



TENDANCES
ADAPTATION

Entre relance des fossiles et sobriété d'urgence, le douloureux apprentissage de l'adaptation des réseaux électriques

VIRGINIE HUGUES • Consultante adaptation au changement climatique

Largement confrontés aux effets du changement climatique, les réseaux et infrastructures énergétiques ont rencontré des difficultés à assurer un niveau d'approvisionnement à la hauteur de la demande lors de pics de consommation ou d'affaiblissement des capacités de production. Aux États-Unis, en Europe, en Inde, en Chine ou encore au Brésil, plusieurs épisodes climatiques extrêmes ont souligné durant l'année écoulée la vulnérabilité des réseaux électriques. Alors que le gaz, le pétrole et le charbon offrent un relai d'urgence très carboné aux défaillances ponctuelles des réseaux, la guerre en Ukraine a souligné combien cette dépendance aux énergies fossiles était coûteuse pour l'autonomie stratégique des acteurs. Ainsi, l'intégration de l'adaptation dans les scénarios et politiques de transition semble plus que jamais complémentaire des stratégies d'atténuation.



PANORAMA DES DONNÉES

De l'été 2021 à l'été 2022 : des conditions météorologiques exceptionnelles qui pourraient devenir la norme

Le bilan climatique de l'année 2021 publié par l'organisation météorologique mondiale (OMM) montre une intensification des événements extrêmes liés aux changements climatiques. La température mondiale moyenne est supérieure d'environ 1,11 °C par rapport à la moyenne de la période préindustrielle. Des records de température ont été atteints (54,5 °C dans la Vallée de la Mort, Californie, aux États-Unis ; 48,8 °C à Syracuse en Italie). À la mi-août, le Groenland a subi une fonte des glaces exceptionnelle, et pour la première fois, des chutes de pluie ont été enregistrées au point culminant (3 216 m d'altitude), les températures étant restées positives durant plusieurs heures d'affilée. Ailleurs dans le monde, des inondations ont entraîné des coûts humains et économiques colossaux : 17,7 milliards de dollars pour la province du Henan en Chine, 20 milliards de dollars pour l'Allemagne ; à cause des sécheresses, le niveau de production de blé et de colza au Canada a été inférieur entre 35 et 40 % par rapport au niveau de 2020. L'année 2021 enregistre également de nombreux déplacements de population (migrations internes) : plus d'1,5 million de déplacés en Chine, plus de 664 000 au

Viet Nam, et plus de 600 000 aux Philippines¹. À l'échelle de l'Europe, le programme Copernicus identifie qu'au cours des trois mois de l'été 2022, « les températures ont dépassé de +1,34 °C la moyenne de 1991-2020, et de +0,4 °C le précédent record, qui datait de 2021 ». Au mois d'août en particulier, les températures ont été jusqu'à « à 1,72 °C au-dessus de la moyenne 1991-2020 »². En France, l'été 2022 a été le 2^e été le plus chaud observé depuis 1900, avec un écart de +2,3 °C par rapport à la moyenne 1991-2020. Trois vagues de chaleur se sont succédé en juin, juillet et août pour un total de 33 jours de vague de chaleur (contre 22 jours en 2003)³. Si les chiffres officiels de Santé publique France concernant le nombre de décès attribués à la canicule ne sont pas encore disponibles, l'Insee identifie tout de même une augmentation du nombre de décès au cours de l'été 2022.

Les événements extrêmes, comme les feux de forêt, sont de plus en plus fréquents. Conséquences de plusieurs facteurs (dessèchement de la végétation et des sols et augmentation de la température notamment), les incendies brûlent « près de deux fois plus de couvert arboré aujourd'hui qu'il y a 20 ans »⁴. Si toute la partie sud de la France a été touchée par de très nombreux départs de feu (61 921 hectares en 2022 contre 9 117 en moyenne sur la période 2006-2021), c'est en Gironde que les incendies ont été les plus dévastateurs (plus de 26 000 ha brûlés). Selon le système européen d'information sur les feux de forêts (EFFIS), « au moins 901 094 hectares ont été brûlés en Europe, dont 750 000 à l'intérieur de

TABEAU 1
SENSIBILITÉ AUX ALÉAS CLIMATIQUES DES PRINCIPAUX ÉLÉMENTS DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

 Source : *Carbone 4, 2021*

	Chaleurs extrêmes, froid extrêmes, amplitude thermique	Précipitations neigeuses, crues, inondations	Vents violents/ tempêtes	Feux de forêt
Lignes électriques	● Surchauffe ou contraction (givre) des câbles	● Dommages sur les pylônes et câbles	● Dommages sur les pylônes et câbles	● La chaleur, la fumée et les cendres peuvent couper les lignes de transmission
Transformateurs	● Réduction de la capacité, vieillissement accéléré et rupture	● Court-circuit (infiltration d'eau) et explosion	● Court-circuit (chute d'objets) et explosion	● Destruction (équipements généralement peu exposés)
Postes électriques (disjoncteurs, sectionneurs...)	● Rupture, vieillissement accéléré	● Panne, fragilisation et rigidification des isolants	● Court-circuit (chute d'objets)	● Destruction (équipements généralement peu exposés)
Équipements électroniques et télécoms	● Surchauffe ou gel	● Dommages liés à l'humidité ou infiltration d'eau	● Dommages (chute d'objets)	● Destruction (équipements généralement peu exposés)

● Sensibilité faible ● Sensibilité moyenne ● Sensibilité forte

l'UE », avec des records particulièrement élevés dépassant toutes les années précédentes : 293 155 ha brûlés en Espagne, 149 278 en Roumanie, 103 382 au Portugal⁵...

Les changements climatiques bouleversent les équilibres naturels maintenus par un certain niveau de température ou de pluviométrie. Ces variables modifiées, des événements extrêmes et des perturbations latentes apparaissent, avec des conséquences sur les écosystèmes naturels mais aussi sur les activités socio-économiques et les industries qui les soutiennent. Tel est le cas du secteur de l'énergie qui doit faire face à des extrêmes climatiques plus fréquents, des événements extrêmes plus intenses, mais également une demande en énergie qui varie en fonction des saisons et des évolutions du climat.

peuvent déstabiliser tout ou partie du réseau (TAB. 1), avec des effets en cascade sur 1) les autres infrastructures du réseau énergétique^a et 2) les autres réseaux, comme le transport par exemple (FIG. 1). On notera des effets sur les capacités de production et de fonctionnement, sur l'intégrité et la durée de vie des infrastructures, ou encore la stabilité de la production et l'offre d'énergie.

ENCADRÉ 1 • RETOUR D'EXPÉRIENCE

CARACTÉRISER LES EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES INFRASTRUCTURES ÉNERGÉTIQUES ET IDENTIFIER LES OPTIONS DE RÉSILIENCE : LE CAS DES INFRASTRUCTURES CANADIENNES

Les conclusions d'un rapport de l'International Institute on Sustainable Development (IISD) sur la résilience des infrastructures canadiennes préconisent « une approche intégrée et globale de la société pour rendre les infrastructures de tout le Canada résilientes aux changements climatiques » afin de lutter contre les « défaillances en cascade ». Les experts recommandent alors trois catégories d'options de résilience, que sont la planification et l'évaluation, la surveillance et l'entretien, et les modifications de structure (tab. 2), tout cela éclairé par les enseignements scientifiques sur les changements climatiques observés et prévus à l'avenir⁶.



L'adaptation des réseaux énergétiques, une question à choix multiples

Le poids du changement climatique sur les infrastructures et les réseaux énergétiques

Les effets des changements climatiques, tels que l'augmentation des températures, l'élévation du niveau de la mer, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations et les événements extrêmes, affectent les infrastructures et

^a Les infrastructures énergétiques renvoient à toutes les installations physiques qui composent le réseau d'énergie. Elles ont plusieurs rôles : la production, le transport, la distribution ou encore le stockage de l'énergie. Les réseaux forment donc un ensemble d'infrastructures plus ou moins interconnectées.

TABEAU 2
TABEAU SYNTHÉTIQUE DES IMPACTS ET OPTIONS DE RÉSILIENCE FACE AUX EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LE SECTEUR DE L'ÉNERGIE

 Source : [IISD, 2021](#)

EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	EXEMPLES D'IMPACTS SUR LES INFRASTRUCTURES	EXEMPLES D'OPTIONS D'ADAPTATION
AUGMENTATION DES TEMPÉRATURES	<ul style="list-style-type: none"> • Risques de défaillances des barrages hydroélectriques • Diminution de l'efficacité des panneaux solaires et des centrales thermiques • Stress accru sur l'infrastructure du réseau de distribution 	<ul style="list-style-type: none"> • Planification : intégrer des données climatiques dans la prévision de charge pour la demande future • Structure : augmenter la capacité du système de refroidissement • Surveillance et entretien : renforcer l'entretien et le remplacement des composants, améliorer la surveillance et la gestion de la sécurité des barrages
MODIFICATION DU RÉGIME DES PRÉCIPITATIONS	<ul style="list-style-type: none"> • Les fluctuations du niveau d'eau et les sols plus secs peuvent accroître l'érosion interne des barrages de remblai • Inondation de centrales de production d'énergie côtières, de sous-stations 	<ul style="list-style-type: none"> • Planification : utiliser les cartes à jour des plaines inondables • Structure : renforcer les infrastructures côtières, ajuster les critères de conception des lignes de transmission (hauteur, matériaux, etc.) • Surveillance et entretien : réviser les calendriers d'entretien et de remplacement des actifs
AUGMENTATION DE LA FRÉQUENCE ET DE L'INTENSITÉ DES TEMPÊTES (VENT, GLACE)	<ul style="list-style-type: none"> • Ruptures des lignes électriques causées par l'accumulation de glace • Destruction des poteaux électriques et lignes de transmission en cas de vents violents 	<ul style="list-style-type: none"> • Planification : installer des micro-réseaux pour permettre aux collectivités de se séparer des réseaux centraux qui ne leur conviennent pas et de se connecter à des sources secondaires • Structure : enfouir les lignes de distribution • Surveillance et entretien : gestion des arbres à proximité des lignes de distribution, développer les réseaux intelligents pour déterminer rapidement l'emplacement des défaillances...

Afin de renforcer la résilience et l'adaptation des infrastructures aux changements climatiques en tenant compte d'un point essentiel mais peu traité que sont les nombreuses interdépendances entre les différents réseaux (électricité, transports routier et ferroviaire et télécommunications, **FIG. 1**), France Stratégie a récemment proposé trois axes de réflexions⁷.

Assurer des références partagées

- Faciliter l'utilisation d'un même jeu de projections climatiques par l'ensemble des acteurs
- Renforcer la connaissance de l'état actuel des infrastructures de réseau et de leurs liens de dépendance

Mettre en place une gouvernance nationale

- Créer une instance de travail rassemblant *a minima* les gestionnaires de réseaux et l'État
- Inscrire dans la loi la réalisation d'une feuille de route conjointe d'adaptation des réseaux au changement climatique

Asseoir la vision nationale sur des démarches territorialisées

- Proposer à des territoires d'expérimenter un système d'établissement d'un diagnostic et d'un plan d'action partagé à l'échelle locale
- Éprouver un système de remontée et de capitalisation des informations au sein de l'instance nationale

Ainsi, accroître la résilience des infrastructures énergétiques renvoie également à différents leviers comme l'identifie Ouranos^b dans un rapport : mieux observer, prévoir et anticiper les effets des changements climatiques, modifier les normes climatiques, revoir les capacités et les caractéristiques des installations physiques, co-construire la résilience climatique avec les habitants, etc.⁸

Par exemple, l'Agence parisienne du climat propose, dans le cadre de la plateforme Adaptaville⁹, des solutions d'adaptation face aux risques de sécheresse, d'inondations et de canicules, qui pourraient fragiliser la résilience du réseau et de l'approvisionnement en énergie de la capitale. On notera notamment la production d'énergie locale (micro-méthanisation des biodéchets alimentaires des collectivités), l'auto-consommation (installation d'une toiture végétalisée avec production photovoltaïque), ou encore les alternatives passives à la climatisation individuelle (« *free-cooling* »).

La production nucléaire mise à l'épreuve par les sécheresses

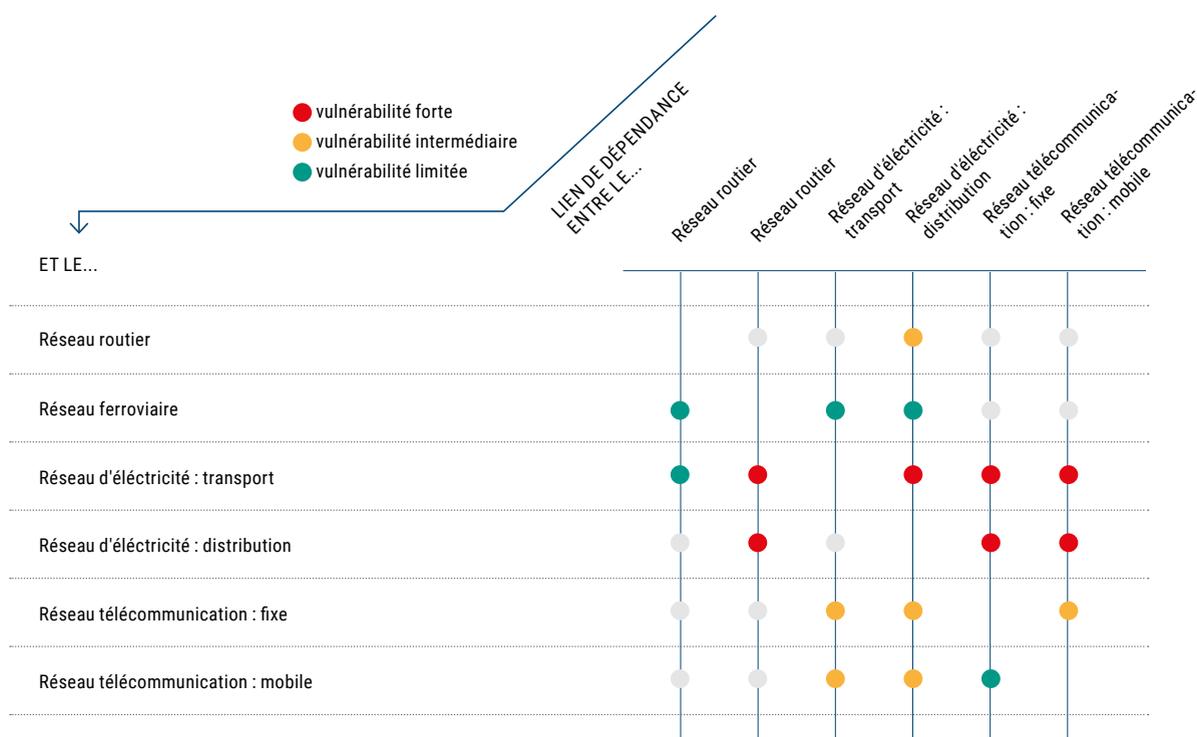
Les centrales nucléaires sont aux premières loges des effets des changements climatiques et pourraient être davantage affectées que ce que les prévisions anticipent^{10,11}. En effet, les centrales nucléaires ont de forts besoins en eau pour refroidir leurs installations. Communément, les centrales prélèvent de l'eau dans les cours d'eau à proximité. L'eau est utilisée pour refroidir les installations, puis est rejetée dans le fleuve ou la rivière. La réglementation permet de limiter la température maximale que le cours d'eau ne doit pas dépasser en aval de la centrale (ex : 28 °C pour la Garonne, centrale de Golfech), le seuil maximal d'échauffement du fleuve entre l'amont et l'aval de la centrale (ex : +3 °C en été pour le Rhône au niveau de la

b Ouranos est un consortium québécois sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques.

FIGURE 1

VISION QUALITATIVE DES INTERDÉPENDANCES ENTRE RÉSEAUX

Source : *France Stratégie*, 2022



centrale de Saint-Alban), ainsi que le seuil réglementaire de prélèvement maximal d'eau (par exemple, la consommation d'eau/évaporation est interdite pour la centrale de Chooz si le débit de la Meuse est inférieur à 20 m³/s en moyenne sur 12 jours)¹².

Les périodes de canicule et de sécheresse (qui accroissent le risque d'étiage), sont donc propices à 1) des situations de manque d'eau pour refroidir les centrales et 2) l'atteinte des limites réglementaires, menaçant ainsi l'activité des centrales et la sûreté des infrastructures en cas d'impossibilité de refroidissement. En mai 2022, particulièrement tôt par rapport aux années précédentes, EDF a dû ralentir l'activité de la centrale du Blayais, située au bord de l'estuaire de la Gironde : la température du fleuve étant trop élevée, EDF ne pouvait plus rejeter l'eau utilisée pour le refroidissement, notamment pour protéger la biodiversité¹³. RTE insiste également sur l'emplacement des centrales nucléaires comme piste d'adaptation¹⁴ : une source d'eau froide à proximité, mais un emplacement qui limite les risques de vagues de submersion et raz-de-marée. Face à ces risques, Hervé Cordier, chef de groupe à la direction de l'ingénierie et projets nouveau nucléaire chez EDF, explique que « des échangeurs de chaleur et climatiseurs supplémentaires ont été placés dans les centrales [depuis 2003] » et « des travaux sont en cours à Gravelines (Nord), pour rehausser le niveau de la digue et tenir compte du niveau de la mer »¹⁵.

ENCADRÉ 2 • RETOUR D'EXPÉRIENCE

LA DISTRIBUTION D'ÉLECTRICITÉ GÉRÉE PAR ENEDIS

Enedis, entreprise gestionnaire du réseau de distribution d'électricité en France, mène une réflexion sur la résilience de ses infrastructures face aux effets des changements climatiques, à la fois pour les « événements climatiques aigus, tempêtes, inondations, canicules », mais aussi « sur des événements de transition, comme l'élévation progressive des températures, ou du niveau de la mer » (Nicolas Perrin, directeur du pôle RSE d'Enedis)¹⁶. Des pistes d'adaptation émergent ainsi depuis une prise de conscience « forcée » par la tempête de décembre 1999 et la canicule d'août 2003. Le travail d'identification des risques majeurs (tempête, vague de chaleur, incendie, précipitations, neige collante) a ainsi permis de structurer des réponses, telles que l'enfouissement des lignes dans les régions boisées particulièrement sensibles aux tempêtes et aux incendies, l'installation de dispositifs étanches dans les postes électriques, ou l'installation de pompes dans les zones soumises au risque d'inondation par exemple. Toutefois, ces réponses nécessitent encore des améliorations car on sait, par exemple, qu'en « période de canicule, le sol se refroidit moins et donc la dissipation de chaleur des équipements dans le sous-sol se fait moins bien ».



La sobriété, nouvel horizon des politiques d'atténuation et d'adaptation

La sobriété, bien qu'étant un concept aux contours encore mouvants, renvoie aux idées de maîtrise et de réduction des consommations mais aussi de hiérarchisation des usages et des besoins¹⁷. Ce concept appelle indéniablement à des « *changement[s] des comportements individuels, des cadres économiques et des modèles d'affaires, dans l'objectif d'un découplage entre création de valeur sociétale et consommation de ressources/énergie* »¹⁸. Face aux menaces qui pèsent sur le réseau et sur les capacités de production et de fonctionnement des infrastructures d'énergie, la voie de la sobriété s'affirme alors comme une approche stratégique, d'autant plus dans un contexte géopolitique tendu.

De nombreux pays dévoilent récemment leur « plan de sobriété » afin de respecter l'objectif européen d'une réduction globale de 10 % de la consommation d'électricité d'ici mars 2023 et de 5 % pendant les heures de pointe. Les États européens, demeurant libres dans le choix des mesures adoptées, optent notamment pour l'incitation à réduire le chauffage dans les logements (-1 °C en Italie) et l'abaissement du seuil de la température maximum (19 °C dans les écoles et bâtiments publics en Italie, en France et en Espagne ; maintien à 16 ou 17 °C dans les bâtiments durant le week-end en Lituanie), le décalage de la période de chauffe (de 15 jours pour la France, et attendre novembre en Italie par exemple), la réduction de la température des équipements sportifs (gymnases, piscines municipales) et de l'utilisation de l'eau chaude sanitaire dans les bureaux, l'arrêt de l'éclairage nocturne de certains monuments et des magasins après leur fermeture (Portugal, France) et dès 22h en Espagne, des restrictions pour les illuminations des fêtes de fin d'année, l'extension du télétravail et le regroupement des services publics dans des locaux adaptés pour limiter le nombre de mètres carrés chauffés, etc.

Au-delà de l'Europe, d'autres pays encouragent la sobriété. En juin 2022, le gouvernement japonais – pris entre l'augmentation des températures estivales et l'effondrement du cours du yen qui a contribué à faire augmenter la facture des importations d'énergie – exhorte la population et les entreprises à adopter des éco-gestes (éteindre la lumière dans les espaces non occupés, réduire d'une heure par jour l'utilisation des téléviseurs, éteindre les dispositifs de chauffage des sièges de toilettes, etc.) afin de réduire la consommation d'énergie et éviter les coupures^{19,20}. Ces conversions rapides et sous contraintes conjoncturelles à une forme de « sobriété d'État » s'inscrivent dans un horizon temporel défini et limité et ne sauraient se confondre avec une intégration de la sobriété dans les scénarios de transition à long terme. Le projet CACTUS²¹, porté par l'association française négaWatt et l'institut de recherche allemand Fraunhofer ISI, est une de ces initiatives qui encouragent cette intégration de la sobriété dans les scénarios de transition, via la formation d'acteurs des politiques énergétiques et climatiques en Hongrie et en Lituanie entre 2020 et 2022.

Canicules et pressions sur les réseaux

De plus en plus fréquentes, les canicules incitent les populations dans de nombreuses régions du monde à adopter de nouveaux comportements et à se tourner vers la climatisation. Or, le recours croissant aux climatiseurs entraîne une augmentation locale de la température nocturne qui induit des effets néfastes pour le confort et la santé des habitants et pourrait créer une boucle de rétroaction négative, l'augmentation des températures renforçant le recours aux appareils de climatisation, et inversement.

Selon l'Agence internationale de l'énergie, 2,27 milliards de climatiseurs étaient en service dans le monde en 2021 et représentaient environ 16 % de la consommation mondiale d'énergie²². Les projections montrent que « *le stock mondial de climatiseurs [devrait augmenter] de plus de 50 % au cours des dix prochaines années* » : le palier des quatre milliards d'appareils en service dans le monde serait atteint en 2040. Si, à ce jour, ce sont la Chine et les États-Unis qui constituent la plus grande partie de la demande, les marchés qui auront la plus forte croissance seront probablement l'Inde et l'Indonésie, « *où il est prévu que le nombre d'appareils en service soit multiplié respectivement par quinze et par huit entre 2020 et 2040* ». En France en 2020, le nombre de climatiseurs vendus « *a dépassé les 800 000 unités contre seulement 350 000* » en 2019. 25 % des ménages sont équipés d'appareils de climatisation en 2021, contre seulement 14 % des ménages en 2017^{23,24}.

En conséquence directe de la hausse des besoins électriques en cas de forte chaleur, certains États sont contraints de modifier en urgence leur mix énergétique, au détriment des objectifs de réduction des émissions de GES. En effet, dès le printemps 2022, l'Inde et le Pakistan sont confrontés à une vague de chaleur sans précédent, la température a atteint 43,5 °C à New Delhi fin avril, et jusqu'à 48 °C dans certaines zones du Sind rural, soit un dépassement de +8 °C par rapport aux moyennes saisonnières. L'Inde a alors enregistré un record de consommation électrique à l'échelle nationale le 26 avril (204,65 GW)²⁵. La demande énergétique a augmenté de 12 % en avril. Pour faire face à cette augmentation de la demande, le pays a relancé sa production de charbon (principale source énergétique du pays), et mis en place des mesures de rationnement (coupures dans certaines usines, réduction de l'activité industrielle, etc.).

En Chine, et en particulier dans la province du Sichuan, les températures ont plusieurs fois dépassé les 40 °C au cours du mois d'août 2022. Face au recours quasi-systématique des 84 millions d'habitants de la province à la climatisation et alors que les cours d'eau sont asséchés (le Sichuan dépend à 80 % des barrages hydrauliques), le gouvernement a imposé un rationnement de l'électricité pour les professionnels et le Centre d'Information Internet de Chine^c informe que « *la quantité de charbon utilisée pour faire tourner les centrales de production d'électricité a augmenté de 15 % sur la première quinzaine d'août, par rapport à la même période* » en 2021²⁶.

c Organe de presse officiel chinois.

ENCADRÉ 3 • RETOUR D'EXPÉRIENCE

LES RÉSEAUX AMÉRICAINS SOUS PRESSION

Aux États-Unis, le croisement de différents facteurs (climatiques, avec une forte augmentation des vagues de chaleur notamment ; économiques, marqués par un fort déficit d'investissement dans les infrastructures ; comportementaux, par l'augmentation des besoins en électricité, et enfin structurels, avec des infrastructures vieillissantes et donc de plus en plus vulnérables aux effets des changements climatiques) a conduit le pays dans une situation complexe, marquée par une pression accrue sur un réseau d'infrastructures d'énergie vieillissant.

On sait notamment que « les aléas climatiques sont la principale cause des pannes d'électricité aux États-Unis. Au total, 679 pannes généralisées sont survenues entre 2003 et 2012 en raison des conditions climatiques ». Ainsi, les infrastructures américaines et en particulier les transformateurs de puissance nécessitent un renouvellement du parc. Par exemple, la tempête SuperStormSandy (2012) « a provoqué l'explosion d'un transformateur de puissance de la compagnie ConEd contribuant à un blackout privant d'électricité plus de 8,1 millions de foyers et entreprises à New York et ses environs, dont 800 000 pendant 10 jours »²⁷.

Au cours des deux dernières années, les États-Unis ont été confrontés à des vagues de chaleur de plus en plus fréquentes ; la population tente d'y faire face en ayant un recours croissant aux appareils de climatisation : la demande en électricité explose et pourrait avoir pour conséquence une augmentation du prix de l'énergie²⁸ et des risques importants de coupure d'électricité²⁹. La Californie semble particulièrement confrontée à ces risques, comme cela a été le cas début septembre 2022^{30,31}. Le gouvernement de Californie a lancé le dispositif FlexAlert (créé par l'association California ISO) et a diffusé des conseils d'économie d'énergie afin de ne pas saturer le réseau, tels que ne pas baisser la climatisation en-dessous de 25 °C, limiter l'utilisation d'appareils électriques, ou encore éteindre les lumières inutiles.

En début d'été 2021, une vague de chaleur d'une intensité sans précédent (jusqu'à 51 °C) a affecté les réseaux et infrastructures d'énergie de la ville de Portland, dans l'Oregon (fonte de certains câbles, interruption du tramway, saturation du réseau causé par une augmentation de la demande en climatisation, etc.).

L'influence des changements climatiques sur les choix énergétiques des pays

La production d'énergie éolienne dépend de plusieurs variables telles que la vitesse, l'intensité, la direction, le cisaillement et la distribution des vents, le degré de nébulosité ou encore la capacité de transmission de l'atmosphère. Un ralentissement du vent^{32,33,34} a été constaté à plusieurs endroits du globe avec des évolutions plus marquées au niveau local qu'au niveau des évolutions moyennes, comme ce fut le cas dans le nord de la Chine (« en Mongolie intérieure et dans le Gansu, deux des provinces les plus équipées, le potentiel éolien a baissé d'environ 15 % depuis 1979 »³⁵) et au Royaume-Uni (le secteur éolien n'a fourni que 7 % de l'électricité en septembre 2021, contre 24 % habituellement sur cette même période ; ce qui a contraint le pays à rallumer une centrale à charbon³⁶). La

startup française Callendar, spécialisée dans l'évaluation des risques climatiques, confirme cette tendance en France également, où la vitesse du vent a été anormalement faible en septembre 2021. À l'échelle de la région des Hauts-de-France, la vitesse moyenne du vent a été inférieure de 58 % à la normale de 1991-2020 pour le mois de septembre, alors qu'un quart du parc éolien français se trouve dans cette région.

Du côté de l'énergie solaire, les prévisions montrent vraisemblablement une augmentation du degré d'insolation mais il semblerait que les panneaux solaires présentent un rendement décroissant en cas de forte chaleur^{37,38}.

La ressource en eau sous tension : un défi majeur pour la production d'hydroélectricité partout dans le monde

Le potentiel hydroélectrique est directement lié à la disponibilité de la ressource en eau. Les changements climatiques vont donc affecter la capacité de production des centrales hydroélectriques (modifications des apports naturels alimentant le lac-réservoir amont en quantité et en temporalité, élévation des températures de l'air, précocité de la fonte nivale, réduction des précipitations sous forme de neige) et la demande en énergie (modification des pics de demande en fonction des variations de température notamment). Pour un réservoir multi-usages, d'autres activités demandeuses en eau pourraient être impactées et entrer en concurrence plus forte avec l'usage hydroélectrique.

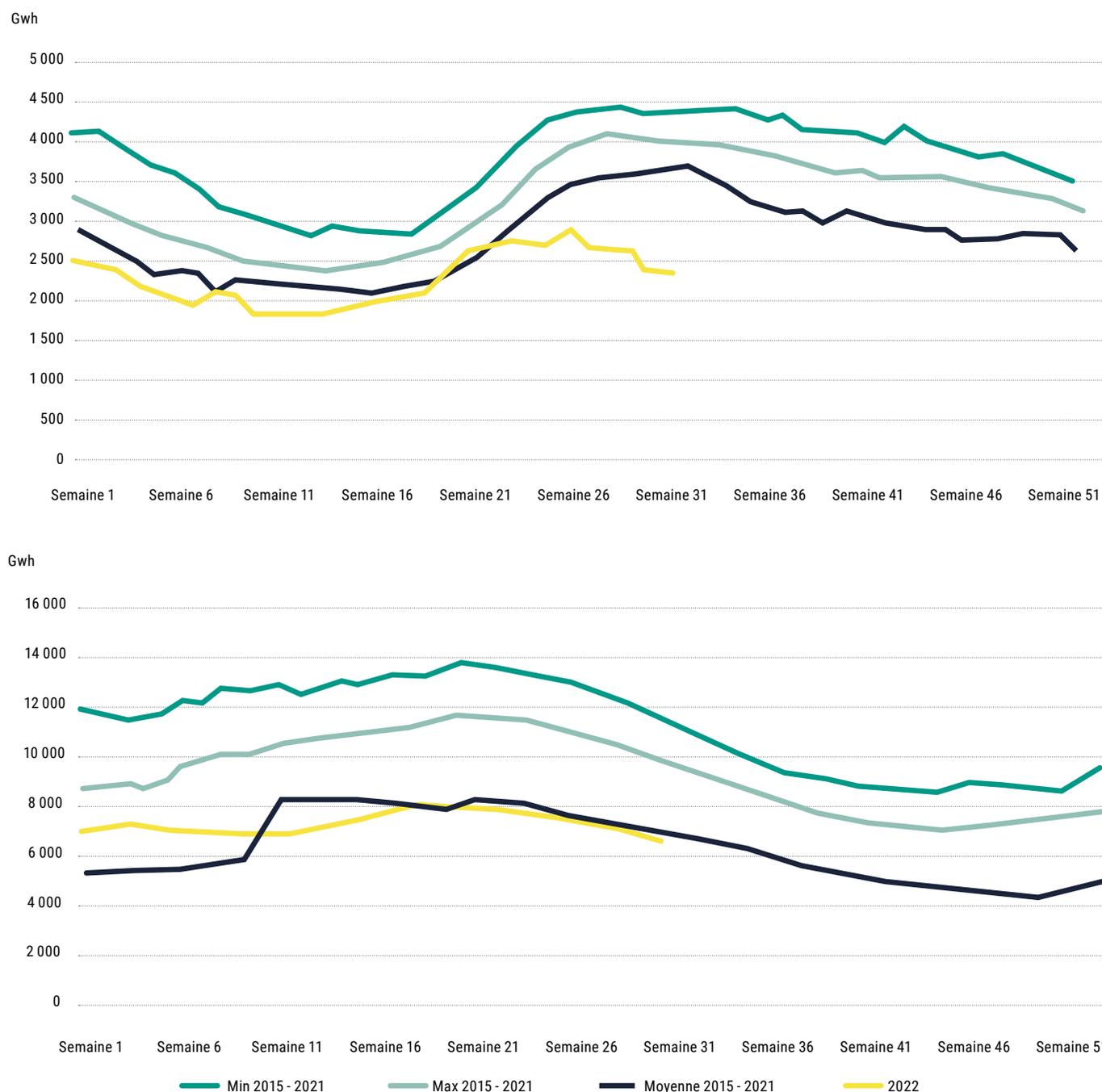
Les vagues de chaleur des étés 2021 et 2022 ont entraîné l'assèchement de nombreux cours d'eau à travers le monde. En Amérique du Sud, le fleuve Paraná (2^e plus grand fleuve du continent) a perdu six mètres en deux mois et la production des centrales hydrauliques a été réduite. Faute d'un approvisionnement suffisant, le Brésil s'est tourné vers les États-Unis pour importer du gaz, dont le prix a explosé au niveau mondial. En Chine, une vague de chaleur a sévi dans le sud-ouest du pays (allant jusqu'à 43,3 °C à Chengdu). Le niveau du fleuve Yangtze était de 40 % inférieur à la normale sur la période estivale. Lors de l'été 2022 comme 2021, les autorités ont dû cesser l'approvisionnement en électricité de certains sites industriels (Toyota, Foxconn, Contemporary Amperex Technology Co., Limited – CATL –), mais aussi des aciéries et autres fonderies de métaux, qui ont dû interrompre leur activité, parfois stratégique pour la transition écologique, comme les usines de fabrication de panneaux solaires... En Italie, le Pô a atteint un niveau historiquement bas au cours de l'été 2022 et les réserves hydroélectriques sont inférieures de 40 % à la moyenne historique sur la même période (**FIG. 2, EN HAUT**). Or, l'hydroélectricité représente environ 35 % de la production totale d'énergie verte, et satisfait habituellement plus de 15 % de la demande énergétique italienne. Même tendance en Espagne, où la production hydroélectrique était inférieure de plus de 30 % pendant l'été 2022 à sa moyenne sur les sept dernières années (**FIG. 2, EN BAS**)³⁹.

Ces tensions sur la ressource en eau, dues à des niveaux de précipitations plus faibles et des températures plus élevées, peuvent générer des situations de conflit d'usages lorsqu'un cours d'eau alimente différentes activités sur un même périmètre géographique. Par exemple, le système hydraulique de

FIGURE 2

RÉSERVES HYDROÉLECTRIQUES EN ITALIE (EN HAUT) ; RÉSERVES HYDROÉLECTRIQUES EN ESPAGNE (EN BAS)

Source : [Schroders](#), 2022



la Durance est un des plus artificialisés de France et fournit de l'eau potable à 3,5 millions d'habitants (Bouches-du-Rhône et Var) ; il approvisionne également les secteurs agricole et industriel de la région. En résumé, la Durance et son affluent le Verdon produisent « 50 % de l'électricité régionale et 10 % de l'hydroélectricité nationale ». En 2022, EDF a dû réduire sa production dès le mois de février et jusqu'à 60 % afin de conserver la ressource en eau pour les autres usages, jugés prioritaires⁴⁰.

Néanmoins, le développement des énergies renouvelables reste un levier essentiel de la transition énergétique, de l'indé-

pendance nationale vis-à-vis de l'extérieur et de la résilience territoriale. Au Bénin, le Programme des Nations unies pour le développement a soutenu un projet de renforcement de la résilience du secteur de l'énergie aux impacts des changements climatiques afin de réduire la vulnérabilité des communautés rurales et urbaines, et ce, à toutes les étapes du réseau énergétique (production, transport et distribution énergétique). Le projet a permis d'installer des mini-centrales solaires photovoltaïques, des lampadaires solaires, et également de réhabiliter un poste électrique avec l'acquisition d'un transformateur électrique intelligent⁴¹.



GRANDS ENSEIGNEMENTS

La crise des marchés énergétiques aura révélé l'exposition des réseaux et des infrastructures énergétiques à l'intensification du changement climatique. Si, parmi les moteurs de l'inflation, la guerre en Ukraine déclenchée en février 2022 retient l'attention, les conséquences directes et indirectes des sécheresses, inondations et vagues de chaleur laissent penser que cette conjoncture pourrait cacher des défis plus structurels posés par le changement climatique. Entre pics de demande de climatisation, assèchement des capacités de production hydroélectrique et pénuries d'eau pour le refroidissement des centrales, la répétition des vagues de chaleur a accentué plusieurs facteurs de tension sur les réseaux électriques. La vétusté des infrastructures, la concentration des capacités de production et le manque d'anticipation des besoins d'adaptation comptent parmi les causes de vulnérabilité des réseaux sur le plan infrastructurel et organisationnel. L'observation de phénomènes à l'échelle mondiale, comme le ralentissement global de la vitesse des vents (stilling), fait aussi peser de nouveaux risques encore peu étudiés sur les productions renouvelables. Lorsqu'elle pousse à l'accroissement de la demande en énergie, la « maladaptation » elle-même devient un facteur de déstabilisation des réseaux.

Deux principaux modèles de réponses sont apparus entre 2021 et 2022. D'abord, le recours d'urgence aux énergies fossiles, plus souples et flexibles, pour relayer les capacités de production renouvelables affectées par des variables climatiques, souligne comment l'impréparation de l'adaptation peut entrer en contradiction avec les stratégies d'atténuation. De plus, la guerre en Ukraine a rappelé le coût géostratégique d'une telle dépendance aux fossiles. À ce titre, l'accélération de la transition du mix énergétique vers des énergies bas carbone fait figure de pierre angulaire d'une stratégie d'adaptation des réseaux de production qui garantisse l'approvisionnement et l'autonomie stratégique des États et des acteurs non-étatiques.

Ensuite, la propulsion soudaine de la « sobriété » en haut de l'agenda politique, sous la forme de plans d'urgence impulsés par les États, ouvre de nouveaux horizons pour le pilotage de la demande dans les scénarios de transition. Ses conséquences durables seront à observer dans les années qui viennent : deviendra-t-elle un élément structurant des politiques d'atténuation, allégeant d'autant plus les infrastructures énergétiques des pressions générées par les changements climatiques, ou bien son adoption en urgence sans forme de planification entraînera-t-elle un effet rebond sur la demande énergétique ?

Dans tous les cas, l'adaptation des acteurs et infrastructures énergétiques requiert l'adoption d'une approche holistique et écosystémique des enjeux énergétiques afin de mieux maîtriser les effets en cascade (sur un réseau ou entre différents réseaux) ou encore les conflits d'usage en cas de raréfaction des ressources. D'autre part, l'intégration des données et des prévisions climatiques de long terme dans la planification, le dimensionnement et le fonctionnement des infrastructures énergétiques se révèle cruciale afin d'anticiper le plus tôt possible les effets des changements climatiques sur les infrastructures et réseaux énergétiques.

RÉFÉRENCES

RETOUR PAGE PRÉCÉDENTE

- 1 WMO (2022) [State of the Global Climate 2021](#). World Meteorological Organization
- 2 Copernicus Climate Change Service (08/09/2022). « [Copernicus : l'été 2022 est le plus chaud jamais enregistré en Europe](#) ». Copernicus
- 3 Météo France (30/08/2022). [Changement climatique : l'été 2022 et ses extrêmes météorologiques pourraient être la norme après 2050](#). Météo France
- 4 MacCarthy, J., Tyukavina, S., Weisse, M., Harris, N. (17/08/2022). [New Data Confirms : Forest Fires Are Getting Worse](#). World Resources Institute
- 5 European Forest Fire Information System (06/09/2022). [Répartition de la surface brûlée en Europe depuis le 1er janvier 2022](#). public. flourish.studio
- 6 IISD (2021). « [Renforcer la résilience climatique des infrastructures canadiennes : une revue de la littérature pour éclairer la voie à suivre](#) ». International Institute on Sustainable Development
- 7 France Stratégie (2022). « [Risques climatiques, réseaux et interdépendances : le temps d'agir](#) »
- 8 Braun, M., Fournier, E. (2016), [Études de cas d'adaptation dans le secteur de l'énergie – Surmonter les obstacles à l'adaptation](#). Rapport présenté à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada, 114 p
- 9 <https://www.adaptaville.fr/alea-climatique/tensions-sur-les-ressources-energetiques>
- 10 [Connaissance des énergies \(5/07/2021\)](#), « [Les centrales nucléaires face aux risques liés au changement climatique](#) »
- 11 Dorfman, P. (28/06/2021). [Nuclear energy isn't a safe bet in a warming world – here's why](#). UCL Energy Institute, University College London
- 12 RTE, GT1 Climat, [Réunion n°4 : effets du climat sur la production électrique d'origine nucléaire et thermique](#), 10 mars 2021
- 13 Lonchamp, J., Raymond, A., Fleury, N., Wursthorn, P., Laurentin, R. (11/05/2022). [Sécheresse : la production nucléaire ralentie](#). France Info
- 14 Guarato, J. (08/12/2021). [Nucléaire : face au changement climatique, le casse-tête du refroidissement](#). NaturaSciences
- 15 Fleitour, G. (05/07/2022). [Comment EDF compte éviter le coup de chaud à ses centrales nucléaires cet été](#). Ouest-France
- 16 Enedis (2022). [La distribution électrique face au dérèglement climatique](#). Pour la science, n°535
- 17 Cézard, F., Mourad, M. (2019). [Panorama sur la notion de sobriété – définitions, mises en œuvre, enjeux](#). Ademe
- 18 Laurent, D. (2020). [La sobriété dans les scénarios de transition](#). La Revue de l'énergie, n°648
- 19 Bloomberg (28/06/2022). [Tokyo power crunch eases as Japan renews call to save energy](#). The Japan Times
- 20 Oda, S. (07/06/2022). [Japan Wants People to Use Less Energy to Prevent Blackouts](#). Bloomberg
- 21 <https://cactus-energy-sufficiency.eu/>
- 22 AIE (2022). [Space Cooling](#). Agence internationale d'énergie.
- 23 Ademe (2021). [La climatisation : vers une utilisation raisonnée pour limiter l'impact sur l'environnement](#).
- 24 Binet, G., Grignon-Massé, L. (2020). [La climatisation des logements résidentiels : laisser faire ou encadrer intelligemment ?](#). Équilibre des énergies
- 25 PTI (29/04/2022). [India's peak power supply touches record level of 204GW on Thu](#). Energyworld
- 26 Les Echos (16/08/2022). [Une vague de chaleur contraint la Chine à rationner l'électricité](#). Les Echos
- 27 Aboukrat, M., Lepousez, V. (2021). [Les réseaux électriques, un enjeu majeur de la résilience climatique](#). Carbone 4
- 28 Oleniacz, L. (05/01/2022). [Climate Change could lead to blackouts, higher power costs on West coast](#). NC State University
- 29 Cool Coalition (10/05/2021). [A growing summertime risk for cities : power failures during waves](#).
- 30 Halper, E., Werner, E. (07/09/2022). [California scrambles to avoid blackouts as it pursues a green energy future](#). The Washington Post
- 31 Hubler, S., Borwning, K., Penn, I., Cowan, J. (06/09/2022). [California Narrowly Averts an Electricity Crisis Amid Scorching Heat](#). The New York Times
- 32 Robbins, J. (13/09/2022). [Global 'Stilling' : Is Climate Change Slowing Down the Wind ?](#) YaleEnvironment360
- 33 Dodgshun, J. (05/10/2017). [The stilling : global wind speeds slowing since 1960](#). Horizon, the EU Research and Innovation Magazine
- 34 van Halm, I. (22/11/2021). [Weekly data : Changes in wind speed caused by climate change may affect future wind power output](#). Energy Monitor
- 35 Laconde, T. (12/11/2021). « [Résilience climatique : l'éolien aussi doit faire ses preuves](#) ». Le Monde de l'énergie
- 36 Alvarez, C., Fricot, P. (21/10/2021). [Partout dans le monde, le changement climatique exacerbe la crise énergétique](#). Novethic
- 37 Jerez, S., Tobin, I., Vautard, R. et al. (2015). [The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe](#). Nature Communication, vol. 6 (10014)
- 38 Müller, J., Folini, D., Wild, M., & Pfenniger, S. (2019). [CMIP-5 models project photovoltaics are a no-regrets investment in Europe irrespective of climate change](#). Energy, vol. 171, pp. 135-148.
- 39 Lauro, I. (16/09/2022). [L'impact des sécheresses sur le mix énergétique](#). Schroders
- 40 Isnard-Dupuy, P. (12/07/2022). [Durance, la fin d'un modèle de résilience](#). Politis
- 41 PNUD (n.d.). [Projet de renforcement de la résilience du secteur de l'énergie aux impacts des changements climatiques au Bénin](#). undp.org