

Résilience des systèmes électriques face au changement climatique

Par Alain BURTIN et Sylvie PAREY

EDF R&D

La question de la résilience des systèmes électriques face aux risques météo-climatiques est une question fondamentale pour la sécurité de l'alimentation en électricité et pour assurer une fourniture de qualité. Les systèmes électriques actuels ont été développés sur la base de référentiels climatiques issus de l'observation historique des phénomènes météo-climatiques. Le changement climatique en cours nous conduit à réinterroger la pertinence de nos référentiels à l'aune des évolutions en cours du climat et des projections climatiques futures réalisées dans le cadre des travaux du GIEC. Dans cet article, nous abordons l'exemple du système électrique français sur la base des études menées par EDF R&D dans le but de caractériser les évolutions du climat et leurs impacts potentiels sur le système électrique, avant de nous intéresser à la démarche d'adaptation engagée en son sein par le groupe EDF.

Systèmes électriques et risques climatiques

La question des risques climatiques n'est pas une problématique nouvelle pour les systèmes électriques : la maîtrise de ces risques est fondamentale pour la résilience de ces systèmes face aux événements extrêmes, et ainsi assurer la sécurité de l'alimentation en électricité et en garantir une fourniture de qualité.

Les systèmes électriques sont fortement exposés aux conditions climatiques et aux effets associés : ainsi, le fonctionnement du circuit de refroidissement des centrales de production est dépendant de son alimentation en eau de mer ou en eau des rivières, ou en air dans le cas du recours à des aéroréfrigérants. De même, la production des énergies renouvelables (l'hydraulique, l'éolien ou le solaire) est évidemment étroitement liée à la ressource en eau, en vent ou en ensoleillement. Plus globalement, la fiabilité de tous ces systèmes repose sur la résilience des réseaux de distribution et de transport aux conditions climatiques.

La gestion des risques climatiques fait partie intégrante des processus de conception des ouvrages et des procédures d'exploitation de ceux-ci, ainsi que de la gestion de l'équilibre offre-demande et de celle de la ressource en eau. L'approche adoptée face à ces risques repose sur des référentiels statistiques représentatifs de la variabilité des phénomènes climatiques historiques pour lesquels on dispose de mesures réalisées sur de longues périodes, ainsi que sur la caractérisation des événements extrêmes auxquels les ouvrages et les systèmes électriques doivent pouvoir résister.

Par ailleurs, les usages de l'électricité et de l'énergie sont eux-mêmes dépendants des conditions climatiques : la demande d'électricité est ainsi fortement influencée par la température (en France, 1°C en moins en hiver implique un appel de puissance supplémentaire de l'ordre de 2 400 MW à l'heure de pointe. La sensibilité estivale est moindre mais est devenue significative, de l'ordre de 400 à 500 MW par degré supplémentaire à la pointe).

La prise en compte des phénomènes météorologiques est essentielle dans la gestion de l'équilibre offre-demande des systèmes électriques, sachant que l'électricité ne se stocke pas et qu'il est dès lors nécessaire d'ajuster à chaque instant l'offre à la demande en gérant notamment les impacts des aléas météorologiques sur la disponibilité des ressources¹ et des équipements. Cela nécessite de disposer des marges suffisantes en termes de capacités installées pour pouvoir faire face aux situations extrêmes, et faire en sorte de limiter le risque de défaillance du système, ce qui peut conduire, le cas échéant, à des délestages de consommation.

L'exposition des systèmes électriques aux aléas climatiques constitue ainsi un des facteurs essentiels du dimensionnement des mix électriques : historiquement, en France, l'aléa prépondérant était l'aléa hydraulique qui conduisait à dimensionner le parc thermique pour faire face aux années sèches. Le développement des usages thermosensibles a conduit progressivement à rendre prépondérant l'aléa de température et à dimensionner le parc thermique pour faire face aux vagues de froid extrême, le critère de 3 heures par an en espérance a été défini pour faire face à un risque de vague

¹ Par exemple, contrainte sur la disponibilité du gaz en période de vague de froid.

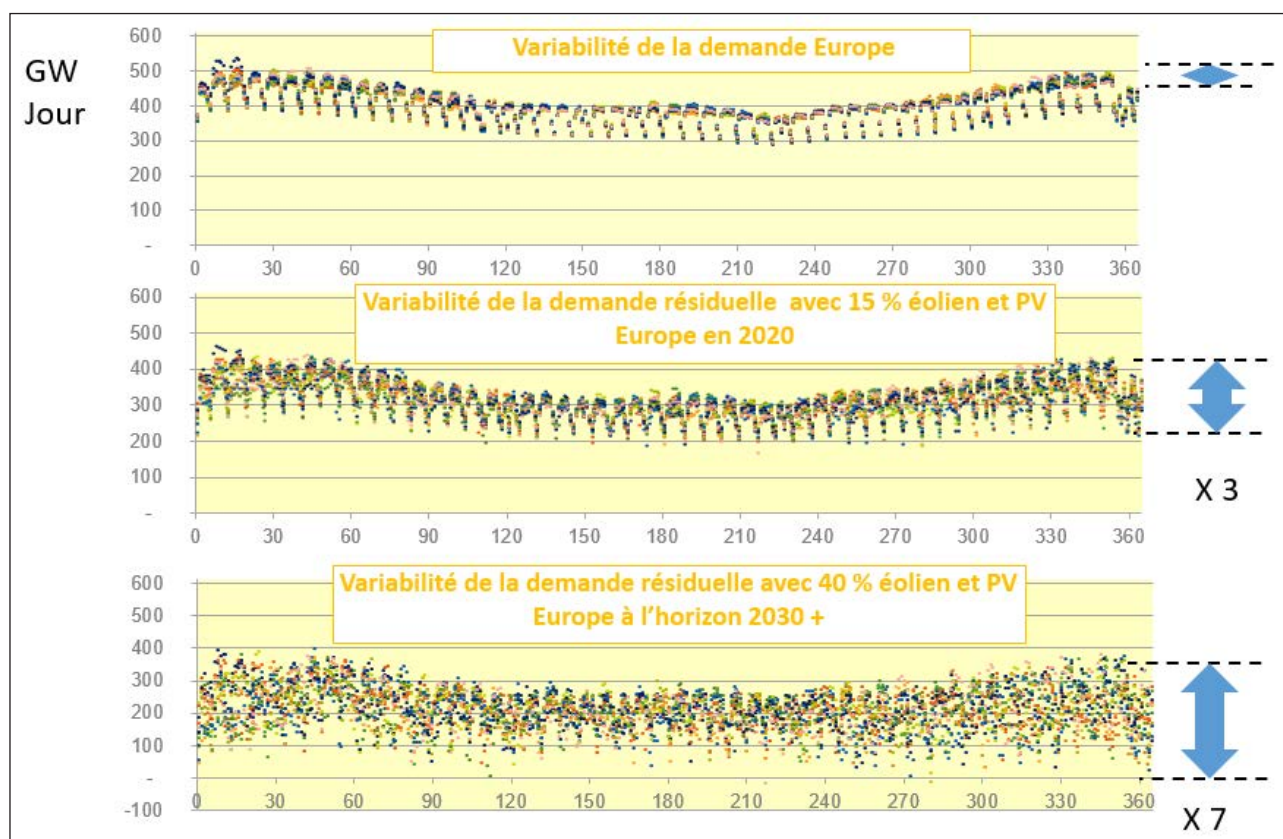


Figure 1 : Variabilité de la demande d'électricité – Source : EDF R&D.

de froid qui ne se réalise statistiquement qu'une fois tous les dix ans².

Le développement massif des énergies renouvelables variables (éolien, photovoltaïque) modifie en profondeur les fondamentaux de la gestion de l'équilibre offre-demande ainsi que le paysage des risques de défaillance en France et en Europe. La variabilité de la production éolienne tend à devenir le principal aléa pesant sur la gestion physique de l'équilibre offre-demande à la maille européenne. Le premier graphique de la Figure 1 (voir ci-dessus) restitue la variabilité journalière de la demande d'électricité en Europe en fonction de la température pour les 365 jours de l'année sur 30 années climatiques représentatives, avec des périodes critiques concentrées sur les pointes mobiles en hiver. Le deuxième graphique illustre pour 2020 la variabilité journalière en Europe de la demande résiduelle d'électricité une fois défalquée la production d'origine renouvelable : il est à noter que cette variabilité augmente tout au long de l'année.

Le troisième graphique donne une projection de cette variabilité à l'horizon des 10 ans, laquelle montre

² Ce critère correspond à une durée moyenne de défaillance annuelle de trois heures intervenant pour des raisons liées au déséquilibre entre l'offre et la demande d'électricité. Ce critère a été défini à l'échelle du système électrique dans le cadre d'un processus de planification centralisé. Dans le cadre d'un marché, cela pose la question de la gestion décentralisée par les acteurs de leur exposition aux risques climatiques sur leur périmètre d'équilibre.

la forte montée en puissance des énergies renouvelables. Il est également constaté une exposition croissante du système électrique aux phénomènes météo-climatiques, laquelle s'accompagne d'une évolution du « paysage de défaillance », ce qui pose la question du critère d'ajustement du parc thermique. L'une des situations potentiellement critiques est celle d'une vague de froid extrême s'accompagnant de vents faibles et touchant simultanément et pendant plusieurs jours un grand nombre de pays européens durant la période hivernale. Estimer la fréquence de survenue de ce type de situation nécessite de pouvoir disposer d'un important jeu de données, allant bien au-delà du simple recul observationnel dont on dispose pour la période historique.

Les impacts du changement climatique

Le constat

Le changement climatique est une réalité déjà tangible pour les systèmes électriques. Ses effets font l'objet de nombreux travaux au niveau international.

Le changement climatique auquel nous assistons actuellement est sans précédent à une échelle de temps aussi courte. Le rapport du groupe de travail I du 6^e rapport d'évaluation du GIEC (IPCC, 2021) indique que le changement climatique a déjà conduit à l'augmentation de près de 1,1°C de la température moyenne

globale par rapport à la période préindustrielle et a entraîné un recul global des glaciers, une hausse de 20 cm du niveau global de la mer, ainsi que l'augmentation de la fréquence des vagues de chaleur et de la proportion des cyclones tropicaux les plus intenses.

Ces évolutions se déclinent, pour la France, au travers d'une augmentation de la température moyenne, qui est plus forte que celle constatée au niveau global et qui est plus marquée en été qu'en hiver, ainsi que d'une aggravation des risques de canicule et de sécheresse. Les régions de moyenne montagne et la zone méditerranéenne sont particulièrement touchées. Ces changements vont se poursuivre dans le futur, de façon d'autant plus importante que les émissions de gaz à effet de serre générées par les activités humaines seront moins maîtrisées.

L'adaptation au changement climatique nécessite de faire évoluer nos référentiels pour améliorer la gestion des risques climatiques. Par exemple, la filière Hydro et barrages s'est dotée récemment de plusieurs référentiels relatifs à la question de l'évaluation des impacts du changement climatique et de la résilience climatique des ouvrages hydrauliques (barrages et réservoirs). Ces guides n'ont pas de valeur réglementaire, mais tendent à s'imposer comme des standards internationaux de plus en plus systématiquement exigés par les bailleurs de fonds et les assurances. Nous citerons en particulier le référentiel de la Commission internationale des grands barrages ou encore le guide de l'International Hydropower Association.

Une veille scientifique continue

La prise en compte quantitative du changement climatique dans nos analyses est conditionnée par notre capacité à évaluer les évolutions du climat, sachant qu'en la matière, la science progresse régulièrement. Les modèles climatiques globaux sont de plus en plus complexes et performants, mais leur résolution spatiale reste trop large pour pouvoir donner une bonne représentation des particularités régionales et locales du climat et de ses évolutions. À cette fin, les climatologues ont développé des approches dites de descente d'échelle dynamique conduisant à se focaliser sur une région du globe à des résolutions spatiales bien plus fines, de l'ordre de quelques kilomètres, et en appliquant un modèle global pour alimenter le modèle régional à ses limites.

Les modèles actuels permettent ainsi, en affichant un certain degré de confiance, de réaliser des projections de l'évolution, en termes d'intensité, de fréquence et de distribution géographique et temporelle, de certains phénomènes climatiques (la modélisation reste en revanche encore hors de portée pour nombre d'autres phénomènes climatiques).

Les projections d'augmentation des températures de l'air et de l'eau, d'élévation du niveau marin ou de diminution du volume annuel de l'écoulement hydraulique font l'objet d'un consensus, avec toutefois des variabilités au niveau régional ou local. On constate déjà une modification de la saisonnalité des débits des rivières dans les zones montagneuses, avec des pics de débit

en avance de phase de 3 à 4 semaines sur certains bassins. Il faut également s'attendre à des étiages estivaux plus marqués et plus longs.

Il reste difficile en revanche d'identifier des évolutions quantifiables sur le territoire national en ce qui concerne la modification des régimes de vent, le changement de nébulosité, les tempêtes, les tornades, la foudre, ou la modification des précipitations extrêmes et des débits exceptionnels des fleuves. S'agissant du potentiel solaire, les modèles fournissent des réponses parfois différentes selon les simulations climatiques considérées. Pour l'éolien, les résultats divergent aussi en fonction des études et des régions. En Europe, des diminutions sont attendues dans le Sud, tandis que de faibles augmentations sont anticipées en Europe du Nord et en Europe centrale.

Enfin, les modèles ne remettent pas en cause l'existence d'épisodes de températures froides, de frasil et de neige. Le récent grand froid observé au Texas en 2021 questionne cependant sur notre capacité de résilience à des épisodes de froid intense tels que l'on a pu connaître dans le passé, mais auxquels nous ne sommes plus habitués.

Un article paru en 2020 dans *Nature Energy* (Yalew *et al.*, 2020) procède à une revue d'études parues entre 2002 et 2019 et relatives à l'impact du changement climatique sur le secteur de l'énergie. Les aspects les plus étudiés sont les impacts de ce changement sur l'hydroélectricité. Viennent ensuite les impacts sur le système énergétique en général, puis les impacts sur la demande en matière de chauffage et de climatisation, où sont notamment montrées une diminution des besoins de chauffage en hiver et une augmentation des besoins de climatisation en été.

La démarche d'adaptation adoptée par le groupe EDF

La sensibilité du système électrique aux variations climatiques explique l'engagement précoce d'EDF R&D, dès 1990, dans des projets de recherche collaboratifs élaborés autour du changement climatique. Ces travaux visent à anticiper à court, moyen et long termes les évolutions des phénomènes climatiques, ainsi que certains des aléas indirectement associés au changement climatique, comme la prolifération d'espèces invasives, la dégradation de la qualité de l'air, le déclenchement de feux de forêt, les glissements de terrain, etc.

Pour quantifier les impacts du changement climatique, le groupe EDF s'est doté d'un service climatique qui regroupe des projections climatiques issues des exercices internationaux et des outils qui, relevant de l'état de l'art, permettent d'en décliner les résultats à l'échelle de ses activités. Cette démarche vise à intégrer à la fois des scénarios très émissifs du type RCP8.5 ou SSP5-RCP8.5, en particulier pour les agressions externes subies par les ouvrages, et des scénarios du type 2°C ou 1,5°C, dans lesquels le risque climatique est maîtrisé.

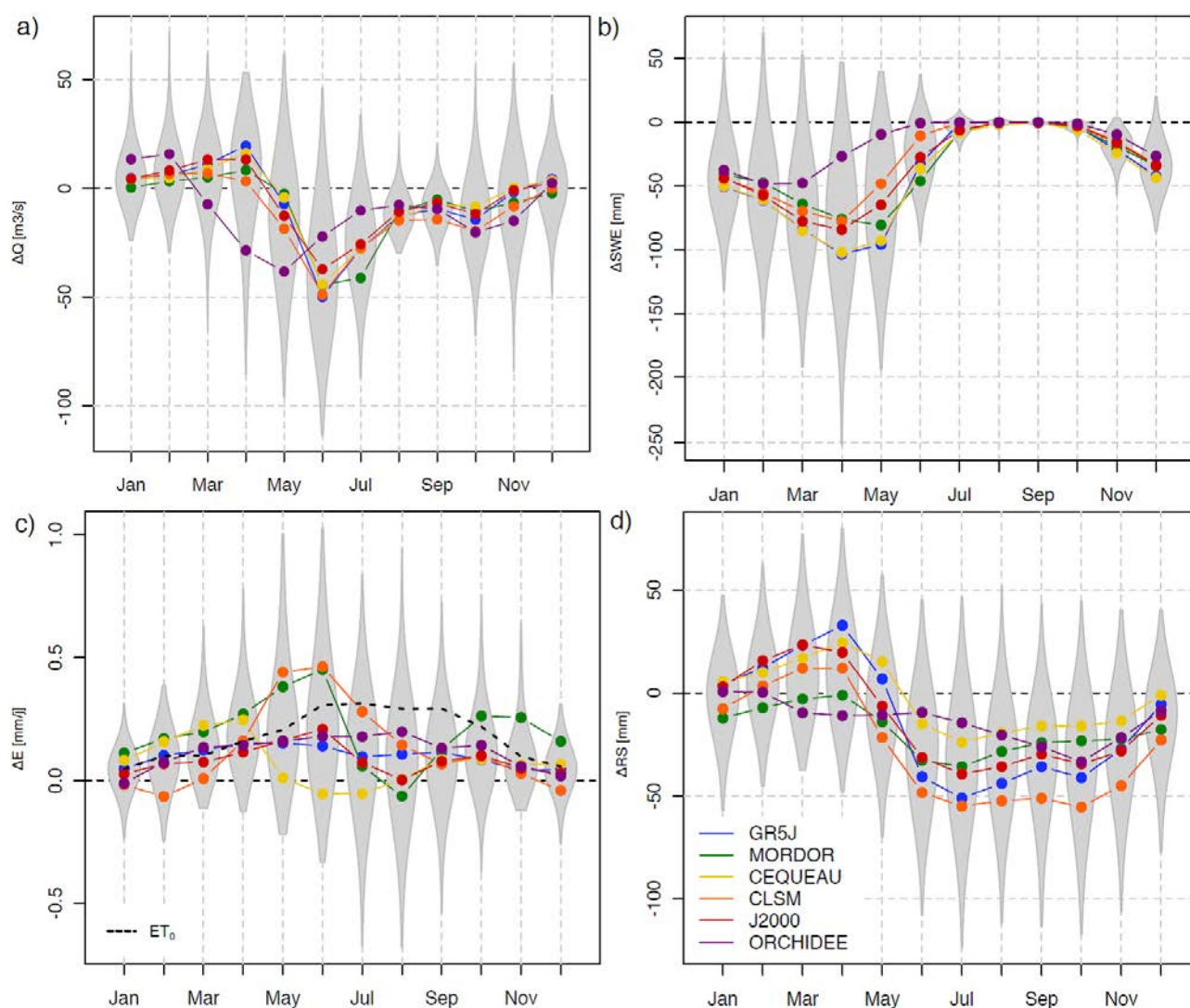


Figure 2 : Comparaison des résultats donnés par différents modèles hydrologiques (GR5J, MORDOR...) s'agissant des changements mensuels attendus à l'horizon 2050 en matière de : a) débit des rivières, b) de maximum de stock de neige, c) d'évapotranspiration réelle et d) de stock d'eau souterraine pour le bassin de la Durance à Serre-Ponçon. Les médianes de changements mensuels entre les périodes présentes et futures sont représentées par les lignes de couleur. Pour chaque mois, les distributions des changements mensuels, tous modèles confondus, sont représentées en gris par les diagrammes en violon – Source : Magand, 2014, projet R2D2 2050.

Les études réalisées ont démontré la robustesse du parc de production du groupe EDF, tout en identifiant les menaces potentielles à surveiller. Si le changement climatique mais aussi les autres changements anthropiques sont source supplémentaire d'incertitudes à prendre en compte dans nos évaluations, le principe d'un réexamen tous les dix ans de la sûreté des ouvrages nucléaires et hydrauliques est un pilier fondamental de cette robustesse sur le long terme.

Une étude publiée en 2021 (Parey et Marty, 2021) a permis d'analyser les évolutions à attendre à l'horizon 2050 pour cinq aléas majeurs susceptibles d'impacter le réseau de distribution d'électricité : les tempêtes, les précipitations extrêmes, la neige collante, les températures chaudes extrêmes et les feux de forêt. Concernant les trois premiers risques, aucune tendance à l'aggravation de ceux-ci n'est identifiée, si ce n'est l'aléa des pluies extrêmes dans la zone méditerranéenne, où il nous faut donc rester vigilants. En revanche, il faut se

préparer à être confrontés à des températures chaudes extrêmes possiblement supérieures de 5 à 10°C par rapport aux extrêmes historiques selon les modèles climatiques considérés (pour cette échéance, l'incertitude liée à la modélisation domine l'incertitude liée au scénario d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols) et à une extension à la fois de la saison propice et de la zone soumise au risque de feux de forêt. Ces résultats confortent les mesures d'adaptation déjà mises en œuvre par Enedis, qui consistent, par exemple, à remplacer les éléments sensibles à la chaleur et à enterrer les câbles dans les zones boisées.

L'adaptation au changement climatique fait aujourd'hui partie du périmètre couvert par le système de management environnemental du groupe EDF, lequel intègre l'élaboration de plans d'adaptation au changement climatique à l'échelle des différentes entités du groupe.

Références bibliographiques

MASSON-DELMOTTE V., ZHAI P., PIRANI A., CONNORS S. L., PÉAN C., BERGER S., CAUD N., CHEN Y., GOLDFARB L., GOMIS M. I., HUANG M., LEITZELL K., LONNOY E., MATTHEWS J. B. R., MAYCOCK T. K., WATERFIELD T., YELEKÇI O., YU R. & ZHOU B. (2021), "Summary for Policymakers", In: "Climate Change 2021: The Physical Science Basis", Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.

PAREY S. & MARTY A. (2021), *Resilience Of The French Distribution Network To Climate Change: Projected Changes For Main Meteorological Hazards Around 2050*, CIRED conference, paper 0468.

YALEW S. G., VAN VLIET M. T. H., GERNAAT D. E. H. J. *et al.* (2020), "Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios", *Nat. Energy* 5, pp. 794-802, <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0664-z>

Bulletin CIGB/ICOLD n°169 (2017), « Évaluation des risques et opportunités climatiques pour les barrages et réservoirs ».

IHA (2019), "Climate Resilience Guide for the Hydropower Sector".

EDF R&D *et al.* (2018), *Les systèmes électriques de demain*, Paris, Lavoisier.

EDF R&D *et al.* (2021), *Les défis scientifiques du nucléaire*, Paris, Lavoisier.