



La salle de contrôle de la répartition régionale de RTE, à Lyon, le 15 septembre 2022.
JOEL PHILIPPON/PHOTOPQR/MAXPPP

DOSSIER

Le 4 novembre 2006, il est 20h10 quand les opérateurs d'électricité allemands RWE et E.ON coupent les deux lignes à haute tension qui traversent le fleuve Ems, dans le nord-ouest de l'Allemagne. Une manœuvre habituelle, destinée à laisser passer en toute sécurité un navire de croisière, le *Norwegian Pearl*, sortant de son chantier et en route pour la mer du Nord. Mais, cette fois, une erreur de communication et de calcul entre les deux opérateurs engendre la surcharge des autres lignes puis la déconnexion complète d'une partie du réseau européen. De l'Allemagne à la France, à l'Espagne et jusqu'au Maroc, 15 millions de foyers et de clients se retrouvent plongés dans le noir pendant près d'une heure. Très vite des actions de rééquilibrage sont lancées, le black-out total est évité, mais l'Europe a frôlé la catastrophe...

S'ils sont généralement oubliés au quotidien, les réseaux électriques savent se rappeler à notre bon souvenir dès lors que nous en sommes privés. Le spectre des coupures de courant, durant l'hiver 2022, dans le sillage de la guerre en Ukraine et de l'arrêt des livraisons de gaz par la Russie, en est l'illustration la plus récente.

Vitales à bien des égards, ces infrastructures vont l'être plus encore dans le cadre de la transition énergétique. Elles vont devoir accueillir plus d'électricité, plus d'énergies renouvelables, tout en étant plus résilientes au changement climatique. Après la première révolution électrique – celle engagée par Thomas Edison et Nikola Tesla à la fin du XIX^e siècle –, l'électricité est appelée à en vivre une deuxième, en se substituant aux combustibles fossiles pour lutter contre le changement climatique. « On a mis un siècle et demi entre l'arrivée de la lampe Edison et aujourd'hui pour faire passer de 0 % à environ 25 % l'électricité dans nos usages énergétiques », rappelle Nouredine Hadjsaid, directeur du laboratoire G2Elab, à Grenoble. Il va nous falloir vingt-cinq ans seulement pour passer de 25 % à 60 %, afin d'atteindre les objectifs de neutralité carbone. »

MÉCANISMES DE CONTRÔLE

Conçus à l'origine pour transporter l'électricité des lieux de production éloignés de ceux de consommation, « les réseaux constituent l'infrastructure la plus complexe jamais construite par l'homme », poursuit Nouredine Hadjsaid. Derrière leurs pylônes d'acier, et leurs innombrables lignes et transformateurs, ces infrastructures cachent une activité immatérielle en constante évolution. « A chaque fois que l'on appuie sur un interrupteur, c'est un peu de l'ordre d'un miracle qui se produit », décrit Marc Barthelemy, auteur du *Monde des réseaux* (Odile Jacob, 2023).

Ce fait prodigieux tient entièrement sur un équilibre fragile : la production doit toujours équilibrer la consommation. A chaque instant, le

La deuxième révolution de l'électricité

Pour accompagner l'électrification à marche forcée des usages et soutenir l'arrivée massive des énergies renouvelables, **un chantier de près de 200 milliards d'euros** s'ouvre afin de moderniser et de sécuriser les réseaux de transport et la distribution

volume d'énergie utilisé par les lave-linge, lampes, haut-parleurs, climatiseurs, ascenseurs, ordinateurs et autres équipements ordinaires, sans oublier l'industrie doit être identique à la quantité d'énergie injectée.

Pour ce faire, de puissants modèles de prédiction de la consommation, des mécanismes de contrôle qui réagissent instantanément à toute variation veillent au grain. Du moins jusque dans une certaine mesure. « Si tout le monde éteint toutes les lumières en même temps à 19 heures, le système peut craquer », rappelle Marc Barthelemy. En 1998, par exemple, lors de la finale de la Coupe du monde de football, pendant que les supporters exultaient, les gestionnaires du réseau, eux, ont dû faire leur possible pour compenser, à la mi-temps, un écart préoccupant entre la production et la

consommation d'environ 1500 mégawatts (MW) en moins, presque l'équivalent de la production d'un réacteur EPR.

Qualifiés de « *maillons faibles de la transition énergétique* » par l'Agence internationale de l'énergie, qui a longtemps souligné le sous-investissement dans ces infrastructures au niveau mondial, ces réseaux font l'objet, en France, depuis la mi-mars, d'une grande consultation publique qui s'achève le 30 avril. Dans le cadre de son nouveau schéma décennal de développement des réseaux, le gestionnaire du réseau de transport d'électricité (RTE) français s'attelle à peaufiner sa stratégie pour les seize prochaines années. Un exercice délicat au cours duquel RTE recense, avec les producteurs d'électricité, les zones prioritaires dans lesquelles ces derniers souhaitent s'implanter,

EN 2023, ENEDIS A BATTU UN RECORD EN RACCORDANT 4,2 GW D'ÉNERGIES RENOUVELABLES, SOIT PLUS DU DOUBLE QU'EN 2019

Quand les véhicules électriques alimenteront le réseau français

FAUT-IL y voir une avancée concrète ? Pour la première fois, en France, un salarié de Renault a raccordé, en février, son véhicule au réseau électrique dans les Yvelines. La Renault 5 est le premier modèle commercialisé avec un chargeur bidirectionnel permettant d'alimenter le réseau (V2G, pour « *vehicle-to-grid* ») ou sa maison (V2H, « *vehicle-to-home* »).

« C'est un premier test », confirme Pierre de Firmas, directeur de la mobilité électrique d'Enedis, principal gestionnaire du réseau de distribution d'électricité, partenaire de l'opération, en précisant qu'une quinzaine

d'autres sont en cours avec la marque : « Seuls quelques prototypes roulent à ce jour. » Balbutiante en France, cette technologie permet de connecter les voitures électriques au réseau ou aux maisons non seulement pour se charger, comme c'est le cas aujourd'hui, mais aussi pour servir de moyen de production avec la batterie du véhicule pour éviter de solliciter le réseau.

« Un levier de flexibilité »

Dans l'Hexagone, le nombre de véhicules hybrides et électriques pourrait atteindre 17 millions d'ici à 2035. « Avec la généralisation de la mobilité

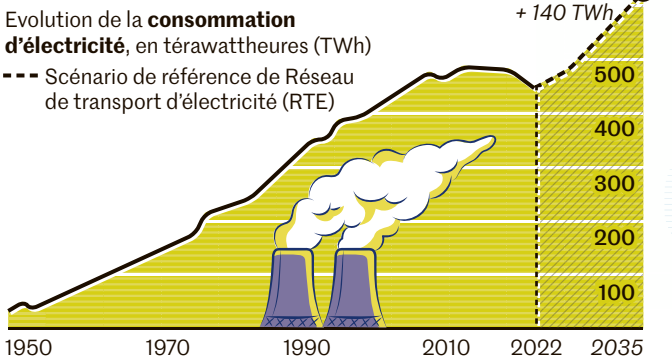
électrique, cela va devenir un levier de flexibilité pour le réseau et ce service sera rémunéré auprès des propriétaires des véhicules », souligne François Legalland, directeur du Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux, un institut de recherche du Commissariat à l'énergie atomique. En Californie, nombreux sont déjà les usagers de Tesla disposant d'une production solaire sur leur toit et qui l'optimisent en utilisant la batterie de leur voiture.

« Le V2G fait briller les yeux », concède Pierre de Firmas pour souligner

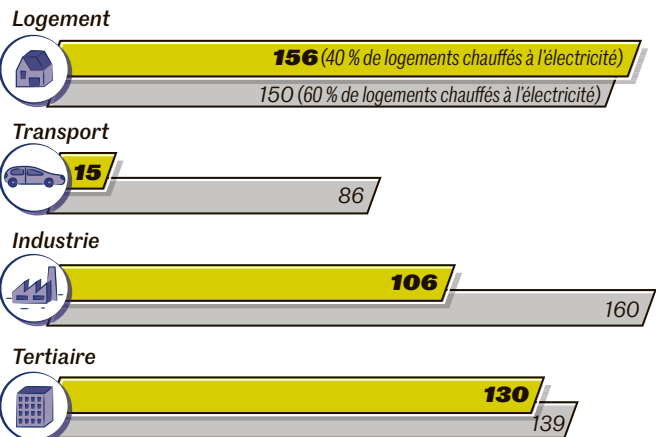
l'attrait suscité par cette innovation. Il ne faudrait toutefois pas, selon lui, sous-estimer les méthodes simples de pilotage de la recharge qui permettront d'optimiser davantage le coût pour les usagers et la collectivité. Une des pistes serait, par exemple, d'automatiser son déclenchement pendant les heures creuses comme cela se fait actuellement avec les 11 millions de ballons d'eau chaude. « A l'arrivée, si l'on réussit cette opération, ce sont 10 gigawatts que l'on économisera au pic de consommation », estime cet expert. ■

MARJORIE CESSAC

Après deux décennies de stagnation, la consommation d'électricité devrait fortement augmenter

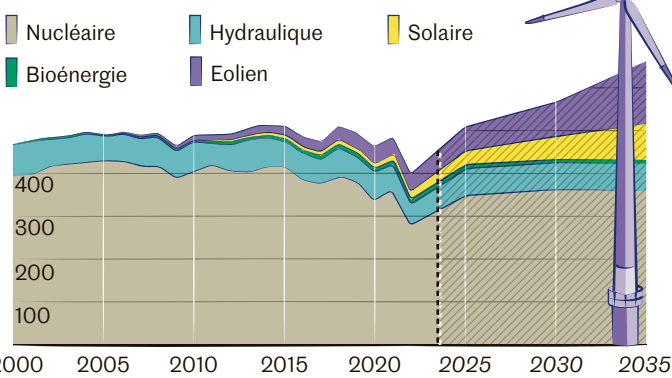


Evolution de la consommation d'électricité entre 2022 et 2035* par secteur, en TWh



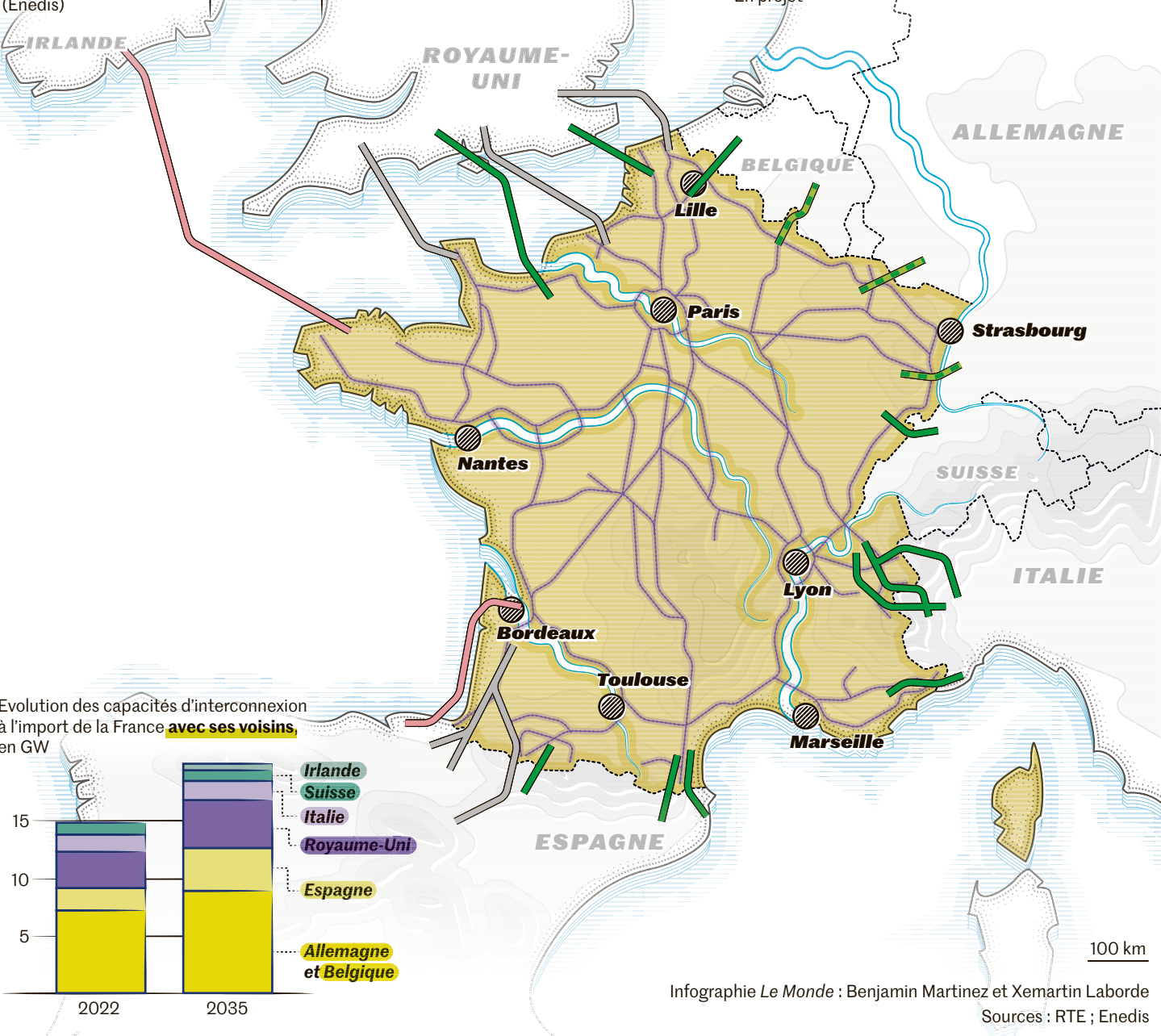
* Selon le scénario de référence de RTE.

Evolution de la production d'électricité bas carbone, en TWh

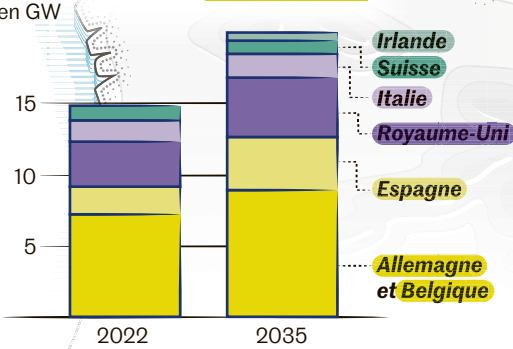


Un réseau électrique à densifier

Différents types de lignes	Puissance, en kilovolts	Longueur du réseau en 2021
Réseau de transport (RTE)		
Grand transport	400	30 000 km
Réseaux régionaux	de 63 à 225	70 000 km
Réseau de distribution (Enedis)	15 ou moins	1,4 million de km



Evolution des capacités d'interconnexion à l'import de la France avec ses voisins, en GW



« AVEC LE DÉVELOPPEMENT DES RENEUVABLES, UNE PARTIE DE LA PRODUCTION EST DÉSORMAIS DÉCENTRALISÉE »

FRANÇOIS LEGALLAND
directeur du Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles

nombreux. « Parmi les avancées, il y a des obligations légales d'installer des systèmes de pilotage dans les bâtiments de plus de 1 000 mètres carrés pour le chauffage et la climatisation », note Alric Marc, président de la start-up Efcia, qui intervient dans le tertiaire.

ARTÈRES STRATÉGIQUES

Enfin, il y a les interconnexions. De très grande dimension, le réseau européen s'étend de l'Ukraine jusqu'au Maroc via l'Espagne. La France est connectée à ses voisins terrestres ainsi qu'à l'Angleterre et bientôt à l'Irlande. « Cette soupape constitue le premier degré de flexibilité qui nous a aidés à passer l'hiver 2022 au plus fort de la crise », assure Andreas Rüdinger. Ces solutions ne sont toutefois pas sans risques. « Quand on couple deux réseaux électriques, la stabilité est a priori moindre », relative pour sa part le physicien Marc Barthelemy, en indiquant que ces interconnexions peuvent aussi faciliter la propagation de pannes, de virus ou autres cyberattaques.

Dans les villes, différents réseaux sont aussi entremêlés les uns aux autres : tout dysfonctionnement de l'un affecte les autres. « Tout fonctionne à partir des réseaux électriques : les télécommunications, le numérique, y compris les pompes, qui actionnent l'alimentation en eau », poursuit ce même chercheur.

De quoi faire de ces artères stratégiques l'une des premières cibles lors des cyberattaques – comme cela a été le cas à partir du 23 décembre 2015, en Ukraine, quand un groupe de pirates informatiques russes surnommé Sandworm (« ver de sable ») a privé 230 000 personnes de courant pendant six heures. Un enjeu de plus, alors que la solidité de ces infrastructures sera à l'épreuve d'événements climatiques plus fréquents et plus violents. Tempêtes, inondations, augmentation des températures se chargeront de tester le système si les conflits armés ne le font pas. Leur résilience sera au cœur de tout. ■

MARJORIE CESSAC

donne d'ailleurs qu'un objectif maximum de 5 GW, à l'horizon 2035.

A mesure que les renouvelables prendront de l'importance, les besoins en stockage augmenteront. Ils ne constitueront cependant qu'une partie de cette mosaïque de solutions. Cette bascule vers le tout-électrique devra surtout s'accompagner d'un pilotage toujours plus « intelligent » de l'offre et de la demande. « Tout cela peut se faire au travers des boîtiers Linky, mais aussi de tarifs incitatifs comme Tempo, qui impose un prix au kWh jusqu'à 6 fois plus cher les jours de forte tension en échange d'un tarif préférentiel le reste du temps, souligne Andreas Rüdinger, coordinateur transition énergétique France à l'Iddri, un cercle de réflexion qui favorise, dans ses propositions, les solutions vers le développement durable. Aujourd'hui, c'est 250 000 utilisateurs en France, cela pourrait devenir des millions. »

Pour les entreprises, la gestion de l'énergie est déjà une manière de répondre aux objectifs de responsabilité sociétale toujours plus

« Nous devons penser notre souveraineté vis-à-vis des matières premières »

XAVIER PIECHACZYK, président du directoire de Réseau de transport d'électricité (RTE), explique pourquoi la France et l'Europe doivent favoriser le contenu local dans le développement de leur système électrique.

Le fait qu'il faille investir des dizaines de milliards d'euros par an dans le système électrique fait polémique. Qu'en pensez-vous ?

Si l'on cumule l'ensemble des investissements en France pour le système électrique dans son ensemble sur les trente prochaines années, nous arrivons à une estimation de l'ordre de 1 000 milliards d'euros, et ce, sans prendre en compte les nouveaux usages électriques. Soit environ 35 milliards d'euros par an. A priori, cela peut faire peur, mais cette somme reste relativement moins élevée que la facture pétrolière et gazière de la France qui, en 2022, a atteint 116 milliards d'euros. Surtout, il s'agit d'investissements et non d'une seule dépense faite auprès de producteurs étrangers. Pointer du doigt les dépendances de

développement du réseau est nécessaire, mais cela reste gérable si on mène les réformes qu'il faut et qu'on le fait sans oublier l'urgence à se débarrasser du pétrole et du gaz fossile.

Comment gérer l'acceptabilité sociale ?

Elle n'est effectivement pas facile à obtenir, et les réseaux électriques n'y échapperont pas, d'autant que, d'ici à 2050, le nombre de lignes va s'accroître d'environ 20 %. Nous ferons notre possible pour ne pas en construire trop en sites vierges, mais il faut s'attendre à ce que cela arrive quand même. Nous avons par ailleurs lancé un concours d'architectes en vue de bâtir un nouveau pylône qui soit différent sur le plan esthétique.

Dans la transition énergétique, vous alertez sur les dépendances de la France. Quelles sont-elles ?

Nous devons penser notre souveraineté vis-à-vis des matières premières, des technologies et de l'industrie. On ne peut dissocier les trois. Sur les ma-

tières premières, cela concerne la capacité de la France à aller se sourcer en minerais qu'elle ne possède pas dans son sol. Nous devons ensuite produire et maîtriser les technologies que l'on installe sur notre système énergétique sans dépendre d'un fabricant étranger. Enfin, ces deux points de vigilance sont indissociables du fait d'avoir les usines sur notre sol pour produire nos disjoncteurs, nos transformateurs et nos câbles. Si tout est fabriqué hors d'Europe, nous ne faisons qu'entretenir un autre PIB que le nôtre, sachant que le robinet de la fabrication peut aussi, à tout moment, être fermé.

Comment rattraper le retard sur notre souveraineté industrielle ?

Je suis un défenseur du contenu local, européen, pour le système électrique de l'Europe. Aux Etats-Unis, quand un Etat lance un parc éolien, il y a une forte incitation de contenu local dans l'Etat lui-même et dans le pays. En Europe, ce n'est absolument pas le cas. Il y a certes une prise de conscience de ces enjeux, mais nous n'avons pas encore

commencé à discuter des directives dans le code des marchés publics. Les opérateurs du réseau de transport européen ont, depuis un an et demi, lancé quatre alliances industrielles qui visent notamment à standardiser leurs achats de câbles.

Pour l'heure, on relève des goulets d'étranglement sur des composants...

Oui, des tensions sont déjà visibles sur les chaînes d'approvisionnement car l'Europe n'a pas la capacité industrielle d'en produire certains face à la demande. Les câbles souterrains et sous-marins, puis les postes électriques au pied des éoliennes en mer en sont l'illustration. Une station de courant continu en mer pour un gros parc offshore en Centre Manche 1 et 2 représente en volume une demi-arche de la Défense à Paris. Peu de chantiers navals en Europe sont capables de construire une telle « boîte ». Il faut des hangars adaptés, des rampes pour la mettre à l'eau, c'est gigantesque. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR M. CE.

ans d'attente », regrette Corentin Sivy, directeur de développement du groupe éolien BayWa R.E. à Nantes. Un défaut de capacités attribuable selon lui au manque d'anticipation des anciens gestionnaires face à des objectifs pourtant fixés quinze ans auparavant.

A l'origine très centralisé, en forme d'étoile, ce réseau, structuré par l'énergie nucléaire, n'était pas conçu pour accueillir de l'électricité venant d'une foule de sites différents. Il cohabite désormais avec de nouvelles lignes, qui viennent tisser une toile d'araignée. « Cette décentralisation est déjà complètement en marche », confirme Marianne Laigneau qui évalue à 840 000 le nombre de sites d'énergie renouvelables en France (dont la moitié en autoconsommation) à mettre en perspective avec 56 réacteurs nucléaires et une centaine de sites hydrauliques.

« Avec le développement des renouvelables, une partie de la production est désormais décentralisée et n'est pas rattachée au réseau de transport, détaille François Legalland, directeur du Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux, un institut de recherche du Commissariat à l'énergie atomique. Sur le réseau de distribution, il y a donc maintenant de la production ainsi que des nouveaux modes de consommation avec l'électrification des transports et du bâtiment. »

Typiquement, ce sont, par exemple, les pompes à chaleur qui remplacent les chaudières à fioul et à gaz, et tous les usages de la mobilité électrique. A ce jour, 1,6 million de véhicules électriques et hybrides sont en circulation en France. Mais l'objectif est d'en faire rouler 8 millions en 2030 et 17 millions en 2035. Une massification qui devrait engendrer, si elle se réalise, un pic de raccordement des parkings, des habitats collectifs ou privés, et ce, dès 2026. Et plus de volatilité sur le réseau électrique.

Dans l'immédiat, pour l'équilibrer, la France peut encore se contenter de moins de capacités de stockage que d'autres pays européens, du fait de la part du nucléaire dans son mix énergétique et de l'importance de ses réserves et barrages hydrauliques. En Allemagne, où plus de 50 % de la production d'électricité provient du solaire et de l'éolien, la volatilité est nettement plus importante. Le système de batteries y est aussi plus développé que dans l'Hexagone, où leur puissance installée reste à ce jour encore en deçà du gigawatt (807 MW à fin 2023). RTE, dans son scénario central, ne se