

L'adaptation aux effets du changement climatique des infrastructures des systèmes électriques

Sylvie Parey*, Bruno Carlotti*, Stéphane Gardey*, Anthony Maire*,
Didier Roustan*, Nicolas Vandenberghe*, Etienne Brière*

@ 98672

Mots-clés : système électrique, climat, résilience, nucléaire, renouvelables

Le 6^e rapport du GIEC confirme le fait que l'influence humaine contribue à réchauffer le système climatique et à générer des changements rapides et étendus. De nombreux pays, dont la France, s'engagent vers des objectifs de neutralité carbone à horizon 2050. Leur atteinte repose sur la sobriété énergétique, sur une électrification des usages finaux de l'énergie et sur une décarbonation des moyens de production d'électricité. Toutefois la trajectoire des émissions mondiales de GES n'est pas en ligne avec les objectifs de l'Accord de Paris et États et entreprises doivent se préparer à affronter des niveaux de réchauffement au-dessus de 1,5 °C. Par ailleurs, les niveaux de réchauffement constatés et à venir ne sont pas homogènes en fonction des géographies. Dans ce contexte, nous donnons une vision sur les actions d'adaptation engagées par le groupe EDF pour anticiper les effets du changement climatique.

Introduction

L'Europe, la France et de nombreux pays s'engagent vers des objectifs de neutralité carbone à horizon 2050. L'atteinte de ces objectifs ambitieux repose sur la sobriété énergétique, sur une électrification massive des usages finaux de l'énergie et sur une décarbonation des moyens de production d'électricité. Ainsi en Europe, la part de l'électricité dans l'énergie finale pourrait atteindre 50 %, voire 60 % dans des pays comme la France, les 40 à 50 % restants devant être couverts par de la chaleur renouvelable, de la biomasse solide, liquide ou gazeuse ou encore de l'hydrogène électrolytique ou des produits dérivés de l'hydrogène électrolytique (e-fuels).

Ainsi, face à ce rôle croissant de l'électricité dans l'économie, il nous est apparu utile de nous interroger sur la manière dont le système électrique se préparait aux impacts du changement climatique. Nous proposons donc dans cet article de commencer par une présentation générale de notre connaissance actuelle sur les impacts du changement climatique. Nous dressons ensuite un aperçu des défis scientifiques sur la ressource en eau dans le contexte du changement climatique, puis nous décrivons l'analyse de l'incidence des rejets thermiques des centrales nucléaires sur les milieux aquatiques à partir de près de 40 ans de mesures et pourrons ainsi relativiser ces impacts par rapport aux effets du changement climatique. Dans les trois chapitres suivants, nous présentons les démarches d'adaptation engagées par les exploitants des parcs de production nucléaire, hydraulique et par les gestionnaires de

* EDF.

réseaux électriques pour faire face aux effets de ses impacts. Nous finissons l'article par la présentation d'une étude sur l'impact du changement climatique pour nos clients, leur habitat et leurs usages.

Cet article donne ainsi une vision d'ensemble sur les actions engagées par le groupe EDF pour anticiper les effets du changement climatique sur le système électrique et sur les clients en engageant dès maintenant des actions d'adaptation.

1. Principaux impacts du changement climatique sur les systèmes électriques

Le système électrique est par essence tributaire des conditions météo-climatiques, d'une part parce que la conception des ouvrages impose de résister à certains niveaux d'extrêmes météorologiques, et d'autre part parce que les aléas météorologiques impactent l'équilibre entre l'offre et la demande. La production d'électricité renouvelable est évidemment dépendante du vent pour l'éolien, du rayonnement pour le solaire ou des précipitations pour l'hydroélectricité (au premier ordre), mais la production des centrales thermiques classiques et nucléaires dépend aussi de la température de l'air ou de l'eau et de la quantité d'eau pour leur refroidissement. Par sa forte proportion de chauffage électrique, la France se distingue par une consommation particulièrement thermosensible en hiver, où 1 °C de moins conduit à une hausse de la demande de 2400 MW. L'installation croissante de moyens de climatisation en été induit désormais également une sensibilité de la consommation sur cette période, de l'ordre de 700 MW en plus par degré supplémentaire à la pointe. Les réseaux de transport et de distribution sont exposés aux aléas météorologiques, à la fois pour leur capacité à affronter des épisodes extrêmes (vent, pluie, neige, foudre, incendies...) et aussi par la dépendance à la température de l'air des capacités de transit des lignes électriques. Enfin, les installations de production et de transport doivent résister à des niveaux d'aléas météorologiques plus ou moins extrêmes selon la sensibilité de l'installation. Pour toutes ces raisons, le système électrique a été conçu sur la base d'observations

historiques et de niveaux d'aléas tels qu'anticipés lors de la conception de ses différents éléments à partir du climat passé avec des hypothèses de stabilité climatique. Le changement climatique en cours incite à réinterroger les référentiels de conception et à prévoir des adaptations lorsque c'est nécessaire.

Le rapport du groupe de travail sur les bases scientifiques du 6^e rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) paru en août 2021 indique comme désormais établi le fait que l'influence humaine contribue à réchauffer le système climatique et à générer des changements rapides et étendus. La température moyenne globale annuelle a augmenté de 1,1 °C par rapport à la période préindustrielle, avec une répartition inégale entre les continents (1,59 °C) et les océans (0,88 °C). Ce changement climatique 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. En France, la température moyenne annuelle s'est accrue de 1,7 °C depuis 1900, et le réchauffement est plus marqué en été qu'en hiver, avec notamment une augmentation de la fréquence des canicules. Les zones de moyenne montagne et la région méditerranéenne sont les plus impactées. On observe depuis quelques années déjà une modification de la saisonnalité des débits des rivières dans les zones montagneuses, avec un pic lié à la fonte de la neige avancé de 3 à 4 semaines sur certains bassins. Les étiages estivaux deviennent également plus marqués et plus longs. En ce qui concerne le vent et le rayonnement, les signaux sont moins clairs. Une diminution de la vitesse du vent est notée en Europe, mais la confiance reste moyenne et l'attribution au changement climatique d'origine anthropique difficile, sauf pour la zone méditerranéenne où le signal est plus clair. Dans le paragraphe suivant, nous détaillerons les défis scientifiques à relever pour préciser les conséquences du changement climatique sur la ressource en eau.

La forte sensibilité du système électrique aux conditions hydrométéorologiques explique

L'adaptation aux effets du changement climatique des infrastructures des systèmes électriques

l'implication précoce d'EDF R&D, dès 1990, sur le climat et ses possibles évolutions. Essentiellement consacrés à la compréhension des mécanismes et à la modélisation du système climatique dans les premiers temps, les projets collaboratifs se sont articulés autour des impacts du changement climatique sur les activités d'EDF à partir du début des années 2000. Face à la demande croissante d'études d'impact de la part des différents métiers de l'entreprise, un service climatique interne a été mis en place en 2014. Son objectif est de constituer une interface entre la communauté scientifique, pourvoyeuse de connaissances et de projections climatiques, et les besoins internes de l'entreprise, en rassemblant des données, des outils et de l'expertise. De plus en plus complexes et performants, les modèles climatiques globaux fournissent des projections à des résolutions spatiales de l'ordre d'une centaine de kilomètres, encore trop imprécises pour bien décrire les impacts locaux. Le raffinement à une échelle spatiale plus fine peut alors être effectué de plusieurs manières. En parallèle des projets coordonnant les projections des modèles globaux lors de chaque nouveau cycle d'évaluation du GIEC, une démarche internationale, l'initiative CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*), s'est mise en place pour coordonner des projections à l'échelle de différents continents à l'aide de modèles atmosphériques régionaux forcés à leurs limites par les projections des modèles globaux. EURO-CORDEX héberge les projections régionales sur le continent européen, avec des résolutions spatiales de 44 à 11 km. Cette façon de régionaliser les projections constitue l'approche dynamique. Comme les modèles ne fournissent qu'une représentation approximative de la réalité observée, elle nécessite ensuite une étape d'ajustement des biais des modèles. Des approches statistiques de descente d'échelle spatiale sont également utilisées. Elles consistent à identifier des relations entre les structures climatiques de grande échelle et le climat local, puis à les utiliser pour dériver les impacts locaux à partir des projections globales. Elles permettent de traiter en même temps les ajustements d'échelle et de biais. La base de projections climatiques que met à disposition le service climatique d'EDF pour les différentes études d'impact est construite en

collaboration avec la communauté scientifique française (IPSL – Institut Pierre-Simon Laplace et CERFACS – Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique) de façon à proposer un ensemble représentatif des projections des derniers exercices internationaux en date, avec une gamme de scénarios d'émissions allant de scénarios compatibles avec la cible de 2 °C de réchauffement global par rapport à la période préindustrielle au scénario le plus émissif, pour les enjeux les plus sensibles. Pour le dernier exercice du GIEC, les projections d'une vingtaine de modèles avec les scénarios SSP1-2,6, SSP2-4,5, SSP3-7,0 et SSP5-8,5 ont été récupérées pour l'ensemble des variables utiles dans les études.

Le système de management environnemental du groupe EDF intègre l'élaboration des plans d'adaptation au changement climatique des différentes entités du groupe. La construction du plan d'adaptation passe par une évaluation des impacts à attendre à différents horizons temporels selon les entités et la durée d'exploitation de leurs installations. Le service climatique permet d'effectuer ces études d'impacts.

2. Défis scientifiques de l'évaluation de la ressource en eau face au changement climatique

L'évolution de la ressource en eau dans les décennies à venir sous l'influence du changement climatique est un sujet de recherche majeur qui mobilise la communauté scientifique de chaque zone géographique. Nous présentons dans ce chapitre les principaux défis scientifiques soulevés par cette évaluation.

Sous l'effet du changement climatique, l'eau va devenir une ressource de plus en plus en tension, voire rare dans certaines zones géographiques et à certaines périodes de l'année. Les volumes annuels d'écoulement hydrologique baisseront à l'horizon 2050 entre 10 et 40 % par rapport à la période 1960-1990 du fait de l'augmentation de l'évapotranspiration et les étiages deviendront plus intenses (-30 à -60 %), plus précoces et plus longs⁴. EDF participe au projet Explore2 financé par le ministère de la Transition écologique et

l'Office français de la biodiversité et dont l'objectif est de mettre à jour les évaluations de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie à l'échelle nationale, en incluant les eaux de surface et les eaux souterraines. Grâce à la surveillance associée à ses ouvrages installés le long des cours d'eau en France depuis plusieurs décennies, EDF a déjà pu observer sur la période 1961-2010 une tendance nette au réchauffement de l'air et une baisse des volumes d'écoulement : l'effet d'une hausse de 1 °C conduit à une baisse légèrement inférieure à 5 % de l'écoulement annuel.

Dans le même temps, sous l'effet conjugué du changement climatique et du développement économique (les changements globaux), les usages de l'eau vont se développer et accroître ainsi les tensions déjà existantes autour du partage de ce bien commun, fondamental pour le fonctionnement des écosystèmes et des organisations anthropiques.

L'eau est en particulier fondamentale pour la production d'électricité centralisée, que ce soit pour le refroidissement des équipements thermiques (nucléaires ou classiques) ou l'entraînement des turbines des ouvrages hydrauliques. EDF est ainsi pleinement concernée par la question de l'évolution de la ressource en eau pour la résilience de sa capacité de production. Les questions posées portent notamment sur la disponibilité de la ressource pour le refroidissement des centrales thermiques, l'évolution du produit et de la capacité de stockage hydraulique ou encore sur l'impact sur la biodiversité de l'élévation des températures des cours d'eau due au changement climatique (cf. partie suivante sur la thermie-hydrobiologie). Elle l'est également dans le cadre de son rôle d'acteur de la gestion de l'eau en France (EDF dispose en France d'une capacité de stockage de 7 milliards de m³ d'eau) et de contributeur majeur à l'équilibre du système électrique. Le maintien et le développement des capacités de production et de stockage d'électricité décarbonée, qui seront des piliers de la transition énergétique pour la lutte contre le changement climatique, devront reposer sur une gestion coordonnée de la ressource en eau avec les autres usages et une anticipation de son évolution.

L'été 2022 a cependant démontré la résilience du système de production centralisé et sa capacité à atténuer les effets des changements globaux. Pour la production nucléaire et afin de maintenir la sécurité du réseau électrique national et les réserves énergétiques (gaz et hydraulique) en amont d'un hiver annoncé tendu, des modifications temporaires des limites de rejets thermiques ont été prononcées par les autorités. Les pertes de production ont été ainsi limitées à 0,5 TWh (soit moins de 0,2 % de la production annuelle), sans conséquence sur la sûreté. Les ouvrages hydroélectriques d'EDF, malgré un déficit de production de 20 %, ont continué à constituer la majeure partie de la flexibilité du système électrique tout en assurant dans le même temps du soutien d'étiage estival sur de nombreux bassins.

Afin d'anticiper au mieux ces situations, EDF mène depuis de nombreuses années des programmes de recherche dans le domaine de la ressource en eau pour préserver l'environnement, développer la compétitivité de ses métiers, optimiser le dimensionnement et l'exploitation de ses ouvrages et s'adapter aux évolutions réglementaires. EDF a ainsi développé une capacité de recherche interne et partenariale reconnue sur des capacités de modélisation et de prévision de la ressource en eau, en sédimentologie, en écologie aquatique, en microbiologie, en hydrogéologie, en chimie environnementale et en écotoxicologie.

Les évolutions observées et probables de la ressource en eau renforcent les besoins de recherche en développant de nouveaux paradigmes :

- La connaissance du passé ne suffit plus à décrire les futurs possibles. Dans un contexte de changement climatique, la notion de « normalité », à laquelle on se réfère souvent, perd de son sens. Il y a désormais une nécessité de comprendre les dynamiques de cette dérive et de projeter la ressource en eau et son évolution sur des horizons long terme pour pouvoir alimenter les décisions stratégiques ;
- La diminution de la ressource renforce l'interdépendance des usagers de l'eau et le besoin

L'adaptation aux effets du changement climatique des infrastructures des systèmes électriques

d'un dialogue fondé sur une vision commune de l'évolution de la ressource en eau, élaborée avec des méthodes partagées;

- La sobriété, le partage organisé et le stockage seront sans doute les leviers principaux à mobiliser à travers des actions de sensibilisation, de dialogue et de développement de solutions innovantes;
- Le maintien en « bonne santé » des milieux naturels aquatiques et de la biodiversité sera non seulement une condition indispensable à la lutte contre les changements globaux, mais contribuera également au maintien des services qu'ils rendent, que ce soit la séquestration du carbone, l'épuration naturelle, la protection contre les crues et les étiages sévères.

Ces évolutions interpellent la communauté scientifique sur de nombreux aspects.

La prévision court, moyen et long terme de la qualité et de la quantité de la ressource en eau sera fondamentale pour adapter les pratiques et développer une gestion partagée avec les autres « usagers », y compris et en premier lieu les écosystèmes aquatiques. Les réponses à apporter devront traiter les incertitudes liées aux effets du changement climatique et au comportement des autres usagers et élargir le champ d'observation à l'échelle des bassins versants. Les solutions déployées devront non seulement se fonder sur des travaux scientifiques multidisciplinaires, mais également être reconnues et adoptées par l'ensemble des parties prenantes.

Le maintien de la qualité des écosystèmes aquatiques constituera un enjeu pour une utilisation durable de la ressource en eau. Aussi, et au-delà de la quantité, la qualité de l'eau (dans ses composantes physiques, thermiques, sédimentaires et biochimiques) et la préservation de la biodiversité aquatique devront également faire l'objet de projections et de recherche de solutions de mitigation des effets du changement climatique. S'agissant du monde du vivant, ces questions relèvent de programmes de recherche

ambitieux abordant des travaux complexes en écologie, en modélisation et en métrologie.

L'adaptation des installations industrielles et de leur mode opératoire aux évolutions de la ressource en eau sera à étudier. Il s'agira dans le même temps de mesurer et limiter l'impact de ces installations sur le cycle de l'eau. Les défis scientifiques porteront non seulement sur l'évaluation prospective de ces impacts, mais également sur la mise en œuvre de technologies et méthodes d'exploitation innovantes, économes en eau (idéalement avec des solutions fondées sur la nature).

Enfin, la croissance de la nécessité de partage de l'eau entre différents acteurs et utilisateurs et le renforcement de la vulnérabilité des territoires nécessiteront de comprendre et maîtriser les ressorts des controverses et du positionnement des parties prenantes.

Autant de défis sur lesquels les équipes de recherche industrielles et académiques devront renforcer et réunir leurs efforts.

3. Évaluation de l'incidence des rejets thermiques des centrales nucléaires sur les milieux aquatiques dans un contexte de changement climatique : près de 40 ans de retour d'expérience

Dans ce contexte de changement climatique, l'impact des rejets thermiques sur les milieux aquatiques est souvent questionné. Nous présentons dans cette partie les principaux résultats des études menées depuis plus de 20 ans à EDF, en collaboration avec la communauté scientifique française, pour évaluer ces impacts sur la faune et la flore des cours d'eau.

Les Centres nucléaires de production d'électricité (CNPE) doivent respecter des limites réglementaires sur la température de leurs rejets d'eau dans l'environnement afin de préserver le milieu aquatique récepteur (rivière, océan, lac). Les premières études sur l'incidence des rejets thermiques sur les écosystèmes aquatiques remontent aux années 1970 et ont permis de poser les bases

de la réglementation actuelle. Les questionnements relatifs à cette thématique se sont ensuite intensifiés : d'abord après la canicule européenne de 2003, inédite par sa longueur et son intensité, puis dans un contexte de changement climatique impactant de plus en plus les écosystèmes. En réponse à ces interrogations, et pour tenir compte de ces évolutions, de nombreuses études ont été menées en partenariat entre EDF et le monde académique. Depuis 2008, celles-ci ont été structurées dans le cadre des programmes successifs «Thermie-Hydrobiologie» pilotés et financés par EDF. Les objectifs principaux de ces programmes de recherche sont : (1) de caractériser quantitativement les réponses des organismes aquatiques à une modification de la température de l'eau, (2) d'évaluer les contributions respectives du changement global, notamment sa composante climatique, et des rejets thermiques des CNPE dans les changements de biodiversité observés, (3) de fournir de nouveaux éléments scientifiques qui permettront, en tant que de besoin, d'alimenter

de manière objective les réflexions en cas de situation climatique exceptionnelle comme les canicules et (4) d'explorer des solutions d'atténuation des effets du changement climatique sur les rivières et leur biodiversité qui s'inspirent de la nature. Les CNPE constituent en effet de véritables observatoires du changement climatique grâce aux suivis hydrobiologiques réglementaires menés chaque année depuis leur construction dans les années 1980 et 1990. Ces suivis long terme ont permis d'avoir aujourd'hui accès à des chroniques de données de plus de quarante ans sur certaines stations (Figure 1).

En synthèse, les programmes de recherche Thermie-Hydrobiologie ont mis en évidence des évolutions significatives des peuplements aquatiques des fleuves français sur le long terme en relation avec l'évolution des principaux paramètres du milieu, en particulier l'augmentation progressive de la température liée au changement climatique [Floury et al., 2012; Larroudé et al.,

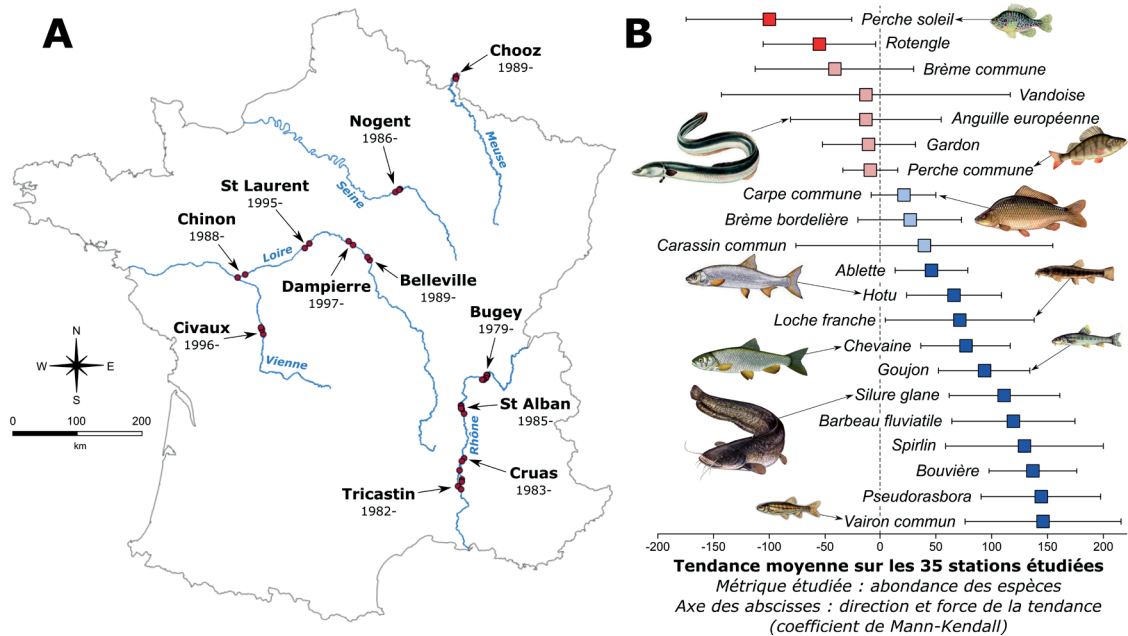


Figure 1. Tendances d'évolution des abondances de 21 espèces de poissons des fleuves français sur la période 1980-2015 et localisation des 35 stations de suivi considérées, localisées au voisinage de 11 CNPE

Source : d'après [Maire et al., 2019]

L'adaptation aux effets du changement climatique des infrastructures des systèmes électriques

2013; Maire et al., 2019, Diamond et al., 2022]. Un déplacement, généralement vers le nord et plus en altitude, des aires géographiques de répartition des espèces piscicoles en fonction de leur caractère plus ou moins thermophile a été observé. Les variations de débit et l'amélioration progressive de la qualité des eaux (réduction de l'eutrophisation en lien avec une amélioration du traitement des eaux usées et la législation sur les lessives phosphatées) ont également joué un rôle important dans les évolutions constatées. Les études ont montré que les tendances d'évolution observées pour les peuplements de poissons, d'invertébrés et de diatomées (algues présentes sur le fond des rivières) ne différaient pas entre les stations d'échantillonnage localisées à l'amont et à l'aval des CNPE. Ces études identifient ainsi les changements globaux, observés à l'échelle de plusieurs décennies, comme les déterminants principaux des évolutions de biodiversité observées dans les fleuves étudiés (Rhône, Loire, Seine, Meuse). L'effet ajouté des rejets thermiques par rapport aux différents facteurs d'ordre climatique, physico-chimique ou morphologique, est quant à lui le plus souvent tenu et limité à quelques kilomètres en aval des CNPE.

En 2020, le groupe EDF s'est engagé dans le cadre de l'initiative «Entreprises engagées pour la nature»², en complément des nombreux articles scientifiques publiés sur le sujet, à restituer publiquement les résultats des études menées dans le cadre du programme de recherche Thermie-Hydrobiologie 2016-2020 et à co-construire avec les partenaires scientifiques un nouveau programme de recherche à mener sur la période 2023-2027. Le colloque Thermie-Hydrobiologie³ a eu lieu le 17 novembre 2022 à l'EDF Lab Paris-Saclay et a réuni environ 120 représentants de plus de 50 organismes différents. En parallèle de la restitution publique des études, la co-construction du nouveau programme de recherche pour la période 2023-2027 a impliqué de nombreux partenaires scientifiques (INRAE, CNRS, Ifremer, plusieurs universités françaises...). Les échanges entre EDF et ces organismes de recherche ont placé l'adaptation au changement climatique au centre des problématiques qui seront explorées dans le cadre de ce nouveau

programme. En particulier, plusieurs actions de recherche, appuyées par des suivis scientifiques renforcés sur le terrain, veilleront à déterminer comment le maintien et la restauration des ripisylves (formations végétales présentes au bord des cours d'eau) peuvent permettre d'atténuer les effets du changement climatique sur les rivières et leur biodiversité. Enfin, ce nouveau programme a pour ambition d'étendre le champ des études sur l'incidence des rejets thermiques aux milieux marins et estuariens, tout en poursuivant l'acquisition de connaissances sur les effets de l'augmentation de la température sur les écosystèmes des principaux fleuves français.

4. Adaptation du parc nucléaire en exploitation au changement climatique

Les Centres nucléaires de production d'électricité ont la double propriété d'être des installations à longue durée d'exploitation et de présenter une sensibilité certaine aux conditions hydrométéorologiques. C'est pourquoi EDF, et sa direction en charge du parc nucléaire et thermique (DPNT), s'est intéressé de longue date à la question de l'adaptation au changement climatique. Nous présentons dans cette partie l'approche mise en place par EDF pour préparer le parc de production nucléaire.

En 2003, certaines centrales avaient dû limiter leur production afin d'éviter de contribuer au réchauffement de l'eau des rivières. Ces réductions ont entraîné une perte de production équivalente à 1 % de la production d'EDF.

À la suite de cet épisode, et parce que l'engagement précoce de la R&D d'EDF sur le thème du climat et de ses évolutions permettait à l'entreprise d'être consciente que le changement climatique en cours se traduirait par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des canicules, un plan «Grands chauds» a été mis en place afin d'adapter le parc de production en conséquence.

Ainsi, les valeurs extrêmes de température à considérer dans les référentiels de sûreté des installations nucléaires d'EDF ont été réinterrogées en tenant compte du changement climatique.

Un important travail scientifique et méthodologique a été fait à la R&D d'EDF pour proposer des méthodes d'estimation de valeurs extrêmes en contexte non stationnaire, et les valeurs retenues sont régulièrement réinterrogées, à l'occasion des visites périodiques des réacteurs. La capacité des centrales à faire face à ces nouvelles températures définies pour le référentiel «grands chauds» conduit à des modifications déployées au rythme des réexamens périodiques ou de manière anticipée entre les visites décennales, selon les paliers. Ces modifications concernent par exemple l'augmentation des débits de ventilation ou de la capacité frigorifique, l'ajout de climatisations, le remplacement de certains matériels électriques anciens par des équipements dissipant moins de chaleur ou le renforcement de la capacité d'échange thermique des échangeurs entre le système de réfrigération intermédiaire et le système d'eau brute secourue de certains sites par l'ajout de plaques et l'amélioration du suivi en continu de leur capacité d'échange.

Grâce à ces investissements, la production d'EDF n'a pas été fortement impactée lors de l'été 2022 exceptionnellement chaud et sec. Par ailleurs, les centrales en cours de construction du groupe EDF ont toutes été dimensionnées en intégrant les scénarios climatiques les plus récents.

Pour prendre en compte à la fois le caractère systémique et évolutif du dérèglement climatique et l'évolution de la demande d'électricité, le secteur a besoin de pouvoir compter sur des moyens de production pilotables et très bas carbone pour assurer la sûreté et la résilience des systèmes électriques et contribuer à l'habitabilité des territoires. C'est pourquoi, pour prolonger l'adaptation en cours et aller plus loin, le groupe EDF a lancé le programme ADAPT destiné à assurer la résilience du parc de production nucléaire et thermique au changement climatique. Outre des températures très élevées, les canicules occasionnent des débits des fleuves et rivières plus bas. Ainsi, la mise en place du programme ADAPT au sein de la direction de la production nucléaire et thermique d'EDF s'accompagne de la nécessité d'anticiper les événements de canicule et d'étiage les plus sévères susceptibles de survenir à l'horizon 2050.

Mais cet aspect ne représente qu'une petite partie d'un plan de travail beaucoup plus vaste avec une vision systémique. La démarche du programme ADAPT est articulée autour de 4 axes :

- comprendre le dérèglement climatique et ses effets à l'échelle des territoires en intégrant son caractère systémique pour imaginer les futurs climatiques des territoires ;
- évaluer les impacts du dérèglement climatique sur les installations mais aussi sur l'ensemble de l'écosystème territorial des centrales ;
- mobiliser l'ensemble des acteurs internes et externes sur les dimensions évolutives et systémiques du dérèglement climatique et de ses conséquences ;
- agir pour s'adapter et contribuer à l'habitabilité des territoires.

Comprendre les évolutions possibles du climat nécessite une articulation entre la direction de la production nucléaire et thermique et la R&D d'EDF autour de la déclinaison à l'échelle des sites de production et de leur territoire des connaissances scientifiques, en particulier issues des travaux du GIEC, mais aussi des différentes initiatives régionales. L'objectif est d'imaginer les futurs des territoires, en s'appuyant aussi bien sur les expertises externes que sur les compétences développées en interne à EDF et mises à disposition via le service climatique.

L'évaluation des impacts permettra alors de proposer des adaptations visant à pérenniser le rôle de nos implantations sur le maintien d'un bon niveau d'habitabilité des territoires. Le travail porte sur les ressources en eau, l'outil industriel à proprement parler, le tissu industriel nécessaire à son fonctionnement (prestataires, fournisseurs contractualisés), mais aussi l'environnement socio-industriel non contractualisé.

Maintenir un bon niveau d'habitabilité d'un territoire nécessite de s'adapter au dérèglement climatique et de permettre aux écosystèmes de continuer à fonctionner (puits carbone,

L'adaptation aux effets du changement climatique des infrastructures des systèmes électriques

biodiversité, ressource en eau). Préserver et restaurer les écosystèmes contribue à accroître la résilience des territoires face aux conséquences du changement climatique. L'atteinte de cet objectif implique la mobilisation de tous, favorisée par la sensibilisation aux enjeux à venir.

Enfin, la définition d'un plan d'action permet de dérouler l'adaptation pour maîtriser les risques climatiques au niveau de nos ouvrages, via des options techniques ou organisationnelles, en commençant par identifier rapidement des mesures sans regret. Ce plan d'adaptation des centrales nucléaires d'EDF au changement climatique a été présenté à l'ASN (Autorité de sûreté nucléaire) le 13 avril 2023 [ASN, 2023].

La mise en œuvre du premier axe sur la compréhension des évolutions possibles s'est traduite à la R&D d'EDF par la proposition et la mise en œuvre d'une stratégie méthodologique destinée à anticiper les conditions de canicules et d'étiages les plus extrêmes à l'horizon 2050. Elle repose sur la génération stochastique d'un grand nombre de séries temporelles de températures et de précipitations équivalentes aux séries observées ou projetées par les modèles climatiques, à l'aide de générateurs de temps. Ces séries constituent ensuite les données d'entrée du modèle hydrologique MORDOR, qui produit le même nombre de séries temporelles de débit, à partir desquelles il est possible de faire des statistiques plus robustes sur les étiages. L'anticipation des conditions climatiques futures est basée sur les projections climatiques les plus récentes mises à disposition par la communauté scientifique et récupérées dans le service climatique d'EDF. Afin de prendre en compte les incertitudes liées aussi bien à la modélisation climatique qu'aux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, d'aérosols et d'utilisation des sols, des projections effectuées avec des modèles et des scénarios différents, conduisant à des résultats contrastés à l'horizon 2050, sont considérées. La sélection repose essentiellement sur ce qu'anticipent les modèles en termes de changements de températures et de précipitations en été et en termes d'augmentation de la température moyenne, mais aussi de sa variabilité

en été, qui a un impact non négligeable sur les niveaux extrêmes atteints.

L'ambition affichée du programme ADAPT est d'avoir analysé tous les sites de production dans les prochaines années de façon à commencer le déploiement des adaptations en parallèle.

5. Adaptation du parc de production hydraulique au changement climatique : maîtrise des risques et contribution à la transition énergétique

À l'image de l'ensemble des infrastructures du système électrique, le changement climatique constitue un enjeu majeur pour la performance et le développement de l'hydroélectricité; nous présentons dans cette partie à la fois les actions mises en œuvre pour adapter les ouvrages de production hydraulique, mais également le rôle accru que peuvent jouer les ouvrages hydrauliques pour réduire les impacts du changement climatique sur les débits des cours d'eau.

Il s'agit en premier lieu d'améliorer constamment la projection des effets du climat sur les moyens de production hydraulique à partir des données du GIEC afin de réaliser des analyses d'impact de plus en plus précises à l'échelle de chaque bassin versant.

Par ailleurs, il existe différents rapports entre les effets du changement climatique et l'énergie hydraulique. D'une part, ses effets induisent directement ou indirectement des risques qu'il faut maîtriser pour garantir la résilience des installations en particulier face aux effets potentiels du changement climatique (risque crue, impact sur les structures des ouvrages...). D'autre part, l'hydroélectricité, grâce à sa capacité de régulation des débits des cours d'eau en aval des retenues hydrauliques, offre des opportunités d'actions essentielles pour atténuer le réchauffement climatique et ses conséquences.

Concernant la maîtrise des risques, en dehors des problématiques liées à la gestion de la ressource en eau, le changement climatique est pris en compte dans l'évaluation de la sûreté

des barrages. Les installations hydroélectriques sont déjà conçues pour faire face aux situations météorologiques exceptionnelles et extrêmes. Toutefois, la prévision d'une augmentation potentielle des sollicitations des équipements de sûreté justifie des études complémentaires à mener sur la base d'analyses de risques, que ce soit pour la conception, la maintenance, la surveillance ou pour l'élaboration des plans d'urgence. Par exemple, la maîtrise du risque crue peut conduire à la conception innovante d'ouvrages évacuateurs de crue plus performants (*Piano Key Weir*, déversoir en touches de piano).

Un autre exemple de maîtrise des risques est la prise en compte des modifications des chargements thermiques ou des écarts hydriques sur les structures des ouvrages et de leur interaction avec les sols, notamment dans les guides de conception et de construction. L'instrumentation d'ouvrages existants est également à l'étude pour améliorer la connaissance de ces comportements, afin de mieux en évaluer les impacts.

À noter aussi que sur les méthodologies de prise en compte des risques liés au changement climatique, EDF participe activement aux développements portés par la communauté des hydrauliciens comme au sein de l'Association Internationale de l'Hydroélectricité [International Hydropower Association, 2019].

Les barrages et les réservoirs offrent aussi de nombreux aspects positifs pour atténuer les effets du dérèglement climatique. Des capacités de stockage supplémentaires peuvent aider à améliorer la gestion de la ressource en eau. De nouveaux ouvrages hydrauliques pourraient s'avérer également nécessaires pour réduire les risques d'inondation dus à l'intensité et la fréquence potentiellement exacerbées des crues dans certaines zones. Ces enjeux seront de plus en plus pris en compte dans l'instruction de l'implantation de nouveaux ouvrages par les pouvoirs publics.

L'hydroélectricité, source d'énergie faiblement émettrice de gaz à effet de serre, présente aussi de nombreux atouts pour contribuer à la transition énergétique bas carbone. Par ailleurs, certains

effets du changement climatique pourraient même favoriser l'augmentation du stockage et la production hydroélectrique associée, en raison par exemple de la fonte des glaciers.

De plus, comme le souligne notamment l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) [AIE, 2021], l'hydraulique stockable peut contribuer à satisfaire les besoins croissants de flexibilité des systèmes électriques afin de compenser la variabilité des autres énergies renouvelables, et ce à différentes échelles de temps. Outre sa forte expérience sur les STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage) permettant de stocker les surplus de productions éoliennes et photovoltaïques, EDF développe des projets pour dégager le plein potentiel des aménagements hydroélectriques. Par exemple, sa participation au projet européen XFLEX-Hydro⁴ permet de démontrer l'efficacité de différentes innovations de flexibilité dans un contexte industriel : mode de fonctionnement supplémentaire de pompage turbinage simultané, combinaison batterie-turbine pour répondre au réglage fréquence/puissance avec une dynamique accrue et une sollicitation réduite de la machine hydraulique... En complément, des expérimentations sont menées pour développer les services supplémentaires de l'hydroélectricité combinée à d'autres technologies (fermes photovoltaïques flottantes, production décarbonée d'hydrogène...).

En conclusion, le développement de l'énergie hydraulique constitue un atout essentiel à la fois dans la lutte contre le changement climatique, mais également pour participer à l'adaptation des systèmes électriques et de l'économie face aux effets du changement climatique.

6. Préparation de l'adaptation des réseaux électriques aux impacts du changement climatique

Comme mentionné dans le début de cet article, le changement climatique impacte l'ensemble du secteur énergétique, des moyens de production aux usages et à la consommation, dans tous les pays et territoires : les réseaux de transport et distribution d'électricité ne sont pas épargnés. Nous aborderons dans cette partie la manière dont les gestionnaires de réseaux électriques prennent en compte le changement climatique et se préparent à les adapter pour accroître leur résilience.

Dans les pays du monde, les réseaux électriques sont planifiés, conçus et opérés sur la base de l'optimum technico-économique collectif (analyse coût-bénéfice, comprenant l'application d'un taux d'actualisation). Cependant la durée de vie des ouvrages étant souvent de 40 à 60 ans, de nouvelles études à la maille des territoires sont réalisées en cours de vie au regard des nouvelles contraintes et des nouveaux flux d'énergie. Face à l'évolution climatique, les études portent principalement sur 2 thématiques :

- l'évolution des charges et des productions, donc de la gestion et du dimensionnement du réseau, en lien avec l'évolution du mix énergétique prévu au sein de chaque territoire,
- l'évolution tendancielle du climat et des aléas climatiques et la façon de s'en prémunir, qu'il s'agisse d'évolution de matériel, de pratiques d'exploitation ou de conception et de dimensionnement de réseau.

Face à ces deux tendances, la mission des gestionnaires de réseau est complexe : en se basant sur un actif de parc existant considérable, ils doivent déterminer le meilleur compromis dans la durée entre les capacités des ouvrages qu'ils construisent (transit, résilience, redondance...) et le coût de ceux-ci, qui sont répercutés sur les utilisateurs du réseau.

Face à l'évolution climatique par exemple, l'évaluation des solutions se fait à l'aune des

contraintes spécifiques, liées à la géographie et topographie du territoire. Chaque solution présente des vulnérabilités potentielles : au-delà du coût et des nuisances liées aux travaux, l'enfouissement des lignes électriques fait partie des solutions de mitigation des impacts du changement climatique, mais nécessite un sous-sol qui le permette et augmente la sensibilité à des phénomènes plus fréquents comme les vagues de canicules ou les inondations et crues (par la présence d'ouvrages électriques à une altitude moindre). *A contrario*, les lignes aériennes sont évidemment sensibles aux épisodes de neige collante et aux tempêtes.

En 2020, une étude d'impact du changement climatique à l'horizon 2050 sur les principaux aléas impactant les réseaux de distribution en France métropolitaine a été menée. Les évolutions les plus marquées sont celles qui concernent les températures extrêmes chaudes et les risques de feux de forêt. Le risque lié à la neige collante, en revanche, n'augmenterait pas. Ces résultats confortent les mesures d'adaptation mises en œuvre par les gestionnaires de réseaux et consistant, par exemple, à remplacer les éléments de réseau les plus sensibles à la chaleur et à passer de câbles aériens à souterrains dans les zones boisées. Une mise à jour de cette étude en 2022 n'a pas mis en évidence d'évolution majeure des résultats de 2020.

L'une des évolutions de contraintes climatiques les plus spectaculaires se situe dans les territoires ultramarins et en particulier aux Antilles et dans le golfe du Mexique : l'intensité des cyclones et ouragans augmente, et renforce la récurrence de dégâts en zones habitées, insulaires ou non.

À l'international, les États-Unis, et en particulier l'État de Floride, ont été précurseurs sur le sujet. Depuis 2000, 15 ouragans de catégorie 1 à 5 ont traversé la Floride, avec notamment des années denses en 2004 (4 ouragans en 6 semaines) et en 2005 (ouragan Wilma, extrêmement puissant).

Les *utilities* de la Floride ont donc été amenées, parfois sous l'impulsion du régulateur, à revoir leurs pratiques, sous différents angles :

- Mise à niveau des infrastructures pour les rendre conformes au NESC (*National Electric Safety Code*, qui prescrit notamment les standards matériels en fonction de leur exposition potentielle aux ouragans) : remplacement des poteaux en bois par de l'acier ou béton, remplacement de pylônes problématiques;
- Réduction des temps de réalimentation : autoguérison/configuration du réseau, augmentation du maillage, relocalisation des sites difficiles d'accès;
- Renforcement de la résilience : renforcement et sécurisation des infrastructures face aux inondations, gestion du couvert végétal à risque, protection cathodique;
- Amélioration de la qualité de service et opérations routinières : cycles d'inspection des structures, gestion routinière du couvert végétal (élagage).

Depuis 2020, les *utilities* américaines soumettent tous les trois ans un *Storm Protection Plan* (plan de protection du réseau face aux tempêtes) qui couvre les standards de construction, les politiques, les pratiques et les procédures pour les 10 années suivantes.

Les mesures mises en œuvre montrent leur efficacité, comme l'illustrent les performances de Florida Power & Light : l'ouragan Wilma (catégorie 3, en 2005) avait coupé 3,2 millions de clients, pour une durée moyenne de 5,4 jours, avec plus de 12 000 poteaux endommagés et 241 postes électriques coupés. L'ouragan Irma (catégorie 4, en 2017, qui avait également frappé la Guadeloupe) avait endommagé 4 600 poteaux et coupé l'alimentation de 92 postes, engendrant 4,4 millions de clients coupés rétablis en moyenne en 2,3 jours!

Pour mettre en œuvre la nécessaire adaptation face au changement climatique, les gestionnaires de réseaux disposent donc de solutions pour améliorer leur résilience face au climat et gérer des flux d'énergie de nouvelle nature, plus variables et plus répartis : construire de nouveaux

ouvrages plus robustes face aux aléas et variations, mais aussi inclure plus d'intelligence et de manœuvrabilité dans le réseau existant, et améliorer les procédures d'exploitation. Les opérateurs de réseau doivent disposer des moyens humains et des capacités d'investissement nécessaires pour conduire ce changement, en ayant à cœur, en tant qu'opérateurs d'une mission de service public, d'optimiser l'équilibre entre dépense et risque géré.

7. Impact du changement climatique pour les clients, leur habitat et leurs usages

Enfin, bien que ne relevant pas directement du sujet de l'impact du changement climatique sur les infrastructures des systèmes électriques et de leur nécessaire adaptation, il nous est apparu pertinent d'aborder également la question de l'impact du changement climatique sur les clients, leur habitat et leurs usages. En effet, les clients sont des acteurs directs du fonctionnement de ces systèmes et le changement climatique va également nécessiter des adaptations de leur part. Par ailleurs, en cohérence avec sa raison d'être, «construire un avenir énergétique neutre en CO₂, conciliant préservation de la planète, bien-être et développement, grâce à l'électricité et à des solutions et services innovants», EDF étudie les impacts du changement climatique sur ses clients avec la volonté de les accompagner via des services adaptés.

La réglementation environnementale RE2020 s'applique au bâtiment neuf résidentiel depuis le 1^{er} janvier 2022. Cette réglementation présente une évolution importante sur le thème du confort d'été avec une nouvelle exigence : les «degrés heures» ou DH. Les DH quantifient la durée et l'intensité d'inconfort dues à des températures trop élevées à l'intérieur du bâtiment. Les DH indiquent le nombre d'heures, sur la période estivale, durant lesquelles on constate un écart entre la température intérieure et une température «confortable» de référence : 26 °C la nuit, entre 26 °C et 28 °C le jour. La RE2020 définit deux seuils en résidentiel : un seuil de 350 DH sous lequel le projet est conforme et le bâtiment

L'adaptation aux effets du changement climatique des infrastructures des systèmes électriques

confortable, et un seuil de 1250 DH au-dessus duquel le projet n'est plus conforme, le bâtiment présentant un inconfort inacceptable. Entre ces deux seuils, le bâtiment reste conforme mais on parle d'«inconfort tolérable» avec un ajout d'un forfait de consommation de refroidissement et des émissions de GES correspondantes.

Cet indicateur permet de sensibiliser l'ensemble des acteurs de la construction aux enjeux de maîtrise du confort d'été mais de nombreux travaux doivent permettre de le faire évoluer. EDF et le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) ont souhaité collaborer pour mieux appréhender cette question, également dans une vision prospective d'un climat projeté en 2050.

Lancé en 2021, le projet de recherche ICARE, pour «impact du changement climatique sur la rénovation et la conception du bâtiment», a pour objectif de caractériser le confort thermique à l'intérieur des bâtiments, en considérant la dimension prospective avec une fréquence des épisodes caniculaires plus importante. L'évaluation de l'impact du réchauffement climatique à l'échelle du parc se fera au regard d'autres indicateurs de confort d'été avec une préconisation de bouquets de solutions associant des équipements «passifs» et «actifs» pour les bâtiments neufs et existants.

À l'heure actuelle, le projet a permis de comparer deux indicateurs pour évaluer l'impact du réchauffement climatique sur le confort thermique ressenti : l'indicateur DH, qui offre l'avantage d'évaluer le confort selon un modèle adaptatif en différenciant le confort diurne et le confort nocturne, et l'indicateur PMV (*Predicted Mean Vote*) de Gagge issu d'un modèle analytique transitoire à deux nœuds. Ayant une description plus fine du fonctionnement métabolique des occupants, l'indicateur PMV permet de réaliser une étude prenant en compte les différences interindividuelles à travers un échantillon représentatif de la population française.

L'analyse de vulnérabilité du parc a révélé avec des simulations réalisées sur plus de 2500 logements collectifs existants en région parisienne, dans un climat projeté à 2050 à un niveau de

réchauffement élevé dans une situation caniculaire extrême, que les petits appartements, non traversants, situés au dernier étage des bâtiments présentaient un inconfort thermique très élevé, au-delà des seuils règlementaires. L'identification de solutions de conception et de rénovation visant à réduire les risques sur le confort et sur la santé apparaît donc essentielle.

Une dizaine de solutions passives et actives sont à l'étude : vitrage à contrôle solaire, revêtement peu émissif, protection fixe ou mobile, ventilation naturelle optimisée, brasseurs d'air, puits climatiques, rafraîchissement adiabatique indirect, pompes à chaleur aérothermiques (air-eau et air-air). Pour en évaluer précisément la performance, les modèles thermiques doivent être couplés à des modèles aérauliques. Des études menées en outre-mer ont montré que l'utilisation couplée de brasseurs d'air et de climatisation fixe (pompe à chaleur réversible) apporte des bénéfices importants en termes de confort avec une consommation énergétique limitée. Les travaux de modélisation en maison individuelle et logement collectif permettront de le vérifier dans les tout prochains mois.

Conclusion

Face aux impacts du changement climatique sur les systèmes électriques, EDF a engagé depuis plus de 30 ans une démarche proactive. Grâce aux activités de ses équipes de chercheurs, le groupe suit les résultats produits par la communauté scientifique internationale et s'appuie sur ces données reconnues pour évaluer les impacts sur les infrastructures du système électrique sur l'ensemble de leur durée de vie en prenant en compte les incertitudes inhérentes à ces projections. Ces études permettent aux exploitants des ouvrages d'adapter les infrastructures et ainsi d'accroître leur résilience en lien étroit avec leurs territoires d'implantation.

NOTES

1. Le projet Explore 2070 (2010-2012, piloté par la direction de l'eau et de la biodiversité du MEDDE) portait sur les stratégies d'adaptation au changement climatique à l'horizon 2070. Pour la production hydraulique, des estimations ont été menées en collaboration avec la communauté scientifique française dans le cadre de projets tels que GICC-Rhône (programme Gestion et Impact du Changement Climatique), IMAGINE 2030 (programme Risque Décision Territoire) sur la Garonne, RIWER 2030 pour la Durance et la Loire (ANR Vulnérabilité : Milieux, climats, société) ou R2D2 2050 (Gestion et Impact du Changement Climatique) sur la Durance.

2. <https://www.edf.fr/groupe-edf/agir-en-entreprise-responsable/responsabilite-societale-d-entreprise/biodiversite/act4nature-france-renforcer-connaissances>.

3. <https://www.colloque-thermie.fr/>.

4. <https://xflexhydro.net>.

RÉFÉRENCES

AIE, 2021. Hydropower Special Market Report, <https://www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report>.

ASN, 2023. Adaptation des centrales nucléaires d'EDF au changement climatique, Note d'information, <https://www.asn.fr/l-asn-informe/actualites/adaptation-des-centrales-nucleaires-d-edf-au-changement-climatique>.

Diamond Jacob S., Moatar Florentina, Cohen Matthew J., Poirel Alain, Martinet Cécile, Maire Anthony, Pinay Gilles, 2021. "Metabolic regime shifts and ecosystem state changes are decoupled in a large river", *Limnology and Oceanography*, <https://aslopubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/lno.11789>.

Floury Mathieu, Usseglio-Polatera Philippe, Ferreol Martial, Delattre Cecile, Souchon Yves, 2012. "Global climate change in large European rivers: long-term effects on macroinvertebrate communities and potential local confounding factors", *Global Change Biology*, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.12124>.

International Hydropower Association, 2019. Hydropower Sector Climate Resilience Guide, www.hydropower.org/publications/hydropower-sector-climate-resilience-guide.

Larroudé S., Massei N., Reyes-Marchant P., Delattre C., Humbert J.F., 2013. "Dramatic changes in a phytoplankton community in response to local and global pressures: a 24-year survey of the river Loire (France)", *Global Change Biology*, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.12139>.

Maire Anthony, Thierry Eva, Viechtbauer Wolfgang, Daufresne Martin, 2019. "Poleward shift in large-river fish communities detected with a novel meta-analysis framework", *Freshwater Biology*, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/fwb.13291>.

BIOGRAPHIES

Diplômée de l'École Nationale Supérieure de Techniques Avancées (ENSTA) et titulaire d'une habilitation à diriger des recherches, **SYLVIE PAREY** est ingénieur-chercheur sénior au département Optimisation, Simulations, Risques et Statistiques pour les marchés de l'énergie (OSIRIS) dans le groupe Météo, Climat et prévisions des EnR. Elle a effectué son parcours à la R&D d'EDF, en contribuant dès 1990 au premier projet consacré à l'étude du changement climatique. Après plusieurs expériences de pilotage de projets, elle a opté pour la filière expertise, et elle mène des travaux en lien notamment avec la caractérisation des extrêmes en contexte de changement climatique.

BRUNO CARLOTTI est délégué du programme Environnement de la R&D d'EDF qui regroupe les activités de recherche sur les interactions entre les moyens de production centralisés (nucléaire, hydraulique, thermique) et l'environnement. Il était auparavant directeur général de l'Institut Photovoltaïque d'Île-de-France (IPVF), qu'il a créé en collaboration avec EDF, Total, Air Liquide, le CNRS et l'École polytechnique. Il a tenu précédemment des rôles de management d'unités de R&D d'EDF sur l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables, la production décentralisée et la modélisation des systèmes. Diplômé de l'ENSEEIH et titulaire d'un DEA en physique et chimie de l'environnement, il a débuté son parcours professionnel à l'Université

L'adaptation aux effets du changement climatique des infrastructures des systèmes électriques

d'Herriot-Watt d'Edimbourg en collaboration avec ENGIE avant de rejoindre le groupe EDF en 1997.

Diplômé de l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielle de la ville de Paris (ESPCI) et titulaire d'un doctorat de chimie, **STÉPHANE GARDEY** est délégué Programme à EDF R&D depuis septembre 2021 ; responsable du programme de recherche pour le parc hydraulique d'EDF et pour les matériels électriques et mécaniques du parc nucléaire. Il a accompli l'essentiel de son parcours professionnel à l'ingénierie nucléaire, principalement dans des fonctions de management d'entités d'EDF et dans différents domaines d'activité (surveillance des fabrications, réalisation de grands chantiers sur les sites de production, management de grands projets, études environnementales).

ANTHONY MAIRE, 35 ans, diplômé d'AgroParis-Tech (2011) et titulaire d'un doctorat de l'Université de Toulouse en écologie (2014), occupe depuis 2015 un poste d'ingénieur-chercheur en hydroécologie au Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) de la R&D d'EDF. Ses activités de recherche s'intéressent aux conséquences de l'augmentation de la température de l'eau sur les écosystèmes fluviaux, estuariens et marins dans un contexte de changement climatique et d'échauffement additionnel par les rejets thermiques des centres nucléaires de production d'électricité.

DIDIER ROUSTAN, 53 ans, est directeur de programme à la R&D d'EDF. Il a en charge la définition et le suivi de l'activité d'environ 200 chercheurs sur le domaine « commerce et services ». Ces travaux appuient le pôle Clients Services et Territoires et adressent le champ des offres de fourniture et des solutions de décarbonation pour les clients particuliers, entreprises et collectivités. Il a rejoint la R&D d'EDF le 1^{er} octobre 2020 après avoir passé 5 ans chez Dalkia au poste de directeur Marketing de la région Île-de-France puis directeur de l'Innovation au siège.

NICOLAS VANDENBERGHE est directeur des programmes R&D Réseaux à EDF R&D. Ingénieur de formation, il a rejoint le groupe EDF en 2009 après une expérience de 10 ans en conseil en management, et a exercé des fonctions de management opérationnel dans différentes unités d'Enedis. Il pilote depuis 2021 les programmes Réseaux de EDF R&D, qui couvrent les activités de distribution et de transport d'électricité, ainsi que les infrastructures de raccordement des moyens de production.

Diplômé de l'École Centrale de Paris (1984), et titulaire d'un doctorat en énergétique (1987), **ETIENNE BRIÈRE** a rejoint la R&D d'EDF en 1987, où il a tenu différents postes techniques et managériaux dans les domaines de la mécanique des fluides, de la thermo-hydraulique, des écoulements diphasiques, des différents sources et vecteurs d'énergies (nucléaire, hydraulique, nouvelles EnR, thermique, hydrogène, e-fuels...), de l'environnement et sur les enjeux énergétiques. Depuis l'été 2022, il est directeur scientifique de EDF R&D.

À lire également dans *La Revue de l'Énergie*

- Le rapport du GIEC sur 1,5 °C : au fait, quelle est la question?, *Jean-Charles Hourcade (n° 640, septembre-octobre 2018)*
- Transition(s)2050 – Enseignements énergétiques pour la neutralité carbone, *Eric Vidalenc, David Marchal, Jean-Michel Parrouffé (n° 662, mai-juin 2022)*

À retrouver sur www.larevuedelenergie.com.