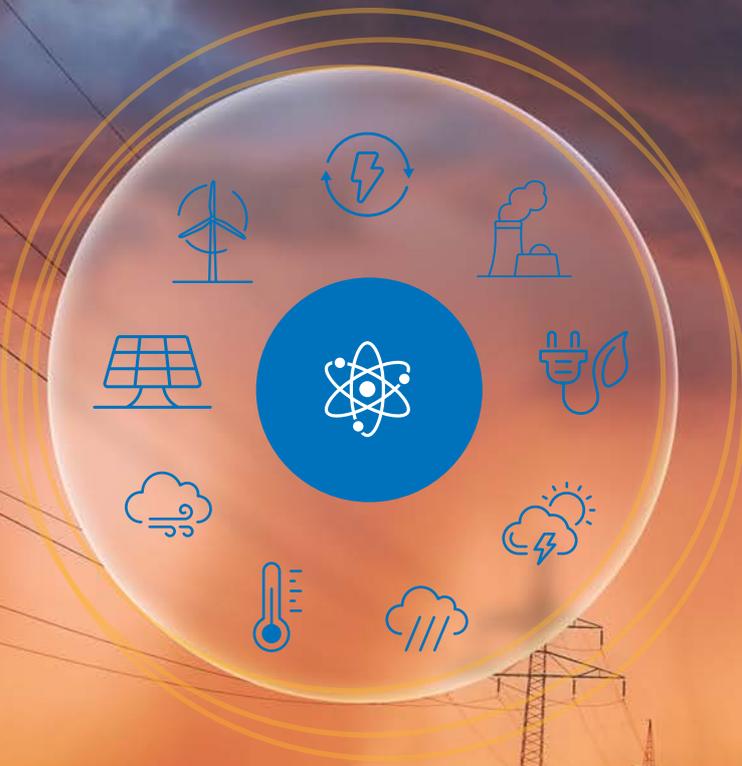




**IAEA**

Agence internationale de l'énergie atomique

# L'énergie nucléaire dans les systèmes électriques résistants aux changements climatiques



« Les sources d'énergie résistantes aux changements climatiques gagnent en importance à mesure que les conditions météorologiques extrêmes s'intensifient et que la part des énergies renouvelables dans la production électrique s'accroît. Une base énergétique diversifiée et résiliente provenant de sources d'énergie décarbonées telles que le nucléaire, l'énergie hydraulique ou la géothermie jouera un rôle important dans l'intégration des énergies renouvelables aux systèmes et la décarbonation des systèmes énergétiques mondiaux » [1].

### Organisation météorologique mondiale



Du fait des conditions de chaleur extrême, des fortes précipitations, des sécheresses, des inondations côtières et fluviales ainsi que des cyclones tropicaux, il deviendra de plus en plus difficile, mais d'autant plus nécessaire, de concevoir et de mettre en œuvre des plans de résilience climatique dédiés aux systèmes énergétiques mondiaux.



**L'énergie nucléaire peut faciliter l'intégration d'une part importante d'énergies renouvelables et contribuer à la sécurité énergétique à long terme.**

À mesure que les risques climatiques augmentent, la résilience climatique du parc nucléaire mondial fait de lui un excellent complément aux autres sources d'énergie à faible teneur en carbone.

**Les baisses de production nucléaire dues à la disponibilité de l'eau de refroidissement et à d'autres phénomènes climatiques sont minimes – en 2022, ces pertes représentaient 0,3 % de la production nucléaire mondiale.**

Les données historiques montrent que les phénomènes météorologiques extrêmes, tels que les vagues de chaleur, les tempêtes et les sécheresses, n'ont que peu d'impact sur le fonctionnement des centrales nucléaires, ce qui fait de l'énergie nucléaire un allié essentiel des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique décarboné.

**En France, en dépit des chaleurs extrêmes et de l'aridité, les pertes en termes de production nucléaire attribuées aux conditions environnementales s'élevaient à 501 gigawatts-heures (Gwh) en 2022, soit moins de 0,2 % de la production annuelle des centrales concernées.**

Le printemps 2022 a été marqué par des débits fluviaux historiquement bas et a été suivi par le deuxième été le plus chaud jamais enregistré dans le pays.



**1,1 °C**

d'élévation de la température à la surface du globe en 2011-2020 par rapport aux niveaux de 1850-1900 [2].

Deux facteurs – tous deux en croissance exponentielle – nous pousseront à repenser de fond en comble la manière d’assurer le fonctionnement pérenne du système énergétique mondial. Le marché de l’électricité connaît un niveau d’instabilité et d’incertitude sans précédent qui s’explique par la fréquence accrue des conditions météorologiques extrêmes et la progression rapide de la part des énergies renouvelables dans la production d’électricité.

Les menaces concomitantes induites par les changements climatiques, qui s’intensifient à un rythme soutenu, ont des répercussions croissantes sur l’offre, la demande et les infrastructures du système énergétique mondial. Chaque aspect du secteur de l’énergie en ressentira les effets, qu’il s’agisse de la production de chaque technologie de production d’énergie, de la demande en énergie ou des infrastructures physiques et non physiques conjuguées qui garantissent la sûreté et la fiabilité des opérations lorsque surviennent des phénomènes météorologiques extrêmes.

Ces deux facteurs réunis confèrent une importance accrue au concept de système énergétique résistant face aux changements climatiques, ou à l’aptitude d’une technologie énergétique de pouvoir répondre systématiquement à la demande dans un contexte de fluctuation de l’approvisionnement énergétique. En raison des conditions de chaleur extrême, des fortes précipitations, des sécheresses, des inondations côtières et fluviales ainsi que des cyclones tropicaux, il deviendra de plus en plus difficile, mais d’autant plus nécessaire, de concevoir et de mettre en œuvre des plans de résilience climatique dédiés aux systèmes énergétiques mondiaux. Pour garantir leur résilience, il faudra prendre à la fois des mesures d’atténuation des effets des changements climatiques – en déployant des technologies énergétiques résilientes qui serviront de mécanisme de stabilisation – et des mesures d’adaptation telles que des améliorations technologiques qui permettront d’assurer la continuité des opérations dans un avenir qui sera marqué par l’instabilité climatique. L’électronucléaire peut contribuer à la mise en place de systèmes énergétiques décarbonés et résistants aux changements climatiques.



## Les changements climatiques

**affecteront tous les domaines du secteur de l'énergie.**



**Les systèmes énergétiques dépendant de plus en plus de sources d'énergie renouvelables pour répondre à une grande partie de la demande, il sera de plus en plus important de valoriser et de maintenir des sources d'énergie sûres pour garantir la sécurité de l'approvisionnement énergétique.**

# SOUTENIR DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES RÉSISTANTS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES GRÂCE AU NUCLÉAIRE

L'électricité et la chaleur produites par un réacteur nucléaire peuvent jouer un rôle important dans la mise en place et le maintien de systèmes énergétiques résistants aux changements climatiques. En disposant d'un bouquet énergétique diversifié et résilient (dont l'énergie nucléaire constitue une composante essentielle), il devient alors possible d'intégrer des technologies d'énergie renouvelable dans les systèmes énergétiques mondiaux, de réduire au minimum le coût de la décarbonation de l'économie, de créer des emplois décents et durables et de renforcer la sécurité énergétique. Vu le caractère crucial de ce rôle, la présente brochure rend compte, chiffres à l'appui, de la manière dont l'énergie nucléaire peut contribuer à instaurer des systèmes énergétiques résistants aux changements climatiques.

L'énergie nucléaire peut jouer un rôle essentiel dans un système énergétique diversifié sur le plan technologique et résistant aux changements climatiques. Les centrales nucléaires peuvent fonctionner en continu, constituant ainsi une source d'électricité stable non tributaire des conditions

météorologiques. Elles sont également capables de fonctionner en mode suivi de charge, adaptant ainsi la production d'électricité aux variations quotidiennes de la production axée sur l'énergie renouvelable.

Dans le contexte des changements climatiques, l'énergie nucléaire peut contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur de l'électricité et fournir de la chaleur à faible émission de carbone pour d'autres applications telles que la production d'hydrogène, le dessalement de l'eau de mer et le chauffage urbain. En remplaçant les centrales à combustibles fossiles pour ces applications, l'électronucléaire peut contribuer à réduire les émissions de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre, et donc à atténuer les changements climatiques.



**Les données montrent que les centrales nucléaires ne subissent que très peu d'interruptions de fonctionnement dues à des conditions météorologiques extrêmes.**

# LE NUCLÉAIRE VU COMME SOURCE D'ÉNERGIE RÉSISTANTE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Malgré la fréquence accrue des conditions météorologiques extrêmes, en 2022, les pertes d'énergie liées aux conditions météorologiques s'élevaient à moins d'un tiers d'un pour cent de la production d'énergie d'un réacteur – soit 0,3 % – en moyenne (figure 1). Les phénomènes météorologiques liés au climat (inondations, tempêtes, sécheresses, vagues de chaleur) peuvent affecter la quantité d'électricité produite par les centrales nucléaires. Ainsi, un phénomène météorologique extrême peut entraîner une réduction de la production des réacteurs nucléaires, voire leur arrêt pour maintenir la sûreté des opérations.

L'AIEA s'efforce de recueillir des données, des études de cas et des bonnes pratiques auprès des États Membres concernant l'adaptation de la conception des centrales nucléaires pour réduire le risque de perte de production. Si la température et la disponibilité de l'eau de refroidissement font partie des variables climatiques les plus pertinentes quant au maintien de niveaux élevés de production nucléaire la technologie nucléaire s'est avérée résistante à d'autres variables climatiques (fortes précipitations, vents violents, froids extrêmes et tempêtes) qui affectent plus facilement

d'autres technologies de production d'énergie ou infrastructures énergétiques. Les exploitants de centrales nucléaires usent déjà d'une série de solutions quantifiables en matière d'ingénierie et de gestion des installations, par exemple la programmation des arrêts pour rechargement de façon à éviter les périodes de forte demande en énergie dues à des événements liés au climat.

Étant donné que les pertes de production sont dues à divers facteurs, on peut mener une analyse approfondie de l'évolution des différents types d'arrêt au fil du temps. Comme les conditions météorologiques défavorables et extrêmes sont de plus en plus fréquentes en raison des changements climatiques, il convient de mesurer et de quantifier la capacité de production nucléaire dans des conditions dégradées. Cette quantification permet d'établir une comparaison objective des différentes technologies énergétiques et de garantir que les systèmes énergétiques répondent à la demande à tout moment, plutôt que d'obliger les consommateurs à adapter massivement leurs modes de consommation à l'exploitation de ces systèmes.

## Qu'est-ce qu'une perte d'énergie ?

Par perte d'énergie, on entend la différence entre la production d'électricité potentielle d'une centrale et sa production réelle. Dans le cas des centrales nucléaires, il peut y avoir des pertes d'énergie lors du rechargement en combustible (qui nécessite l'arrêt partiel ou complet des centrales) ; cela étant, la présente brochure se concentre sur les réductions de production d'électricité que l'on peut attribuer aux changements climatiques. Elle recense les pertes liées aux conditions météorologiques que sont les tempêtes (ouragans, inondations, tornades) et les températures extrêmes de chaleur ou de froid (blizzards, vagues de chaleur), ainsi que les répercussions directes de ces phénomènes sur la centrale nucléaire – nécessitant une réduction de la production afin de maintenir la sûreté des opérations ou de s'adapter aux températures ou à la disponibilité de l'eau de refroidissement.

Ainsi, les phénomènes météorologiques extrêmes n'ayant pas d'incidence directe sur la centrale, mais entraînant des perturbations sur le réseau électrique dans son ensemble et pouvant contraindre une centrale nucléaire à réduire sa production à la demande de l'opérateur du réseau, ne sont pas pris en compte.

L'ampleur d'une perte d'énergie se mesure à la fois en termes d'échelle (en unités de puissance telles que le mégawatt ou le gigawatt) et de volume (durée en heures). Afin de comparer l'échelle de l'énergie indisponible avec celle de la production des réacteurs au cours d'une période donnée et pour tenir compte de l'évolution au fil du temps de la taille du parc nucléaire mondial, les pertes d'énergie sont présentées en pourcentage de production des réacteurs.



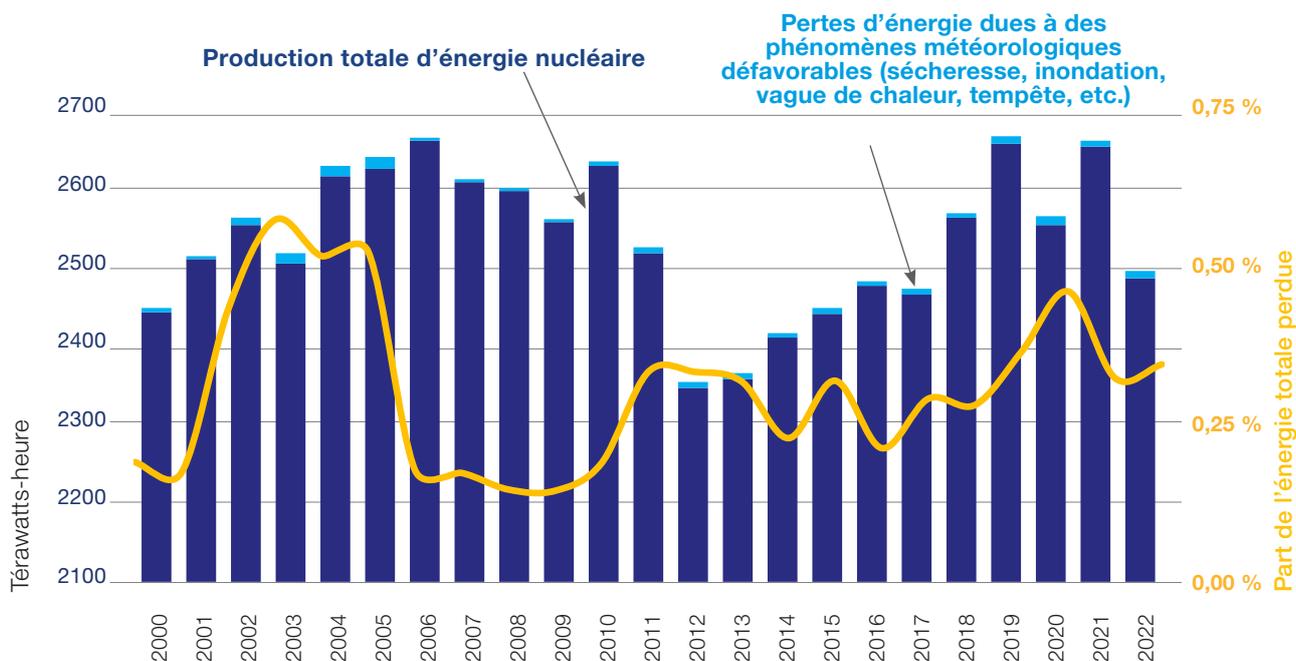
**La technologie nucléaire s'est avérée résistante à d'autres variables climatiques, telles que de fortes précipitations, des vents violents, un froid extrême et des tempêtes.**

Les pertes annuelles d'énergie dues à des conditions météorologiques défavorables représentent environ 1 % des pertes totales du parc nucléaire et une part encore plus faible de la production électronucléaire totale. La figure 1 compare l'énergie nucléaire totale produite et perdue par les centrales nucléaires du monde entier à cause de conditions météorologiques défavorables. Pour replacer ces chiffres dans leur contexte, en 2021, le parc nucléaire mondial aurait pu fournir deux fois la consommation annuelle totale d'électricité de l'Inde, tandis que la quantité totale d'énergie nucléaire perdue en raison de phénomènes météorologiques représentait environ 88 minutes de la consommation d'électricité de l'Émirat de Dubaï [3, 4].

Les données montrent que les centrales nucléaires ne subissent que très peu d'interruptions de fonctionnement dues à des conditions météorologiques extrêmes. Non seulement l'énergie nucléaire peut être associée à d'autres technologies à faible teneur en carbone, telles que l'énergie éolienne, solaire, hydraulique et géothermique, afin d'atténuer les changements climatiques, mais elle peut également constituer une source d'énergie

résiliente face aux changements climatiques. La section suivante examine la résilience climatique des centrales nucléaires au fil du temps. Elle se concentre sur la faible part des pertes d'énergie attribuées aux conditions météorologiques extrêmes afin de mieux comprendre comment les centrales nucléaires se sont comportées lors de conditions météorologiques difficiles et d'obtenir un indicateur de l'adaptation aux changements climatiques dans l'industrie nucléaire.

## Les données historiques montrent que l'énergie nucléaire a prouvé sa résilience face à des phénomènes météorologiques de plus en plus fréquents et de plus en plus extrêmes.



**Fig. 1.** Production annuelle d'énergie nucléaire et pertes liées aux conditions météorologiques entre 2000 et 2022 [5].

**Note :** Les données présentées au titre de la référence [5] reflètent les informations disponibles et les communications des États Membres à l'AIEA. Les données d'exploitation n'incluent pas les réacteurs ukrainiens, celles-ci n'ayant pas été communiquées pour l'année 2022 au moment de la présente publication.

# UN TIERS DE UN POUR CENT

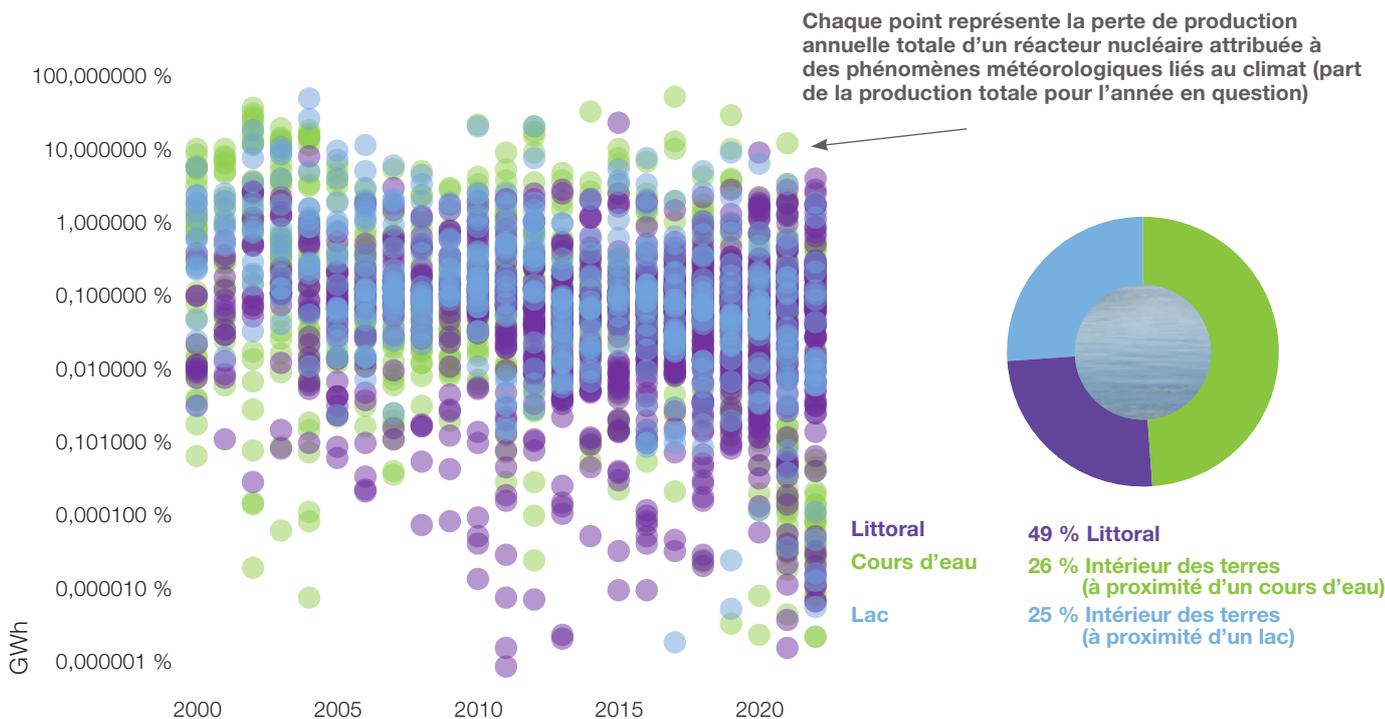
Les données historiques montrent que l'énergie nucléaire a prouvé sa résilience face à des phénomènes météorologiques de plus en plus fréquents et de plus en plus extrêmes. Dans un contexte où les effets des changements climatiques perturbent de plus en plus les systèmes énergétiques mondiaux et où de nombreux dirigeants du monde entier appellent à la mise à l'arrêt du parc mondial de centrales à combustible fossile, l'énergie nucléaire est susceptible d'être de plus en plus utilisée comme source sûre permettant de pallier les aléas des sources d'énergie renouvelables. Même si les pertes d'énergie nucléaire dues aux phénomènes météorologiques sont faibles, elles ne sont pas nulles pour autant. La présente section traite des conditions dans lesquelles se produisent ces pertes d'énergie afin d'examiner pleinement la capacité du nucléaire à jouer un rôle à part entière dans les systèmes énergétiques résistants au climat.

Sur les 460 gigawatts de capacité nucléaire disponibles à tout moment entre 2000 et 2022, 48 % de cette capacité étaient situés en bord de mer, 36 % en bord de cours d'eau et 16 % en bord de lac. Si l'on considère les phénomènes météorologiques liés au climat qui ont été signalés à l'AIEA par les exploitants de centrales nucléaires, on constate qu'au cours des 22 dernières années, les plus grosses pertes énergétiques (en GWh) engendrées par ces phénomènes ont été enregistrées par les centrales

situées sur des cours d'eau, tandis que celles situées à proximité de lacs ou sur le littoral ont enregistré des pertes d'énergie relativement plus faibles (figure 2).

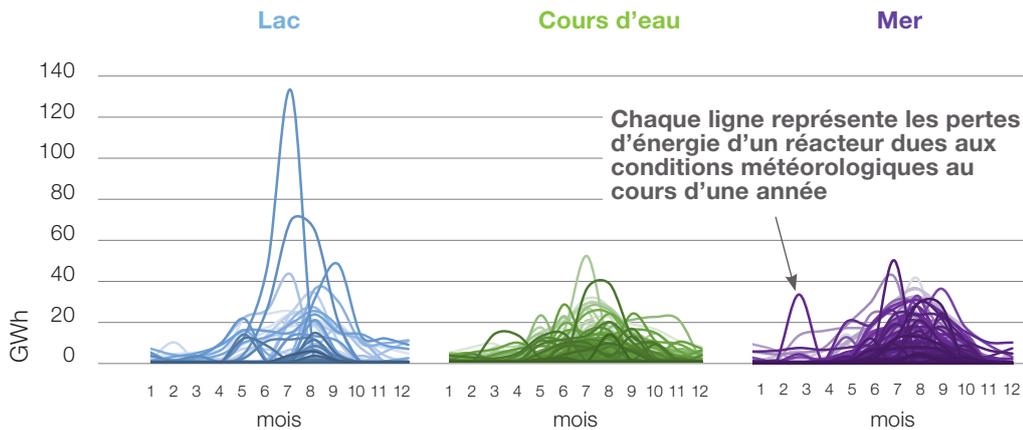
La prochaine génération de réacteurs nucléaires sera probablement davantage concentrée sur le littoral et donc moins touchée par les problèmes d'eau de refroidissement. Il ressort des communications officielles faites par les États Membres à l'AIEA que les réacteurs en construction ou en projet représentent une capacité totale de plus de 100 gigawatts ; plus de 60 % de ces réacteurs devraient se situer en bordure de littoral [5]. Toutefois, tous n'ont pas encore reçu d'emplacement spécifique.

Comme la plupart des centrales nucléaires se trouvent dans l'hémisphère Nord, il est possible d'établir une comparaison saisonnière. Les centrales nucléaires situées à l'intérieur des terres, près de cours d'eau ou de lacs, enregistrent de plus grosses pertes d'énergie liées aux conditions météorologiques entre mai et octobre, tandis que celles situées sur le littoral ont tendance à subir ces pertes tout au long de l'année (figure 3). Certaines centrales subissent des pertes sur plusieurs mois, comme l'illustrent les pics importants et les plateaux de la figure 3 – souvent, les périodes plus longues de pertes d'énergie sont dues à des températures plus élevées ou à une disponibilité réduite de l'eau de refroidissement.



**Fig. 2.** Pertes annuelles d'énergie nucléaire liées aux conditions météorologiques présentées en termes de production des réacteurs (à gauche) et de pertes d'énergie nucléaire liées aux conditions météorologiques selon l'emplacement du réacteur (à droite) entre 2000 et 2022 [5].

**Note :** Les données présentées au titre de la référence [5] reflètent les informations disponibles et les communications des États Membres à l'AIEA. Les données d'exploitation n'incluent pas les réacteurs ukrainiens, celles-ci n'ayant pas été communiquées pour l'année 2022 au moment de la présente publication.

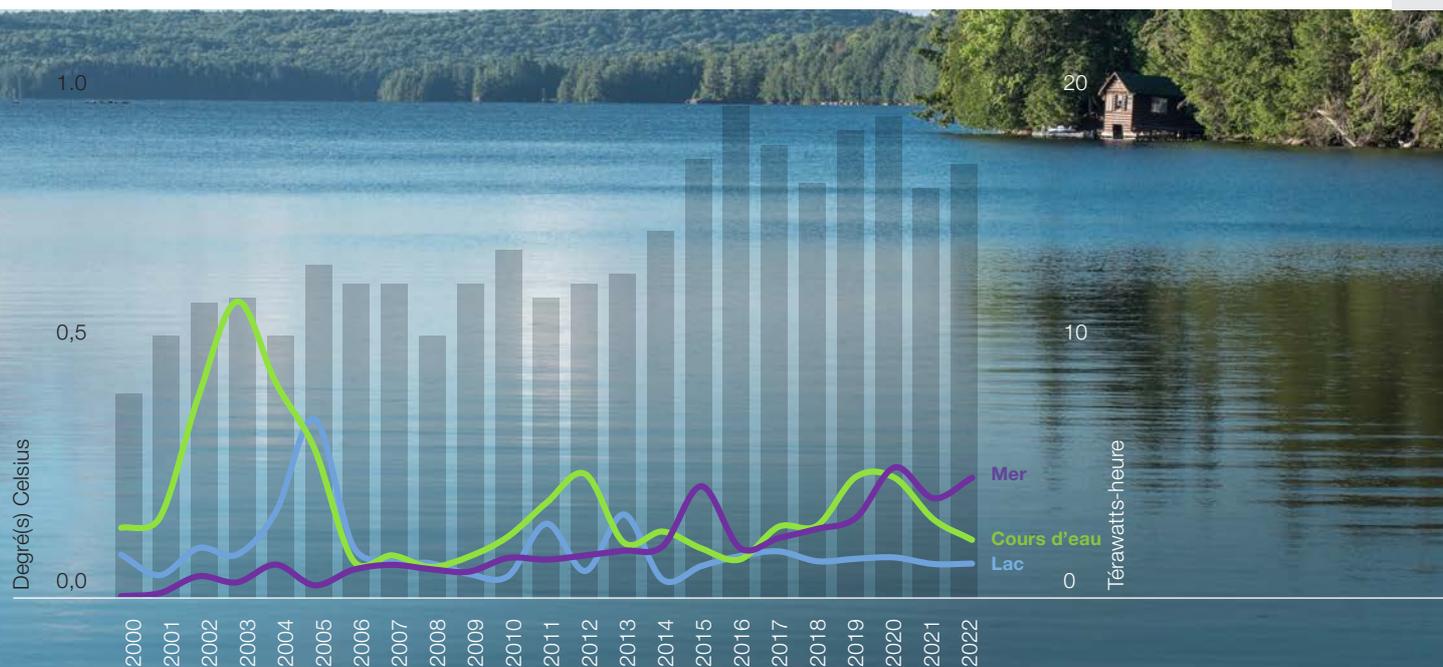


**Fig. 3. Production annuelle d'énergie nucléaire et pertes liées aux conditions météorologiques entre 2000 et 2022 [5].**

**Note :** Les données présentées au titre de la référence [5] reflètent les informations disponibles et les communications des États Membres à l'AIEA. Les données d'exploitation n'incluent pas les réacteurs ukrainiens, celles-ci n'ayant pas été communiquées pour l'année 2022 au moment de la présente publication. Les valeurs aberrantes au-dessus de trois écarts types par rapport à la moyenne théorique (> 0,1 % des valeurs) ont été exclues des graphiques.

L'ampleur et le volume des pertes d'énergie dues aux phénomènes météorologiques extrêmes dépendent de la source de l'eau de refroidissement de la centrale nucléaire. La production des centrales nucléaires situées au bord de cours d'eau ou de lacs dépend fortement de la disponibilité de l'eau de refroidissement, dont l'accès est rigoureusement réglementé afin de limiter autant que possible les incidences sur l'écosystème environnant. De ce fait, les centrales situées au bord de cours d'eau ou de lacs sont davantage susceptibles d'être affectées par des conditions climatiques extrêmes (chaleurs extrêmes, aridité, inondations ou tempêtes) que celles situées en bord de mer. À titre d'exemple, une vague de chaleur record s'est abattue sur l'Europe à l'été 2003, entraînant

des baisses historiques de la production nucléaire (figure 4). Cet épisode a permis d'en apprendre plus sur la production du parc nucléaire européen – en 2016, les températures ont de nouveau atteint des niveaux élevés, mais les pertes d'énergie dues aux conditions météorologiques ont été moindres en termes de térawatts-heures. À la longue, les périodes prolongées de chaleurs extrêmes ont des répercussions non négligeables sur le contenu thermique et la disponibilité de l'eau de mer utilisée pour le refroidissement (en raison de limites réglementaires sur les rejets) – ce sous-ensemble du parc nucléaire mondial connaît également une légère augmentation des pertes d'énergie liées aux conditions météorologiques.



**Fig. 4. Anomalies des températures mondiales des terres et des océans comparées à la moyenne de 1910-2000 (axe de gauche) et pertes annuelles d'énergie nucléaire liées aux conditions météorologiques (axe de droite), 2000-2022 [5, 6].**

**Note :** Les données présentées au titre de la référence [5] reflètent les informations disponibles et les communications des États Membres à l'AIEA. Les données d'exploitation n'incluent pas les réacteurs ukrainiens, celles-ci n'ayant pas été communiquées pour l'année 2022 au moment de la présente publication. Les pertes d'énergie liées aux conditions météorologiques ne comprennent pas les séismes.

# CONTRIBUTION DE LA COMMISSION ÉCONOMIQUE DES NATIONS UNIES POUR L'EUROPE

## METTRE EN PLACE DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES RÉSILIENTS ET NEUTRES EN CARBONE

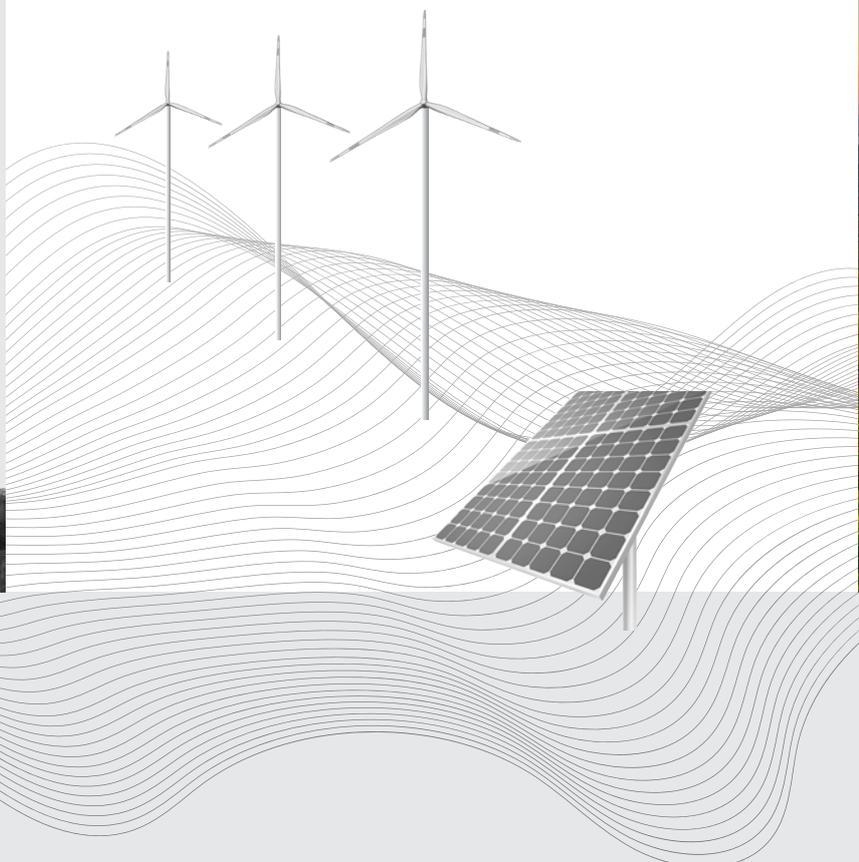
Un certain nombre de crises, dont la pandémie de COVID-19, les changements climatiques et des situations géopolitiques ont révélé la vulnérabilité des systèmes énergétiques du monde entier. Pour répondre à ces difficultés, la communauté internationale a décidé d'agir et d'aider les pays à concevoir et à mettre en place des systèmes énergétiques résilients et neutres en carbone.

Un système énergétique résilient repose sur :

- 1. la sécurité énergétique, qui garantit à tout moment l'énergie nécessaire grâce à la diversité de l'offre ;**
- 2. des prix abordables de l'énergie durable pour réduire les coûts de l'électricité, du chauffage, du refroidissement et du transport tout en augmentant l'efficacité énergétique systémique ;**
- 3. la durabilité environnementale, qui réduit l'empreinte carbone et améliore l'efficacité tout le long de la chaîne d'approvisionnement énergétique, conformément à l'Accord de Paris et au Programme de développement durable à l'horizon 2030.**

Les responsables politiques du monde entier ont besoin d'outils qui leur permettent de prendre des décisions éclairées en vue de concevoir et de construire des systèmes énergétiques résilients et de se préparer aux incertitudes de l'avenir.

L'AIEA s'associe à la Commission économique des Nations Unies pour l'Europe, à l'Organisation météorologique mondiale, à l'Agence internationale de l'énergie, à l'Organisation pour la sécurité et la coopération en Europe et à la Banque européenne d'investissement, entre autres, pour lancer une plateforme sur les systèmes énergétiques résilients qui permettra d'élaborer des politiques efficaces. Cette plateforme fournira deux services principaux : i) un outil assisté par l'IA pour soutenir une politique et une prise de décision adaptées et ciblées et ii) un forum unique permettant l'échange d'informations et un dialogue multipartite inclusif.



« L'énergie est essentielle pour préserver la paix, la coopération, le développement économique et social et la qualité de vie dans notre région et au-delà. Les experts ont manifestement tracé la voie qui permettra aux décideurs politiques de parvenir à un système énergétique résilient et neutre en carbone. L'amélioration de l'efficacité énergétique, le déploiement des énergies renouvelables, les technologies haut rendement à combustibles fossiles qui disposent de systèmes de captage, d'utilisation et de stockage du carbone, l'électronucléaire (y compris les technologies électronucléaires avancées), l'hydrogène et la gestion intégrée et durable des ressources naturelles sont tous des éléments de la solution qui permettra d'atteindre la neutralité carbone. Seule une action audacieuse, immédiate et soutenue peut permettre à la fois de mettre en place des systèmes énergétiques résilients qui garantissent un accès à l'électricité à un prix abordable et de décarboner nos systèmes énergétiques à temps pour éviter une catastrophe climatique » [7].

Tatiana Molcean  
SECRÉTAIRE EXÉCUTIVE DE LA COMMISSION  
ÉCONOMIQUE DES NATIONS UNIES POUR L'EUROPE



L'AIEA recueille des données, des études de cas et des bonnes pratiques auprès des États Membres concernant l'adaptation de la conception des centrales nucléaires pour réduire le risque de perte de production.

## CONTRIBUTION DE L'AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE

### TRANSFORMER LE SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE POUR ATTÉNUER LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET S'Y ADAPTER

Les effets de plus en plus marqués des changements climatiques menacent l'accessibilité économique et la sécurité du système énergétique. À mesure que les températures grimpent et que les phénomènes météorologiques gagnent en intensité, un nombre croissant d'infrastructures énergétiques construites au départ pour un climat plus frais et plus calme ne sont plus assez fiables ou résistantes. Il convient d'opérer une transformation complète des systèmes énergétiques pour éviter que les changements climatiques ne s'aggravent et pour faire face à leurs effets actuels. Les Perspectives énergétiques mondiales 2023 de l'AIE [8] recensent quatre domaines clés nécessitant une attention immédiate en vue d'opérer une transformation des systèmes énergétiques mondiaux. L'énergie nucléaire peut être utilisée dans ces domaines afin d'assurer une transition rapide, sûre, abordable et inclusive (voir les figures 5 et 6).

#### Assurer un portefeuille équilibré d'investissements

Le scénario « zéro émission nette d'ici à 2050 » envisagé en 2023 par l'AIE prévoit que la capacité nucléaire installée devrait plus que doubler. Selon ce scénario, les énergies renouvelables et l'électronucléaire remplaceront la plupart des énergies fossiles [9].

Dans tous les scénarios, les grands réacteurs restent la filière de réacteurs dominante pour ce qui est de l'énergie nucléaire ; cela étant, la mise au point des petits réacteurs modulaires et l'intérêt croissant qu'ils suscitent augmentent le potentiel de cette énergie à long terme. Enfin, la prolongation de la durée de vie des centrales nucléaires existantes et les nouvelles constructions prévues dans les pays ouverts à l'électronucléaire conduisent à une augmentation de la capacité nucléaire dans tous les scénarios de modélisation de l'AIE.

#### Augmenter les investissements dans les énergies propres sur ce marché émergent et dans les économies en développement

Les progrès qui seront réalisés en matière de production d'électricité dépendront de la réduction des coûts et d'une meilleure disponibilité des capitaux. L'augmentation des coûts de financement est le facteur qui a le plus d'incidence sur les projets à grande échelle faisant appel à des technologies à forte intensité de capital telles que l'éolien en mer, les réseaux ou les nouvelles centrales nucléaires. Il convient donc de recourir à des mécanismes de financement innovants et à grande échelle pour soutenir les investissements dans les énergies propres, en particulier dans les économies émergentes et en développement.

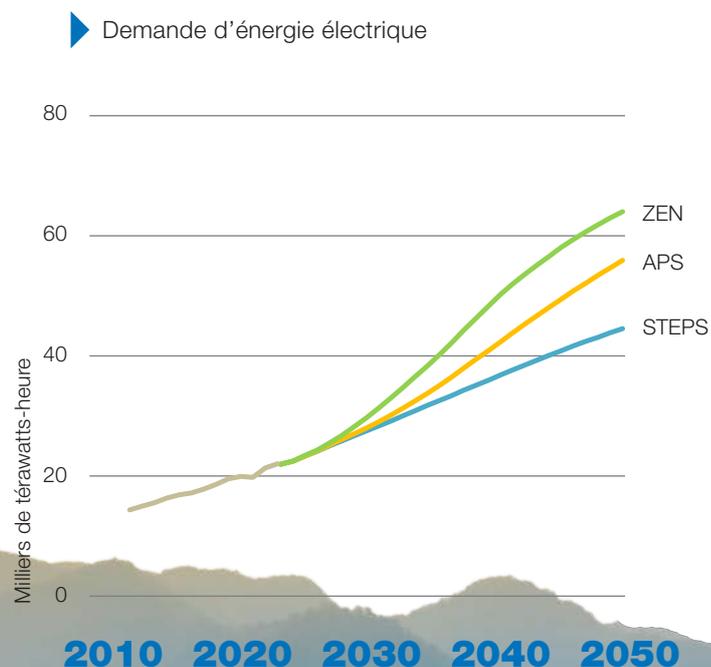


Fig. 5. Demande mondiale d'électricité (2010-2050) et mix de production par scénario (2022 et 2050). Adapté à partir de la référence [8] avec l'autorisation de l'auteur.

Note : STEPS – scénario déclaré de stratégie, APS – scénario annoncé d'engagement.



### Effectuer des transitions résilientes, inclusives et abordables

La part de l'éolien et du photovoltaïque dans la production totale d'électricité devrait passer de 12 % à environ 30 % d'ici 2030, ce qui place la flexibilité du système électrique au cœur de la sécurité de l'électricité.

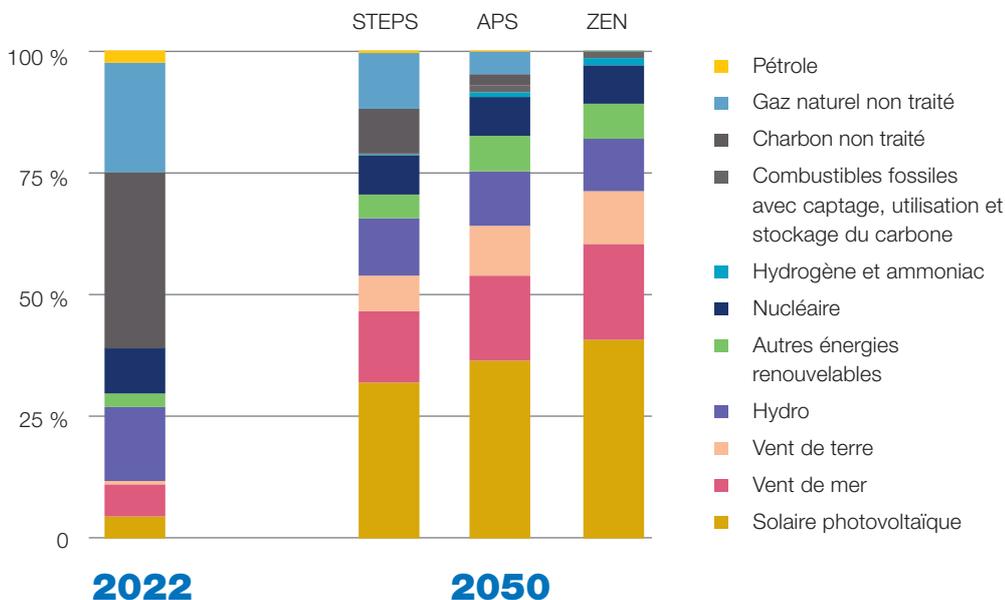
Les technologies à faibles émissions (nucléaire, hydroélectricité, combustibles fossiles avec capture, utilisation et stockage du carbone, bioénergie, hydrogène et ammoniac) peuvent fortement contribuer à la flexibilité saisonnière afin d'assurer une transition énergétique sûre.

### Trouver des moyens pour que les gouvernements collaborent

Le maintien de l'apport de l'électronucléaire dans le secteur de l'électricité dépend des décisions visant à prolonger la durée de vie des réacteurs existants et de l'aboutissement des programmes de construction de nouveaux réacteurs. Les gouvernements doivent prendre l'initiative de garantir des transitions énergétiques sûres en s'attaquant aux distorsions de marché – notamment les subventions aux combustibles fossiles – et en corrigeant les défaillances du marché.

Toutefois, les transitions énergétiques ont peu de chances d'être efficaces si elles sont gérées uniquement selon une approche descendante. Pour accroître le financement des énergies propres, il faudra passer d'un financement direct des projets à une réduction plus importante des risques y afférents afin de démultiplier considérablement les financements privés.

#### ► Production d'électricité



**Fig. 6.** Demande mondiale d'électricité (2010-2050) et mix de production par scénario (2022 et 2050). Adapté à partir de la référence [8] avec l'autorisation de l'auteur.

**Note :** STEPS – scénario déclaré de stratégie, APS – scénario annoncé d'engagement.

# CONTRIBUTION D'ÉLECTRICITÉ DE FRANCE

## MESURER LES EFFETS DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES SUR LE NUCLÉAIRE EN FRANCE

L'été 2022 a été le deuxième été le plus chaud jamais enregistré en France après celui de 2003 : les températures ont été particulièrement élevées dans les régions du sud et de l'ouest du pays, qui a été touché par trois vagues de chaleur successives. Par ailleurs, toujours en raison de la chaleur, la France a également connu des débits fluviaux particulièrement faibles dès le début du printemps, avec des débits minimaux records sur le Rhône et la Garonne. Électricité de France, propriétaire et exploitant du parc nucléaire français, a étudié le fonctionnement de son parc à l'été 2022 en établissant une comparaison avec les années précédentes.

En 2022, les pertes totales de production (voir figure 7) attribuées aux conditions environnementales s'élevaient à 501 GWh, soit moins de 0,2 % de la production annuelle des centrales concernées. Les centrales nucléaires françaises ont subi des pertes d'énergie afin de respecter les limites réglementaires visant à préserver la température de l'eau et les écosystèmes.

À l'origine, en France, deux niveaux avaient été établis pour le contrôle radiologique de l'environnement et les limites réglementaires correspondantes concernant les

rejets thermiques des centrales nucléaires : un niveau correspondant aux conditions climatiques normales et l'autre aux conditions climatiques exceptionnelles. À la suite des vagues de chaleur survenues en 2003, 2005 et 2006, le cadre réglementaire français a été adapté pour permettre un ajustement des limites réglementaires en cas de circonstances exceptionnelles telles que la sécurité du réseau électrique.

La crise énergétique actuelle provoquée par la guerre en Ukraine a également été classée comme circonstance exceptionnelle en 2022 en raison de la nécessité de produire davantage d'électricité à partir du nucléaire afin d'économiser du gaz pour la période hivernale. L'application de modifications temporaires aux prescriptions thermiques dans des circonstances exceptionnelles a permis de préserver 452 GWh provenant des centrales nucléaires, ce qui correspond à environ 80 millions de mètres cubes de gaz naturel, soit 12 heures de pleine capacité du gazoduc Nord Stream.

Les pertes d'énergie liées au respect des limites thermiques ont été relativement faibles en 2022, mais certaines parties de sites thermosensibles ont été mises à l'arrêt pour cause de maintenance préventive.

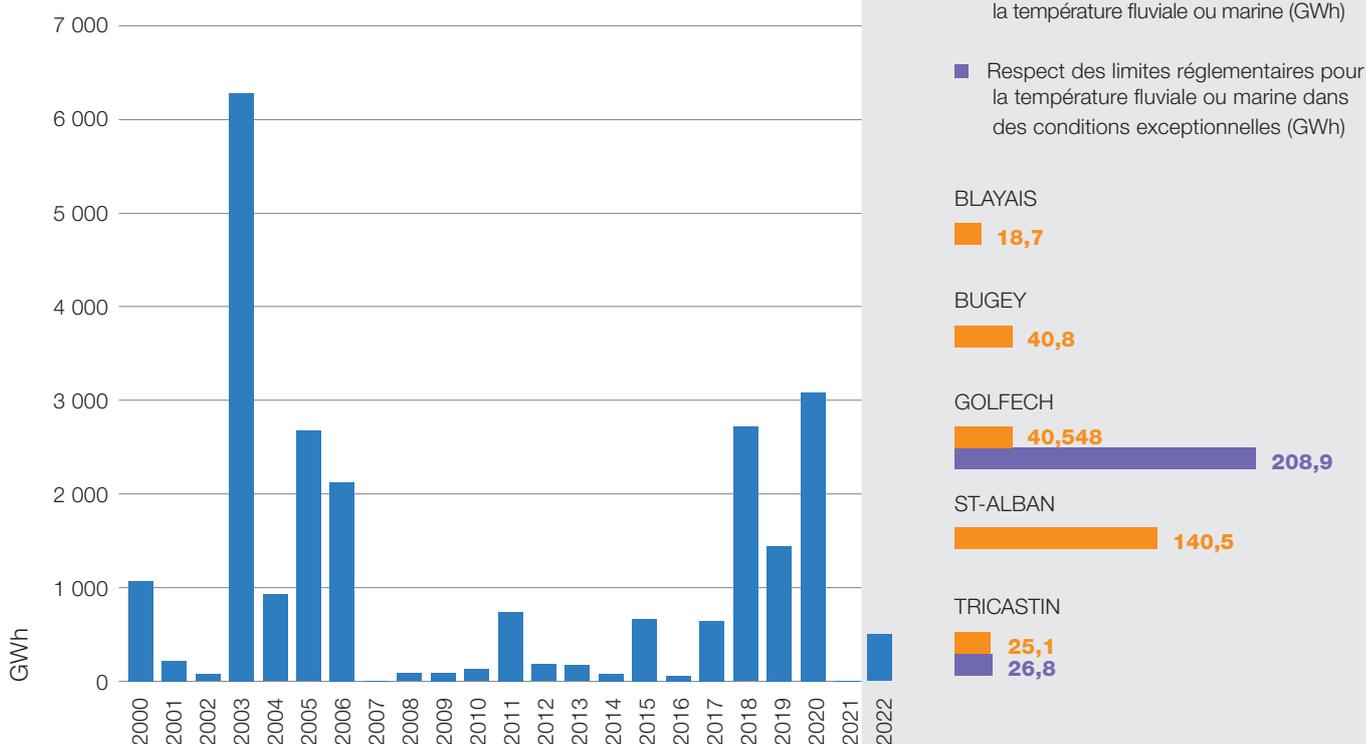


**L'été 2022 a été un été exceptionnel pour le parc nucléaire français, lequel représente environ 15 % de la capacité nucléaire mondiale. L'été 2022 peut être classé dans la catégorie des anomalies ayant affecté l'exploitation des centrales nucléaires en France en raison de plusieurs facteurs : des températures atmosphériques historiquement élevées, des niveaux d'eau bas et une crise énergétique mondiale qui a entraîné une hausse des prix du gaz naturel et obligé les centrales à reporter leur maintenance afin de fournir de l'électricité à bas prix au réseau européen.**

Depuis 2003, les pertes annuelles d'énergie dans l'environnement sur les sites nucléaires représentent en moyenne 0,3 % de la production. Au cours de l'été 2022, les limites réglementaires des centrales nucléaires de Golfech, Blayais, Saint-Alban et Bugey ont été modifiées pendant 24 jours en raison des circonstances exceptionnelles afin de maintenir la stabilité de l'approvisionnement en électricité. Par ailleurs, plusieurs tranches et sites auraient pu être limités par des exigences de température ou de débit fluvial, parmi lesquels citons : les tranches 1 et 2 de Chooz ; les tranches 1 et 2 de Civaux ; une partie des capacités des tranches 1, 3 et 4 de Cattenom ; les tranches 3 et 4 de Bugey ; la tranche 2 de Saint-Alban ; la tranche 3 du Tricastin ; et la tranche 1 de Golfech. Toutes ces tranches étaient à l'arrêt en raison de travaux de maintenance dus à la corrosion sous contrainte et n'ont donc pas fait l'objet de réductions de puissance pour des raisons environnementales.

Depuis 40 ans, Électricité de France recueille des données sur les conditions environnementales en collaboration avec un institut de recherche public afin

de mieux comprendre et de mesurer les éventuels effets thermiques liés à l'exploitation des centrales nucléaires. En 2022, aucun changement majeur n'a été observé dans le biotope (impact sur les poissons, la faune, etc.) dont l'état était comparable à celui précédemment observé dans des conditions climatiques normales. Les principaux changements constatés dans le biotope au cours des 40 dernières années sont dus à des changements mondiaux, tandis que les effets thermiques dus aux centrales nucléaires sont faibles et localisés à quelques kilomètres en aval de la centrale.



**Fig. 7.** Pertes de production dues aux limites thermiques réglementaires concernant l'environnement (2000-2022). Avec l'aimable autorisation d'Électricité de France.

# PLANIFIER AU NIVEAU DU SYSTÈME POUR ATTÉNUER LES INCIDENCES CLIMATIQUES

Bien que pris séparément, les risques climatiques aient été historiquement atténués dans la mesure du possible, il convient de prendre en compte le risque croissant de phénomènes météorologiques simultanés lors de la planification des infrastructures et de l'approvisionnement en électricité. Les systèmes énergétiques dépendant de plus en plus de sources d'énergie renouvelables pour répondre à une grande partie de la demande, il sera de plus en plus important de valoriser et de maintenir des sources d'énergie sûres pour garantir la sécurité de l'approvisionnement énergétique.

Dans cette optique, l'AIEA a lancé un projet technique s'appuyant sur l'expérience la plus récente des États Membres dans l'application de méthodes de prévision climatique aux fins d'évaluer le danger d'un site et la sûreté des sites nucléaires existants et nouveaux. Ce projet vise à intégrer un modèle de prévision des effets des changements climatiques dans la prise en compte des aléas naturels, en fournissant des méthodes de pointe permettant de réduire l'incertitude au minimum grâce à des techniques durables. Il intégrera des capacités de modélisation statistique et numérique aux capacités météorologiques et hydrologiques afin de développer un cadre durable permettant la prise en compte des

risques en fonction du temps. Les mesures prises viseront à accroître la robustesse et la résilience des centrales nucléaires face aux effets des changements climatiques. Enfin, le projet définira également une nouvelle génération de systèmes de surveillance des sites axés sur l'étude continue des dangers du site pour assurer une gestion rapide du comportement de la centrale.

Dans le cadre de son Système de notification des incidents (IRS), l'AIEA recueille auprès des États Membres des données sur les événements liés à la sûreté ayant eu une incidence sur les composants électriques des centrales nucléaires, le circuit d'eau, le circuit primaire et la structure, sur les événements ayant déclenché des mises à l'arrêt non programmées ou ayant entraîné des modifications apportées à la centrale afin d'éviter d'autres pertes. Un examen récent de l'ensemble de la base de données de l'IRS a permis de relever qu'environ 130 incidents étaient liés à des événements extérieurs, dont la plupart étaient attribués à des scénarios liés aux conditions météorologiques susceptibles d'être aggravées par les changements climatiques. Au vu de l'examen de ces événements et des effets potentiels des changements climatiques sur les installations nucléaires, il est nécessaire



**Des politiques éclairées par la science des données sont essentielles pour encourager l'innovation dans le domaine de la résilience climatique des systèmes énergétiques.**

de définir clairement les objectifs généraux et les niveaux de performance de la centrale, du site et des réseaux de distribution d'électricité. Ainsi, l'on peut définir deux objectifs d'une importance capitale : la sûreté de l'infrastructure physique d'une part et la fiabilité des services énergétiques fournis d'autre part. Ces deux objectifs sont étroitement liés : la sûreté de l'installation nucléaire doit être assurée avec un minimum d'interruptions dans la disponibilité de l'électricité. Pour obtenir un examen plus détaillé des événements liés à la sûreté saisis dans le Système de notification des incidents et le cadre multidimensionnel d'évaluation des risques pour le secteur nucléaire, voir la publication de l'AIEA intitulée « *Climate Change and Nuclear Power 2022* » (Changements climatiques et électronucléaire 2022).

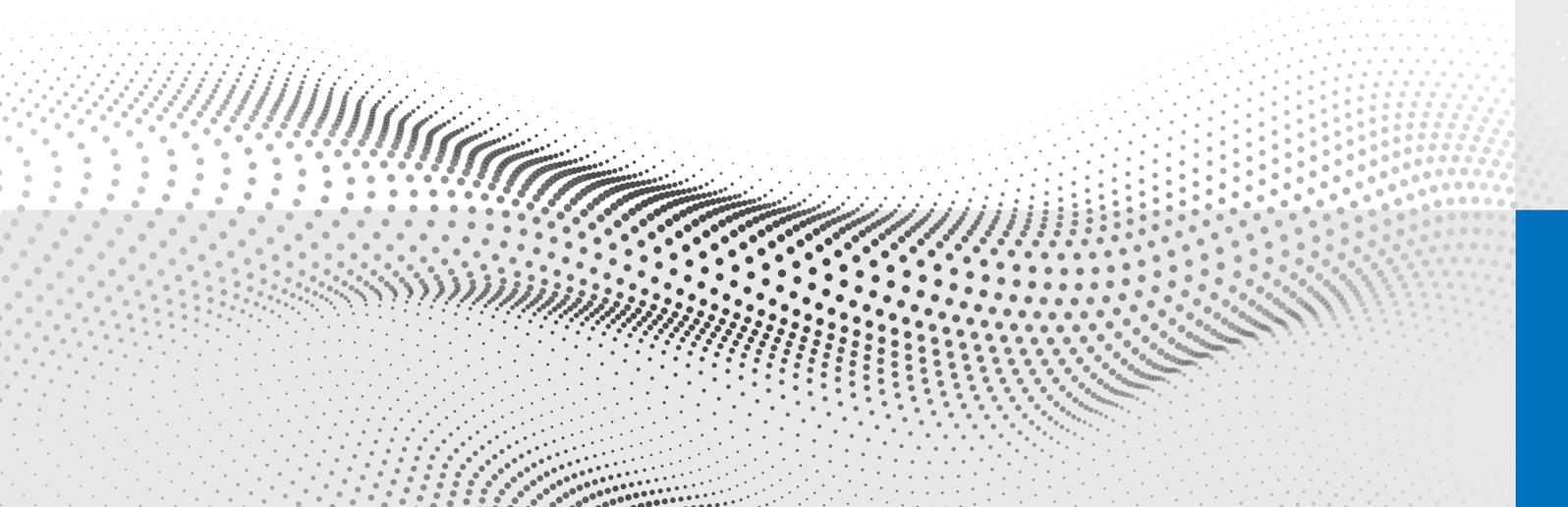
En outre, l'AIEA réunit actuellement un groupe d'experts chargés de rédiger une publication présentant les solutions techniques liées à la performance qui ont été récemment choisies ou envisagées par les pays en vue de réduire les pertes de production dues aux changements environnementaux et à la variabilité du climat avant l'enclenchement de mesures de sûreté et de protection. La publication donnera des exemples illustrant les modifications des actifs physiques et des procédures d'exploitation en vue de maximiser

l'économie de la centrale dans des conditions telles que des saisons chaudes plus chaudes, des saisons sèches plus longues, des tempêtes plus fréquentes et des épisodes d'infestation d'organismes aquatiques dans les structures de prise d'eau de refroidissement.

Il demeure toutefois de nombreuses incertitudes quant au climat auquel il faudra faire face et aux coûts induits par les mesures d'atténuation des risques. Il convient d'étendre et de normaliser les méthodes d'estimation permettant de mesurer les avantages des mesures d'adaptation par rapport aux investissements, et ce, afin d'améliorer et d'évaluer les ramifications des effets en cascade et cumulés des phénomènes météorologiques extrêmes sur les populations, les infrastructures, les chaînes d'approvisionnement et les services. Des politiques éclairées par la science des données sont essentielles pour encourager l'innovation dans le domaine de la résilience climatique des systèmes énergétiques. En outre, il est essentiel d'apporter un appui financier suffisant pour élaborer des stratégies de gestion des risques systémiques et mettre en œuvre des solutions au niveau local.

« Avec la poursuite du réchauffement climatique, les risques liés aux changements climatiques deviendront de plus en plus complexes et difficiles à gérer. De multiples facteurs de risque climatiques et non climatiques interagiront, ce qui entraînera une aggravation du risque global et des risques en cascade dans tous les secteurs et toutes les régions » [10].

**Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat,  
AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023.**



- [1] ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE, État du climat en Europe 2022, OMM, Genève (2022).
- [2] GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT, *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*, Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, GIEC, Genève (2022).
- [3] MINISTÈRE DES STATISTIQUES ET DE LA MISE EN ŒUVRE DES PROGRAMMES, *Energy Statistics India 2023* (2023),  
<https://www.mospi.gov.in/publication/energy-statistics-india-2023>
- [4] AUTORITÉ DE L'ÉLECTRICITÉ ET DE L'EAU DE DUBAÏ, *Annual Statistics 2021*,  
[https://www.dewa.gov.ae/-/media/Files/About-DEWA/Annual-Statistics/DEWA-statistics\\_booklet\\_2021\\_EN.ashx](https://www.dewa.gov.ae/-/media/Files/About-DEWA/Annual-Statistics/DEWA-statistics_booklet_2021_EN.ashx)
- [5] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, *Power Reactor Information System (PRIS)* (2023),  
<https://pris.iaea.org/pris/Home.aspx> [Les données présentées dans cette base de données reflètent les informations disponibles et les communications des États Membres à l'AIEA. Les données d'exploitation n'incluent pas les réacteurs ukrainiens, celles-ci n'ayant pas été communiquées pour l'année 2022 au moment de la présente publication.]
- [6] ADMINISTRATION NATIONALE DES OCÉANS ET DE L'ATMOSPHÈRE, *National Centers for Environmental Information Global Time Series, Global Land and Ocean Temperature Anomalies, January-December* (2023),  
<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series>
- [7] COMMISSION ÉCONOMIQUE DES NATIONS UNIES POUR L'EUROPE, Déclaration de M<sup>me</sup> Tatiana Molcean lors de la 32<sup>e</sup> session du Comité de l'énergie durable (2023),  
<https://unece.org/speeches/statement-ms-tatiana-molcean-32nd-session-committee-sustainable-energy>
- [8] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE, *Perspectives énergétiques mondiales 2023* (2023),  
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- [9] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE, *Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1,5 °C Goal in Reach: 2023 Update* (2023),  
<https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>
- [10] GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT, « *Summary for policymakers* », *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2023: Synthesis Report* [Équipe principale de rédaction, H. Lee et J. Romero (Eds)] GIEC, Genève (2023).

## RÉFÉRENCES



## Note de l'éditeur :

La présente publication a été éditée par l'équipe rédactionnelle de l'AIEA dans la mesure jugée nécessaire pour en faciliter la lecture. Elle ne traite pas des questions de la responsabilité, qu'elle soit juridique ou autre, résultant d'actes ou omissions imputables à une quelconque personne.

Les orientations et les recommandations fournies dans la présente publication en ce qui concerne les bonnes pratiques répertoriées représentent l'opinion des experts et ne sont pas le fruit d'un consensus entre tous les États Membres.

Bien que l'exactitude des informations contenues dans la présente publication ait fait l'objet d'un soin particulier, ni l'AIEA ni ses États Membres n'assument une quelconque responsabilité pour les conséquences éventuelles de leur utilisation.

L'emploi d'appellations particulières pour désigner des pays ou des territoires n'implique de la part de l'éditeur, l'AIEA, aucune prise de position quant au statut juridique de ces pays ou territoires, ou de leurs autorités et institutions, ni quant au tracé de leurs frontières.

La mention de noms de sociétés ou de produits particuliers (qu'ils soient ou non signalés comme marques déposées) n'implique aucune intention d'empiéter sur des droits de propriété et ne doit pas être considérée non plus comme valant approbation ou recommandation de la part de l'Agence.

L'AIEA n'assume aucune responsabilité quant à la persistance ou l'exactitude des adresses URL de sites internet externes ou de tiers mentionnées dans la présente publication et ne peut garantir que le contenu desdits sites est ou demeurera exact ou approprié.

Les États ci-après sont Membres de l'Agence internationale de l'énergie atomique :

AFGHANISTAN	GÉORGIE	PAYS-BAS
AFRIQUE DU SUD	GHANA	PÉROU
ALBANIE	GRÈCE	PHILIPPINES
ALGÉRIE	GRENADE	POLOGNE
ALLEMAGNE	GUATEMALA	PORTUGAL
ANGOLA	GUINÉE	QATAR
ANTIGUA-ET-BARBUDA	GUYANA	RÉPUBLIQUE ARABE
ARABIE SAOUDITE	HAÏTI	SYRIENNE
ARGENTINE	HONDURAS	RÉPUBLIQUE CENTRAFRICAINE
ARMÉNIE	HONGRIE	RÉPUBLIQUE DE MOLDOVA
AUSTRALIE	ÎLES MARSHALL	RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE
AUTRICHE	INDE	DU CONGO
AZERBAÏDJAN	INDONÉSIE	RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE
BAHAMAS	IRAN, RÉP. ISLAMIQUE D'	POPULAIRE LAO
BAHREÏN	IRAQ	RÉPUBLIQUE DOMINICAINE
BANGLADESH	IRLANDE	RÉPUBLIQUE TCHÈQUE
BARBADE	ISLANDE	RÉPUBLIQUE-UNIE
BÉLARUS	ISRAËL	DE TANZANIE
BELGIQUE	ITALIE	ROUMANIE
BELIZE	JAMAÏQUE	ROYAUME-UNI
BÉNIN	JAPON	DE GRANDE-BRETAGNE
BOLIVIE, ÉTAT	JORDANIE	ET D'IRLANDE DU NORD
PLURINATIONAL DE	KAZAKHSTAN	RWANDA
BOSNIE-HERZÉGOVINE	KENYA	SAINTE-LUCIE
BOTSWANA	KIRGHIZISTAN	SAINT-KITTS-ET-NEVIS
BRÉSIL	KOWEÏT	SAINT-MARIN
BRUNÉI DARUSSALAM	LESOTHO	SAINT-SIÈGE
BULGARIE	LETTONIE	SAINT-VINCENT-ET-LES-
BURKINA FASO	LIBAN	GRENADINES
BURUNDI	LIBÉRIA	SAMOA
CABO VERDE	LIBYE	SÉNÉGAL
CAMBODGE	LIECHTENSTEIN	SERBIE
CAMEROUN	LITUANIE	SEYCHELLES
CANADA	LUXEMBOURG	SIERRA LEONE
CHILI	MACÉDOINE DU NORD	SINGAPOUR
CHINE	MADAGASCAR	SLOVAQUIE
CHYPRE	MALAISIE	SLOVÉNIE
COLOMBIE	MALAWI	SOUDAN
COMORES	MALI	SRI LANKA
CONGO	MALTE	SUÈDE
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	MAROC	SUISSE
COSTA RICA	MAURICE	TADJIKISTAN
CÔTE D'IVOIRE	MAURITANIE	TCHAD
CROATIE	MEXIQUE	THAÏLANDE
CUBA	MONACO	TOGO
DANEMARK	MONGOLIE	TONGA
DJIBOUTI	MONTÉNÉGRE	TRINITÉ-ET-TOBAGO
DOMINIQUE	MOZAMBIQUE	TUNISIE
ÉGYPTE	MYANMAR	TÜRKIYE
EL SALVADOR	NAMIBIE	TURKMÉNISTAN
ÉMIRATS ARABES UNIS	NÉPAL	UKRAINE
ÉQUATEUR	NICARAGUA	URUGUAY
ÉRYTHRÉE	NIGER	VANUATU
ESPAGNE	NIGÉRIA	VENEZUELA,
ESTONIE	NORVÈGE	RÉP. BOLIVARIENNE DU
ESWATINI	NOUVELLE-ZÉLANDE	VIET NAM
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	OMAN	YÉMEN
ÉTHIOPIE	UGANDA	ZAMBIE
FÉDÉRATION DE RUSSIE	OUZBÉKISTAN	ZIMBABWE
FIDJI	PAKISTAN	
FINLANDE	PALAOS	
FRANCE	PANAMA	
GABON	PAPOUASIE-NOUVELLE-GUINÉE	
GAMBIE	PARAGUAY	

Le Statut de l'Agence a été approuvé le 23 octobre 1956 par la Conférence sur le Statut de l'AIEA, tenue au Siège de l'Organisation des Nations Unies, à New York ; il est entré en vigueur le 29 juillet 1957. L'Agence a son Siège à Vienne. Son principal objectif est « de hâter et d'accroître la contribution de l'énergie atomique à la paix, la santé et la prospérité dans le monde entier ».

## DROIT D'AUTEUR

Toutes les publications scientifiques et techniques de l'AIEA sont protégées par les dispositions de la Convention universelle sur le droit d'auteur adoptée en 1952 (Berne) et révisée en 1972 (Paris). Depuis, l'Organisation mondiale de la propriété intellectuelle (Genève) a étendu le droit d'auteur à la propriété intellectuelle sous forme électronique et virtuelle.

La reproduction totale ou partielle des textes contenus dans les publications de l'AIEA sous forme imprimée ou électronique est soumise à autorisation préalable et habituellement au versement de redevances. Les propositions de reproduction et de traduction à des fins non commerciales sont les bienvenues et examinées au cas par cas.

Les demandes doivent être adressées à la Section d'édition de l'AIEA :

Unité de la promotion et de la vente,

Section d'édition

Agence internationale de l'énergie atomique

Centre international de Vienne

B.P. 100, 1400 Vienne (Autriche)

tél. : +43 1 2600 22417

mél. : sales.publications@iaea.org

[www.iaea.org/publications](http://www.iaea.org/publications)

© IAEA, 2024

Imprimé par l'AIEA en Autriche, mars 2024

IAEA/PAT/003

## Catalogage à la source par la Bibliothèque de l'AIEA

**Nom :** Agence internationale de l'énergie atomique.

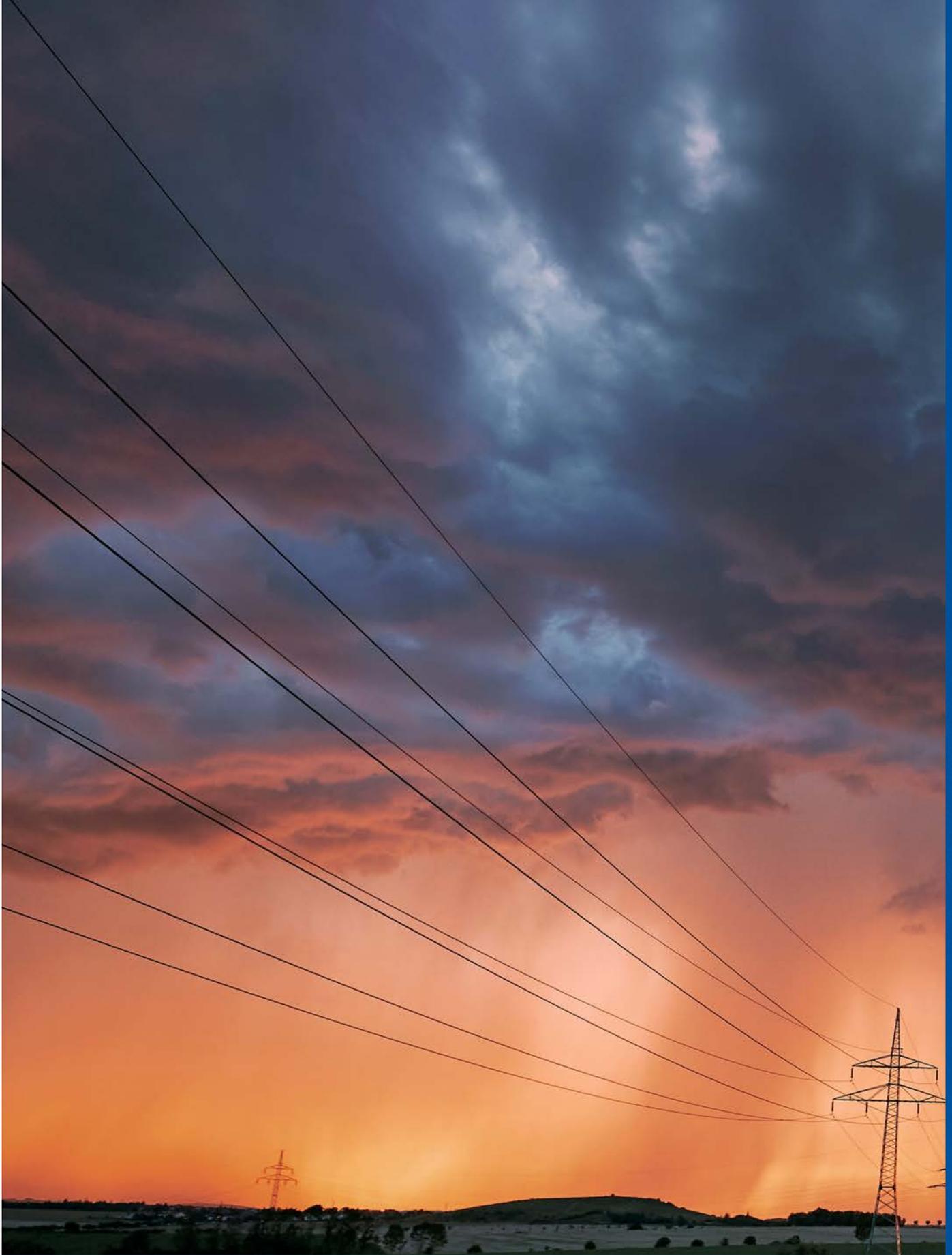
**Titre :** L'énergie nucléaire dans les systèmes électriques résistants aux changements climatiques / Agence internationale de l'énergie atomique.

**Description :** Vienne : Agence internationale de l'énergie atomique, 2024. | Comprend des références bibliographiques.

**Objets :** LCSH : Énergie nucléaire – Facteurs climatiques. | Sources d'énergie renouvelables. | Atténuation des changements climatiques.

**Catégorie :** UDC 620.91 | IAEA/PAT/003





24-00234F

Vienne, 2024

**CONSULTER NOTRE SITE**

 [iaea.org](https://www.iaea.org)