



PUBLICATION - JUILLET 2021

Les réseaux électriques, un enjeu majeur de la résilience climatique

Auteurs : **Maxime Aboukrat**

L'accès à l'électricité est un des objectifs du millénaire pour des raisons aujourd'hui perceptibles : nos sociétés et nos économies dépendent de plus en plus de ce vecteur énergétique, l'électricité représente 19% de l'énergie finale consommée dans le monde en 2018, contre 13% en 1990 [\[1\]](#).

En 2050, l'électricité pourrait représenter environ un tiers de l'énergie finale consommée. Les réseaux de transmission et distribution de cette énergie sont donc cruciaux et on constate une inquiétude croissante sur la sécurité de

l'approvisionnement en électricité dans un contexte de changement climatique[[ii](#)].

Cet article propose d'en comprendre quelques-unes des principales raisons :

Quelles sont les vulnérabilités climatiques des réseaux électriques ?

En quoi les réseaux électriques aux États-Unis sont-ils particulièrement exposés et vulnérables aux aléas climatiques ?

En quoi les transformateurs de puissance constituent un enjeu majeur de la résilience des réseaux électriques face au changement climatique ?

Que nous disent les projections climatiques ?

[[i](https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD&energy=Balances&year=2018)] <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD&energy=Balances&year=2018>

[[ii](https://www.iea.org/commentaries/the-world-s-electricity-systems-must-be-ready-to-counter-the-growing-climate-threat)] <https://www.iea.org/commentaries/the-world-s-electricity-systems-must-be-ready-to-counter-the-growing-climate-threat>



Mark Felix–AFP/Getty Images

En février 2021, l'État du Texas aux États-Unis a connu une grave crise de l'électricité provoquée par trois vagues de froid, où près de 5 millions d'américains ont été privés d'électricité pendant plusieurs jours et induisant pénuries d'eau, de nourriture et de chaleur[[i](#)].

Vulnérabilité climatique des réseaux électriques : de quoi parle-t-on ?

L'infrastructure de transmission et de distribution est l'épine dorsale du système électrique, car elle permet l'acheminement de l'électricité des centrales aux clients finaux (et inversement pour l'autoproduction dont une partie peut être évacuée sur le réseau). L'énergie est produite dans les centrales électriques à une tension relativement basse. Pour préparer cette énergie au transport, son niveau de tension est augmenté par des **transformateurs de puissance** afin de réduire les pertes d'énergie pendant le transport le long des lignes de transmission. Les **lignes de « transmission »** transportent l'électricité entre les régions jusqu'aux sous-stations, où le niveau de tension est cette fois-ci réduit (ou "abaissé") à l'aide de **transformateurs de distribution** afin de circuler sur les **lignes de « distribution »**, les lignes qui distribuent l'électricité aux utilisateurs finaux, notamment aux clients résidentiels, commerciaux et industriels. Les lignes de distribution acheminent l'électricité par des lignes aériennes ou souterraines.

Tout le long de cette chaîne d'approvisionnement, des équipements de captage et transmission d'information mesurent et enregistrent l'état du réseau électrique, afin d'en faciliter **le pilotage de l'équilibre et donc sa sécurité**.

En effet, l'équilibre du réseau doit être assuré à tout instant afin d'éviter un « blackout »^[1] électrique, généré par l'un des phénomènes suivants^[i] :

- la cascade de surcharges de lignes de transport et leur déclenchement ;
- l'écroulement de fréquence ;
- l'écroulement de tension ;
- la rupture de synchronisme entre les groupes de production.

Ainsi, la panne d'un élément du système peut entraîner des conséquences en chaîne et amener à une panne généralisée du système électrique. À noter que les aléas climatiques ne sont pas les seuls événements perturbateurs de l'équilibre réseau, de nombreux phénomènes entrent en jeu lors d'une rupture d'approvisionnement en électricité, où surviennent des incidents multiples, proches dans le temps, voire simultanés.

[1] Terme anglais pour désigner une panne de courant généralisée

[i] A. Cheimanoff, L. Feignier, J.C. Gougeuil, "Analyse des incidents d'exploitation conduisant à un fonctionnement dégradé: 1) Facteurs propices à un fonctionnement dégradé, 2) Analyse des incidents"



A New Delhi, le 31 juillet 2012. AFP/SAJJAD HUSSAIN

Lors du blackout de juillet 2012 en Inde (un des plus importants de l'histoire avec près de 670 millions d'individus impactés), la panne est attribuée à une combinaison de facteurs structurels et conjoncturels : un déficit structurel de production d'électricité pour faire face à la hausse de consommation électrique, et une sécheresse, qui a diminué les capacités de production hydro-électriques [1].

[1] <https://www.bbc.com/news/world-asia-india-19043972>

Les aléas climatiques peuvent venir affecter la sécurité de l'approvisionnement via plusieurs canaux comme l'illustre le schéma en Figure 1.

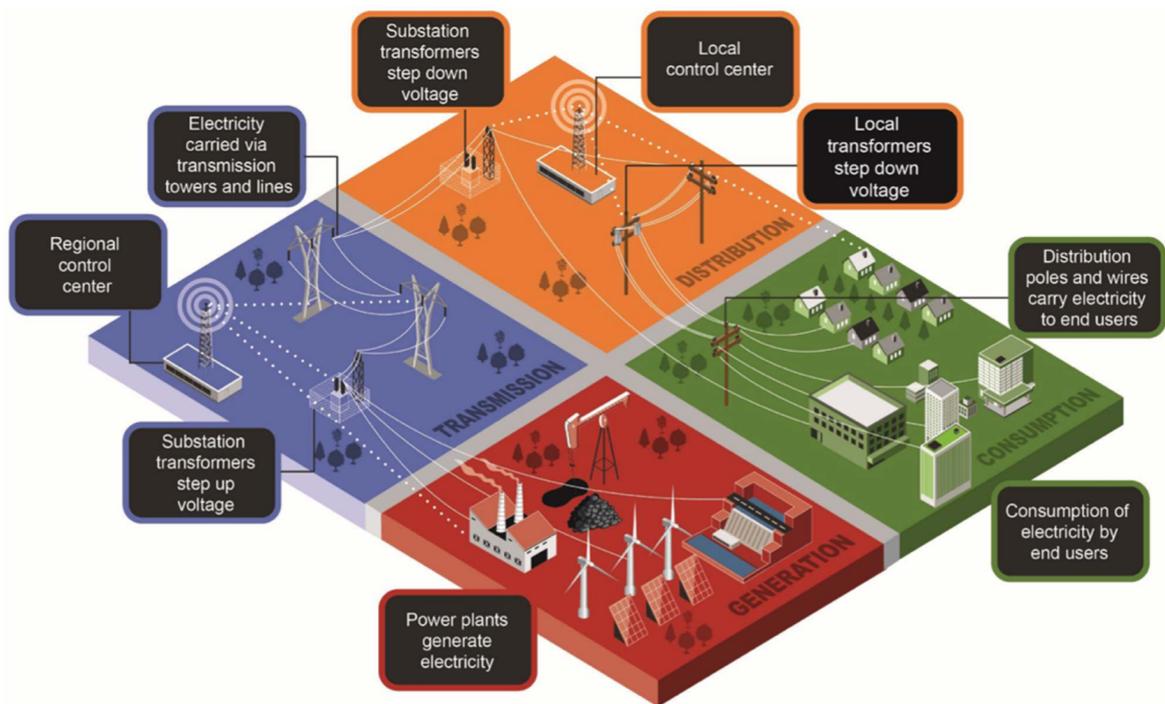


Figure 1 - Schéma général d'un réseau électrique

Dans le reste de l'article, nous nous concentrerons sur l'infrastructure de réseau (transmission et distribution). Plusieurs éléments constituant ces infrastructures sont particulièrement sensibles aux aléas climatiques, c'est-à-dire que la fonction qu'ils assurent peut être altérée, voire interrompue, par ces aléas. Parmi les éléments les plus critiques, il y a :

- Les lignes électriques : pylônes, poteaux et câbles électriques
- Les transformateurs électriques : de puissance, de courant ou de tension
- Les équipements de pilotage et de sécurité du réseau : disjoncteurs, sectionneurs, parafoudre, etc.
- Les équipements de mesure et télécommunication

En Figure 2, nous résumons les principales sensibilités climatiques de ces équipements recensés dans la littérature [1][2][3].

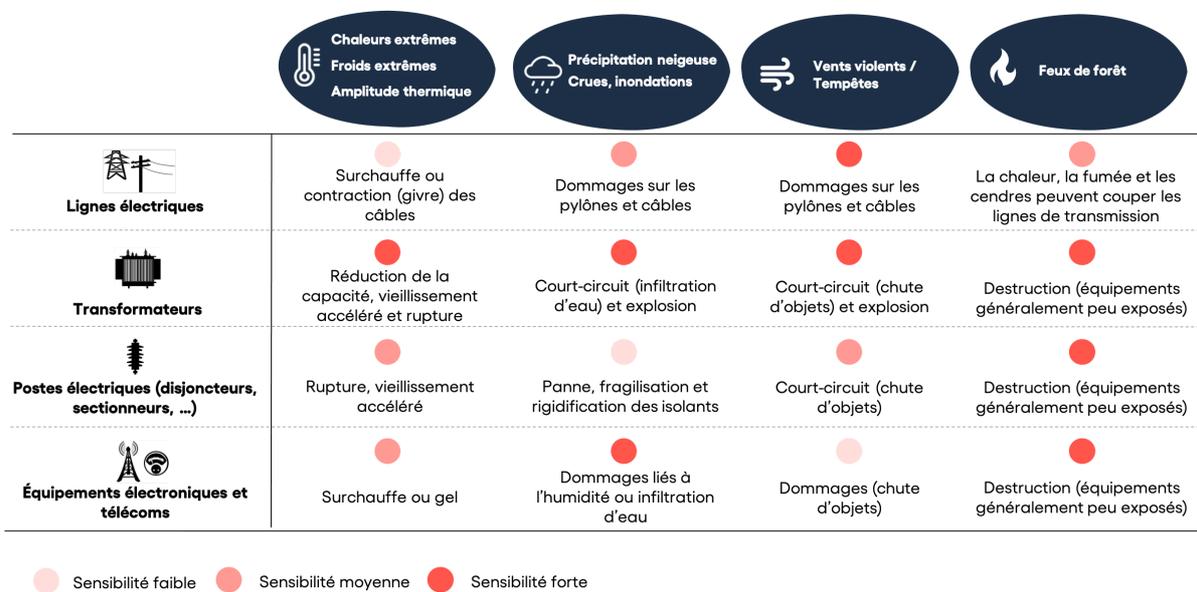


Figure 2- Sensibilité aux aléas climatiques des principaux éléments des réseaux électriques (Source : Carbone 4)

[i] Dumas, M., Kc, B., & Cunliff, C. I. (2019). *Extreme weather and climate vulnerabilities of the electric grid: a summary of environmental sensitivity quantification methods* (No. ORNL/TM-2019/1252). Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States).

[ii] Finster, M., Phillips, J., & Wallace, K. (2016). *Front-line resilience perspectives: The electric grid* (No. ANL/GSS-16/2). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).

[iii] Mikellidou, C. V., Shakou, L. M., Boustras, G., & Dimopoulos, C. (2018). Energy critical infrastructures at risk from climate change: A state of the art review. *Safety Science*, 110, 110-120

Les réseaux électriques américains sont exposés et vulnérables aux aléas climatiques

État des lieux : le système électrique américain est de plus en plus impacté par le changement climatique

Les aléas climatiques sont la principale cause des pannes d'électricité aux États-Unis. Les pannes causées par les aléas tels que les orages, les ouragans et les

pannes touchant 50 000 clients ou plus. Au total, 679 pannes généralisées sont survenues entre 2003 et 2012 en raison des conditions climatiques[[ix](#)].

Les analyses des blackouts majeurs recensés montrent de plus que **cette tendance est à la hausse**. En effet, le nombre de pannes d'électricité majeures (celles qui touchent plus de 50 000 foyers ou entreprises) a été multiplié par dix entre le milieu des années 1980 et 2012. Cette augmentation s'explique en partie par la mise en place, depuis 2003, de l'obligation des opérateurs de réseaux électriques de signaler toute panne et son origine aux autorités. **Pourtant, même depuis 2003, le nombre annuel moyen de pannes d'électricité liées aux conditions météorologiques a doublé**[[x](#)].

Les pannes d'électricité entraînent la fermeture des écoles et des entreprises et entravent les services d'urgence. **Cela aurait coûté entre 18 et 33 milliards de dollars par an à l'économie américaine entre 2003 et 2012**[[ix](#)].

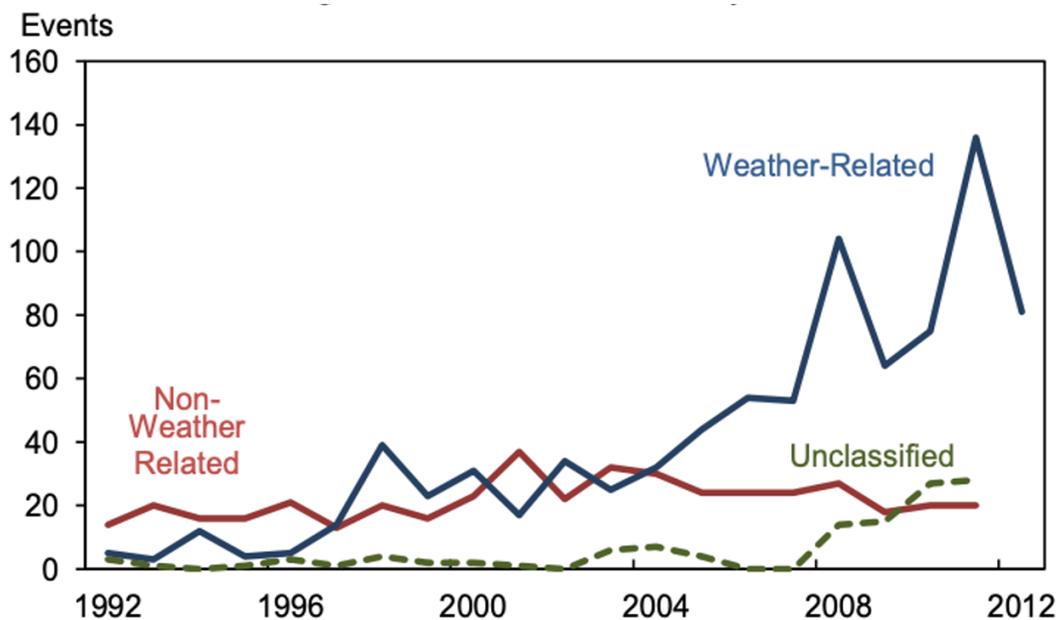


Figure 3 - Pannes d'électricité majeures aux États-Unis, 1992-2012ix

Des infrastructures de plus en plus exposées aux aléas climatiques auxquelles elles sont vulnérables

La hausse du nombre de pannes de courant aux États-Unis peut être mise en perspective de l'évolution du nombre d'événement de précipitation intense. Comme le montre la Figure 4, les États-Unis ont connu une hausse significative de tels évènements entre la moitié du XXe siècle et nos jours. On observe de fortes augmentations dans la moitié Est des États-Unis et de plus petites augmentations, ou de légères diminutions, dans la moitié Ouest.

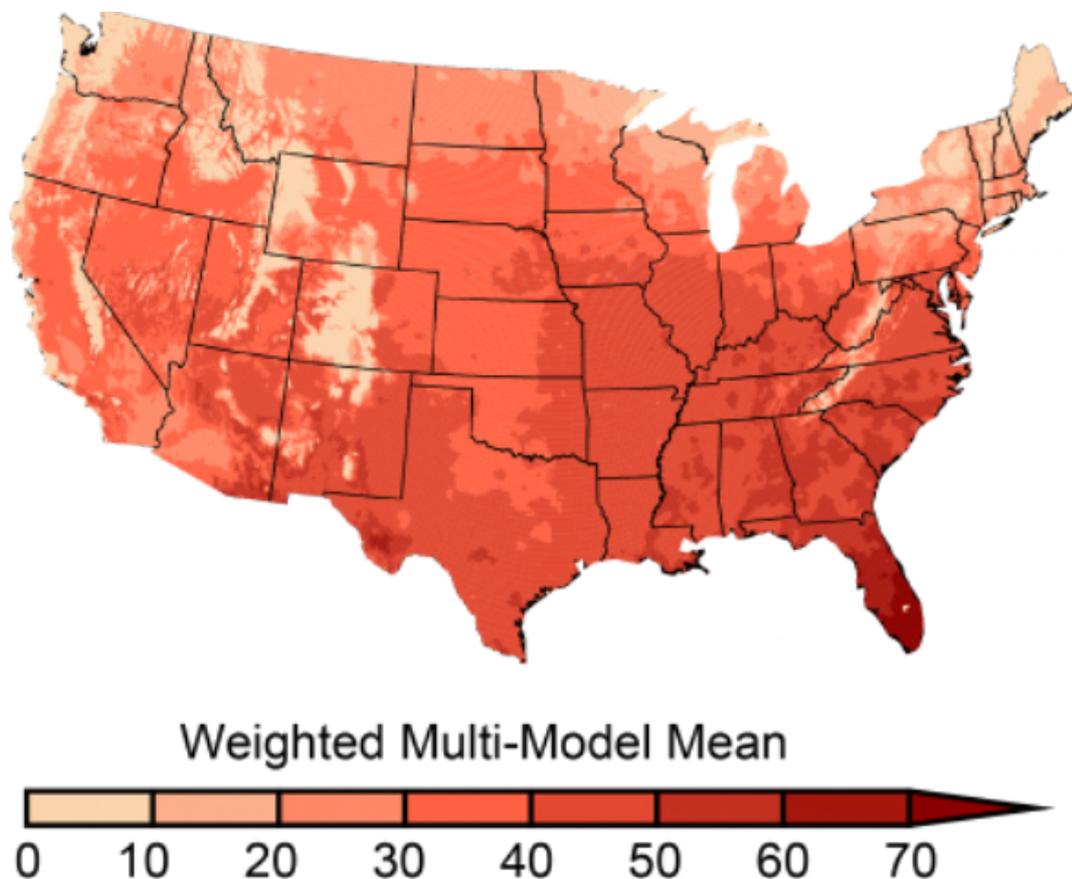


Figure 5 - Évolution du nombre de jours par an avec une température maximale supérieure à 32°C entre le présent proche (1976-2005) et le milieu du siècle (2036-2065), selon le scénario d'émissions RCP 8.5 (moyenne de 32 modèles climatiques)

Des infrastructures de plus en plus fragiles face aux aléas climatiques, car vieillissantes

Parmi les chaînes d'impacts qui ont causé ces blackouts électriques, **nombre d'entre eux sont attribuables à la vulnérabilité climatique des réseaux de transport et distribution de l'électricité américains**. En effet, ces infrastructures sont **de plus en plus sensibles à ces aléas car elles sont vieillissantes et mal entretenues**.

De fait, le ministère américain de l'Énergie estime que **70 % des transformateurs de puissance du pays ont 25 ans ou plus et que 60 % des disjoncteurs ont plus de 30 ans, alors que leur durée de vie utile est respectivement de 25 ans et de 20 ans**. De plus, sur les 450 000 kilomètres de transmission aux États-Unis, on estime que **70 % ont 25 ans ou plus et approchent de la fin de leur vie utile**. Cette situation critique est due à un manque d'investissement dans les infrastructures de transmission, qui ont diminué de 44 % entre 1980 et 1999, alors que la consommation d'électricité a, elle, augmenté de 58 % sur la même période [\[xv\]](#).

Le vieillissement et le manque d'entretien des infrastructures aggravent alors la sensibilité des infrastructures aux aléas climatiques mais deviennent aussi des facteurs de risque supplémentaires dans les chaînes d'impacts liées à la dérive climatique. L'exemple le plus emblématique étant le cas de Pacific Gas & Electric, la plus grande compagnie d'électricité de Californie, qui a été responsable (par manque d'investissements et d'entretien) en 2015, 2017 et 2018 d'incendies de forêt qui ont détruit des centaines de milliers d'hectares et ont fait plusieurs dizaines de morts. En conséquence, l'entreprise a dû priver intentionnellement d'électricité 750 000 ménages pour prévenir les incendies en 2019[xvi].

Les transformateurs de puissance constituent un enjeu majeur de la résilience des réseaux électriques

Le transformateur de puissance est un élément indispensable du réseau qui est utilisé en continu. En France, 70% de la production d'électricité passe par les 58 transformateurs en sortie des tranches nucléaires. Similairement, aux États-Unis les transformateurs de puissance représentent moins de 3% des transformateurs des postes électriques américains, mais ils supportent 60% à 70% de l'électricité du pays. La *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC) a identifié 30 d'entre eux comme étant critiques. La perte simultanée de seulement 9 d'entre eux, dans diverses combinaisons, pourrait paralyser le réseau et conduire à une panne en cascade, entraînant un blackout total du réseau d'électricité, d'une côte à l'autre[xvii].

Dans cette section, nous démontrons l'importance de planifier et assurer la disponibilité des transformateurs de puissance pour augmenter la résilience de l'approvisionnement en électricité face au changement climatique.

Le changement climatique accélère la nécessité des États-Unis de renouveler son parc de transformateurs de puissance

Retournons aux États-Unis, où en 2012 une tempête désignée « SuperStorm Sandy », d'une intensité particulièrement forte, frappe la côte Est des États-Unis. L'impact total de cet aléa extrême est estimé à 32 milliards de dollars de dommages et de pertes. En particulier, la tempête 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[xviii]. L'explosion aurait été provoquée par l'infiltration d'eau dans le transformateur, un défaut d'isolation lié à l'usure. Un tel évènement aurait eu moins de chances de se produire sur un transformateur

moderne, ces derniers étant désormais équipés d'un réservoir de gel de silice qui absorbe l'eau de l'air entrant dans l'appareil[xix].

Cet évènement est un exemple de la nécessité du pays de renouveler son parc de transformateurs dans les prochaines décennies. En effet, comme mentionné précédemment, le parc de transformateur américain est vieillissant, et **la probabilité qu'un transformateur soit hors d'usage augmente avec son âge.**

La Figure 6, présentant l'historique des installations de transformateurs du pays associée à la courbe de taux de défaillance du transformateur, démontre la situation critique des États-Unis à cet égard.

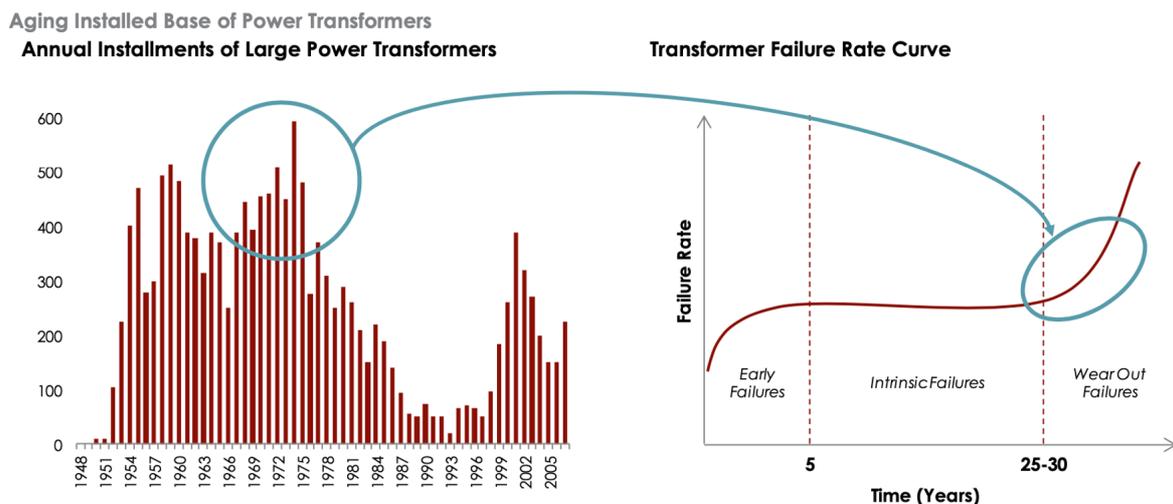


Figure 6 – Historique d'installation de transformateurs de puissance aux États-Unis et courbe du taux de défaillance en fonction de l'âge des transformateurs[xx]

La situation est d'autant plus alarmante en prenant en considération les sensibilités climatiques des transformateurs (cf. Figure 2), car **la durée de vie de ces derniers risque d'être raccourcie plus encore par les aléas climatiques, qu'ils soient chroniques ou aigus.** Une étude[xxi] a modélisé l'impact de l'augmentation de la température de l'air ambiant sur la durée de vie des transformateurs[2] et montre que, **à l'horizon 2090, les transformateurs de puissance américains perdront jusqu'à 35% de leur durée de vie selon le scénario d'émissions RCP 8.5.**

Les résultats de l'étude sont présentés en Figure 7.

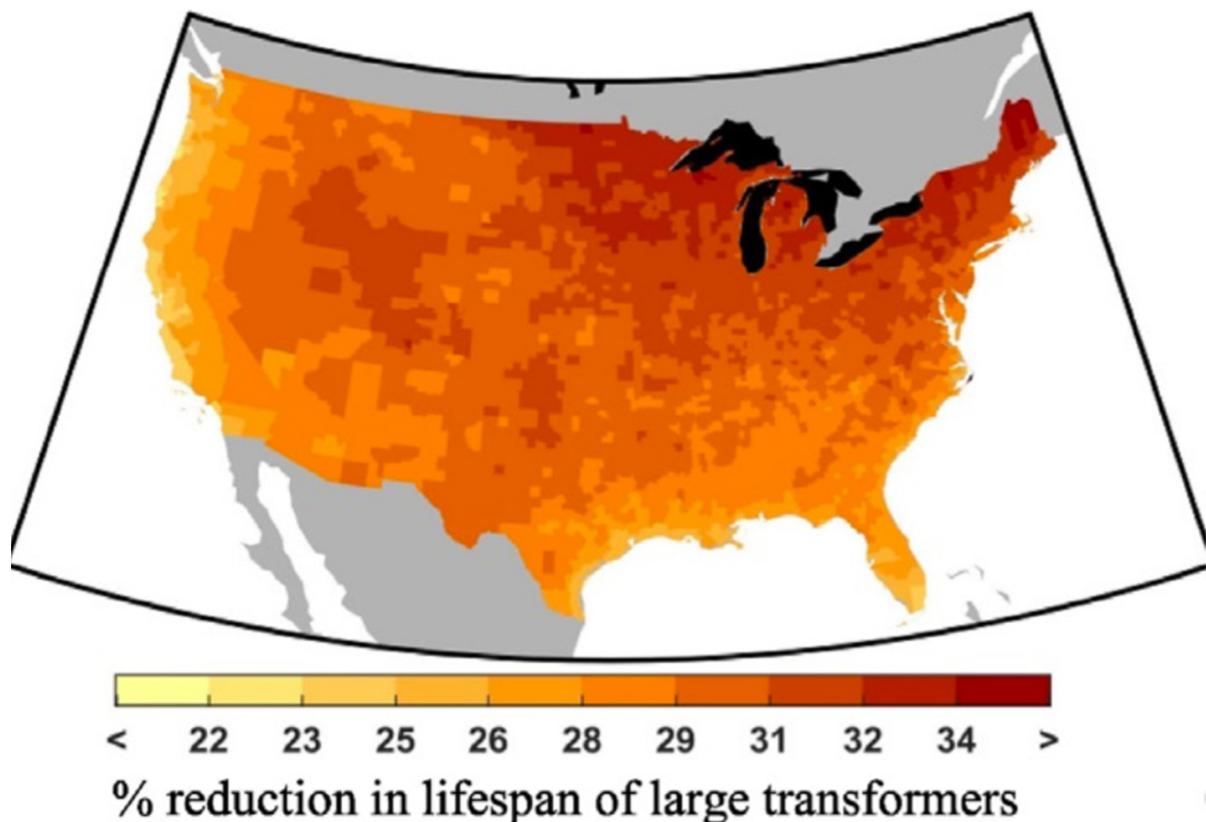


Figure 7 – Impact de l’augmentation des températures de l’air ambiant sur la durée de vie des transformateurs de puissance aux États-Unis en 2090 par rapport à la référence, selon un scénario RCP 8.5xxii

Une tension croissante de l’approvisionnement en transformateurs de puissance est à prévoir

Les éléments présentés précédemment démontrent que les États-Unis, et très probablement d’autres pays aussi, devront renouveler leur parc de transformateurs de puissance.

Or, la capacité de production mondiale de ces appareils est déjà à flux tendu. En effet, le cœur des transformateurs est fait d’acier électrique (un alliage de fer aux propriétés magnétiques spécifiques). **La production de cet alliage est limitée**, avec moins de 10 producteurs dans le monde pour cette qualité d’acier. Cette matière première constitue 25% du coût final d’un transformateur et **il y a une compétition forte sur son approvisionnement**, car l’acier électrique est aussi indispensable pour la fabrication des stators (éoliennes, turbines), et des moteurs électriques. **Par exemple, le prix de cet alliage a triplé entre 2011 et 2013**^[xxii].

On observe d’ailleurs que les délais de livraison des transformateurs s’allongent. Pendant des années, les fournisseurs ont pu livrer les nouveaux transformateurs dans un délai moyen de 8 à 12 semaines après la passation de la commande. Les délais de livraison sont maintenant d’environ 12 mois, et parfois plus

Le sujet est connu des autorités aux États-Unis, puisqu'en 2017, le **US Department of Energy** recommande au Congrès la constitution d'un stock d'État de transformateurs de puissance[xxiv].

Ainsi, une tension croissante sur l'approvisionnement en transformateurs de puissance est à prévoir du fait que (i) de nouveaux transformateurs seront nécessaires pour supporter l'extension du réseau électrique des pays en développement et (ii) la décarbonation des pays développés induira une hausse de la demande en acier électrique, nécessaire à la fabrication des transformateurs, pour la fabrication d'éoliennes et de véhicules électriques.

En conclusion, il est permis d'affirmer :

- Que **les infrastructures de transmission et distribution de l'électricité, et pas uniquement les capacités de production, sont sensibles à des aléas climatiques** dont la fréquence et l'intensité vont être modifiées par le changement climatique.
- **Qu'aux États-Unis particulièrement, les infrastructures sont vieillissantes et de plus en plus vulnérables aux aléas climatiques.**
- **Que le dérèglement climatique va imposer une tension croissante sur les transformateurs, un élément critique des infrastructures de transport et de distribution du réseau électrique.**
- **Que les projections climatiques fournissent des informations très utiles et exploitables pour anticiper ces changements et planifier des actions d'adaptation visant la résilience du réseau électrique.**

Cette analyse met en avant l'importance d'évaluer **les risques physiques** liés au changement climatique à **une échelle la plus opérationnelle possible**, afin de dégager les **vulnérabilités climatiques** des processus essentiels aux activités et les **capacités d'adaptation** qu'il est possible de mettre en œuvre pour augmenter sa résilience face au changement climatique.

[Contactez-nous pour plus d'information sur notre accompagnement](#)

-

[1] Terme anglais pour désigner une panne de courant généralisée

[2] Les transformateurs sont généralement refroidis avec des dissipateurs

développent parfois des « points chauds », qui peuvent endommager le papier isolant qui empêche les courts-circuits. Des températures de fonctionnement plus élevées réduisent la durée de vie prévue des transformateurs car ce papier isolant vieillit plus rapidement.

[i]<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables?country=WORLD&energy=Balances&year=2018>

[ii]<https://www.iea.org/commentaries/the-world-s-electricity-systems-must-be-ready-to-counter-the-growing-climate->

[iii]<https://time.com/5939633/texas-power-outage-blackouts/>

[iv] A. Cheimanoff, L. Feignier, J.C. Gougeuil, "Analyse des incidents d'exploitation conduisant à un fonctionnement dégradé: 1) Facteurs propices à un fonctionnement dégradé et mécanismes correspondants, 2) Analyse de quatre processus de dégradation", Revue Générale de l'Électricité (RGE), tome 87, n°3, mars 1978

[v]<https://www.bbc.com/news/world-asia-india-19043972>

[vi] Dumas, M., Kc, B., & Cunliff, C. I. (2019). *Extreme weather and climate vulnerabilities of the electric grid: a summary of environmental sensitivity quantification methods* (No. ORNL/TM-2019/1252). Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States).

[vii] Finster, M., Phillips, J., & Wallace, K. (2016). *Front-line resilience perspectives: The electric grid* (No. ANL/GSS-16/2). Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States).

[viii] Mikellidou, C. V., Shakou, L. M., Boustras, G., & Dimopoulos, C. (2018). Energy critical infrastructures at risk from climate change: A state of the art review. *Safety Science*, 110, 110-120

[ix] Economic benefits of increasing electric grid resilience to weather outages, Executive Office of the President, 2013.

[x] Kenward, A., & Raja, U. (2014). Blackout: Extreme weather, climate change and power outages. *Climate central*, 10, 1-23.

[xi] <https://science2017.globalchange.gov/chapter/7/>

[xii] Janssen, E., D. J. Wuebbles, K. E. Kunkel, S. C. Olsen, and A. Goodman, 2014: Observational- and model-based trends and projections of extreme precipitation over the contiguous United States. *Earth's Future*, 2, 99–113

[xiii] Janssen, E., R. L. Sriver, D. J. Wuebbles, and K. E. Kunkel, 2016: Seasonal and regional variations in extreme precipitation event frequency using CMIP5. *Geophysical Research Letters*, 43, 5385–5393

[xiv] <https://science2017.globalchange.gov/chapter/6/>

[xv] Williams, H. (2010). Transmission & distribution infrastructure. White Paper, Harris Williams & co Ltd, Richmond, VA, Summer.

[xvi] <https://www.revolution-energetique.com/californie-750-000-menages-privés-intentionnellement-deelectricite-pour-prevenir-les-incendies/>

[xvii] Parfomak PW (2014) Physical security of the U.S. power grid: high-voltage transformer substations. Congressional Research Service, p 6.

[xviii] <https://www.reuters.com/article/us-storm-sandy-powercuts-idUSBRE89T10G20121030>

[xix] <https://slate.com/news-and-politics/2012/10/hurricane-sandy-blackout-what-causes-transformers-to-explode.html>

[xx] Williams, H. (2010). Transmission & distribution infrastructure. White Paper, Harris Williams & co Ltd, Richmond, VA, Summer.

[xxi] Fant, C., Boehlert, B., Strzepek, K., Larsen, P., White, A., Gulati, S., ... & Martinich, J. (2020). Climate change impacts and costs to US electricity transmission and distribution infrastructure. Energy, 195, 116899.

[xxii] Hoffman, P., & Bryan, W. (2012). Large power transformers and the US electric grid. Report of US Department of Energy.

[xxiii] <https://www.umatillaelectric.com/transformer-shortage-cause-long-delays/>

[xxiv] Strategic Transformer Reserve Report to Congress - March 2017

Auteurs et autrices

Maxime Aboukrat

Consultant

Contributeurs et contributrices

Violaine Lepousez

Manager