production d'éthylène (actuellement par craquage d'hydrocarbures) par co-électrolyse de l'eau et du CO₂ est par ailleurs en cours de développement.
- Le développement de technologies de rupture, notamment la récupération de chaleur fatale par des PAC haute température : de maturité récente, cette technologie bénéficie progressivement de nombreuses innovations. Autre innovation en rupture, celle de l'électrolyse du fer pour remplacer les hauts fourneaux.

En plus de ces usages thermiques, certains procédés – notamment dans l'industrie pétrochimique – sont très émetteurs de CO₂. Actuellement, la production d'hydrogène pour les applications industrielles (pétrochimie et chimie – production d'ammoniac) est principalement issue du vaporeformage du méthane fortement émetteur de gaz à effet de serre (GES). **La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau représente donc une solution de décarbonation par électrification indirecte.** Ceci concernera les usages actuels de l'hydrogène mais aussi de nouveaux usages. L'hydrogène peut, par exemple, être

utilisé dans l'industrie sidérurgique lors de la phase de réduction du minerai de fer dans les hauts fourneaux, en remplacement du charbon, ou encore dans l'industrie du raffinage pour assurer la désulfuration des carburants.

Bien que l'électrification représente un levier majeur pour la décarbonation de l'industrie, certains procédés seront difficiles à électrifier (procédés chimiques, très hautes températures...) ou génèrent des émissions de procédés qui ne peuvent être évitées par un changement d'énergie (ciment, céramique...). Pour ces cas particuliers, d'autres stratégies de décarbonation peuvent exister, parmi lesquelles la capture et le stockage du CO₂ (CCS, carbon capture and storage).



Le remplacement des hauts fourneaux par des fours à arc électrique est un levier majeur pour décarboner la production d'acier.

1. En 2019, l'industrie représentait en France 23% des émissions de GES (source : UNFCCC) et 25% de la consommation d'énergie (source : AIE).

MOBILITÉ ET TRANSPORT

Le secteur des transports est responsable d'environ 30% des émissions, la part principale (75%) revenant au transport terrestre dont l'automobile. D'abord poussés par des indicateurs tels que le CAFE (Corporate Average Fuel Emission), les constructeurs ont dû développer des véhicules de plus en plus électrifiés pour éviter les pénalités. Tous les constructeurs automobiles ont défini **une feuille de route ambitieuse** pour le déploiement des véhicules hybrides rechargeables (PHEV), et encore davantage pour les véhicules tout électrique (BEV).

Ces dernières années, les pays ont commencé à annoncer la fin de la vente de véhicules thermiques à moyen terme (2025 pour la Norvège, 2040 pour la France, 2050 pour l'Allemagne). Mais le 8 juin 2022, le Parlement européen a voté la date de 2035 pour la fin de la vente des voitures particulières neuves et des véhicules utilitaires légers neufs à moteurs thermiques dont les hybrides rechargeables. Cela fixe un cap pour la mobilité 100% électrique à batterie ou hydrogène décarboné. Cette décision s'inscrit dans le plan « fit for 55 », et est cohérente avec le plan « batteries » (European Battery Alliance) qui vise à créer une industrie européenne compétitive et soutenable. Face aux risques sur la disponibilité des matériaux, **une stratégie de recyclage se met en place** avec des objectifs progressifs de taux de recyclabilité.

La décarbonation de la mobilité concerne également **la mobilité lourde** (poids-lourds et bus). Qu'elle soit à batterie ou à hydrogène¹, le système électrique sera impacté. Enfin, sur **le volet maritime**, l'électrification va également s'accélérer avec la mise en place de zones de réglementation des émissions de polluants atmosphériques (ECA) et un règlement européen qui va renforcer les obligations concernant l'alimentation électrique à quai². À cet effet, des projets de smart grids portuaires commencent à émerger avec le déploiement d'écosystèmes hydrogène.



Avec le plan Fit for 55, l'Union européenne fixe des objectifs ambitieux de déploiement des bornes de recharge pour préparer la fin des ventes de véhicules thermiques en 2035. Un nouveau règlement européen va par ailleurs renforcer les exigences sur recyclage des batteries.

AGRICULTURE

Dans le secteur de l'agriculture, les consommations d'énergie ne sont responsables que d'une faible part des émissions de GES³, le méthane lié à l'élevage et le protoxyde d'azote lié à la fertilisation des sols étant les deux principaux postes d'émission. La performance énergétique des activités agricoles s'améliore régulièrement. Les tracteurs sont de plus en plus efficaces et se tournent progressivement vers le gaz renouvelable ou l'électricité lorsque cela est possible. Les pompes à chaleur et le solaire thermique se développent pour diverses activités.

La consommation d'énergie du secteur agricole diminue ainsi progressivement et se décarbonera via **l'électrification de nombreux procédés, l'utilisation d'énergies renouvelables** (dont l'agriphotovoltaïsme), et **l'arrivée de nouvelles technologies** telles que les robots ou les drones agricoles qui pourront effectuer certaines tâches actuellement dévolues aux tracteurs (avec d'autres retombées positives telles que la réduction de la quantité de pesticides par des actions plus ciblées).

1. La production d'hydrogène vert est aussi source d'électrification : le scénario médian du rapport RTE « Futurs énergétiques 2050 » table sur une consommation de 50TWh pour la production d'hydrogène.

2. Cf article 9 du projet de règlement européen AFIR (alternative fuels infrastructure regulation) qui porte sur l'alimentation électrique à quai dans les ports maritimes : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fr/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0559>

3. 12 MICO₂eq sur 89 MICO₂eq pour 2015, selon le rapport SECTEN du CITEPA.

LES IMPACTS SUR LES SYSTÈMES ÉLECTRIQUES... ET LES DÉFIS À RELEVER !

MAINTENIR LA SÛRETÉ D'UN SYSTÈME DE PLUS EN PLUS COMPLEXE

Le développement historique des réseaux, et l'intensification de leurs maillages, avait deux objectifs : d'une part mutualiser les centres de production pour l'ensemble des consommateurs (ce qui minimise le coût global d'approvisionnement et renforce la fiabilité et la résilience du système par redondance des chemins d'accès à la ressource) et, d'autre part, faire foisonner l'ensemble des modes individuels de consommation (l'agrégation d'un grand nombre de comportements erratiques conduit à un lissage global beaucoup plus stable et prévisible, limitant le besoin de marges et les coûts associés à un surdimensionnement).

Le pilotage d'un système aussi large et interdépendant sur la plaque européenne (désormais étendu jusqu'à l'Ukraine) repose sur des outils complexes pour assurer : **l'équilibre offre-demande** en temps réel (production = consommation), **préserver la stabilité dynamique** du réseau (c'est-à-dire éviter qu'un incident local conduise rapidement à un black-out continental) et **garantir une tension d'alimentation** selon les normes.

La complexité de ce pilotage va croître à mesure que se développent les sources de production d'énergie dites variables et intermittentes (éolien et solaire), connectées au réseau via de l'électronique de puissance (voir plus bas), ainsi qu'une demande beaucoup plus importante du fait de l'électrification.

De nouveaux processus et outils devront ainsi être déployés, en s'appuyant sur toutes les flexibilités disponibles ou à développer. Ce principe est au cœur du Smart Grid, ou système électrique intelligent.

DÉVELOPPER LA FLEXIBILITÉ POUR ASSURER LA RÉSILIENCE DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE

Quel que soit le mix énergétique choisi pour accompagner la Transition énergétique, **les besoins de flexibilité vont aller croissant**. L'AIE définit la flexibilité comme étant « la capacité d'un système électrique à gérer, de manière fiable et à faible coût, la variabilité et les incertitudes de la production et de la demande, sur toutes les échelles de temps ». Cela intègre notamment **les leviers d'action pour maintenir la sécurité d'approvisionnement à toutes les échelles de temps et éviter les black-outs.**

Outre les capacités de modulation de la production / consommation en temps réel, les flexibilités pour réguler les effets jour/nuit, infra-hebdomadaires, été/hiver (impact du solaire) ou même d'une année sur l'autre (variabilité des vents) seront requises et à planifier.

Ces flexibilités peuvent être de multiples natures :

- **La flexibilité des réseaux électriques de transport et de distribution**

Il s'agit de la capacité de ces infrastructures physiques à rendre les flexibilités des usages et des moyens de production accessibles à tous, dans le respect des contraintes électriques (stabilité, tension, flux). Cela implique l'existence de systèmes de communication pour activer les flexibilités, voire des dispositifs physiques de contrôle des flux électriques. Les opérateurs de réseau devront mener des études à différentes échelles de temps, envoyer les signaux adaptés au moment voulu pour garantir la disponibilité de la production et des modulations associées à tout instant de l'année. En temps réel, l'enjeu sera de disposer d'un outil industriel (environnement SI, Télécom) apte à envoyer les ordres aux acteurs sélectionnés pour activer leur flexibilité avec le temps de réponse requis.



La flexibilité du système électrique est essentielle à la sécurisation des futurs approvisionnements en électricité, alors que les réseaux électriques supporteront l'essentiel de la transition énergétique.

- **La flexibilité des moyens de production**

Qu'elles soient hydrauliques, à gaz, ou nucléaires, les centrales possèdent des capacités de flexibilité déjà utilisées pour compenser les variations de production des EnR variables. À titre d'exemple, le seuil minimum de puissance des réacteurs nucléaires est actuellement de 20%. Les réacteurs nucléaires ont ainsi la capacité d'ajuster jusqu'à 80% leur puissance, à la hausse ou à la baisse, et ce, en moins de 30 minutes. Les moyens de production EnR variables, même si moins pilotables par nature, peuvent également être réglés pour apporter de la flexibilité (en puissance active et/ou réactive). L'éolien et le solaire, non programmables, sont par exemple écrivains (modulables à la baisse) en cas de production trop élevée. C'est là aussi un champ de R&D et de normalisation à poursuivre dans les prochaines années, au niveau européen.

- **La flexibilité de la demande**

Dans les bâtiments résidentiels ou tertiaires, les objets communicants (IoT) seront les supports intelligents de nouveaux systèmes d'automatisation et de pilotage des usages flexibles (chauffage, chauffe-eau, recharge du véhicule électrique...). Cela nécessitera toutefois de progresser dans l'interopérabilité (c'est-à-dire les protocoles et modèles de données communs rendant ces objets compatibles entre eux) et de s'appuyer davantage sur les compteurs communicants en tant qu'interface vers l'aval. Les industriels, et en particulier les électro-intensifs, constituent le plus grand gisement de flexibilité de la demande et leur électrification croissante devra être accompagnée de nouvelles solutions pour tirer profit du potentiel de flexibilité de ces nouveaux usages.



Les compteurs communicants ont permis de faire émerger de nouvelles offres et services pour la flexibilité et la maîtrise de la consommation d'énergie. L'infrastructure communicante déployée contribue aussi au pilotage optimal du réseau électrique, à l'optimisation des solutions de raccordement des énergies renouvelables et à une réduction des pertes techniques et non techniques sur le réseau.

- **La flexibilité liée à la mobilité et au transport électrique**

Trois axes de recherche sont actuellement explorés : la gestion des séquences de charge pour éviter des pics de demande électrique sur le réseau à la maille globale et/ou locale, la corrélation entre la recharge des véhicules et une production renouvelable variable locale, et la mise à disposition des capacités de stockage au service du système électrique.

Ces batteries peuvent être vues comme des ressources flexibles, mais extrêmement distribuées (moins de 100 kWh pour chaque batterie et des puissances de quelques kW ou dizaines de kW) avec une incertitude sur la disponibilité et le niveau d'énergie. La flexibilité des batteries peut également s'envisager en mode unidirectionnel (mode V1G) ou bidirectionnel (mode V2X).

Mais le mode V2X pose plusieurs questions : la réglementation normative pour une borne qui devient aussi une source de production (la réglementation avance sur ce sujet sous l'égide des acteurs), l'impact sur le vieillissement de la batterie en fonction des services visés, et la technologie du chargeur bidirectionnel (solution AC embarquée dans le véhicule ou DC dans la borne).

Les premières solutions de services au réseau en mode V2G arrivent (RTE a certifié un premier opérateur pour de la réserve primaire de fréquence), mais il reste encore du chemin à faire pour identifier les services les plus pertinents techniquement et économiquement.

- **La flexibilité du stockage** (par batterie, ou couplé au vecteur chaleur ou gaz)

Il peut contribuer à trois niveaux : l'équilibrage du système (services en puissance ou énergie pour des horizons court-terme ou long terme), la gestion du réseau (congestions et contraintes de tension), et l'optimisation en aval du compteur (lissage de la demande, réduction des pointes de puissance). Le stockage par batterie bénéficie de la forte baisse des coûts tirée par les besoins pour la mobilité électrique. Sa modularité permet d'envisager des applications aval compteur ou sur le réseau. Dans un système électrique à plus faible inertie, la forte réactivité des batteries est un atout. Le verrou principal reste toutefois le modèle économique, qui devrait émerger progressivement au fil des années avec la part croissante d'EnR dans le mix.

- **Les règles de marché :**

Elles doivent faciliter l'exploitation de ces gisements de flexibilités, au travers, par exemple, des agrégateurs qui proposent à leurs clients producteurs et consommateurs des contrats spécifiques permettant d'activer des hausses ou des baisses de production et de consommation aux périodes critiques. Il s'agit également de permettre à un même actif de bénéficier de plusieurs modes de valorisation.

Quel que soit le type de flexibilité, cela nécessitera de développer et de déployer plus d'intelligence dans les réseaux et les systèmes d'information pour renforcer les capacités de pilotage de la production comme de la consommation d'électricité, et ainsi garantir l'équilibre futur du système électrique.

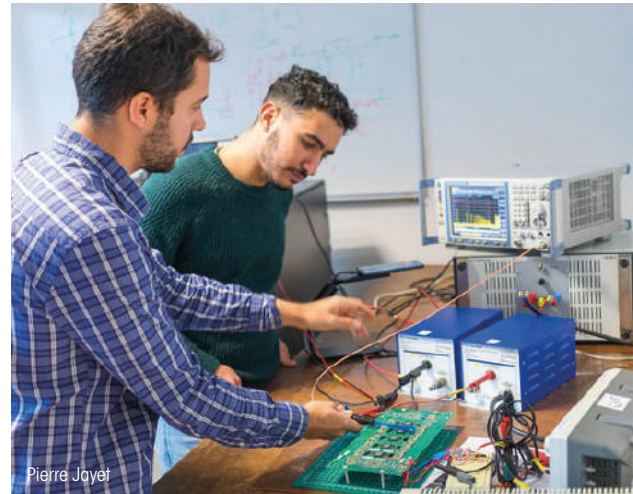
L'intégration de cette intelligence s'appuiera sur des technologies numériques telles que l'intelligence artificielle, déjà utilisée dans de nombreux cas d'usages par les gestionnaires de réseaux, l'edge computing qui permet de décentraliser une partie des systèmes d'information et d'avoir des automatismes locaux plus performants et plus réactifs, ou encore la virtualisation. Associée à l'edge computing, cette dernière facilitera le déploiement de fonctions intelligentes à différents endroits du système électrique, en offrant des capacités de traitement standardisées.

INTÉGRER LE RÔLE CROISSANT DE L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

S'il est clair que le numérique supportera l'ensemble de ces évolutions, il est une technologie que l'on cite beaucoup plus rarement, alors qu'elle prend une place de plus en plus importante ; il s'agit de l'électronique de puissance (ELP). Les premières applications industrielles de l'ELP dans les réseaux ont concerné les liaisons haute tension en courant continu (HVDC) ou le réglage des flux (FACTS). Les sources de production EnR sont aujourd'hui majoritairement raccordées au système électrique via de l'ELP. Cette technologie de plus en plus répandue n'offre pas la même réserve d'inertie que les alternateurs classiques et leurs masses tournantes, or une réserve d'inertie suffisante est essentielle pour garantir la stabilité du réseau électrique et réduire le risque de blackouts.

Pour y remédier, il faudra imaginer des solutions technologiques originales. Mais au-delà de ces questions de stabilité, l'ELP doit faire face à des défis majeurs : montée en tension pour permettre un déploiement généralisé sur les réseaux Haute Tension, augmentation des performances et de la durée de vie, de la fiabilité, de la disponibilité et du coût d'installation. De nouveaux convertisseurs statiques s'appuyant sur des technologies de rupture devront répondre aux problèmes des surcharges transitoires tout en optimisant leur fonctionnement en régime normal, ce qui nécessitera de repenser leur architecture et les méthodes de dimensionnement.

Mais la tendance se confirme. En basse tension, l'ELP et le courant continu sont déjà omniprésents dans la plupart des assets connectés au réseau de d'électricités : panneaux photovoltaïques, bornes de recharge des véhicules électrique, tous nos équipements électroniques, et batteries. Et nous n'en sommes probablement qu'au début, avec peut-être à l'avenir des réseaux en courant continu coexistant avec les réseaux à courant alternatif actuels.



Pierre Jayet

L'électronique de puissance, qui permet de convertir et de transporter l'énergie électrique avec une très haute efficacité, est au cœur de la transition énergétique et fait l'objet de nombreux projets de R&D en France.

L'ÉLECTRIFICATION : ANTICIPER LES ÉVOLUTIONS POUR SAISIR À TEMPS LES OPPORTUNITÉS

Partant du constat que les émissions de la combustion d'énergie fossile et des procédés industriels représentent près de 85 % des émissions de CO₂ dans le monde, l'électrification s'impose comme la pierre angulaire des politiques énergétiques, en permettant de substituer aux énergies fossiles des énergies électriques décarbonées. De fait, **il y a aujourd'hui consensus sur une augmentation importante de la demande en électricité d'ici à 2050¹, en dépit de la baisse globale de la consommation en énergie, nécessaire à l'atteinte des objectifs climatiques.**

L'électrification portera avant tout sur les trois principaux secteurs émetteurs de gaz à effet de serre, à savoir **le transport, le bâtiment et l'industrie**, et elle aura **un impact majeur sur le système électrique.**

Pour réussir le défi de l'électrification, il sera nécessaire de poursuivre le développement des moyens de production décarbonés et de développer toutes les solutions de flexibilité (pour la production, la consommation, et les réseaux électriques) pour faire face à la variabilité des sources renouvelables, et en particulier tous les leviers d'action pour maintenir la sécurité d'approvisionnement des systèmes électriques, leur stabilité et éviter les black-outs. Pour cela, **il sera nécessaire d'investir dans la recherche et le développement² de nouvelles solutions « smart grid » à déployer dans nos systèmes électriques** toujours plus intelligents, mais aussi de développer les filières industrielles correspondantes.

Par exemple, alors que l'électronique de puissance est incontournable pour le développement des énergies renouvelables et du véhicule électrique, le nombre d'acteurs industriels nationaux reconnus dans ce domaine est bien trop faible. Il semble dès lors nécessaire d'assurer un soutien fort pour les acteurs académiques et industriels présents et de favoriser le développement de synergies.

Les investissements doivent également être à la hauteur des ambitions. La Commission européenne estime ainsi que l'électrification de l'économie nécessitera un investissement

massif d'ici 2050³ : pour les scénarios les plus ambitieux sur l'électrification des usages (ALLBNK), le montant des investissements annuels s'élève à 1054,7 milliards d'euros jusqu'à 2030 puis à 1196 milliards d'euros de 2030 à 2050. Pour le réseau électrique uniquement, cet investissement s'élève en moyenne à 60,1 milliards d'euros par an jusqu'à 2030 puis à 80,3 milliards d'euros de 2030 à 2050. Il s'agit du montant des investissements considérés comme nécessaire par les experts pour atteindre une réduction de 55 % des émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2030 et atteindre la neutralité climatique d'ici 2050.

Cette électrification représente aussi un important gisement d'opportunités. L'étude de la Fondation européenne pour l'amélioration des conditions de vie et de travail (Eurofound, une agence de l'Union européenne)⁴ évalue l'impact potentiel d'une transition bas carbone sur l'emploi et l'économie de l'UE d'ici à 2030. Cette transition s'opère via un accroissement de la part des renouvelables dans le mix électrique et une électrification des usages (mobilité et logement). Les résultats de cette étude montrent un impact positif sur l'emploi (+0,5% à l'horizon 2030 pour l'UE et +0,38 pour la France), et la croissance (+ 1,1 point à l'horizon 2030 par rapport au tendanciel constant pour l'ensemble de l'UE, 1% de gain pour la France). De la même façon, une récente analyse de l'ADEME⁵ montre que pour les secteurs du bâtiment et de la mobilité, le bénéfice des stratégies de transition passant par l'électrification des usages est aussi économique, avec la création de plus de 500 000 emplois pour 2030 par rapport au tendanciel, et plus de 177 000 en 2050 pour les scénarios d'électrification des usages les plus ambitieux (coopérations territoriales et technologies vertes).

Enfin, dans un contexte où le prix de l'énergie est au cœur des préoccupations, rappelons que **l'électrification est également un levier puissant pour réduire les dépenses énergétiques (jusqu'à 23 milliards d'euros d'économies pourraient être réalisées par les ménages européens)⁶ et pour renforcer l'indépendance énergétique de la France.**

1. RTE prévoit une consommation d'électricité de 430 TWh / an aujourd'hui à 645 TWh en 2050 dans un scénario médian appelé « trajectoire de référence » (cf. <https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-12/Futurs-Energetiques-2050-principaux-resultats.pdf>)

2. Au niveau européen, pour les smart grids, augmentation de 25% des projets de R&I et de 59% des investissements sur la période 2014-2020 comparé à la période 2007-2013, source : Commission européenne : Smart Grids and Beyond: An EU research and innovation perspective, 2021, https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC125980/jrc125980_jrc125980-sg_eu_outlook_2021_pubsy_new.pdf

3. Source Commission européenne : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020SC0176>

4. Source Eurofound : https://www.eurofound.europa.eu/sites/default/files/ef_publication/field_ef_document/fomeef18003en.pdf.

5. Source ADEME : <https://infos.ademe.fr/lettre-strategie-juillet-2022/les-effets-de-la-transition-ecologique-sur-lemploi/>

6. Cambridge Econometrics, TOWARDS FOSSIL-FREE ENERGY IN 2050, mars 2019, p.6 : <https://www.camecon.com/wp-content/uploads/2019/03/2019-03-13-NZ2050-Towards-Fossil-Free-Energy-in-2050.pdf>

L'ASSOCIATION THINK SMARTGRIDS

L'association Think Smartgrids fédère la filière française des Smart Grids, des gestionnaires de réseau électrique aux grands industriels et équipementiers français du secteur de l'énergie, en passant par les startups et PME du numérique et de l'électrotechnique, et le monde universitaire et de la recherche.

L'association soutient le passage à l'échelle de solutions qui contribuent à la décarbonation du mix énergétique et au développement des territoires, mais aussi à la sobriété, à la sécurité d'approvisionnement et à l'efficacité du système électrique, au bénéfice des consommateurs.

MEMBRES ASSOCIÉS



MEMBRES OBSERVATEURS



MEMBRES PARTENAIRES



Écoles, centres de recherches et laboratoires





Think Smartgrids – Tel : +33 1 42 06 52 50 – contact@thinksmartgrids.com.
www.thinksmartgrids.fr - @ThinkSmartgrids